

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Διδακτορική Διατριβή

Φεβρουάριος 2008



Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ

για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος
Του Τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του
Πανεπιστημίου Αιγαίου

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Άγγελος Ρούσκας	Επίκουρος Καθηγητής του Πανεπιστημίου Αιγαίου, Επιβλέπων
Γεώργιος Ι. Στασινόπουλος	Καθηγητής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Δημήτριος Δ. Βέργαδος	Λέκτορας του Πανεπιστημίου Πειραιώς, Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Άγγελος Ρούσκας	Επίκουρος Καθηγητής του Πανεπιστημίου Αιγαίου, Επιβλέπων
Γεώργιος Ι. Στασινόπουλος	Καθηγητής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Βασίλειος Λούμος	Καθηγητής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Μέλος
Σωκράτης Κάτσικας	Καθηγητής του Πανεπιστημίου Πειραιώς, Μέλος
Δημήτριος Δ. Βέργαδος	Λέκτορας του Πανεπιστημίου Πειραιώς, Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Ηλίας Μαγκλογιάννης	Λέκτορας του Πανεπιστημίου Αιγαίου, Μέλος
Ιωάννης Αναγνωστόπουλος	Λέκτορας του Πανεπιστημίου Αιγαίου, Μέλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί το πολυτιμότερο αγαθό στα ασύρματα δίκτυα, λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας των φορητών συσκευών. Το πρόβλημα της ενέργειας γίνεται ακόμη εντονότερο στα ad hoc ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, εξαιτίας των περιορισμών που προκύπτουν από την ίδια τους τη φύση.

Τα διάφορα σχήματα αφύπνισης, τα οποία θέτουν εκτός λειτουργίας τους πομποδέκτες των αισθητήριων κόμβων, όταν δεν υπάρχει ανάγκη επικοινωνίας, συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, η στρατηγική που θα εφαρμοστεί για την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής μπορεί και αυτή να συμβάλλει ουσιαστικά στη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας με άμεσο και ουσιαστικό αντίκτυπο στην επέκταση του ορίου ζωής του δικτύου. Όμως, τα διάφορα σχήματα που έχουν κατά καιρούς προταθεί ασχολούνται ελάχιστα με τα εξής προβλήματα: πρώτον, με την ελαχιστοποίηση της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης κατά τη μετάδοση των πακέτων και την παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας, και δεύτερον, με τη στρατηγική που θα πρέπει να ακολουθηθεί για την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής. Η παρούσα διατριβή προτείνει τρία βασικά σχήματα για την επίλυση αυτών των δύο πολύ σπουδαίων προβλημάτων.

Το πρώτο σχήμα ασχολείται με τη μελέτη του χρονοπρογραμματισμού των διαστημάτων αφύπνισης που έχουν ως βάση το TDMA (Time-Division Multiple Access), και καταφέρνει να διατηρεί τις λεπτές ισορροπίες ανάμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης.

Το δεύτερο σχήμα έχει ως βάση τη στρατηγική που θα πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να εξευρεθεί η πλέον κατάλληλη διαδρομή η οποία θα διασφαλίζει τη μακροβιότητα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Προσπαθεί να αποφύγει τους κόμβους εκείνους που διαθέτουν ελάχιστα ενεργειακά αποθέματα, ενώ, ταυτόχρονα, προσπαθεί να διατηρήσει σε πολύ χαμηλό επίπεδο το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε μετάδοση δεδομένων.

Το τρίτο σχήμα βασίζεται στη στρατηγική του MBCR (Minimum Battery Cost Routing) και προσπαθεί να βελτιώσει το λειτουργικό κόστος της μπαταρίας με τη βοήθεια μιας εκθετικής συνάρτησης, συντελώντας στην αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Η αξιολόγηση της επίδοσης των τριών προταθέντων σχημάτων επιβεβαιώνει την πολύ καλή συμπεριφορά τους, σε σχέση με άλλα παρεμφερή σχήματα που μπορεί να συναντήσει κανείς στη διεθνή βιβλιογραφία.

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΝΤΑΖΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

2008

ABSTRACT

Energy saving is a valuable commodity for wireless networks due to the limited battery of the portable devices. The energy conservation problem becomes harder in ad hoc wireless sensor networks (WSNs) due to their limitations arising from their nature.

Wakeup schemes that turn off the sensors' transceiver whenever communication is not needed contribute considerably in energy saving. However, the various proposed schemes have only paid little attention to reducing the end-to-end packet delay while retaining the energy-saving capability, and, moreover, to apply the most appropriate route selection strategy that may have an impact on the network lifetime. The present thesis proposes three basic schemes to give solutions to these important problems.

Since a long delay can be harmful for either large or small WSNs, the first proposed scheme, is a TDMA (Time-Division Multiple Access)-based wakeup intervals scheduling scheme that helps to manage the balance between energy saving and end-to-end delay. It achieves the reduction of the end-to-end delay caused by the sleep mode operation while maximizing the energy savings.

The second scheme, proposed in this thesis, is a lifetime prolonging route selection strategy for WSNs. This scheme tries to avoid the least-energy nodes, while maintaining, at the same time, low energy consumption for each transmission.

The third scheme introduces a new metric which contributes to the optimization of the second proposed algorithm. It is based on the MBCR (Minimum Battery Cost Routing) strategy and tries to improve the battery cost function, and thus, increasing further the network lifetime.

Simulation results confirm the superiority of the proposed schemes in terms of node lifetime and network connectivity in comparison with some other relevant schemes.

NIKOLAOS A. PANTAZIS

Department of Information and Communication Systems Engineering

UNIVERSITY OF THE AEGEAN

2008

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ – ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ

Κατ' αρχήν, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Αιγαίου για τη δυνατότητα που μου προσέφερε ώστε να εκπονήσω την παρούσα Διδακτορική Διατριβή. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Αγγελο Ρούσκα, τον Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Γεώργιο Ι. Στασινόπουλο, τον Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Βασίλειο Λούμο, τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς κ. Σωκράτη Κάτσικα, τον Λέκτορα του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Ιωάννη Αναγνωστόπουλο, καθώς και τον Λέκτορα του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Ηλία Μαγκλογιάννη, για τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Από αυτή τη θέση θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του κ. Δημητρίου Δ. Βέργαδου για την άριστη και εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια, και ιδιαίτερα, τον Δημήτριο Ι. Βέργαδο, την Αγγελική Σγώρα, και τον Γιάννη Στεργίου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθειά μου ευγνωμοσύνη στον Λέκτορα του Πανεπιστημίου Πειραιώς κ. Δημήτριο Δ. Βέργαδο ο οποίος πίστεψε στις ικανότητές μου, ήταν πάντα δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια προσφέροντάς μου ουσιαστική βοήθεια, ενώ ταυτόχρονα με ενθάρρυνε ώστε να αντιπαρέρχομαι τις εκάστοτε παρουσιαζόμενες δυσκολίες.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αφιερώνεται στην οικογένειά μου και σε όσους συνέβαλαν, με τον ένα ή με τον άλλον τρόπο, στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Νικόλαος Α. Πανταζής

Φεβρουάριος 2008

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ – ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Γενικά	15
1.2 Συμπερασματικά	15
1.3 Οριοθέτηση της Διδακτορικής Διατριβής	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	21
2.1 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας	21
2.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Σχεδίαση των Δικτύων Αισθητήρων	22
2.2 Αισθητήριοι Κόμβοι	27
2.2.1 Δομή	29
2.2.2 Τύποι και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων	35
2.2.3 Σύγκριση Μεταξύ των Πλέον Κοινών Τύπων Αισθητήρων	41
2.3 Τεχνολογίες Ασύρματων Δικτύων	43
2.3.1 Ασύρματα Δίκτυα Ad Hoc	44
2.3.2 Πρωτόκολλο Ασύρματης Επικοινωνίας IEEE 802.11	44
2.3.3 Διαφορές Μεταξύ Ασύρματων Δικτύων Ad Hoc και Δικτύων Αισθητήρων	48
2.4 Ιδιαιτερότητες στη Σχεδίαση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	49
2.4.1 Μεγάλη Εξάρτηση των Κόμβων από την Κατανάλωση Ενέργειας	49
2.4.2 Μεγάλη Χωρική Πυκνότητα των Αισθητήρων	51
2.4.3 Ανοχή σε Σφάλματα	51
2.4.4 Μη Σταθερή Τοπολογία	52
2.5 Πιθανές Αιτίες Δυσλειτουργίας ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων	53
2.6 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	53
2.6.1 Ιατρικές Εφαρμογές	54
2.6.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές	54
2.6.3 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές	57
2.6.4 Λοιπές Εφαρμογές	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ	63
3.1 Εισαγωγή	63

3.2 Το Φυσικό Επίπεδο	64
3.2.1 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα	66
3.3 Το Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων	66
3.3.1 Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο Μετάδοσης	67
3.3.2 Έλεγχος Σφαλμάτων	69
3.4 Το Επίπεδο Δικτύου	70
3.4.1 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης	74
3.4.2 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα	102
3.5 Το Επίπεδο Μεταφοράς	103
3.5.1 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα	103
3.6 Το Επίπεδο Εφαρμογής	103
3.6.1 Πρωτόκολλο Διαχείρισης Αισθητήρων	104
3.6.2 Πρωτόκολλο Προσδιορισμού Έργου και Διαφήμισης Δεδομένων	104
3.6.3 Πρωτόκολλο Αναζήτησης και Διασποράς Δεδομένων	105
3.6.4 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	107
4.1 Γενική Εισαγωγή στον Έλεγχο και τη Διαχείριση της Ισχύος	107
4.2 Ταξινόμηση των Πρωτοκόλλων Ελέγχου Ισχύος	108
4.2.1 Παθητικοί Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος	109
4.2.2 Ενεργοί Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος	112
4.3 Σχήματα Παθητικών Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος	114
4.3.1 Σχήματα Φυσικού Επιπέδου	114
4.3.2 Σχήματα Fine-Grain (FG)	123
4.3.3 Σχήματα Coarse-Grain Κατανεμημένων Μηχανισμών Ελέγχου Ισχύος	124
4.3.4 Σχήματα Κορμού Coarse-Grain Μηχανισμών Ελέγχου Ισχύος	146
4.4 Σχήματα Ενεργών Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος	148
4.4.1 Σχήματα Επιπέδου MAC	148
4.4.2 Επίπεδο Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης με Ενημέρωση Ισχύος	171
4.4.3 Επίπεδο Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης για Μέγιστη Διάρκεια Ζωής	180
4.4.4 Σχήματα Επιπέδου Μεταφοράς	183
4.5 Ανακεφαλαίωση	185
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	187
5.1 Εισαγωγή	187
5.2 Σχετικές Αναφορές για το Πρώτο Σχήμα TDMA Scheduling	190
5.2.1 Μηχανισμοί Διατήρησης της Ισχύος στην Κατάσταση Ύπνου	190
5.2.2 Σχήματα Χρονοπρογραμματισμού TDMA για Απόδοση Ενέργειας σε WSNs	191
5.2.3 Χρονική Διάρκεια Απόκρισης των Μηχανισμών Εξοικονόμησης Ενέργειας	193

5.2.4 Ελαχιστοποίηση της End-to-End Delay σε Μηχανισμούς Διατήρησης Ισχύος.....	194
5.3 Σχετικές Αναφορές για το Δεύτερο Προτεινόμενο Σχήμα LCMMR	194
5.3.1 Τεχνικές Δρομολόγησης και Πρωτόκολλα σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	195
5.3.2 Τακτικές Επιλογής Ενεργειακά Αποδοτικών Διαδρομών	196
5.4 Σχετικές Αναφορές για το Τρίτο Σχήμα (MBCR2 και MREPSum2)	200
5.4.1 Πολιτικές Επιλογής Ενεργειακά Αποδοτικών Διαδρομών	203
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	207
6.1 Σχεδίαση και Μοντελοποίηση του Αλγόριθμου TDMA Scheduling.....	207
6.1.1 Βασικές Έννοιες	207
6.1.2 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος.....	208
6.1.3 Ένα Παράδειγμα.....	215
6.2 Σχεδίαση και Μοντελοποίηση του Αλγόριθμου LCMMR.....	218
6.2.1 Μοντέλο Δικτύου	218
6.3 Σχεδίαση και Μοντελοποίηση των Αλγορίθμων MBCR2 και MREPSum2.....	220
6.3.1 Μοντέλο Κατανάλωσης Ισχύος.....	220
6.3.2 Μοντέλο Παραγωγής Συνδέσεων.....	221
6.3.3 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης.....	221
6.3.4 Μετρικές Απόδοσης	222
6.3.5 Μοντέλο Τοπολογίας.....	223
6.3.6 Παράμετροι Μοντέλου	223
6.3.7 Περιορισμοί Μοντέλου	223
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	225
7.1 Αξιολόγηση της Επίδοσης του Αλγόριθμου TDMA Scheduling.....	225
7.1.1 Κατανάλωση Ισχύος των Πρωτοκόλλων Επιπέδου MAC	226
7.1.2 Χρονική Καθυστέρηση των Ενεργειακά Αποδοτικών Πρωτοκόλλων MAC.....	228
7.1.3 Ισχύς σε Συνάρτηση με τη Χρονική Καθυστέρηση	229
7.1.4 Η Επίδραση του Ρυθμού Άφιξης των Πακέτων	230
7.1.5 Η Επίδραση της Τοπολογίας	233
7.2 Αξιολόγηση της Επίδοσης του Αλγόριθμου LCMMER	239
7.3 Αξιολόγηση της Επίδοσης των Αλγορίθμων MBCR2 και MREPSum2.....	243
7.3.1 Λεπτομερής Περιγραφή της Επίδοσης μιας Απλής Τοπολογίας.....	243
7.3.2 Επιδόσεις Παρόμοιων Τοπολογιών	246
7.3.3 Η Επίδραση της Τοπολογίας του Δικτύου.....	247
7.3.4 Η Επίδραση της p -value	248
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	251
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	253
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	264

ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΟ ΕΡΓΟ	265
ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	267
ΑΓΓΛΟΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ	269

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Σύγκριση μεταξύ επιλεγμένων μικροελεγκτών (I).....	32
Πίνακας 2-2: Σύγκριση μεταξύ επιλεγμένων μικροελεγκτών (II).....	32
Πίνακας 2-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά πομποδεκτών.....	33
Πίνακας 2-4: Σύγκριση μεταξύ διαφόρων τύπων μπαταριών.....	35
Πίνακας 2-5: Τεχνικά χαρακτηριστικά των συνηθέστερων τύπων αισθητήριων κόμβων.....	42
Πίνακας 3-1: Σύγκριση μεταξύ ομοιόμορφης και ιεραρχικής δρομολόγησης.....	87
Πίνακας 3-2: Συγκριτική Παρουσίαση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	92
Πίνακας 3-3: Σύντομη περιγραφή των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στο επίπεδο δικτύου.....	102
Πίνακας 4-1: Διαφορές μεταξύ Fine-Grain και Coarse-Grain μηχανισμών ελέγχου Ισχύος.....	112
Πίνακας 4-2: Βασικές διαφορές μεταξύ των προσεγγίσεων Distributed και Backbone-based....	112
Πίνακας 4-3: Χρησιμοποιούμενες τεχνικές και μειονεκτήματα των PAR και MLR.....	113
Πίνακας 4-4: Κύρια χαρακτηριστικά μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος.....	114
Πίνακας 4-5: Χρήσιμες καταστάσεις ύπνου του αισθητήριου κόμβου.....	118
Πίνακας 4-6: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ διαφορετικών πρωτοκόλλων.....	124
Πίνακας 4-7: PASA: Ο αλγόριθμος 1.....	160
Πίνακας 4-8: Πίνακας ισχύος των γειτονικών κόμβων.....	163
Πίνακας 6-1: Πληροφορίες Συνδεσιμότητας για το υπό εξέταση Δίκτυο TDMA.....	216
Πίνακας 6-2: Το χρονοδιάγραμμα TDMA που προκύπτει από τη διαδικασία.....	216

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.....	22
Σχήμα 2-2: Αρχιτεκτονική κόμβου αισθητήρα	28
Σχήμα 2-3: Μετάδοση πακέτων με το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11	46
Σχήμα 3-1: Στοίβα πρωτοκόλλων σταθμού βάσης και αισθητήριων κόμβων.....	63
Σχήμα 3-2: Η αποδοτικότητα ισχύος των δρόμων (I)	71
Σχήμα 3-3: Η αποδοτικότητα ισχύος των δρόμων (II).....	73
Σχήμα 3-4: Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	75
Σχήμα 3-5: Πλάνο ερωτημάτων σε επικεφαλής κόμβο.....	79
Σχήμα 3-6: Ασύρματο δίκτυο με τέσσερις κόμβους	95
Σχήμα 3-7: Φάση I: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3.....	95
Σχήμα 3-8: Φάση II: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3	96
Σχήμα 3-9: Φάση III: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3	96
Σχήμα 3-10: Φάση IV: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3.....	97
Σχήμα 3-11: Φάση V: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3	98
Σχήμα 4-1: Μπλοκ διάγραμμα μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος	110
Σχήμα 4-2: Μπλοκ διάγραμμα ενός επεξεργαστή DVS.....	116
Σχήμα 4-3: Μεταβατικές καταστάσεις ισχύος και χρονικής καθυστέρησης.....	118
Σχήμα 4-4: Τοπολογία δικτύου δύο βημάτων με δύο πηγές και δύο αποδέκτες.....	126
Σχήμα 4-5: Μέση κατανάλωση ενέργειας των πομποδεκτών σε κάθε κόμβο πηγή.....	127
Σχήμα 4-6: End-to-end delay σε συνάρτηση με τη διατήρηση ισχύος.....	133
Σχήμα 4-7: End-to-end delay σε σχέση με τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων	134
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα ζωνών συχνοτήτων <i>busy tones</i> : BTr και BTr του DBTMA.....	150
Σχήμα 4-9: Σενάρια Εκπομπής: (a) χωρίς έλεγχο ισχύος, και (b) με έλεγχο ισχύος.....	151
Σχήμα 4-10: Χρήση καναλιού/ρυθμαπόδοση σε unclustered PCMA	155
Σχήμα 4-11: Χρήση καναλιού/ρυθμαπόδοση σε clustered PCMA	155
Σχήμα 4-12: Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 εισηγείται τη δέσμευση του καναλιού.....	157
Σχήμα 4-13: Σενάρια κατάληψης του καναλιού σε διαφορετικές τοπολογίες	158
Σχήμα 4-14: Διάγραμμα μεταβατικών καταστάσεων του αλγόριθμου PASA.....	161
Σχήμα 4-15: PASA: Τρόποι διακοπής της στέρισης πόρων.....	162
Σχήμα 4-16: Μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας για το πρωτόκολλο PCM	165
Σχήμα 4-17: Αύξηση συγκρούσεων από διαφορές στην ισχύ μετάδοσης.....	166
Σχήμα 4-18: Βασικό σχήμα μετάδοσης μηνυμάτων RTS και CTS.....	167
Σχήμα 4-19: Βασικό σχήμα εμφάνισης μειονεκτημάτων του βασικού πρωτοκόλλου.....	168
Σχήμα 4-20: Μεταβολή ισχύος κατά τη μετάδοση των RTS-CTS-DATA-ACK	169

Σχήμα 4-21: Κανονικοποιημένη απώλεια ενέργειας / % αναλογία των clusterheads	172
Σχήμα 4-22: Κατανάλωση ενέργειας/διάμετρος του δικτύου	173
Σχήμα 4-23: Χρήση καναλιού μεταξύ IEEE 802.11 και DTTPC.....	179
Σχήμα 4-24: Ρυθμαπόδοση μεταξύ IEEE 802.11 και DTTPC	179
Σχήμα 4-25: Χρονική καθυστέρηση μεταξύ IEEE 802.11 και DTTPC	179
Σχήμα 5-1: Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης flat-based.....	196
Σχήμα 5-2: LCMMER: Παράδειγμα επιλογής της καταλληλότερης διαδρομής.	199
Σχήμα 6-1: WakeUP βασιζόμενο στο TDMA.....	208
Σχήμα 6-2: Οι φάσεις του προτεινόμενου αλγόριθμου	209
Σχήμα 6-3: Η Αφύπνιση Μονοπατιού (Path WakeUP).....	214
Σχήμα 6-4: Το υπό εξέταση δίκτυο	215
Σχήμα 7-1: Αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση 10 βημάτων σε συνάρτηση με το T_f	229
Σχήμα 7-2: Αλγόριθμος TDMA: Καταναλισκόμενη ισχύς/χρονική καθυστέρηση.....	230
Σχήμα 7-3: Κατανάλωση ισχύος P σε συνάρτηση με το ρυθμό άφιξης των πακέτων	231
Σχήμα 7-4: Χρονική καθυστέρηση/ρυθμός άφιξης πακέτων με σταθερή ισχύ	232
Σχήμα 7-5: Κατανάλωση ισχύος/ρυθμός άφιξης πακέτων με τυχαία τοπολογία 1000 κόμβων ..	235
Σχήμα 7-6: Χρονική καθυστέρηση (α), και εξοικονόμηση ενέργειας (β), χωρίς κίνηση.....	235
Σχήμα 7-7: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) με 1000 κόμβους.....	236
Σχήμα 7-8: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) ($\lambda_o = 0.00001$)	237
Σχήμα 7-9: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) ($N \lambda_o = 0.005$)	238
Σχήμα 7-10: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) ($N \lambda_o = 0.05$).....	239
Σχήμα 7-11: Η τοπολογία του υπό μελέτη ασύρματου δικτύου αισθητήρων	240
Σχήμα 7-12: Αριθμός ζωντανών κόμβων/αριθμός προσπαθειών σύνδεσης	240
Σχήμα 7-13: Αριθμός ζωντανών κόμβων/αριθμός επιτυχημένων συνδέσεων	240
Σχήμα 7-14: Ποσοστό απωλειών δικτύου/αριθμός επιτυχημένων συνδέσεων	241
Σχήμα 7-15: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MTPR)/Αριθμός ζωντανών κόμβων.....	241
Σχήμα 7-16: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MTPR)/Συνδεσιμότητα δικτύου	242
Σχήμα 7-17: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MMBCR)/Αριθμός ζωντανών κόμβων.....	242
Σχήμα 7-18: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MMBCR/Συνδεσιμότητα δικτύου	243
Σχήμα 7-19: Συνδεσιμότητα δικτύου/Αριθμός επιτυχών συνδέσεων	244
Σχήμα 7-20: Μέσος αριθμός βημάτων (hops)/Αριθμός επιτυχών συνδέσεων	244
Σχήμα 7-21: Μέση διάρκεια ζωής και διαστήματα εμπιστοσύνης.....	246
Σχήμα 7-22: Μέση διάρκεια ζωής συνδεσιμότητας 0.5/διαφορετικός αριθμός κόμβων (I)	247
Σχήμα 7-23: Μέση διάρκεια ζωής συνδεσιμότητας 0.5/διαφορετικός αριθμός κόμβων (II)	247
Σχήμα 7-24: Διάρκεια ζωής με 0.5/διαφορετικές τιμές p -value, τοπολογία 500 κόμβων.....	248
Σχήμα 7-25: Μέση διάρκεια ζωής με 0.5/διαφορετικές τιμές p -value, 500 κόμβοι.....	249

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι πρόσφατες αλματώδεις εξελίξεις στο χώρο της μικροηλεκτρονικής επιστήμης, η οποία προ-σπαθεί όχι μόνο να μικρύνει τις διαστάσεις και το βάρος των διαφόρων μονάδων επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων, αλλά και να βελτιώσει παράλληλα τις δυνατότητες λειτουργίας τους, συνέβαλαν σημαντικά στην κατασκευή εντελώς νέων μονάδων ασύρματων αισθητήρων συ-μπαγούς μορφής και χαμηλής ισχύος.

Οι ασύρματοι αισθητήρες, οι οποίοι, για παράδειγμα, τοποθετούνται συχνά σε επικίνδυνους για την υγεία και δύσκολα προσπελάσιμους χώρους, έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης και μέτρησης των διαφόρων φυσικών μεγεθών, όπως, π.χ. θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτός, πίεσης, ήχου κτλ., καθώς επίσης και ανίχνευσης της παρουσίας ορισμένων αντικειμένων. Όλοι μαζί σχηματίζουν ένα δυναμικό δίκτυο δρομολόγησης δεδομένων, το οποίο έχει τη δυνατότητα να συνδέει τον κάθε κόμβο του δικτύου σε ασύρματα δίκτυα μεγαλύτερης ισχύος καθώς και σε μεγαλύτερες μονάδες επεξεργασίας των πληροφοριών που έχουν ληφθεί. Αυτά τα δίκτυα ονομάζονται *Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων* (WSNs – Wireless Sensor Networks).

Επειδή, οι ασύρματοι αισθητήρες λειτουργούν με μπαταρίες, που ως γνωστόν, τα ενεργειακά τους αποθέματα έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής, θα ήταν σχεδόν αδύνατη η διατήρησή τους σε συ-νεχώς ενεργό κατάσταση. Ως εκ τούτου, η βέλτιστη οργάνωση και διαχείριση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι ένα πάρα πολύ σοβαρό θέμα διότι αυτό θα πρέπει να επιτελεί την επι-θυμητή λειτουργία σε αποδεκτά επίπεδα ποιότητας, και να παρέχει αρκετή ενέργεια στους αισθη-τήρες ώστε να διατηρούνται στη ζωή καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής που έχουν αναλάβει να φέρουν εις πέρας.

Η δομή ενός WSN πρέπει να είναι τέτοια ώστε να παρέχει τη δυνατότητα της κατάλληλης επιλο-γής ενός περιορισμένου αριθμού αισθητήρων οι οποίοι αυτοί και μόνο θα βρίσκονται σε κατά-σταση επαγρύπνησης, δηλαδή, θα έχουν ανοικτό τον πομποδέκτη τους, και έτσι, με αυτόν τον τρόπο, θα αποφεύγεται η κατασπατάληση της ενέργειας των υπολοίπων αισθητήρων οι οποίοι δεν είναι απαραίτητο να εμπλέκονται σε αυτήν τη διαδικασία.

Όπως και σε άλλα παρόμοια δίκτυα επικοινωνίας, η *επεκτασιμότητα* αποτελεί και αυτή μία από τις σημαντικότερες μετρικές στην ποιοτική σχεδίαση των WSNs.

Η διαχείριση του εκάστοτε δικτύου αισθητήρων πρέπει να λαμβάνει υπόψη της την ενέργεια που καταναλώνεται σε αυτό, να εξασφαλίζει ένα επιθυμητό επίπεδο απόδοσης κατά τη μετάδοση των δεδομένων, ενώ, παράλληλα, να διασφαλίζει τη μακροβιότητά του.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η εξοικονόμηση ενέργειας πρέπει να αποτελεί πάντοτε τη βασική προ-τεραιότητα των διαφόρων ερευνητών οι οποίοι ασχολούνται με τη σχεδίαση πρωτοκόλλων για χρήση σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η παρούσα διατριβή ασχολείται με το εν λόγω σοβαρό πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας σε WSNs προτείνοντας τρία καινοτόμα σχήματα τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

1.2 Συμπερασματικά

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν ήδη αρχίσει να εξαπλώνονται με γοργούς ρυθμούς και, όπως προκύπτει από τη μέχρι τώρα εξέλιξή τους, τείνουν να λάβουν μελλοντικά τεράστιες δια-

στάσεις διότι μας διευκολύνουν αφάνταστα ώστε να επεκτείνουμε τις ικανότητές μας στην εποπτεία και τον έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος από μεγάλες αποστάσεις.

Τέτοιου είδους δίκτυα μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση των λαμβανομένων πληροφοριών μέσα από τη συνεργασία μεταξύ των αισθητήρων (ή αισθητήριων κόμβων) και της online επεξεργασίας των πληροφοριών από αυτούς.

Ως εκ τούτου, μελλοντικά, ένα ευρύ σύνολο από αισθητήρες θα σχηματίζει ad hoc δίκτυα επεξεργασίας πληροφοριών, τα οποία θα είναι σε θέση να παράγουν υψηλής ποιότητας και εύκολα προσβάσιμες πληροφορίες για το φυσικό περιβάλλον. Ο κάθε αισθητήρας θα λειτουργεί αυτόνομα, δηλαδή, χωρίς να εξαρτάται από κάποιο κέντρο ελέγχου στο δίκτυο, και οι αποφάσεις του θα βασίζονται:

- στην αποστολή που του έχει ανατεθεί,
- στις πληροφορίες που διαθέτει, καθώς και
- στη γνώση που έχει για θέματα που αφορούν:
 - ο τη δυνατότητα εκτέλεσης πράξεων και υπολογισμών,
 - ο τη δυνατότητα επικοινωνίας με τους υπόλοιπους κόμβους στο δίκτυο και
 - ο για τα αποθέματα ενέργειας που του έχουν απομείνει.

Οι μελλοντικοί δικτυωμένοι αισθητήρες, είναι βέβαιο, από τη μέχρι στιγμής έρευνα που επιτελείται σε αυτό το χώρο, ότι θα έχουν πιο στιβαρή κατασκευή, θα είναι πιο έξυπνοι και θα λειτουργούν με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Είναι λοιπόν γεγονός ότι οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από διάφορους ενεργειακούς και υπολογιστικούς περιορισμούς, που οφείλονται στο φθινό τους κόστος και στην ad hoc μέθοδο ανάπτυξής τους στο χώρο. Μεγάλη έρευνα διεξάγεται ήδη ώστε να ξεπεραστούν οι δυσκολίες, που ανεφέρθησαν παραπάνω, με την επινόηση και χρήση σχημάτων που καταναλώνουν χαμηλή ενέργεια.

1.3 Οριοθέτηση της Διδακτορικής Διατριβής

Σε αυτήν τη διδακτορική διατριβή προτείνονται τρία βασικά σχήματα για τον έλεγχο της ισχύος και την απόδοση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων:

Το πρώτο από τα τρία σχήματα αναφέρεται στον χρονοπρογραμματισμό TDMA, προτείνοντας ένα σχήμα ύπνου/αφύπνισης των αισθητήρων.

Το δεύτερο σχήμα αναφέρεται κυρίως στη στρατηγική που πρέπει να εφαρμοσθεί για την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής, προκειμένου να διασφαλισθεί η μετάδοση των δεδομένων, από τον πηγαίο κόμβο προς τον προορισμό, με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, προτείνοντας το LCMMER (Low Cost Min-Max Energy Routing).

Το τρίτο σχήμα προτείνει δύο βασικούς αλγόριθμους: τον MBCR2 (Minimum Battery Cost Routing algorithm – αλγόριθμος δρομολόγησης με το ελάχιστο κόστος μπαταρίας) και τον MREPSum2 (Sum Maximum Residual Energy Path – μονοπάτι με τη μεγαλύτερη παραμένουσα ενέργεια). Και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι εισάγουν δύο καινούργιες μετρικές οι οποίες συμβάλλουν στη βελτίωση του LCMMER, του δεύτερου προτεινόμενου σχήματος. Βασίζονται στις στρατηγικές MBCR και MREPSum, αντίστοιχα, και προσπαθούν να διαχειριστούν με ποιο αποδοτικό τρόπο τα ενεργειακά αποθέματα της μπαταρίας των κόμβων συντελώντας έτσι στην αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

- *To Πρώτο Προτεινόμενο Σχήμα: “Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks using Sleep Mode TDMA Scheduling” [1]*

Το πρώτο από τα τρία σχήματα που προτείνονται σε αυτήν τη διατριβή είναι ένα σχήμα ύπνου/-αφύπνισης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το οποίο διασφαλίζει ότι κάθε ένας από τους κόμβους έχει τη δυνατότητα να μεταδίδει πληροφορίες προς το σταθμό βάσης το ταχύτερο δυνατό, και ότι οι κόμβοι μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από το συγχρονισμό των χρόνων αφύπνισης όλων των κόμβων του δικτύου. Συνεπώς, η βασική ιδέα αυτού του σχήματος είναι να καταβληθεί προσπάθεια ώστε να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος παραμονής του κάθε κόμβου στην κατάσταση ΥΠΝΟΥ, και να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παραμονής του στην κατάσταση ΑΝΑΜΟΝΗΣ, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την ισχύ που καταναλώνεται, αλλά και την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση.

Τα διάφορα σχήματα αφύπνισης, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να θέτουν εκτός λειτουργίας τον πομποδέκτη τους, εφόσον δεν υφίσταται λόγος επικοινωνίας, συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Όμως, τα διάφορα σχήματα που έχουν ήδη προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν ασχοληθεί ελάχιστα με τα θέματα εκείνα που σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης κατά την μετάδοση των πακέτων, και την ταυτόχρονη διατήρηση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Επειδή, μία πολύ μεγάλη χρονική καθυστέρηση μπορεί να αποβεί επιζήμια, είτε σε μεγάλα είτε σε μικρά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αυτή η διατριβή προτείνει ένα σχήμα χρονοπρογραμματισμού TDMA, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στα ενδιάμεσα διαστήματα αφύπνισης, και επιτυγχάνει την κρίσιμη εξισορρόπηση μεταξύ της εξοικονομούμενης ενέργειας και της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης.

Αναλυτικότερα, αυτό το σχήμα καταφέρνει να μειώσει κατά πολύ την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, η οποία προκαλείται κατά τη λειτουργία μετάβασης του κόμβου από την κατάσταση ύπνου στην κατάσταση αφύπνισης και αντιστρόφως, ενώ παράλληλα καταφέρνει να εξοικονομεί μεγάλα ποσά ενέργειας. Αυτό είναι εφικτό με τον κατάλληλο χρονοπρογραμματισμό των διαστημάτων αφύπνισης, ώστε να επιτρέπεται στα πακέτα δεδομένων να καθυστερούν μόνο για ένα διάστημα ύπνου κατά την από άκρο-σε-άκρο μετάδοσή τους, από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης (ή πύλη).

- *To Δεύτερο Προτεινόμενο Σχήμα: “Enhanced Route Selection for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks” [2]*

Το δεύτερο από τα τρία προτεινόμενα σχήματα παρουσιάζει μία στρατηγική, η οποία εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, σκοπός της οποίας είναι να επιλέγει εκείνη τη διαδρομή η οποία έχει τη μεγαλύτερη εναπομείνουσα διάρκεια ζωής.

Το προτεινόμενο σχήμα LCMMER προσπαθεί να αποφύγει όλους τους κόμβους οι οποίοι διαθέτουν χαμηλά αποθέματα ενέργειας, ενώ παράλληλα επιδιώκει να διατηρεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα την ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε μετάδοση πακέτων.

Τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων κατά την προσομοίωση του συστήματος, επιβεβαιώνουν την ανωτερότητα της προτεινόμενης στρατηγικής, σε ότι αφορά τη διάρκεια ζωής των κόμβων και τη συνδεσιμότητα του δικτύου, συγκρινόμενη με άλλες παρεμφερείς στρατηγικές επιλογής της πλέον κατάλληλης διαδρομής, που έχουν ως βάση τους αλγόριθμους MTPR (The Minimum Total Transmission Power Routing algorithm – Αλγόριθμος Δρομολόγησης με την Ελάχιστη Ολική Ισχύ Μετάδοσης) και MMBCR (The Min-Max Battery Cost Routing algorithm – Αλγόριθμος Δρομολόγησης με το Ελάχιστο-Μέγιστο Κόστος Μπαταρίας).

- *To Τρίτο Προτεινόμενο Σχήμα: “Energy-Efficient Route Selection Strategies for Wireless Sensor Networks ” [3]*

Το τρίτο σχήμα, όπως ακριβώς και το δεύτερο σχήμα, αναφέρεται επίσης στην εξεύρεση της καλύτερης στρατηγικής, η οποία θα μπορεί να επιλέγει την καταλληλότερη διαδρομή, ώστε να παρατείνεται η διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, προτείνοντας δύο βασικούς αλγορίθμους: τον MBCR2 και τον MREPSum2. Η καινοτομία που εισάγει αυτό το σχήμα είναι ότι προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου μέσα από τον ορισμό δύο εκθετικών συναρτήσεων. Αυτές οι συναρτήσεις φέρνουν μία ισορροπία ανάμεσα στην ανάγκη για διατήρηση (και όχι κατασπατάληση) της ενέργειας στους συχνότερα χρησιμοποιούμενους αισθητήριους κόμβους, και στην ανάγκη για διατήρηση της ενέργειας, που καταναλώνεται σε κάθε μία διαδρομή, σε χαμηλά επίπεδα, προσδιορίζοντας κάθε φορά τον καλύτερο (ή καταλληλότερο) εκθέτη.

Καθώς οι ασύρματοι αισθητήρες χάνουν σταδιακά την ενέργειά τους, το δίκτυο καθίσταται όλο και λιγότερο πυκνό, με τελική κατάληξη το διαμελισμό του. Η συνδεσιμότητα του δικτύου προσδιορίζεται, κατά μέσον όρο, από την επί τοις εκατό ποσοστιαία αναλογία των κόμβων στους οποίους μπορεί να έχει πρόσβαση ο κάθε κόμβος μέσα από μία διαδρομή πολλαπλών βημάτων (multi-hop route). Ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να προσδιοριστεί από τον αριθμό των συνδέσεων που μπορούν να δρομολογηθούν επιτυχώς μέσα από το δίκτυο, μέχρις ότου η συνδεσιμότητα φθάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή.

Για την υλοποίηση των δύο ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων επιλογής της καταλληλότερης διαδρομής, MBCR2 και MREPSum2, χρησιμοποιήθηκε ένας προσομοιωτής διακριτών τιμών (discrete-event simulator) ο οποίος βασίστηκε στη γλώσσα java. Επιπλέον, η απόδοση αυτών των αλγορίθμων έχει μελετηθεί εκτενώς μέσα από συνεχείς προσομοιώσεις σε τυχαία παραγόμενες τοπολογίες δικτύων. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι έχουν επιτύχει να επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου για διαφορετικά επίπεδα συνδεσιμότητας, και για διαφορετικούς τύπους τοπολογιών. Επίσης, έχουν προσδιορισθεί οι πλέον κατάλληλες τιμές των παραμέτρων μέσα από ένα μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων διαφορετικών τοπολογιών.

Το υπόλοιπο μέρος της διδακτορικής διατριβής έχει ως εξής:

Το *Δεύτερο Κεφάλαιο* ασχολείται με τα *Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων*, και αναφέρεται κυρίως στα εξής βασικά θέματα:

- στην *Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας*, και ιδιαίτερα στους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπως είναι π.χ. η τοπολογία του δικτύου, η ανοχή σε σφάλματα, η επεκτασιμότητα, το κόστος λειτουργίας, το περιβάλλον λειτουργίας, τα μέσα ασύρματης επικοινωνίας και ο έλεγχος ισχύος.
- στους *Αισθητήριους Κόμβους*, και κυρίως στη δομή τους, όπως είναι π.χ. οι μονάδες ανίχνευσης, οι μονάδες επεξεργασίας δεδομένων, οι μονάδες επικοινωνίας, οι μονάδες τροφοδοσίας και λοιπές μονάδες, στους τύπους και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήριων κόμβων, όπως είναι π.χ. ο iMote, ο MICA, κτλ.
- στις *Διάφορες Τεχνολογίες των Ασύρματων Δικτύων*, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα Ad hoc, το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11, κτλ.
- στις *Ιδιαιτερότητες* που παρουσιάζονται κατά τη σχεδίαση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπως είναι π.χ. η ανοχή σε σφάλματα, η χωρική πυκνότητα, η μη σταθερή τοπολογία κτλ.
- στις *Πιθανές Αιτίες Δυσλειτουργίας* των δικτύων αισθητήρων, και τέλος

- στις *Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων*, όπως π.χ. ιατρικές, στρατιωτικές, περιβαλλοντικές, και άλλες.

Το *Τρίτο Κεφάλαιο* ασχολείται με τη *Στοιβα Πρωτοκόλλων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων*, και αναφέρεται κυρίως στα εξής επίπεδα:

- *Φυσικό Επίπεδο*,
- *Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων*, και ιδιαίτερα στον έλεγχο πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης, καθώς και στον έλεγχο σφαλμάτων,
- *Επίπεδο Δικτύου*, κάνοντας μία εκτενή παρουσίαση των διαφόρων πρωτοκόλλων δρομολόγησης τα οποία έχουν ως βάση τη δομή ή τη λειτουργία του δικτύου,
- *Επίπεδο Μεταφοράς*, και
- *Επίπεδο Εφαρμογής*

Το *Τέταρτο Κεφάλαιο* ασχολείται με τους μηχανισμούς ελέγχου και διατήρησης της ισχύος σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και αναφέρεται κυρίως στα εξής βασικά θέματα:

- στην *Ταξινόμηση των Πρωτοκόλλων Ελέγχου Ισχύος*, σε παθητικούς και ενεργούς μηχανισμούς ελέγχου και διατήρησης της ισχύος.
- στα *Σχήματα Παθητικών Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος*, και
- στα *Σχήματα Ενεργών Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος*.

Το *Πέμπτο Κεφάλαιο*, αναφέρεται στην περιγραφή των προτεινόμενων σχημάτων, ήτοι, του TDMA Scheduling, του LCMMER, του MBCR2 και του MREPSum2 για τον έλεγχο ισχύος και την εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παρουσιάζοντας αρκετές σχετικές αναφορές.

Το *Έκτο Κεφάλαιο*, αναφέρεται στη Σχεδίαση και Μοντελοποίηση των προτεινόμενων σχημάτων.

Το *Έβδομο Κεφάλαιο*, αναφέρεται στην Αξιολόγηση και Επίδοση των προτεινόμενων σχημάτων.

Το *Όγδοο Κεφάλαιο*, αναφέρεται στα Συμπεράσματα. Στο ίδιο κεφάλαιο υπάρχει επίσης ένας κατάλογος με όλες τις αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγγραφή της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, ένα σύντομο βιογραφικό σημείωμα και ένας κατάλογος δημοσιεύσεων του υποψήφιου διδάκτορα και συγγραφέα αυτής της διατριβής.

Στο τέλος αυτής της διατριβής θεώρησα σκόπιμο να παραθέσω ένα Αγγλοελληνικό Λεξιλόγιο το οποίο περιλαμβάνει τους πλέον εύχρηστους τεχνικούς όρους που απαντώνται στη βιβλιογραφία τη σχετική με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αλλά και των δικτύων υπολογιστών γενικότερα.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η συμπεριφορά καθώς και η αποτελεσματικότητα των τριών προταθέντων σχημάτων, έχει αξιολογηθεί με βάση τη σχεδίαση τριών μοντέλων των οποίων η λειτουργία προσομοιώνεται στον υπολογιστή σε γλώσσα java.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται συχνά από ένα σύνολο αισθητήρων μικρού μεγέθους και χαμηλού κόστους, οι οποίοι συλλέγουν και μεταδίδουν διάφορα κρίσιμα δεδομένα τα οποία ανιχνεύουν στο φυσικό τους περιβάλλον.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Διευκολύνουν την παρατήρηση και τον έλεγχο του φυσικού περιβάλλοντος από απόσταση με μεγάλη ακρίβεια, και, ως εκ τούτου, αναπτύσσονται συνήθως σε απομακρυσμένους και όχι εύκολα προσπελάσιμους χώρους, όπου η αντικατάσταση της μπαταρίας του κάθε αισθητήρα δεν είναι μία απλή υπόθεση. Συνεπώς, η σχεδίαση δικτύων αισθητήρων, που να αντέχουν σε σφάλματα και να έχουν μακρά διάρκεια ζωής, αποτελεί μία πρόκληση.
- Προσδιορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή, και κατά συνέπεια πρέπει να περιλαμβάνουν το κατάλληλο υλικό (hardware) αλλά και λογισμικό (software) μέρος.
- Χρησιμοποιούν πρωτόκολλα τα οποία σχετίζονται άμεσα όχι μόνο με το είδος της εφαρμογής αλλά και με το εκάστοτε ασύρματο δίκτυο.
- Καταναλώνουν ενέργεια υποστηρίζοντας εφαρμογές πολυμέσων, π.χ. PDAs (Personal Digital Assistants), υπολογιστών δικτύων, και κινητών συσκευών επικοινωνίας.
- Βελτιώνουν την ακρίβεια του τεράστιου όγκου πληροφοριών (όπως, π.χ., δεδομένα σεισμικής διέγερσης, ηχητικά ή ακουστικά δεδομένα, εικόνες υψηλής ευκρίνειας, κτλ.) που λαμβάνουν από το φυσικό τους περιβάλλον μέσα από την καταναλωμένη επεξεργασία.
- Μπορούν να βελτιώνουν την πρόσβαση σε δεδομένα αισθητήρων που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση, παρέχοντας ενδιάμεσους σταθμούς βάσης (sink nodes) οι οποίοι τους συνδέουν με άλλα δίκτυα, όπως, για παράδειγμα, με το Internet, χρησιμοποιώντας ασύρματες ζεύξεις ευρείας ζώνης. Εάν λοιπόν οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα α) να διαχειρίζονται από κοινού τις όποιες πληροφορίες που λαμβάνουν από το φυσικό τους περιβάλλον τους και β) να τις επεξεργάζονται, ώστε να φθάνουν στους σταθμούς βάσης μόνο όσες από αυτές είναι χρήσιμες, τότε το έργο των χρηστών καθίσταται ευκολότερο διότι μέσα από αυτές μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν το περιβάλλον από μεγάλες αποστάσεις.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

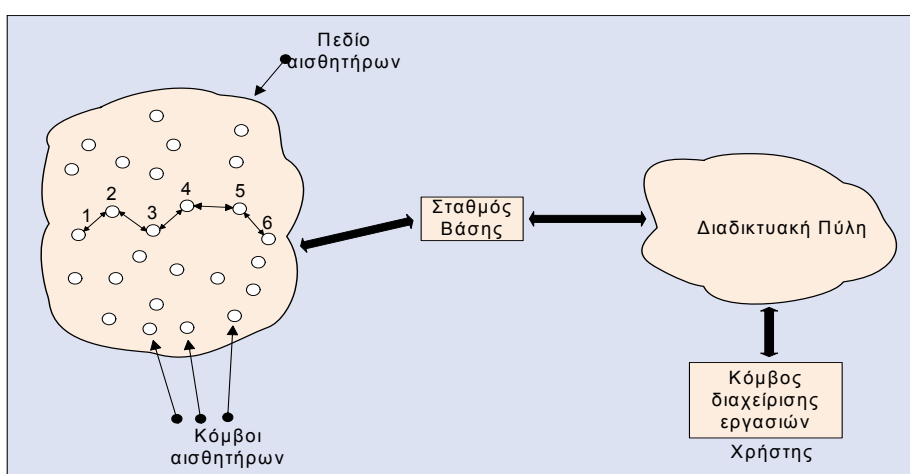
- για την παρακολούθηση των διακυμάνσεων του κλίματος από απόσταση και την περισυλλογή μετεωρολογικών μεταβλητών, όπως είναι π.χ. η θερμοκρασία, η πίεση, και η υγρασία. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη ή την ανίχνευση φυσικών φαινομένων.
- για την επιλεκτική χαρτογράφηση των περιοχών που έχουν πληγεί από φωτιά, ώστε, άμεσα και με μεγάλη ακρίβεια, να κατευθύνουν προς το μέρος της τα πλησίον ευρισκόμενα μέσα πυρόσβεσης.
- σε αποστολές εποπτείας του πεδίου μάχης, προκειμένου να εντοπίσουν π.χ. κινούμενους στόχους ή ακόμη και την παρουσία χημικών αερίων, όσον αφορά το χώρο των στρατιωτικών εφαρμογών.

Τα τελευταία χρόνια, η σχεδίαση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει αποκτήσει τεράστια σημασία λόγω του συνεχώς αυξανόμενου αριθμού των εμπορικών αλλά και των στρατιωτικών εφαρμογών.

Οι αισθητήρες βρίσκονται συνήθως διασκορπισμένοι σε ένα χώρο ο οποίος ονομάζεται *Πεδίο Αισθητήρων* (sensor field).

Καθένας από αυτούς τους αισθητήρες (ή κόμβους) έχει την ικανότητα να συλλέγει δεδομένα και στη συνέχεια να τα δρομολογεί προς το *Σταθμό Βάσης* (sink) μέσω μιας διαδρομής πολλαπλών βημάτων (multi-hop) (Σχήμα 2-1). Ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με τον *Κόμβο Διαχείρισης Εργασιών* (Task manager node) μέσω του Διαδικτύου (Internet) ή μέσω δορυφόρου [4,5].

Η σχεδίαση και η αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, όπως είναι αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-1, εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά στην αμέσως επόμενη ενότητα.



Σχήμα 2-1: Αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

2.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν τη Σχεδίαση των Δικτύων Αισθητήρων

Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς σε πολλές μελέτες που έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές. Πρέπει να σημειώσουμε ότι καμία από αυτές τις μελέτες δεν έχει να παρουσιάσει έναν πλήρη κατάλογο όλων αυτών των παραγόντων. Όμως, αυτοί οι παράγοντες είναι πολύ σημαντικοί για τη σωστή μελέτη και σχεδίαση ενός πρωτοκόλλου ή ενός αλγόριθμου και θα πρέπει να λαμβάνονται πάντοτε σοβαρά υπόψη [4,5]. Στη συνέχεια αναφέρουμε μερικούς από αυτούς.

2.1.1.1 Τοπολογία του Δικτύου Αισθητήρων

Ένας πολύ μεγάλος αριθμός αισθητήρων, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως και μερικές χιλιάδες, μπορεί να αναπτυχθεί σε μία περιοχή, όπου μας ενδιαφέρει η παρακολούθηση κάποιων φαινομένων, και η οποία ονομάζεται *Πεδίο Αισθητήρων*. Η απόσταση μεταξύ τους συνήθως δεν υπερβαίνει τα λίγα μέτρα [6]. Η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και να προσεγγίζει τους 20 κόμβους/m³ [7]. Η ανάπτυξη ενός τόσο σημαντικού αριθμού αισθητήρων σε τόσο πολύ μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, πυκνό δίκτυο, απαιτεί μία πάρα πολύ προσεκτική διαχείριση για τη διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου.

Τα θέματα που σχετίζονται άμεσα με τη διατήρηση αλλά και με την αλλαγή της τοπολογίας του ασύρματου δικτύου αισθητήρων διακρίνονται σε τρεις φάσεις:

- *Φάση Ανάπτυξης των Κόμβων*: Οι κόμβοι (αισθητήρες) μπορούν είτε να τοποθετηθούν τυχαία σε μεγάλες ποσότητες στην υπό έλεγχο περιοχή (π.χ. ρίψη από αεροπλάνο), είτε να τοποθετηθούν ένας-ένας σε προκαθορισμένα σημεία (π.χ. με ανθρώπινη παρέμβαση ή από εξειδικευμένα ρομπότ).
- *Φάση Μετά την Ανάπτυξη των Κόμβων*: Μετά την ανάπτυξη των κόμβων στο πεδίο αισθητήρων, οι οποιοσδήποτε μεταβολές που μπορεί να εμφανιστούν στην τοπολογία του δικτύου πιθανόν να οφείλονται:
 - είτε σε αλλαγές της αρχικής θέσης των κόμβων (π.χ. κόμβοι οι οποίοι διαθέτουν σύστημα κίνησης – ρομπότ, ή κόμβοι οι οποίοι παρασύρονται από το φύσημα του αέρα) [6],
 - είτε στα ποσά ενέργειας που διαθέτουν,
 - είτε στη διακοπή λειτουργίας ορισμένων κόμβων,
 - είτε στις εργασίες που τους έχουν ανατεθεί.
- *Φάση Ανάπτυξης Νέων Πρόσθετων Κόμβων*: Πρόσθετοι κόμβοι μπορούν να αναπτυχθούν στο δίκτυο οποιαδήποτε χρονική στιγμή, προκειμένου, να αντικαταστήσουν ένα αριθμό κόμβων των οποίων η λειτουργία έχει διακοπεί εξ' αιτίας κάποιας βλάβης, ή διότι άλλαξε η δυναμική του εκτελούμενου έργου.

2.1.1.2 Ανοχή σε Σφάλματα

Μερικοί κόμβοι είναι πάρα πολύ πιθανό να παύσουν να λειτουργούν για διαφόρους λόγους,

- είτε διότι εξαντλήθηκαν τα υπόλοιπα διαθέσιμα ποσά ενέργειάς τους,
- είτε λόγω φυσικής τους φθοράς ή καταστροφής,
- είτε λόγω παρεμβολών από το γειτονικό τους περιβάλλον.

Σε καμία όμως περίπτωση δεν θα πρέπει να επηρεαστεί η απρόσκοπτη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου εξ' αιτίας της αδυναμίας λειτουργίας ορισμένων κόμβων. Αυτό αποτελεί εξ' άλλου και το βασικό θέμα αξιοπιστίας ή ανοχής σε σφάλματα του δικτύου. Στο σημείο αυτό θα μπορούσε να δοθεί και ο εξής ορισμός: “*Ανοχή σε Σφάλματα είναι η ικανότητα που διαθέτει ένα δίκτυο αισθητήρων να διατηρεί τη λειτουργικότητά του χωρίς διακοπές παρά τις οποιοσδήποτε αδυναμίες λειτουργίας των κόμβων που το συγκροτούν*” [10,11].

2.1.1.3 Επεκτασιμότητα

Ο αριθμός των κόμβων, που θα αναπτυχθούν σε ένα πεδίο αισθητήρων για τη μελέτη ενός φαινομένου, μπορεί να είναι της τάξης των μερικών δεκάδων ή και μερικών χιλιάδων ακόμη, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Φυσικό είναι, ένας τόσο μεγάλος αριθμός κόμβων να απαιτεί ένα καινούργιο πλαίσιο εργασίας το οποίο θα λαμβάνει πολύ σοβαρά υπόψη αυτόν τον τεράστιο αριθμό των συνεργαζόμενων κόμβων.

Η πυκνότητα μ του δικτύου μπορεί να υπολογιστεί, σύμφωνα με το [12] ως:

$$\mu(R) = (N \cdot \pi R^2) / A \quad (2.1)$$

Όπου: N είναι ο αριθμός των διασκορπισμένων αισθητήριων κόμβων σε μία περιοχή A , και R είναι η εμβέλεια εκπομπής των δεδομένων. Βασικά, το $\mu(R)$ προσδιορίζει τον αριθμό των κόμβων εντός της εμβέλειας εκπομπής του κάθε κόμβου στην περιοχή A .

2.1.1.4 Κόστος Παραγωγής

Επειδή τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα σημαντικό αριθμό κόμβων, θα πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη το κόστος παραγωγής τους διότι αυτό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το συνολικό κόστος εγκατάστασης ενός δικτύου. Στην περίπτωση όπου το κόστος της εγκατάστασης ενός δικτύου αισθητήρων υπερβεί κατά πολύ το κόστος των ήδη υπάρχουσών συμβατικών τεχνολογιών, τότε είναι εύλογο να μην προτιμηθεί. Γι' αυτό λοιπόν το λόγο θα πρέπει το κόστος του κάθε κόμβου χωριστά να διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα προκειμένου να είναι συμφέρουσα η επιλογή του.

2.1.1.5 Περιβάλλον Λειτουργίας

Οι αισθητήρες αναπτύσσονται συνήθως σε πυκνή μορφή, είτε πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο, είτε απευθείας μέσα στο ίδιο το υπό παρακολούθηση φαινόμενο. Τα δίκτυα, τα οποία αυτοί συγκροτούν, λειτουργούν συνήθως σε απομακρυσμένες και δύσκολα προσβάσιμες γεωγραφικές περιοχές χωρίς την υποστήριξη του ανθρώπινου παράγοντα. Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αναπτυχθούν και να λειτουργούν ενδεικτικά:

- είτε σε μία χημικά ή βιολογικά μολυσμένη περιοχή,
- είτε στα βάθη των ωκεανών,
- είτε στο πεδίο της μάχης πίσω από τις εχθρικές γραμμές,
- είτε στο εσωτερικό μιας μεγάλης μηχανής,
- είτε σε μία κατοικία ,
- είτε τέλος σε ένα μεγάλο κτήριο.

2.1.1.6 Κατανάλωση Ισχύος

Ο κάθε αισθητήριος κόμβος, επειδή είναι ουσιαστικά μία μικροηλεκτρονική συσκευή, μπορεί να τροφοδοτείται μόνο από μία πηγή περιορισμένης ισχύος (συνήθως, <0.5 Ah, 1.2 V). Σε κάποιες μάλιστα εφαρμογές είναι δύσκολη η αντικατάσταση της μπαταρίας που διαθέτει. Ως εκ τούτου, ο χρόνος ζωής του κόμβου είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με το χρόνο ζωής της μπαταρίας του.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, κάθε κόμβος παίζει το διπλό ρόλο του γεννήτορα (originator) και του δρομολογητή (router) δεδομένων. Η οποιαδήποτε βλάβη ή καταστροφή, ακόμη και ελάχιστων κόμβων, είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου και είναι πάρα πολύ πιθανό να απαιτηθεί επαναδρομολόγηση (re-routing) των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Συνεπώς, οι διάφοροι αλγόριθμοι και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα αισθητήρων, θα πρέπει να λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα της μπαταρίας του κάθε κόμβου και να φροντίζουν πάντοτε για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίησή τους. Για όλους αυτούς τους λόγους, σήμερα οι ερευνητές εστιάζουν την προσοχή τους στη μελέτη και σχεδίαση των πλέον κατάλληλων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Το κύριο έργο ενός κόμβου σε πεδίο αισθητήρων είναι η ανίχνευση γεγονότων που λαμβάνουν χώρα στο φυσικό τους περιβάλλον, η ταχεία επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από αυτήν τη μέτρηση, εφόσον είναι απαραίτητο, και τέλος η αποστολή τους. Ως εκ τούτου, η ενέργεια που θα καταναλώνεται στο δίκτυο θα οφείλεται κυρίως στην ανίχνευση γεγονότων ή λήψη δεδομένων από γειτονικούς κόμβους, στην επεξεργασία τους και στην αποστολή τους.

Η κατανάλωση ενέργειας, η οποία αποτελεί έναν από τους σπουδαιότερους παράγοντες και που θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη κατά τη μελέτη και τη σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, είναι το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

2.1.1.7 Μέσα Ασύρματης Επικοινωνίας

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, η ζεύξη επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι ασύρματη και μπορεί να γίνει με κάποιον από τους παρακάτω τρόπους:

- Με ραδιοσυχνότητες,
- Με υπέρυθρες,
- Με Bluetooth και
- Με οπτικές ακτίνες Laser.

Αυτά τα δίκτυα για να μπορούν να λειτουργούν οπουδήποτε, θα πρέπει το μέσο μετάδοσης να είναι διαθέσιμο παντού σε όλο τον κόσμο.

2.1.1.7.1 Επικοινωνία με Ραδιοσυχνότητες

Τα περισσότερα από τα δίκτυα αισθητήρων που αναπτύσσονται τον τελευταίο καιρό έχουν επιλέξει τις ραδιοσυχνότητες (Radio Frequencies – RF) ως μέσο μετάδοσης των πληροφοριών. Ο ασύρματος αισθητήριος κόμβος με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, και ο οποίος περιγράφεται στο [13], χρησιμοποιεί ένα πομποδέκτη RF απλού καναλιού ο οποίος λειτουργεί στα 916 MHz. Η αρχιτεκτονική WINS (Wireless Integrated Network Sensors – ασύρματοι ολοκληρωμένοι αισθητήρες δικτύου) χρησιμοποιεί επίσης τις ραδιοσυχνότητες ως μέσο επικοινωνίας [8].

Οι ραδιοσυχνότητες παρουσιάζουν τα εξής βασικά πλεονεκτήματα:

- Δεν απαιτούν οπτική επαφή ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη, ενώ η ζεύξη μπορεί να υλοποιηθεί με σχετικά μικρή κατανάλωση ενέργειας και χρήση μικρών σε μέγεθος κεραιών (λίγα εκατοστά, όσον αφορά τη ζώνη συχνοτήτων κάτω από αυτήν των GHz).
- Εκπέμπονται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, χωρίς να εμποδίζονται από φυσικά εμπόδια, καθιστώντας έτσι εύκολη την εγκατάσταση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.
- Παρέχουν εύκολη και ταχεία επέκταση του δικτύου, χωρίς να επηρεάζονται από τις όποιες μεταβολές της τοπολογίας του.
- Ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της ίδιας συχνότητας είναι πολύ σημαντικός εξ' αιτίας του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης των πακέτων και των μικρών αποστάσεων επικοινωνίας [14].

Οι ραδιοσυχνότητες παρουσιάζουν τα εξής βασικά μειονεκτήματα:

- Είναι κατασκευαστικά ακριβότερες από τις υπέρυθρες και τις οπτικές ακτίνες Laser διότι απαιτούν κυκλώματα διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης (MODEM), φίλτραρίσματος και πολυπλεξίας προκειμένου να λειτουργήσουν.

- Απαιτούν τη χρήση κεραιών.
- Υπάρχουν μεγάλες απώλειες του μεταδιδόμενου σήματος για το λόγο ότι οι κόμβοι, μαζί φυσικά με τις κεραιές τους, βρίσκονται στο έδαφος [8].
- Καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την εκπομπή αλλά και τη λήψη. Συνεπώς, είναι επιβεβλημένη η χρήση των κατάλληλων τεχνικών και πρωτοκόλλων που θα συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Συμπερασματικά, αναφέρουμε ότι το πλεονέκτημα της εύκολης και τυχαίας ανάπτυξης των δικτύων αισθητήρων δίνει το προβάδισμα στη χρήση ραδιοσυχνοτήτων έναντι των υπολοίπων μέσων ασύρματης επικοινωνίας.

2.1.1.7.2 Επικοινωνία με Υπέρυθρες

Ένας άλλος δυνατός τρόπος ενδοκομβικής ασύρματης επικοινωνίας στα δίκτυα αισθητήρων είναι με τη χρήση υπέρυθρων (IrDA).

Οι υπέρυθρες παρουσιάζουν τα εξής βασικά πλεονεκτήματα [15]:

- Δεν απαιτείται ειδική άδεια για να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα αισθητήρων.
- Είναι ιδιαίτερα εύρωστες σε παρεμβολές από ηλεκτρικές οικιακές συσκευές.
- Οι πομποδέκτες που χρησιμοποιούν υπέρυθρες έχουν αρκετά χαμηλό κόστος και είναι πολύ πιο εύκολοι στην κατασκευή.
- Δεν απαιτείται η χρήση κεραιών.
- Η ενέργεια που καταναλώνουν είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτήν που καταναλώνουν οι ραδιοσυχνότητες.

Οι υπέρυθρες παρουσιάζουν το εξής βασικό μειονέκτημα [15]:

Η επικοινωνία τους είναι συνήθως κατευθυντική οπότε απαιτείται οπτική επαφή (LOS – Line Of Sight). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μη παροχή δυνατότητας τυχαίας ανάπτυξης των αισθητήρων στην υπό παρακολούθηση περιοχή. Μία καλή λύση που προτείνεται, για να ξεπεραστούν τα όποια εμπόδια στην ομαλή μετάδοση των δεδομένων, είναι αυτή που περιγράφεται στη μελέτη του PushPin [16]. Σε αυτή τη μελέτη προτείνεται η χρήση ενός κώνου διάχυσης, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από πολυκαρβονικό σωλήνα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί μία πολυκατευθυντική (omni-directional) ακτίνα στην επιφάνεια ενός επιπέδου. Παρά τις όποιες έρευνες θα απαιτηθεί μία νέα προσπάθεια ευθυγράμμισης των κόμβων. Η μελέτη του PushPin χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη υπέρυθρων τύπου 83F8851. Το βασικό του όμως μειονέκτημα είναι η πολύ μικρή του εμβέλεια η οποία περιορίζεται στο ένα μόλις μέτρο.

2.1.1.7.3 Επικοινωνία με Bluetooth

Το Bluetooth [5] είναι ένας επιπλέον τρόπος ενδοκομβικής ασύρματης επικοινωνίας ο οποίος χρησιμοποιείται στα δίκτυα αισθητήρων. Αποτελεί ένα πρότυπο το οποίο προσφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εφόσον βέβαια πρόκειται για ασύρματες επικοινωνίες μικρής εμβέλειας. Όμως, οι επιδόσεις του Bluetooth κρίνονται υπερβολικές όταν χρησιμοποιείται από έναν απλό αισθητήριο κόμβο, διότι αυξάνει την πολυπλοκότητά του, προκειμένου να είναι σε θέση να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα με υψηλές ταχύτητες. Συνεπώς, δεν πρέπει να προτείνεται για χρήση στους αισθητήριους κόμβους. Μπορεί, όμως, να αποτελέσει καλή λύση για πύλες και σταθμούς βάσης που μεταδίδουν δεδομένα σε άλλα δίκτυα, αλλά και για αισθητήριους κόμβους οι οποίοι μεταδίδουν εικόνα [17].

Ο ασύρματος αισθητήριος κόμβος μAMPS χρησιμοποιεί έναν πομποδέκτη 2.4 GHz ο οποίος είναι συμβατός με Bluetooth και περιλαμβάνει ένα συνθέτη συχνοτήτων (frequency synthesizer) ο οποίος είναι τοποθετημένος σε chip [7].

2.1.1.7.4 Οπτική Επικοινωνία με Ακτίνες Laser

Η οπτική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων με τη χρήση Laser είναι ένας ακόμη τρόπος μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα αισθητήρων. Για παράδειγμα αναφέρουμε ενδεικτικά το Smart Dust Mote [9], το οποίο είναι ένα αυτόνομο σύστημα συλλογής, επεξεργασίας και επικοινωνίας δεδομένων, χρησιμοποιεί την οπτική επικοινωνία ως μέσο μετάδοσης.

Η οπτική επικοινωνία με Laser παρουσιάζει τα εξής βασικά πλεονεκτήματα [15]:

- Η επικοινωνία με οπτικά κύματα μπορεί να διεξάγεται με μικρότερους σε μέγεθος και περισσότερο ενεργειακά αποδοτικούς πομποδέκτες από ότι αυτοί οι οποίοι χρησιμοποιούν ραδιοσυχνότητες.
- Δεν απαιτείται η χρήση κεραιών.
- Προσφέρει υψηλό επίπεδο ασφαλείας αφενός, διότι η εκπομπή των δεδομένων δεν γίνεται πολυκατευθυντικά, και αφετέρου, διότι και αν ακόμη υπάρξει η οποιαδήποτε ανεπιθύμητη παρεμβολή σε κανάλι επικοινωνίας τότε διακόπτεται η μετάδοση.

Η οπτική επικοινωνία με Laser παρουσιάζει τα εξής βασικά μειονεκτήματα [15]:

- Απαιτείται οπωσδήποτε οπτική γραμμή επαφής μεταξύ του πομπού και του δέκτη.
- Είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Μπορεί πολύ εύκολα να παρεμβληθεί το φως της ημέρας, ή ακόμη και το περιβάλλον φως, με αποτέλεσμα τη δυσλειτουργία ή και τη διακοπή της επικοινωνίας.
- Η εγκατάσταση των αισθητήριων κόμβων πρέπει να γίνεται ύστερα από πολύ καλή μελέτη και σχεδίαση διότι η επικοινωνία είναι κατευθυντική. Το γεγονός, ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα τυχαίας εγκατάστασης των κόμβων, καθιστά αυτή τη λύση λιγότερο ελκυστική.

Είναι προφανές ότι ο τρόπος μετάδοσης που επιλέγεται για την αποστολή και λήψη δεδομένων επηρεάζει άμεσα τη σχεδίαση πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, αλλά και άλλες επιπλέον ιδιότητες που σχετίζονται με την εφαρμογή.

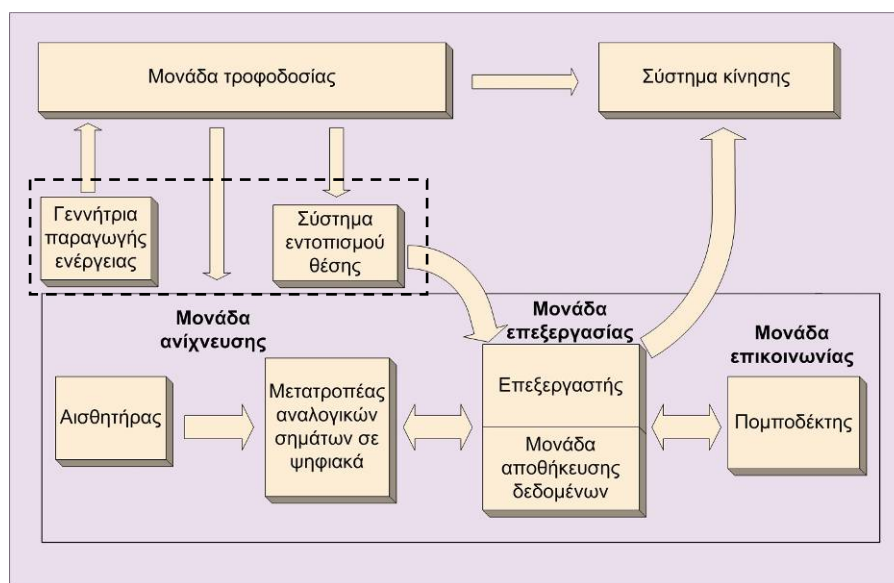
2.2 Αισθητήριοι Κόμβοι

Οι αισθητήριοι κόμβοι αποτελούν τον πυρήνα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Έχουν βασικά την ευθύνη της συλλογής, της επεξεργασίας και της μετάδοσης δεδομένων. Δεν έχουν τη δυνατότητα της άμεσης μετάδοσης των δεδομένων σε κάποιο άλλο μεγάλο δίκτυο, (όπως είναι λόγου χάρη το Διαδίκτυο ή κάποιο δίκτυο υπολογιστών), ή σε κάποιο κεντρικό υπολογιστή. Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει μία άλλη συσκευή η οποία ονομάζεται πύλη (Gateway) και έχει ως βασικό της σκοπό τη μετάδοση των δεδομένων από το τοπικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων προς κάποιο άλλο μεγαλύτερο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα: Οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Μπορούν να περισυλλέγουν πληροφορίες τέτοιες ώστε να παρέχουν μία πλούσια, πολυδιάστατη εικόνα του περιβάλλοντος, εφόσον αποτελούν μέρος του δικτύου.

- Μπορούν να εστιάζουν την προσοχή τους σε κρίσιμα συμβάντα που υποδεικνύονται από άλλους αισθητήρες του δικτύου (όπως, π.χ. την είσοδο εισβολέα σε κτήριο).
- Έχουν τη δυνατότητα να συνεχίζουν να λειτουργούν με ακρίβεια ακόμη και σε περίπτωση απώλειας κάποιων μεμονωμένων αισθητήρων του δικτύου. Για παράδειγμα, εάν κάποιος από τους αισθητήρες του δικτύου απωλέσουν μία σημαντική πληροφορία, τότε, άλλοι αισθητήρες μπορούν να έλθουν σε βοήθεια προκειμένου να παραδώσουν τα δεδομένα που έχουν ήδη χαθεί.
- Έχουν πολύ περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα και η αντικατάσταση της μπαταρίας τους είναι τουλάχιστον αδύνατη, εφόσον βρίσκονται σε μη προσπελάσιμους ή επικίνδυνους περιβαλλοντικά χώρους. Ως εκ τούτου, η καλή σχεδίαση αλγορίθμων, που θα λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τους το θέμα των περιορισμένων ενεργειακών δυνατοτήτων των αισθητήρων, καθίσταται ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη διατήρηση αλλά και την παράταση της διάρκειας ζωής των αισθητήρων.



Σχήμα 2-2: Αρχιτεκτονική κόμβου αισθητήρα

- Είναι γενικά εφοδιασμένοι με μικροκυκλώματα επεξεργασίας και επικοινωνίας των πληροφοριών που λαμβάνουν από το φυσικό τους περιβάλλον. Η μονάδα ανίχνευσης μετρά τις διάφορες παραμέτρους από το περιβάλλον του αισθητήρα και τις μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα. Η επεξεργασία αυτών των σημάτων αποκαλύπτει κάποιες ιδιότητες, είτε των εκεί ευρισκόμενων αντικειμένων, είτε των διαφόρων συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή εμβέλειας του αισθητήρα. Ο αισθητήρας αποστέλλει τις πληροφορίες που έχει ανιχνεύσει, συνήθως με τη βοήθεια ενός πομποδέκτη (αναμεταδότη), προς ένα κέντρο ελέγχου, είτε απευθείας, είτε μέσω ενός ενδιάμεσου κέντρου περισυλλογής δεδομένων (σταθμό βάσης ή πύλη). Ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να συγχωνεύει τα δεδομένα που έχουν ανιχνευθεί προκειμένου να φιλτράρει τα λανθασμένα δεδομένα και άλλες ανωμαλίες και να εξάγει συμπεράσματα από τα δεδομένα που έχουν αναφερθεί για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο είναι προσανατολισμένο στην κατόπτευση, τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από ένα αισθητήρα υποδεικνύουν την ανίχνευση κάποιου στόχου, ενώ η συγχώνευση όλων των αναφορών που προέρχονται από πολλούς άλλους αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ακριβή εντοπισμό και προσδιορισμό του στόχου που έχει ανιχνευθεί. Οι εργασίες, που

αφορούν την επεξεργασία των διαφόρων σημάτων καθώς και την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων, αποτελούν τους μεγαλύτερους καταναλωτές της ενέργειας των αισθητήρων.

2.2.1 Δομή

Ένας αισθητήριος κόμβος αποτελείται από τις εξής βασικές μονάδες (Σχήμα 2.2):

- Τη Μονάδα Ανίχνευσης (Sensing Unit),
- Τη Μονάδα Επεξεργασίας (Processing Unit),
- Τη Μονάδα Επικοινωνίας (Communication Unit) και
- Τη Μονάδα Τροφοδοσίας (Power Unit).

Εκτός από αυτές τις μονάδες, είναι δυνατόν να διαθέτει και κάποιες άλλες ακόμη οι οποίες εξαρτώνται από την εφαρμογή και είναι οι εξής:

- Το Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Location Finding System),
- Το Σύστημα Κίνησης (Mobilizer), και
- Η Γεννήτρια Παραγωγής Ενέργειας (Power Generator) [4-5].

2.2.1.1 Μονάδα Ανίχνευσης

Η μονάδα ανίχνευσης είναι αυτή η οποία πραγματοποιεί τις μετρήσεις και αποτελείται, συνήθως, από δύο επί μέρους μονάδες:

- τους Αισθητήρες (Sensors) και
- το Μετατροπέα Αναλογικών Σημάτων σε Ψηφιακά (A/D Converter).

Τα αναλογικά σήματα τα οποία παράγονται από τους αισθητήρες, και έχουν ως βάση το υπό παρακολούθηση φαινόμενο, μετατρέπονται σε σήματα ψηφιακής μορφής από τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα (A/D Converter), και κατόπιν αποστέλλονται στη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων [4,5].

Οι αισθητήρες αποτελούν την πηγή πληροφοριών ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Συλλέγουν πληροφορίες (δεδομένα) από το περιβάλλον τις οποίες στη συνέχεια επεξεργάζονται και μεταδίδουν. Οι πληροφορίες που συλλέγονται αφορούν, από τη μέτρηση διάφορων φυσικών μεγεθών, όπως θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, μέχρι τον εντοπισμό αντικειμένων. Το μέγεθος των αισθητήρων είναι μία άλλη παράμετρος που θα πρέπει να τύχει κάποιας ιδιαίτερης προσοχής, επειδή κάποιες φορές απαιτείται να έχουν πολύ μικρές διαστάσεις για να χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο.

2.2.1.2 Μονάδα Επεξεργασίας Δεδομένων

Η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων αποτελείται ουσιαστικά από δύο επί μέρους μονάδες:

- Τον Επεξεργαστή (Processor) και
- Μία μικρή Μονάδα Αποθήκευσης Δεδομένων (Storage unit).

Οι δύο αυτές υπομονάδες, οι οποίες έχουν άμεση επικοινωνία μεταξύ τους, διαχειρίζονται τις διαδικασίες εκείνες οι οποίες επιβάλλουν στον κόμβο αισθητήρα να συνεργάζεται με τους υπόλοιπους κόμβους προκειμένου να φέρουν εις πέρας από κοινού το επιτελούμενο από αυτούς έργο (των μετρήσεων). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο επεξεργαστής ενός αισθητήριου

κόμβου καθορίζει, σε πολύ μεγάλο βαθμό, όχι μόνο τις επεξεργαστικές και υπολογιστικές του ικανότητες, αλλά και το ποσό της ενέργειας που πρόκειται να καταναλωθεί. Σήμερα στο εμπόριο υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο πλήθος μικροελεγκτών, μικροϋπολογιστών και FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays – πίνακες πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου) που παρέχουν στο σχεδιαστή των αισθητήριων κόμβων την ευελιξία να επιλέξει τον καταλληλότερο τύπο επεξεργαστή, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

2.2.1.2.1 Μονάδα Επεξεργασίας με FPGA

Η τεχνολογία FPGA παρουσιάζει τρία πολύ βασικά μειονεκτήματα:

- Η ενέργεια που καταναλώνουν δεν είναι τόσο χαμηλή όσο απαιτεί ένας αισθητήριος κόμβος, παρά το γεγονός ότι ήδη κυκλοφορούν στην αγορά FPGAs με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας η οποία, σε συνθήκες αναμονής (stand-by), προσεγγίζει τα 14 μ A. Ως παράδειγμα αναφέρεται ο επεξεργαστής τύπου CoolRunner-II ο οποίος λειτουργεί στα 1.8 V με συχνότητα 20 MHz και απαιτεί ρεύμα ίσο με 17.22 mA, πράγμα το οποίο τον καθιστά ενεργοβόρο, εφόσον συγκριθεί με κάποιον άλλο αντίστοιχο μικροελεγκτή.
- Δεν είναι δυνατή η απενεργοποίηση κάποιων τμημάτων τους, κάτι που θα ήταν πολύ χρήσιμο. Για παράδειγμα, όταν ένας κόμβος δεν πραγματοποιεί κάποια λειτουργία, θα ήταν ανόητο να παραμένει ενεργοποιημένη η μονάδα επικοινωνίας, διότι θα καταναλώνει άσκοπα ενέργεια [15].

Τα μειονεκτήματα που έχουν ήδη αναφερθεί δεν θα πρέπει, εκ των προτέρων, να καταστήσουν απαγορευτική τη χρήση των FPGAs, διότι δεν είναι διόλου απίθανο να αποτελέσουν μία πολύ καλή λύση σε μελλοντικές εφαρμογές.

Το μοναδικό τους πλεονέκτημα, που προκύπτει μέχρι στιγμής, είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού μειώνοντας έτσι δραματικά το κόστος, εφόσον με κάποιες προϋποθέσεις (όπως, για παράδειγμα, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας) χρησιμοποιηθούν σε διαστημικές εφαρμογές [15].

2.2.1.2.2 Μονάδα Επεξεργασίας με Μικροελεγκτές

Οι μικροελεγκτές, σήμερα, δεν περιλαμβάνουν μόνο επεξεργαστή και μνήμη, αλλά και πολλές άλλες χρήσιμες μονάδες, όπως:

- Απαριθμητές,
- Χρονομετρητές,
- A/D converters (ADCs), και
- UART.

Στην αγορά κυκλοφορούν διάφοροι τύποι μικροελεγκτών. Οι διαφορές τους αναφέρονται κυρίως:

- στην επεξεργαστική τους ισχύ,
- στη συχνότητα λειτουργίας,
- στην κατανάλωση ενέργειας,
- στον αριθμό των bits (από 4 μέχρι 32 bits),
- στον αριθμό των χρονομετρητών,
- στον αριθμό των bits που χρησιμοποιεί ο ADC, κτλ.

Στους Πίνακες 2.1α και 2.1β επιχειρείται η σύγκριση μεταξύ διαφόρων τύπων μικροελεγκτών που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά και που χρησιμοποιούνται από τους περισσότερους αισθητήριους κόμβους.

➤ *Συνηθισμένοι Τύποι Μικροελεγκτών.*

EM6603: Ο μικροελεγκτής EM6603 είναι 4-bit, πολύ χαμηλής ισχύος αλλά με περιορισμένες επεξεργαστικές ικανότητες. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές RFID (Radio Frequency Identification) [18].

PIC: Ο μικροελεγκτής PIC, της εταιρείας Microchip, χρησιμοποιείται κυρίως σε παιδαγωγικούς σκοπούς και δεν είναι αποτελεσματικός σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

DragonBall MC9328MXI: Ο μικροελεγκτής DragonBall MC9328MXI είναι 16-bit και διαθέτει ένα Bluetooth Accelerator Radio Interface, μία μονάδα χρονικής επεξεργασίας (TPU – Time Processing Unit), καθώς και μία συνεπεξεργαστική μονάδα προκειμένου να εκτελεί εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (real time applications) [15].

MSP430F149: Ο μικροελεγκτής MSP430F149 είναι η καταλληλότερη επιλογή για έναν αισθητήριο κόμβο, αφού είναι 16-bit (8 MIPS – Million Instructions Per Second – 8 εκατομμύρια εντολές ανά δευτερόλεπτο). Δηλαδή παρέχει περισσότερη υπολογιστική ισχύ σε συνδυασμό με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εκτός από τα παραπάνω, είναι εξοπλισμένος με ένα πλήρες σύνολο από αναλογικούς/ψηφιακούς επεξεργαστές. Διαθέτει επίσης ένα ενσωματωμένο πρόγραμμα αποσφαλμάτωσης (debugging) το οποίο επιδρά στον προγραμματισμό flash που διαθέτει, μέσα από ένα πρότυπο JTAG, και υποστηρίζεται από μία ευρεία γκάμα εξελιγμένων εργαλείων, συμπεριλαμβανομένων του GCC και του IAR Embedded Workbench [15].

ARM: Η οικογένεια των μικροελεγκτών ARM έχει μεταβλητές υπολογιστικές ικανότητες με αποτέλεσμα να προτιμάται από συσκευές οι οποίες απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ, όπως είναι, λόγου χάρη, οι πύλες. Ο StrongArm SA1100 της εταιρείας Intel είναι ο πλέον αντιπροσωπευτικός τύπος επεξεργαστή αυτής της οικογένειας. Ο SA1100 είναι ένας γενικού σκοπού 32-bit (RISC – Reduced Instruction Set Computer) μικροεπεξεργαστής, ο οποίος βασίζεται στην αρχιτεκτονική ARM, και θεωρείται ως ο πλέον αποτελεσματικός επεξεργαστής, όσον αφορά μετρήσεις MIPS/ Watt, αφού διαθέτει σειριακή επικοινωνία I/O και JTAG interface. Όσον αφορά το πρόγραμμα και τα δεδομένα, διατίθενται οι μνήμες: SRAM με χωρητικότητα 1 MB καθώς και η flash μνήμη εκκίνησης (bootable flash memory) με χωρητικότητα 4 MB. Η σύνδεση με τα δομικά στοιχεία των αισθητήρων (sensor modules) πραγματοποιείται με τη χρήση του τετραπλού καλωδίου του SPI interface. Ο ίδιος ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει τρεις βασικές καταστάσεις λειτουργίας, απαραίτητες για τη σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων: normal, idle και sleep. Αυτές οι καταστάσεις λειτουργίας μπορούν να ρυθμιστούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται αισθητά η κατανάλωση των ασύρματων κόμβων αισθητήρων [15].

AVR: Οι μικροελεγκτές τύπου AVR της εταιρείας Atmel είναι πολύ χρηστικοί και παρουσιάζουν τα παρακάτω *πλεονεκτήματα* που τους καθιστούν ανταγωνιστικούς στην αγορά:

- Συνδυάζουν την αρχιτεκτονική RISC με ως επί το πλείστον εντολές σταθερού μήκους, διαδικασίες αποθήκευσης/φόρτωσης στη μνήμη, καθώς και 32 καταχωρητές γενικής χρήσης.
- Είναι περίπου 12 φορές ταχύτεροι και πιο αποδοτικοί από τους ελεγκτές κλασικής αρχιτεκτονικής CISC (Complex Instruction Set Computer).
- Λειτουργούν με συχνότητες χρονισμού που προσεγγίζουν τα 10 MHz.
- Οι περισσότερες από τις εντολές του ρεπερτορίου τους εκτελούνται στη διάρκεια μιας περιόδου του κεντρικού ρολογιού.

- Διαθέτουν μία ειδική δυνατότητα προγραμματισμού μέσα στο ίδιο το σύστημα (ISP – In System Programmable).

Πίνακας 2-1: Σύγκριση μεταξύ επιλεγμένων μικροελεγκτών (I)

	AT90 LS8535	ATMega 103L	PIC 16F86	MSP430 F149	StrongArm SA1100
Bits	8	8	8	16	32
Flash Memory	8 Kbyte	128 Kbyte	68 Kbyte	60 Kbyte	32 Mbyte
RAM	512 Byte	4 Kbyte	1 Kbyte	2048 byte	8-Kbyte
ADC	10-bit	10-bit	12-bit	12-bit	12-bit
Timers	3	3	1	3	3
Operating Voltage	4V – 6V	2.7V – 3.6V	2V – 6V	1.8V–3.6V	3V – 3.6V
Power Active mode	6.4 mA	5.5 mA	2 mA/5V, 4MHz	400 μA/5V	230 mW/133 MHz
Power Idle mode	1.9 mA	1.6 mA	1.6 mA	1.3 μA	50 mW/133 MHz
Power-Down mode	<1μA	<1μA	<1μA	<1μA	Typical 25μA

Πίνακας 2-2: Σύγκριση μεταξύ επιλεγμένων μικροελεγκτών (II)

	AtmelAT91 M 42800A	MC68HC05 PV8A	80C51RD+	EM6603	DragonBall MC9328 MX1
Bits	16/32	8	8	4	16
Flash Memory	8 Kbyte	64 Kbyte	64 Kbyte	64 Kbyte	68 Kbyte
RAM	8 Kbyte	192 B	1024 B	96 x 4 B	128 Kbyte
ADC	0	8-bit	0	0	13-bit
Timers	6	1	1	1	2
Operating Voltage	2.7V – 3.6V	3.3V – 5.0V	2.7V–5.5V	1.2V–3.6V	1.6V – 3.3V
Power Active mode	5.6 mA	4.4 mA	16 mA /16 MHz	1.8 μA /32 KHz	90 mA/96 MHz
Power Idle mode	6.4 mA	1.95 mA	4 mA /16 MHz	0.35 μA	0.16 mW
Power-Down mode	25 μA	485 μA	50 μA /16 MHz	0.1 μA	55.1 μA

2.2.1.3 Μονάδα Επικοινωνίας

Η μονάδα επικοινωνίας αποτελείται βασικά από έναν *Πομποδέκτη (Transceiver)* ο οποίος συνδέει τον κόμβο με το υπόλοιπο δίκτυο. Είναι υπεύθυνη για τη διασφάλιση λειτουργιών ελέγχου, όπως είναι π.χ. η αναφορά για τα υπόλοιπα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα του κάθε κόμβου, ή ο διαθέσιμος χώρος του buffer.

Ο έλεγχος της μεταδιδόμενης ενέργειας καθώς και η μέτρηση του λαμβανόμενου σήματος παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής:

- Πιθανή μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας εκπομπής προς τους γειτονικούς κόμβους.
- Ανίχνευση συγκρούσεων (collisions) στο ασύρματο κανάλι.

- Δυνατότητα χρησιμοποίησης για τον καθορισμό της σχετικής θέσης ενός κόμβου μέσα στο ασύρματο δίκτυο.
- Παροχή δυνατότητας στον αισθητήριο κόμβο ώστε να ρυθμίζει ανάλογα τον αριθμό των γειτονικών του κόμβων με τους οποίους μπορεί να επικοινωνεί ασύρματα, συμβάλλοντας έτσι στην επέκταση του δικτύου.

Εκτός των άλλων, η μονάδα επικοινωνίας είναι υπεύθυνη για το συντονισμό των διαφόρων λειτουργιών, που έχουν άμεση σχέση με την επικοινωνία, όπως είναι π.χ. η λήψη απόφασης για τον καθορισμό της ακριβούς χρονικής στιγμής που θα αποσταλούν τα δεδομένα, την ποσότητα αυτών των δεδομένων, και βεβαίως ο καθορισμός του ρόλου των αισθητήριων κόμβων, δηλαδή ποιος από τους αισθητήριους κόμβους θα είναι ο πομπός και ποιος θα είναι ο δέκτης.

Πολύ σημαντική λειτουργία της μονάδας επικοινωνίας είναι η λειτουργία sleep/awake η οποία έχει ως βασικό της στόχο την ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Πίνακας 2-3: Τεχνικά χαρακτηριστικά πομποδεκτών

	TR1000	CC1000	LMX3162	Philstar PH2401
Τύπος διαμόρφωσης (Modulation type)	OOK/ASK	FSK	GFSK	GFSK
Συχνότητα φέροντος (Carrier frequency)	916.5 MHz	300 - 1000 MHz	2.45 GHz	2.4 GHz
Τάση λειτουργίας (Operating voltage)	3V	2.1V – 3.6V	3.0 – 5.5V	1.8V
Ρεύμα εκπομπής (Current transmit mode)	12 mA	16.5 mA/0 dBm/868 MHz	50 mA	<20 mA
Ρεύμα λήψης (Current receive mode)	3.8 mA / 115.2 Kbps 1.8 mA / 2.4 Kbps	9.6 mA/868 MHz	27 mA	<20 mA
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	OOK / 30Kbps ASK / 115.2Kbps	μέχρι 76.8 Kbits/sec	1 Mbits/sec	1 Mbits/sec
Ευαισθησία δέκτη (Receiver sensitivity)	-97 dBm /115.2 Kbps	-110 dBm /2.4 Kbps	-93 dBm	-84 dBm
Ισχύς πομπού (Transmitter power)	0 dBm	-20 μέχρι 10 dBm	-7.5 dBm	+2 dBm

Παρεμπιπτόντως αναφέρουμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως λόγω χάρη στην οικογένεια MICA, η μονάδα αντίληψης έχει συνδεσμοποιηθεί σε μία ξεχωριστή πλακέτα η οποία ονομάζεται *πλακέτα ή πλατφόρμα αισθητήρων (sensor board)*, ενώ οι μονάδες επεξεργασίας και επικοινωνίας έχουν συνδεσμοποιηθεί σε μία άλλη πλακέτα η οποία ονομάζεται *mote*.

Υπάρχει ένας αριθμός αισθητήριων κόμβων, όπως: iBadge, PicoNode, iMote και BTNode, των οποίων η μονάδα επικοινωνίας διαθέτει τη λειτουργία Bluetooth. Το Bluetooth κρίνεται απαραίτητο όταν ο αισθητήριος κόμβος πρόκειται να μεταδώσει δεδομένα τα οποία απαιτούν

μεγάλο εύρος φάσματος, όπως π.χ. εικόνα (video). Όμως, οι περισσότεροι αισθητήριοι κόμβοι που κυκλοφορούν στην αγορά δεν είναι εξοπλισμένοι με Bluetooth.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλέον διαδεδομένων τύπων πομποδεκτών που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

2.2.1.4 Μονάδα Τροφοδοσίας

Οι μονάδες τροφοδοσίας είναι από τις πλέον σημαντικές μονάδες που διαθέτει ο αισθητήριοι κόμβος. Αυτές είναι πιθανόν να υποστηρίζονται από μονάδες παραγωγής ενέργειας, όπως είναι για παράδειγμα τα ηλιακά κύτταρα, τα οποία είναι σε θέση να τις τροφοδοτούν με ενέργεια όποτε αυτές τα χρειαστούν, και φυσικά όποτε αυτό είναι εφικτό [4,5].

Η μονάδα τροφοδοσίας αποτελείται από τη μπαταρία και από ένα μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε συνεχές (DC-DC converter). Έχει ως σκοπό την τροφοδοσία του αισθητήριοι κόμβου με την απαραίτητη ενέργεια ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του. Η διάρκεια ζωής ενός αισθητήριοι κόμβου είναι το φλέγον ζήτημα και θα μπορούσε να παραταθεί με χρήση διαφόρων μεθόδων οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια. Για την καλύτερη λειτουργία του κόμβου θα μπορούσαν επίσης να προστεθούν διάφορες μονάδες, όπως π.χ. ένα κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας (battery protection circuit) για την αποφυγή υπερφόρτισης/εκφόρτισης, ένας σταθεροποιητής τάσης (power voltage regulator) καθώς και άλλα εξίσου σημαντικά κυκλώματα.

Πολύ σημαντική είναι επίσης η επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου μπαταρίας, διότι αυτή επηρεάζει άμεσα τη σχεδίαση του αισθητήριοι κόμβου. Υπάρχουν πολλοί τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε μία πολύ μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Οι μπαταρίες μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- σε *Κύριες* (μη επαναφορτιζόμενες) και
- σε *Δευτερεύουσες* (επαναφορτιζόμενες).

Μία ακόμη κατηγοριοποίηση των μπαταριών μπορεί να γίνει με βάση το ηλεκτροχημικό υλικό που χρησιμοποιούν ως ηλεκτρόδιο, όπως π.χ. NiCd (νικελίου-καδμίου), NiZn (νικελίου-ψευδαργύρου), Lithium-Ion (λιθίου), NiMH (Nickel Metal Hybrid – νικελίου-υβριδικών μετάλλων) και AgZn (αργύρου-ψευδαργύρου).

Ο τύπος της μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής. Εφόσον είναι αδύνατη η άντληση ενέργειας από το περιβάλλον, τότε είναι προτιμότερη η χρήση μη επαναφορτιζόμενων μπαταριών, διότι αυτές έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας.

Ο τύπος λιθίου αποτελεί ίσως την καλύτερη επιλογή επαναφορτιζόμενης μπαταρίας για τις περισσότερες εφαρμογές. Όμως, υπάρχουν ακόμη διάφοροι άλλοι παράγοντες οι οποίοι θα πρέπει να εξεταστούν λεπτομερώς, πριν την υλοποίηση κάποιας συγκεκριμένης εφαρμογής, αφού αυτοί μπορούν να επηρεάσουν, με τον έναν ή τον άλλο τρόπο, την απόφαση για την επιλογή του πλέον κατάλληλου τύπου μπαταρίας.

Όσον αφορά τη «φιλικότητα προς το περιβάλλον», οι μπαταρίες NiMH είναι οι πλέον φιλικές προς αυτό. Η πυκνότητα ενέργειάς τους είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτή μιας μπαταρίας λιθίου, και έχουν το βασικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να επαναφορτιστούν οποιαδήποτε στιγμή, χωρίς να αντιμετωπίζουν το φαινόμενο μνήμης (memory effect). Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτούν προστασία από υπερφορτίσεις/εκφορτίσεις, με τη βοήθεια κατάλληλων κυκλωμάτων.

Ο Πίνακας 2-4 παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των διαφόρων τύπων μπαταριών που χρησιμοποιούν οι αισθητήριοι κόμβοι.

Πίνακας 2-4: Σύγκριση μεταξύ διαφόρων τύπων μπαταριών

Τύπος Μπαταρίας	Επαναφορτιζόμενη	Ογκομετρική Πυκνότητα (wh/l)	Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία
Alkaline-MnO ₂	Όχι	347	Ναι
Li-ion	Ναι	200	Ναι
Li/MnO ₂	Όχι	550	Ναι
Li-Polymer	Ναι	300-415	Ναι
NiCd	Ναι	80-105	Ναι
NiMH	Ναι	175	Όχι
Sealed Lead Acid	Ναι	90	Ναι
Silver Oxide	Όχι	500	Ναι
Zinc Air	Όχι	1150	Ναι

2.2.1.5 Λοιπές Μονάδες

Υπάρχουν και άλλες ακόμη επί μέρους μονάδες οι οποίες εξαρτώνται από την εφαρμογή. Οι περισσότερες τεχνικές δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και οι εργασίες εκτέλεσης μετρήσεων απαιτούν την προηγούμενη γνώση της ακριβούς θέσης του αισθητήριου κόμβου. Γι' αυτόν το λόγο είναι πολύ σύνηθες να διαθέτει ο κόμβος ένα *Σύστημα Εντοπισμού Θέσης*. Επιπλέον, κάποιες φορές, ένα *Σύστημα Κίνησης* είναι εντελώς απαραίτητο για τη μετακίνηση των αισθητήριων κόμβων προκειμένου αυτοί να πραγματοποιήσουν μία σειρά από μετρήσεις στην υπό παρακολούθηση περιοχή.

2.2.2 Τύποι και Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται μερικοί από τους πλέον δημοφιλείς τύπους αισθητήριων κόμβων που κυκλοφορούν σήμερα στο εμπόριο και με ταυτόχρονη ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών τους.

2.2.2.1 μAMPS

Ο αισθητήριος κόμβος μAMPS (micro-Adaptive Multi-domain Power-aware Sensors) είναι ένα προϊόν του ομώνυμου ερευνητικού προγράμματος του Αμερικανικού Πανεπιστημίου MIT [19].

➤ Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Η Μονάδα Ανίχνευσης περιλαμβάνει:

- Ακουστικούς αισθητήρες (μικρόφωνα) και
- Αισθητήρες δονήσεων.

Η Μονάδα Επεξεργασίας Δεδομένων περιλαμβάνει:

- Το μικροεπεξεργαστή StrongARM S-1100, με 4 MB flash memory και 16 MB RAM, και επιπλέον
- Ένα Μετατροπέα Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή (DC/DC converter) που τροφοδοτεί όλα τα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα του μAMPS με τις απαραίτητες τάσεις.

- Ο πυρήνας του StrongARM τροφοδοτείται από έναν ειδικό ρυθμιστή τάσης ο οποίος ρυθμίζει την τάση λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή να συμβαδίζει με την ταχύτητα του ρολογιού του. Ο μ AMPS χρησιμοποιεί δηλαδή την τεχνολογία DVS (ανάλυται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο) ως βασικό τρόπο εξοικονόμησης ενέργειας και είναι σε θέση να μεταβάλλει δυναμικά την τάση λειτουργίας καθώς και τη συχνότητα του ρολογιού του μικροεπεξεργαστή του από τα 0.85V στα 1.44V, και από τα 74 MHz στα 206 MHz, αντίστοιχα [15], [20]. Για τον προγραμματισμό του μ AMPS χρησιμοποιείται το λειτουργικό σύστημα RedHat eCos.

Η Μονάδα Επικοινωνίας του μ AMPS περιλαμβάνει τον πομποδέκτη LMX3162 ο οποίος λειτουργεί στη ζώνη ISM 2.45 GHz [15], [20]. Ένας ενισχυτής ισχύος 6 επιπέδων επιτρέπει στον πομποδέκτη να αντιδρά ανάλογα με τις απαιτήσεις που θέτει το σύστημα. Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά του μ AMPS επιτρέπουν 13 στάδια κατανάλωσης ενέργειας, όπου μεταξύ αυτών των σταδίων υπάρχουν 6 διαφορετικά επίπεδα ενίσχυσης (κέρδους) του ενισχυτή ισχύος προκειμένου να υποστηρίξουν μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις από 10 μέχρι 100 m. Στην κατάσταση *idle* (αδρανής), ο ραδιοπομποδέκτης καταναλώνει 60 mW, ενώ στην κατάσταση *receive* (λήψη) καταναλώνει 280 mW. Στη χαμηλότερη κατάσταση *transmit* (εκπομπή) καταναλώνει 330 mW, ενώ στην υψηλότερη καταναλώνει 1.1 W [20].

2.2.2.2 iMote

Ο αισθητήριος κόμβος iMote αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα της εταιρείας Intel και κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στο εμπόριο το 2003. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αποτελεί έναν αισθητήριο κόμβο με υψηλό εύρος ζώνης συχνοτήτων, όπως είναι το BT Node. Η διαφορά του με άλλους κόμβους είναι η σημαντικά μεγαλύτερη on-chip μνήμη του (512 Kbytes flash memory και 64 Kbytes SRAM), επειδή χρησιμοποιεί το μικροεπεξεργαστή ARM7TDMI 12-48 MHz.

Ο iMote χρησιμοποιεί έναν πομποδέκτη τεχνολογίας Bluetooth 1.1 με εμβέλεια μεγαλύτερη των 30 m, με ισχύ εκπομπής μεγαλύτερη από 4 dBm και ισχύ λήψης μικρότερη από -80 dBm [21]. Η τεχνολογία Bluetooth τον καθιστά ως τον πλέον κατάλληλο κόμβο σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης για μετάδοση video, ακουστικών και σεισμικών δεδομένων. Επιπλέον παρέχει εύκολη διασύνδεση με PDAs καθώς και με τηλέφωνα τεχνολογίας Bluetooth. Είναι επίσης συμβατός με το λειτουργικό σύστημα TinyOS.

Ο iMote παρέχει μία αρκετά μεγάλη γκάμα θυρών εισόδου/εξόδου, όπως UART, USB, GPIO, I²C και SPI. Η διασύνδεση μέσω της θύρας I²C γίνεται με ταχύτητα kbps και αναμένεται, μάλιστα, να φτάσει τα 400 kbps σε μελλοντικές εκδόσεις.

Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του iMote είναι λιγότερη από ένα μήνα, εφόσον χρησιμοποιεί μπαταρία τύπου νομίσματος, και μικρότερη από έξι μήνες, εφόσον χρησιμοποιεί μπαταρία τύπου AA.

2.2.2.3 BT Node

Ο αισθητήριος κόμβος BT Node είναι μία ασύρματη αυτόνομη πλατφόρμα μετάδοσης και επεξεργασίας δεδομένων η οποία βασίζεται σε ένα μικροεπεξεργαστή τύπου AVR και έναν πομποδέκτη τεχνολογίας Bluetooth [22].

Χρησιμοποιείται ως μία υποδειγματική πλατφόρμα σε κινητά ασύρματα δίκτυα ad hoc (MANETs – Mobile Ad-hoc NETWORKS), καθώς και στα ενσωματωμένα (ή ένθετα – embedded) ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ο κόμβος BT Node είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ των εταιρειών TIK (Computer Engineering and Networks Laboratory) και Research Group for Distinguished Systems. Αυτή τη στιγμή το BT Node χρησιμοποιείται σε δύο βασικά ερευνητικά προγράμματα, το NCCR MICS [23], και το Smart-Its [24].

Στην αγορά κυκλοφορεί η τρίτη έκδοση του BT Node (BT Node version 3) [25]. Τα καινούργια χαρακτηριστικά της τρίτης έκδοσης του BT Node είναι:

- Το νέο Bluetooth υποσύστημα Zeevo ZV4002 το οποίο υποστηρίζει περισσότερα από τέσσερα ανεξάρτητα μεταξύ τους δίκτυα Piconets και επτά βοηθητικά, και
- Ένας επιπλέον πομποδέκτης χαμηλής ισχύος, ο Chipcon CC1000.

Ολόκληρο το σύστημα είναι δομημένο γύρω από το μικροεπεξεργαστή ATmega1281 της εταιρείας Atmel, ο οποίος περιλαμβάνει μία επεκτάσιμη μνήμη SRAM (64 KB+180 KB), μία ενσωματωμένη βάση για δύο μπαταρίες τύπου AA, καθώς και ένα γενικής κατηγορίας συνδετήρα (connector) επέκτασης.

Ο χαμηλής ισχύος πομποδέκτης του κόμβου BT Node είναι ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στα MICA2 Motes του Berkeley. Έτσι, ο BT Node καθίσταται ταυτόχρονα πανομοιότυπος με τον Mote και τον παλιό τύπο BT Node. Και οι δύο αυτοί πομποδέκτες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν συγχρόνως ή, σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται, να τίθενται εκτός λειτουργίας ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον μειώνοντας έτσι σημαντικά την ισχύ που καταναλίσκεται από τη συσκευή όταν αυτή είναι αδρανής ή ανενεργός (idle).

Ο προγραμματισμός του BT Node υλοποιείται είτε με το TinyOS (nesC-programming), είτε με το BTnut System Software, το οποίο επιτρέπει τη συνεργασία πολυνηματικών (multithread) εφαρμογών με standard C προγραμματισμό.

2.2.2.4 weC Mote

Το weC mote [11], [26], [27] είναι το πρώτο από τα πέντε μέλη της οικογένειας των motes (weC, Rene, DotMote, η σειρά MICA, Spec Node). Ουσιαστικά είναι μία μικρότερη έκδοση από τον προκάτοχό του, το RF mote, και αναπτύχθηκε γύρω στα τέλη του 1999 από επιστήμονες ερευνητές του Πανεπιστημίου του Berkeley. Αποτελείται από:

- Ένα ραδιοπομποδέκτη RFM TR1000 ο οποίος λειτουργεί στα 916 MHz με διαμόρφωση OOK,
- Μία ενσωματωμένη κεραία τύπου PCB,
- Αισθητήρες φωτός και θερμοκρασίας καθώς και
- Ένα μικροεπεξεργαστή της εταιρείας Atmel, τον AT90S8535.

Με διαστάσεις 2.54 x 2.54 x 1.25 cm, το weC mote ήταν το μικρότερο της εποχής του, αλλά το ισχυρότερο από πλευράς επεξεργαστικής ικανότητας. Όμως, το μεγαλύτερό του πλεονέκτημα ήταν η δυνατότητα που διέθετε να προγραμματίζεται μέσω ενός ασύρματου καναλιού. Μετά την παρουσίαση του weC άρχισε ουσιαστικά και η ανάπτυξη του λειτουργικού συστήματος TinyOS από ερευνητές του Πανεπιστημίου του Berkeley.

2.2.2.5 Rene Mote και Rene2 Mote

Ο αισθητήριος κόμβος Rene Mote [26,28] είναι ο πρώτος που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Crossbow. Αναπτύχθηκε το καλοκαίρι του 2000 και επέκτεινε τις δυνατότητες του weC. Η κύρια μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, καθώς και η μονάδα επικοινωνίας, παρέμειναν οι ίδιες με αυτές

του weC. Με άλλα λόγια, ο Rene Mote διαθέτει μικροεπεξεργαστή AT90S8535, μνήμη προγράμματος flash 8 KB, μνήμη δεδομένων RAM 512 Bytes και ραδιοπομποδέκτη RFM TR1000. Επιπλέον διαθέτει ένα ζεύγος αρσενικών/θηλυκών 51-pin συνδετήρων (connectors), οι οποίοι επιτρέπουν τη διασύνδεση του mote με μία μεγάλη γκάμα από κάρτες (ή πλατφόρμες) αισθητήρων (sensor boards). Αυτή η καινοτομία άνοιξε το δρόμο για την ανάπτυξη δεκάδων τύπων καρτών οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να συμπεριλάβουν μέχρι και εκατοντάδες αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν πολύ απλά και γρήγορα με το mote, επεκτείνοντας έτσι τις ανιχνευτικές του ικανότητες.

Ο κόμβος Rene2 Mote, ο οποίος εμφανίστηκε μετά από έναν περίπου χρόνο, αντικατέστησε το μικροεπεξεργαστή AT90S8535 με το μικρο-επεξεργαστή ATMEGA163. Με αυτήν την αντικατάσταση αυξήθηκε, αφενός μεν η χωρητικότητα της μνήμης RAM από τα 0.5 Kbytes στο 1 Kbyte, και αφετέρου η μνήμη του προγράμματος flash από τα 8 Kbytes στα 16 Kbytes [28].

2.2.2.6 Dot Mote

Ο αισθητήριος κόμβος Dot Mote [28] συρρίκνωσε τις λειτουργίες και τις δυνατότητες του Rene2 Mote σε ένα συμπαγή κόμβο. Ο Dot Mote περιέλαβε τους αισθητήρες, τη μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, τη μονάδα επικοινωνίας καθώς και τη μπαταρία μέσα σε ένα προστατευτικό περίβλημα μεγέθους μιας ίντσας (2.54 εκ.).

2.2.2.7 MICA

Η σειρά των αισθητήριων κόμβων MICA αποτελεί μέλος της οικογένειας των Motes του Πανεπιστημίου Berkeley. Αυτοί οι αισθητήριοι κόμβοι αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος Smart Dust (έξυπνη σκόνη) [15], το οποίο είχε ως στόχο την ελαχιστοποίηση του μεγέθους των αισθητήριων κόμβων. Είναι ίσως οι πιο πολύπλευρες από τις ασύρματες κάρτες αισθητήρων (sensor boards) που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά, για εφαρμογές γενικού σκοπού. Η εταιρεία Crossbow έχει ήδη κατασκευάσει τέσσερα είδη motes (MICA, MICA2, MICA2DOT, MICAz) τα οποία έχουν ενσωματωμένες τις μονάδες επεξεργασίας δεδομένων, επικοινωνίας και τροφοδοσίας. Ταυτόχρονα έχει αναπτύξει και ένα μεγάλο πλήθος από κάρτες αισθητήρων (sensor boards) και πύλες (gateways) οι οποίες συνδέονται με το mote μέσω ενός 51-pin συνδετήρα. Λόγω της πολύ χαμηλής τους κατανάλωσης ενέργειας, αλλά και λόγω των μικρών τους διαστάσεων προτιμώνται σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Ο MICA πρωτοεμφανίστηκε στην αγορά το 2002. Χρησιμοποιεί τον 8-bit μικροεπεξεργαστή της εταιρείας Atmel ATMEGA103L (οι κατοπινές εκδόσεις χρησιμοποιούν τον ATMEGA128 σε mode του 103), ο οποίος έχει ρολόι στα 4 MHz. Διαθέτει μνήμη προγράμματος 128 KB flash και μνήμη δεδομένων 4 KB RAM. Επίσης μπορεί να δεχθεί μία επιπλέον εξωτερική μνήμη 512 KB flash AT45DB041B.

Χρησιμοποιεί το ραδιοπομποδέκτη RFM T1000 ο οποίος λειτουργεί στη ζώνη ISM, είτε στα 413 MHz, είτε στα 916 MHz.

Χρησιμοποιεί διαμόρφωση OOK ή ASK και επιτυγχάνει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων μέχρι και 40 Kbps, σε αποστάσεις από 9.144 μέχρι 30.48 μέτρα.. Ο MICA είναι συμβατός με το λειτουργικό σύστημα TinyOS.

2.2.2.8 MICA2

Παρά τη μεγάλη επιτυχία που είχαν στην αγορά οι MICA motes, οι απαιτήσεις για όλο και πιο σύνθετες εφαρμογές αυξάνονταν με πολύ ταχείς ρυθμούς. Αυτό το γεγονός ώθησε τους επιστή-

μονες ερευνητές του Πανεπιστημίου του Berkeley να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν το διάδοχο του MICA, ο οποίος, όχι μόνο θα είχε σημαντικά μεγαλύτερη υπολογιστική ικανότητα, αλλά θα ήταν σε θέση να επιτυγχάνει πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Η υλοποίηση όλων αυτών θα πραγματοποιείτο επάνω σε μία πλακέτα του ίδιου μεγέθους με αυτήν του MICA mote. Αυτό το νέο mote το ονόμασαν MICA2 και διατίθεται στο εμπόριο μαζί με όλα τα υπόλοιπα motes της Crossbow.

Ο MICA2 διατίθεται στο εμπόριο σε δύο βασικούς τύπους:

- *Ορθογώνιος τύπος*: Έχει μέγεθος 5.7 x 3.18 x 0.64 cm. Είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να προσαρμοσθούν σε αυτόν δύο μπαταρίες τύπου AA. Με αυτές μπορεί να λειτουργεί συνεχώς για ένα χρόνο, χωρίς να τίθεται θέμα αντικατάστασής τους, εφόσον, βέβαια, χρησιμοποιεί την κατάσταση λειτουργίας sleep mode.
- *Κυκλικός τύπος*: Έχει μέγεθος 2.5 cm. Είναι σχεδιασμένος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να προσαρμοσθεί σε αυτόν μία μπαταρία 3 V τύπου νομίσματος.

Ο πρώτος τύπος ονομάζεται MICA2 και παραπέμπει στην τεχνολογία Rene.

Ο δεύτερος τύπος πήρε το όνομα MICA2DOT και είναι η συνέχεια του MICA2.

Ο αισθητήριος κόμβος MICA2 είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, η βελτιωμένη έκδοση του MICA [28,29,30]. Χρησιμοποιεί το μικροεπεξεργαστή ATMEGA128L ο οποίος λειτουργεί στα 7.3728 MHz. Αυτός παρέχει τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού ενός μόνο τμήματος της μνήμης χωρίς να απαιτεί κάποιο βοηθητικό επεξεργαστή (π.χ. τον AT90S2313). Σε αντίθεση με το μικροεπεξεργαστή ATMEGA103L, αυτός διαθέτει μία RAM 4KB και flash memory 128 KB, ενώ μπορεί να δεχθεί και μία επιπλέον εξωτερική μνήμη flash 512 KB, την AT45DB041B.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που δίνει ο σχεδιαστής, το μεγάλο πλεονέκτημα του MICA2, εκτός από την πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την προσαρμοστικότητα του σε πολλά είδη εφαρμογών, είναι η χρησιμοποίηση του ραδιοπομποδέκτη CC1000 της εταιρείας Chipcon, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερη αυτοδυναμία από τον TR1000. Παρέχει τη δυνατότητα εύκολου προγραμματισμού για λειτουργία σε συχνότητες 433 MHz, 868/916 MHz ή 310 MHz με διαμόρφωση FSK και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 19.2 Kbps. Ο MICA2 είναι απόλυτα συμβατός με το λειτουργικό σύστημα TinyOS και επιτρέπει τον προγραμματισμό του μέσα από ένα ασύρματο κανάλι.

Μπορεί να συνδεθεί με ένα πολύ μεγάλο και ποικίλο πλήθος αισθητήρων, όπως, θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτός, βαρομετρικής πίεσης, επιτάχυνσης, αλλά και με ειδικού τύπου, όπως, σεισμικούς, ακουστικούς κτλ.

2.2.2.9 MICA2DOT

Ο MICA2DOT [30, 31, 32] πρωτοεμφανίστηκε στην αγορά το Φεβρουάριο του 2003. Έχει τα ίδια σχεδόν χαρακτηριστικά με αυτά του MICA2 και βασίζεται στην τεχνολογία DOT. Η τεχνολογία DOT χρησιμοποιείται σε εφαρμογές των οποίων ο δείκτης επιτυχίας καταγραφής των δεδομένων εξαρτάται, σε πολύ μεγάλο βαθμό, από το μέγεθος των κόμβων. Όταν, λοιπόν, κατά την ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε ένα χώρο προέχει ο παράγοντας του περιορισμένου μεγέθους των κόμβων, τότε η καλύτερη λύση που προσφέρεται είναι αυτή των dot nodes, διότι αυτοί οι κόμβοι έχουν το μέγεθος ενός νομίσματος, σε αντίθεση με τους κόμβους Rene των οποίων το μέγεθος είναι λίγο μεγαλύτερο από ένα σπирτόκουτο.

Ο MICA2DOT κατάφερε να ενσωματώσει όλες τις λειτουργίες του MICA2 σε μία κυλινδρικού σχήματος πλατφόρμα με διάμετρο μόλις μιας ίντσας (2.54 εκ.). Χρησιμοποιεί το μικροεπεξεργαστή ATMEGA128L με ρολόι στα 4 MHz, ενώ διαθέτει μόνο ένα κόκκινο LED, σε αντίθεση με το

MICA2 και το ADC1 που χρησιμοποιούν 3 (κόκκινο, κίτρινο, και πράσινο). Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ακριβώς ίδια με αυτά του MICA2.

➤ Διαφορές Μεταξύ MICA2 – MICA και MICA2 – MICA2DOT

- Σύγκριση Μεταξύ MICA2 και MICA.

Ο MICA2 παρουσιάζει τις εξής βελτιώσεις σε σχέση με τον MICA:

- Χρησιμοποιεί το μικροεπεξεργαστή ATMega128L.
- Χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη CC1000 ο οποίος έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
 - Μεγαλύτερη ανοσία στο θόρυβο,
 - Μεγαλύτερη εμβέλεια,
 - Διαμόρφωση FM (σε σύγκριση με τη διαμόρφωση AM του MICA),
 - Γραμμικό RSSI,
 - Υποστηρίζει ζώνη συχνοτήτων 400 MHz - 900 MHz.
- Χρησιμοποιεί κρύσταλλο CPU συχνότητας 7.3728 MHz, ο οποίος υποστηρίζει υψηλά UART baud rates.
- Χρησιμοποιεί υποδοχή για σύνδεση εξωτερικής κεραίας.
- Δε χρησιμοποιεί σταθεροποιητή τάσης.
- Στην κατάσταση sleep mode η κατανάλωση ρεύματος είναι μικρότερη από 10μΑ, ενώ σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας είναι σαφώς μικρότερη από αυτήν του MICA.
- Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων από τον αναλογικό/ψηφιακό μετατροπέα (ADC) στο μικροεπεξεργαστή, στη μέγιστη δυνατή ταχύτητα, είναι 20 KHz ανά 10 bits ή 50 KHz ανά 8 bits.
- Σύγκριση Μεταξύ MICA2 και MICA2DOT
 - Ο MICA2 και ο MICA2DOT χρησιμοποιούν τον ίδιο 8-bit επεξεργαστή της εταιρείας Atmel, τον ATMega128L, αλλά με διαφορετική συχνότητα ρολογιού. Δηλαδή, ο MICA2 εργάζεται στα 7.3728 MHz, ενώ ο MICA2DOT στα 4 MHz.
 - Και οι δύο τύποι χρησιμοποιούν επίσης τον ίδιο πομποδέκτη CC1000, ο οποίος έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Chipcon με ταχύτητα 19.2 Kbps/38.4 Kbaud.
Ο CC1000 είναι τεχνολογίας half-duplex, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν είναι σε θέση να αναγνωρίζει τις συγκρούσεις κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των δεδομένων μέσα στο κανάλι.
Για πρόσβαση στο μέσο επικοινωνίας χρησιμοποιείται η τεχνική CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access/Collision Avoidance – ανίχνευση φέροντος πολλαπλής πρόσβασης με αποφυγή σύγκρουσης).
 - Και τα δύο αυτά motes είναι εξοπλισμένα με μνήμη flash 512 KB η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση των πληροφοριών οι οποίες λαμβάνονται από το περιβάλλον.
 - Τέλος, ο MICA2 περιλαμβάνει τρεις φωτοдиодους (LEDs) (πράσινο, κίτρινο και κόκκινο), ενώ ο MICA2DOT διαθέτει μόνο ένα LED κόκκινου χρώματος. Βασική επίσης διαφορά είναι ότι ο MICA2 έχει σχήμα ορθογώνιο, ενώ ο MICA2DOT έχει κυκλικό σχήμα.

2.2.2.10 MICA-z

Ο MICA-z [30], [33] αποτελεί την πλέον πρόσφατη πρόταση της εταιρείας Crossbow, σχετικά με τις πλατφόρμες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Χρησιμοποιεί αρκετά νέα στοιχεία τα οποία βελτιώνουν τη συνολική λειτουργικότητα των πλατφορμών της οικογένειας MICA. Τα καινούργια χαρακτηριστικά είναι τα εξής: α) ένας ράδιο-πομποδέκτης ο οποίος λειτουργεί στη ζώνη ISM από τα 2.4 GHz μέχρι τα 2.835 GHz και είναι συμβατός με τα πρωτόκολλα IEEE 802.15.4 [34] και Zigbee [35], και β) η ασφάλεια που παρέχει κατά τη μετάδοση των δεδομένων.

Χρησιμοποιεί το μικροεπεξεργαστή ATmega128L, διαθέτει μνήμη RAM 4 KB και flash memory 128 KB, ενώ έχει τη δυνατότητα να δεχθεί μία ακόμη εξωτερική μνήμη flash, την AT45DB041B. Ο προγραμματισμός του γίνεται με το λειτουργικό σύστημα TinyOS version 1.1.7.

2.2.2.11 Spec Node

Ο Spec Node [26], [36] σχεδιάστηκε αρχικά στα τέλη του 2002 από τον Jason Hill. Πρόκειται για έναν ειδικής χρήσης αισθητήριο κόμβο, όπου, η μονάδα επεξεργασίας δεδομένων, η μνήμη και ο ραδιοπομποδέκτης βρίσκονται όλα ενσωματωμένα σε ένα κομμάτι σιλικόνης διαστάσεων 2.5 x 2.5 mm. Πιο αναλυτικά περιλαμβάνει:

- έναν υβριδικό 8-bit μικροεπεξεργαστή ο οποίος λειτουργεί στα 4-8 MHz,
- μία μνήμη RAM 3 KB και
- έναν πομποδέκτη ο οποίος λειτουργεί με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων μεταξύ 50 Kbps και 100 Kbps.

Το Μάρτιο του 2003 κατασκευάστηκε από τη National Semiconductor και στη συνέχεια κυκλοφόρησε με επιτυχία στην αγορά. Ο Spec Node περιλαμβάνει εξειδικευμένους επιταχυντές Hardware, οι οποίοι σχεδιάστηκαν με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας των multihop δικτυακών πρωτοκόλλων. Περιλαμβάνει ακόμη έναν εξαιρετικά χαμηλής ισχύος πομποδέκτη ο οποίος μειώνει δραστικά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Συμπερασματικά αναφέρεται ότι ο Spec Node εκπροσωπεί το μέλλον των ενσωματωμένων ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

2.2.3 Σύγκριση Μεταξύ των Πλέον Κοινών Τύπων Αισθητήρων

Στον Πίνακα 2.5 επιχειρείται μία συγκριτική μελέτη και παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών μεταξύ των συνηθέστερων τύπων αισθητήριων κόμβων.

- Ο *BTnode*, ο *iBadge*, ο *PicoNode* και ο *iMote*, οι οποίοι χρησιμοποιούν πομποδέκτες τεχνολογίας Bluetooth, προτείνονται ως η καλύτερη λύση για πύλες (Gateways), ή για μετάδοση κινούμενης εικόνας (video), επειδή το μεγάλο εύρος ζώνης του Bluetooth επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες.
- Ο *Medusa MK-2* και ο *SpotON* είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όταν είναι γνωστή η θέση των γειτονικών κόμβων, ως εναλλακτικός τρόπος, αντί του GPS.
- Μία καλή λύση, για περιπτώσεις όπου απαιτείται αυξημένη υπολογιστική ισχύς, είναι και τα motes *iBadge* και *WINS 3.0*. Χρησιμοποιούν ένα διπλό πυρήνα επεξεργασίας δεδομένων, ο οποίος αποτελείται από ένα μικροελεγκτή και ένα DSP, και είναι σε θέση να επεξεργαστεί τα πλέον απαιτητικά σε υπολογιστική ισχύ δεδομένα.

Επιπλέον, η πλατφόρμα *WINS 3.0* παρέχει τη δυνατότητα εύκολης διασύνδεσης με σειρά πομποδεκτών, εκτός από αυτόν που έχει ήδη ενσωματωμένο.

Πίνακας 2-5: Τεχνικά χαρακτηριστικά των συνηθέστερων τύπων αισθητήριων κόμβων

Αισθητήριος Κόμβος (Sensing Node)	Επεξεργαστής (CPU)	Μνήμη (Memory)	Αισθητήρες Εισόδου/Εξόδου (I/O Sensors)	Πομποδέκτης (Radio)
BTnode	Atmel ATmega128L	64+180 KB SRAM, 128 KB Flash ROM, 4 KB EEPROM	UART, GPIO, SPI, I ² C, ADC, Clock, Timer, LEDs Standard Molex 1.25 mm Wire-to-Board Hirose DF17 Board-to-Board connectors	CC1000
UCLA iBadge	Atmel ATMEGA and TI DSP C5416	64+180 KB SRAM,	υγρασία, θερμοκρασία, πίεση, επιταχυνσιόμετρο, μαγνητόμετρο, Acoustic in/out+DSP	Bluetooth Radio (64 Kbps)
Medusa MK-II	40 MHz ARM THUMB	1 MB Flash, 136 KB RAM	Ultrasound Transceiver (Πομποδέκτες Υπέρηχων)	RFM (ίδια όπως ο MICA)
CSIRO Fleck	Atmel ATmega128L	64+180 KB SRAM,	υγρασία, θερμοκρασία, πίεση	CC1000
U3			αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης, φωτόμετρο, θερμοόμετρο	Wireless IrDA
EYES	MSP 430F149	60 KB program memory, 2 KB of data memory, 4KB EEPROM	AD and I/O, UART, JTAG interface and sensor board με πυξίδα, επιταχυνσιόμετρο, αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, φωτός, μικρόφωνο και γραμμές push-button	RFM TR1001
Rockwell Wins-Hidra Nodes	StrongARM 1100 (133 MHz)	4 MB Flash memory, 1 MB SRAM	σεισμικός αισθητήρας (geophone), ακουστικός αισθητήρας, πίεσης και θερμοκρασίας, μαγνητόμετρο, επιταχυνσιόμετρο	Connexant's RDSSS9M (100 Kbps)
Sensoria WINS 3.0	Intel PXA255	64 MB SDRAM	GPS, USB (2 host ports, 1 device port), RS-232 serial (5 generic + 1 Linux console), Audio in/out (1 stereo input), PCMCIA/CardBus (1 external slot)	Dual embedded 802.11b modules
BWRC Piconode	StrongARM 1100	4 MB RAM, 4 MB flash memory	2 Sensor Boards: Board 1: temperature, humidity, light, sound Board 2: temperature, acceleration, magnetic fields and provision for GPS	Bluetooth Proxim
SpotON	MC68EZ328	64+180 KB SRAM,	Accelerometer and Infrared detector	RF Monolithic TR100 916 MHz radio
UAMPS MIT	StrongARM SA-1100	16 MB RAM, 512 KB ROM	Σεισμικοί (geophone), και Ακουστικοί αισθητήρες	Interface to the SA-1100 ISM 2.45 GHz with 1 Mbps and range up to 15 meters
Imote	ARM core 12 MHz	64 KB SRAM, 512 KB Flash	USB and UART connectors	Bluetooth with 30m range
weC	Atmel AVR AT90S2313	64+180 KB SRAM,	Αισθητήρες φωτός και θερμοκρασίας	RFM TR1000 RF
Rene	Atmel8535	512 KB RAM, 8 KB Flash	Large expansion connector	916 MHz radio with Bandwidth of 10 Kbps
Dot	Atmega 163	1 KB RAM, 8-16 KB Flash	Large expansion connector	
MICA2	Atmel Atmega 128L	4 KB RAM, 128 KB Flash	Large expansion connector	315, 433 or 868/916 MHz Multi-Channel Transceiver with 38 Kbaud
MICA-z	Atmel Atmega 128	4 KB RAM, 128 KB Flash	Large expansion connector	IEEE 802.15.4/ Zigbee compliant RF Transceiver
Spec	4-8 MHz Custom 8-bit	3 KB RAM	I/O Pads on Chip, ADC	50-100 Kbps

- Οι πλατφόρμες *μAMPS* και *EYES* προσφέρουν μία πολύ καλή λύση για τις περιπτώσεις εκείνες όπου απαιτείται πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- Ο *iMote* της εταιρείας Intel, και οι *Rockwell Wins-Hidra Nodes*, χρησιμοποιούν ένα μεγάλης υπολογιστικής ισχύος μικροεπεξεργαστή, γεγονός που τον καθιστά ως τον πλέον κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές επεξεργασίας δεδομένων.
- Επίσης, μία εξίσου καλή λύση, όπου υπάρχει απαίτηση για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, είναι και ο *CSIRIO Fleck* ο οποίος έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια.
- Ο *U³* παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να αντικαθιστά οποιοδήποτε λειτουργικό τμήμα έχει υποστεί βλάβη.
- Οι *Spec nodes* αποτελούν το μέλλον των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, εξαιτίας του εξαιρετικά μικρού τους μεγέθους.
- Ο *MICA2* αποτελεί μία πολύ καλή λύση σε εφαρμογές όπου προέχουν οι μικρές διαστάσεις αλλά και το χαμηλό κόστος. Για παράδειγμα, μπορεί πάρα πολύ εύκολα να συνδεθεί με αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης, για την ασφάλεια ενός κτηρίου. Επιπρόσθετα, μπορεί να συνεργάζεται με τους *Spec nodes* και να λαμβάνει δεδομένα από αυτούς. Η μνήμη του, αλλά και η επεξεργαστική του ισχύς, είναι αρκετά ικανοποιητικές, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών, όπως επίσης και να διαχειριστεί δεδομένα από δεκάδες *Spec nodes*. Όμως τα πραγματικά σημαντικά του πλεονεκτήματα είναι:
 - Η ευκολία με την οποία μπορεί να συνδεθεί με ένα μεγάλο φάσμα αισθητήρων και
 - Η πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειάς του.

Παρά το γεγονός, ότι ο *MICA2* μπορεί να συνδεθεί με ένα μεγάλο πλήθος άλλων συσκευών, διαπιστώνεται ότι δεν έχει τη δυνατότητα να ανταποκριθεί στο τεράστιο εύρος φάσματος των δεδομένων τα οποία προέρχονται από σύνθετους αισθητήρες.

Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις εκείνες όπου επιχειρεί να επεξεργαστεί δεδομένα εικόνας ή ήχου μεγάλου εύρους ζώνης, τότε η ενέργεια που καταναλώνει αυξάνεται δραματικά, και τούτο, βεβαίως, έχει ως συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Παρά τις όποιες αδυναμίες του, ο *MICA2* αποτελεί την καλύτερη λύση για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

2.3 Τεχνολογίες Ασύρματων Δικτύων

Σήμερα, οι επικρατέστερες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων είναι οι εξής τρεις:

- Ad hoc,
- Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και
- IEEE 802.11.

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μία εκτεταμένη αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επειδή τα εν λόγω δίκτυα παρουσιάζουν πολλά κοινά σημεία με τα ad hoc δίκτυα, θα ήταν αρκετά χρήσιμο να γίνει μία αναφορά στις ουσιαστικές διαφορές τους, αλλά και να διαπιστωθεί κατά πόσον αυτοί οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στα δίκτυα αισθητήρων.

Η αναφορά θα επικεντρωθεί κατά κύριο λόγο στους μηχανισμούς ελέγχου ισχύος.

2.3.1 Ασύρματα Δίκτυα Ad Hoc

Στα προσχεδιασμένα δίκτυα, η τοπολογία του δικτύου είναι γνωστή εκ των προτέρων. Αντίθετα, στα δίκτυα ad hoc η τοπολογία του δικτύου θα πρέπει να δομηθεί σε πραγματικό χρόνο και επιπλέον να αναβαθμίζεται περιοδικά σε περίπτωση που κάποιος από τους κόμβους παρουσιάσει κάποια βλάβη ή καταστραφεί, ή όταν ένας καινούργιος έλθει να προστεθεί στο δίκτυο. Επιπλέον, σε αυτά τα δίκτυα δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη σταθμού βάσης. Το βασικότερο όλων είναι ότι τα δίκτυα ad hoc δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των περιορισμένων αποθεματικών ενέργειας, για τον απλούστατο λόγο ότι αυτά έχουν αδιάλειπτη τροφοδοσία [37].

Κάθε κόμβος οφείλει να γνωρίζει την ταυτότητα καθώς και τη θέση των γειτονικών του κόμβων για να φέρει εις πέρας επιτυχώς το έργο της επεξεργασίας των δεδομένων αλλά και της μεταξύ τους επικοινωνίας.

2.3.2 Πρωτόκολλο Ασύρματης Επικοινωνίας IEEE 802.11

Το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11 αποτελεί μία ξεχωριστή οικογένεια πρωτοκόλλων την οποία χρησιμοποιούν τα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας WLAN (Wireless Local Area Networks) με σκοπό τη μεταξύ τους επικοινωνία [37,38]. Το πρόβλημα της χρησιμοποίησης αυτών των πρωτοκόλλων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εστιάζεται κυρίως στο γεγονός ότι τα WLAN έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ανάγκες δικτύων τα οποία δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των περιορισμένων αποθεματικών ενέργειας, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα υπολογιστών όπου η τροφοδοσία τους με ισχύ είναι συνεχής, και δεν έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ανάγκες αυτόνομων συσκευών όπως είναι οι αισθητήριοι κόμβοι, των οποίων η διάρκεια ζωής εξαρτάται άρρηκτα από τα περιορισμένα τους αποθέματα ενέργειας.

Το IEEE 802.11 ορίζει δύο πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης:

- Το PCF (Point Coordination Function) το οποίο είναι *Κεντρικοποιημένο* και
- Το DCF (Distributed Coordination Function) το οποίο είναι *Κατανεμημένο*. Εδώ χρησιμοποιείται το DCF.

Το DCF στο IEEE 802.11 βασίζεται στο CSMA/CA. Η ανίχνευση φέροντος μπορεί να είναι πραγματική ή εικονική (virtual).

Η εικονική ανίχνευση φέροντος γίνεται με βάση το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση του κάθε πλαισίου, και αναγράφεται κάθε φορά στην επικεφαλίδα των RTS (Request-To-Send), CTS (Clear-To-Send) και DATA πλαισίων.

Ο χρόνος μετάδοσης στην επικεφαλίδα είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο ο κόμβος πηγή (ή πηγαίος κόμβος – source node) θα πρέπει να λάβει επιβεβαίωση (Acknowledgement – ACK) για τη λήψη των DATA από τον κόμβο προορισμού. Για παράδειγμα, το πεδίο που αναγράφει το χρόνο μετάδοσης στο πλαίσιο RTS, περιλαμβάνει το συνολικό χρόνο που θα απαιτηθεί για τη μετάδοση των CTS, DATA και ACK πλαισίων. Με παρόμοιο τρόπο, ο χρόνος μετάδοσης που αναγράφεται στην επικεφαλίδα του πλαισίου CTS, περιλαμβάνει το συνολικό χρόνο που θα απαιτηθεί για τη μετάδοση των πλαισίων DATA και ACK, ενώ στην επικεφαλίδα του πλαισίου DATA αναγράφεται ο χρόνος που θα απαιτηθεί για τη μετάδοση του πλαισίου ACK.

Στο IEEE 802.11, κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα ο οποίος ονομάζεται NAV (Network Allocation Vector – Άνυσμα Κατανομής Δικτύου) και στον οποίο αναγράφονται οι χρόνοι που απόμειναν για την ολοκλήρωση των τρεχουσών μεταδόσεων. Ο πίνακας NAV κάθε κόμβου ενημερώνεται συνεχώς με βάση τις επικεφαλίδες των RTS, CTS και DATA πακέτων που λαμβάνουν οι κόμβοι. Το κανάλι μετάδοσης είναι απασχολημένο όταν η πραγματική ή εικονική ανίχνευση φέροντος δείχνει ότι είναι πράγματι απασχολημένο. Οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της εμβέλειας

μετάδοσης και εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος άλλων κόμβων ενημερώνουν διαρκώς το δικό τους πίνακα NAV κάθε φορά που λαμβάνουν πλαίσια RTS-CTS-DATA-ACK. Έτσι λοιπόν, κάθε φορά που οι κόμβοι κοιτάζουν τον πίνακα NAV γνωρίζουν το χρόνο έναρξης και λήξης μιας μετάδοσης.

Το IFS (Interval Frame Space) είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των μεταδιδόμενων πλαισίων. Από τη στιγμή που θα αποσταλεί ένα πλαίσιο πρέπει να παρέρθει ένα συγκεκριμένο διάστημα νεκρού χρόνου πριν να δοθεί η άδεια σε οποιονδήποτε σταθμό να στείλει ένα άλλο καινούργιο πλαίσιο.

Το IEEE 802.11 ορίζει τα εξής τέσσερα διαστήματα μεταξύ πλαισίων (IFSs):

- SIFS (Short Interframe Space),
- PIFS (PCF Interframe Space),
- DIFS (DCF Interframe Space) και
- EIFS (Extended Interframe Space).

Το IFS καθορίζει επίπεδα προτεραιότητας για την πρόσβαση στο κανάλι μετάδοσης.

Το SIFS είναι το μικρότερο από τα IFSs και χρησιμοποιείται μετά τα πλαίσια RTS, CTS και DATA παρέχοντας σε αυτά μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Στο DCF, όταν το κανάλι είναι αδρανές, τότε ο κόμβος αναμένει για DIFS χρόνο πριν μεταδώσει οποιοδήποτε πακέτο.

Όταν κάποιοι κόμβοι μεταδίδουν πλαίσια RTS ή CTS, τότε, όσοι κόμβοι βρίσκονται εντός της εμβέλειας μετάδοσης των κόμβων που τα μεταδίδουν θα ενημερώνουν συνεχώς το δικό τους πίνακα NAV σύμφωνα με τις τιμές που αναγράφονται σε αυτά. Όμως, οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν με ακρίβεια τα πλαίσια που λαμβάνουν με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να γνωρίζουν τι είδους πλαίσια μεταδίδονται (RTS, CTS, DATA ή ACK) και συνεπώς να μη γνωρίζουν για πόσο ακριβώς χρονικό διάστημα θα πρέπει να αναβάλλουν τις μεταδόσεις τους. Άρα, όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύει μία μετάδοση, αλλά δεν είναι ταυτόχρονα σε θέση να την αποκωδικοποιήσει, τότε, προκειμένου να μην παρεμβάλλει τον κόμβο πηγή, αποφασίζει να μη μεταδώσει για χρόνο ίσο με τη διάρκεια ενός EIFS πλαισίου. Ο κύριος σκοπός του πλαισίου EIFS είναι να παρέχει αρκετό χρόνο στον κόμβο πηγή για να μπορεί να λάβει το πλαίσιο ACK, πριν οποιοσδήποτε άλλος κόμβος επιχειρήσει να μεταδώσει, και κατά συνέπεια να καταστρέψει το πλαίσιο ACK. Το EIFS υπολογίζεται με βάση τα DIFS και το συνολικό χρόνο που απαιτείται μέχρι τη μετάδοση και του πλαισίου ACK, έχοντας πάντοτε ως βάση το ρυθμό μετάδοσης των πλαισίων στο δίκτυο.

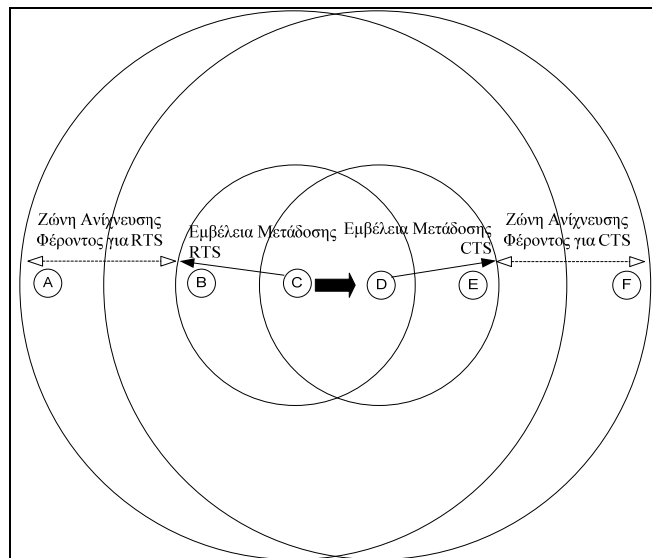
Στο IEEE 802.11, το EIFS χρησιμοποιείται όταν υπάρχει κάποια ένδειξη από το φυσικό επίπεδο ότι ξεκίνησε μία μετάδοση πλαισίου αλλά δεν ολοκληρώθηκε σωστά η λήψη του.

Έτσι λοιπόν, οποτεδήποτε ένας κόμβος ανιχνεύει μία μετάδοση, αλλά δεν την αποκωδικοποιεί σωστά, αναβάλλει οποιαδήποτε μετάδοσή του για χρόνο ο οποίος είναι ίσος με τη διάρκεια ενός πλαισίου EIFS.

Πρέπει να τονιστεί, ότι το IEEE 802.11 δεν είναι σε θέση να αποτρέψει πλήρως τις συγκρούσεις εξαιτίας των κρυμμένων τερματικών. Κόμβοι που βρίσκονται εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος, αλλά όμως όχι και του πομπού, μπορούν να προκαλέσουν συγκρούσεις κατά τη λήψη ενός πακέτου DATA από το δέκτη.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος C (Σχήμα 2.3) μεταδίδει ένα πακέτο στον κόμβο D. Όταν οι κόμβοι C και D μεταδίδουν ένα RTS και CTS πακέτο, αντίστοιχα, τότε οι κόμβοι A και F

θα αναβάλλουν οποιαδήποτε μετάδοση για χρόνο ίσο με ένα EIFS πλαίσιο. Κατά τη διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου DATA από τον κόμβο C, ο κόμβος A αναβάλλει οποιαδήποτε μετάδοση, διότι ανιχνεύει τη μετάδοση του πλαισίου DATA από τον κόμβο C. Παρόλα αυτά, ο κόμβος F δεν λαμβάνει κανένα σήμα κατά τη διάρκεια μετάδοσης του πλαισίου DATA από τον κόμβο C, και έτσι θεωρεί ότι το κανάλι είναι αδρανές. Έτσι, εάν ο κόμβος F ξεκινήσει μία καινούργια μετάδοση τη στιγμή της μετάδοσης του πλαισίου DATA, τότε θα το καταστρέψει και ο κόμβος D δεν θα το λάβει ποτέ (καθώς ο κόμβος F βρίσκεται έξω από την εμβέλεια μετάδοσης του D, λόγω συμμετρίας, και ο D βρίσκεται έξω από την εμβέλεια μετάδοσης του F). Παρόλα αυτά, επειδή ο F βρίσκεται εντός της ζώνης ανίχνευσης φέροντος του D, λόγω συμμετρίας, ο F θα παρεμβάλλει τον κόμβο D, όταν αυτός λαμβάνει το πλαίσιο DATA.



Σχήμα 2-3: Μετάδοση πακέτων με το πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας IEEE 802.11

2.3.2.1 Τύποι Πρωτοκόλλων Ασύρματης Επικοινωνίας της Οικογένειας IEEE 802.11

Η οικογένεια *IEEE 802.11* [37,38] συμπεριλαμβάνει διάφορες τεχνικές διαμόρφωσης οι οποίες χρησιμοποιούν το ίδιο βασικό πρωτόκολλο. Οι πλέον δημοφιλείς από αυτές είναι εκείνες που προσδιορίζονται από τα πρωτόκολλα *IEEE 802.11a* [39], *IEEE 802.11b* [40] και *IEEE 802.11g* [41], και αποτελούν βελτιωμένες τροποποιήσεις του αρχικού πρότυπου (original standard). Το *IEEE 802.11a* [39] ήταν το αρχικό πρότυπο της ασύρματης δικτύωσης (wireless networking standard), αλλά το *IEEE 802.11b* [40] ήταν το πρώτο που έγινε ευρέως αποδεκτό, ακολουθούμενο από τα *IEEE 802.11g* [41] και *IEEE 802.11n* [42]. Η ασφάλεια ήταν αρχικά επίτηδες αναποτελεσματική και οφειλόταν σε λόγους εξωτερικής πολιτικής μερικών κυβερνήσεων, αλλά αργότερα εμπλουτίστηκε με την προσθήκη του *IEEE 802.11i* [43] ύστερα από κυβερνητικές και νομοθετικές αλλαγές. Το *IEEE 802.11n* [42] αποτελεί μία καινούργια τεχνική πολυρευματικής διαμόρφωσης (multi-streaming modulation technique) η οποία βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της πλήρους ανάπτυξής της, όμως, παρόλα αυτά, τα προϊόντα που βασίζονται σε αυτές τις πρόχειρες ιδιοκτησιακές εκδόσεις (pre-draft proprietary versions) πωλούνται στην αγορά.

Άλλα πρότυπα (standards), που ανήκουν στην ίδια οικογένεια, όπως είναι τα *IEEE 802.11h* [44], *IEEE 802.11j* [45], αποτελούν βελτιωμένες επεκτάσεις, ή διορθώσεις των προηγούμενων προδιαγραφών [38].

Το πρότυπο *IEEE 802.11a* [39] αποτελεί επέκταση του *IEEE 802.11* [38], και εφαρμόζεται στα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας (wireless LANs) μεταδίδοντας 54 Mbps στη ζώνη

συχνοτήτων των 5GHz. Το *IEEE 802.11a* [39] προτιμά να χρησιμοποιεί ένα σχήμα κωδικοποίησης OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) παρά τα FHSS or DSSS.

Το πρότυπο *IEEE 802.11b* [40] (το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως *IEEE 802.11 High Rate* ή Wi-Fi) αποτελεί και αυτό επέκταση του *IEEE 802.11* [38], και εφαρμόζεται στα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας μεταδίδοντας 11 Mbps στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz. Το *IEEE 802.11b* χρησιμοποιεί μόνο DSSS. Το *IEEE 802.11b* [40] ήλθε το 1999 να επικυρώσει το πρότυπο *IEEE 802.11*, επιτρέποντας ασύρματη λειτουργικότητα συγκρινόμενο με το Ethernet.

Το πρότυπο *IEEE 802.11g* [41] εφαρμόζεται επίσης στα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας μεταδίδοντας 20+ Mbps στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz.

Τα πρότυπα *IEEE 802.11b* [40] και *IEEE 802.11g* [41] χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων ISM στα 2.4 GHz, και λειτουργούν στις ΗΠΑ σύμφωνα με το άρθρο 15 του νόμου που αναφέρεται στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (US FCC - Federal Communications Commission - Rules and Regulations). Λόγω αυτής της επιλογής ζώνης συχνοτήτων, ο εξοπλισμός των προτύπων *IEEE 802.11b* [40] και *IEEE 802.11g* [41] μπορεί να υποφέρει περιπτώσιακά από παρεμβολές (interference) από φούρνους μικροκυμάτων (microwave ovens) και ασύρματα τηλέφωνα (cordless telephones). Οι συσκευές Bluetooth, παρόλο που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, θεωρητικά τουλάχιστον, δεν παρεμβάλλονται στη λειτουργία του *IEEE 802.11b/g* [40] διότι χρησιμοποιούν τη μέθοδο σηματοδότησης (signaling method) FHSS (frequency hopping spread spectrum) ενώ το *IEEE 802.11b/g* [40] χρησιμοποιεί τη μέθοδο σηματοδότησης DSSS (direct sequence spread spectrum). Το *IEEE 802.11a* [39] χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων U-NII στα 5 GHz, η οποία προσφέρει 8 μη επικαλυπτόμενα κανάλια (non-overlapping channels) και όχι 3 που προσφέρει η ζώνη συχνοτήτων ISM στα 2.4GHz.

Το τμήμα του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιείται διαφέρει από χώρα σε χώρα. Στις ΗΠΑ, οι συσκευές που χρησιμοποιούν τις τεχνικές διαμόρφωσης *IEEE 802.11a* [39] και *IEEE 802.11g* [41] μπορούν να λειτουργούν χωρίς ειδική άδεια, όπως αυτό ερμηνεύεται στο άρθρο 15 του νόμου που αναφέρεται στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα κανάλια από το 1 μέχρι και το 6 (*IEEE 802.11b*) εμπίπτουν στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz των ραδιοερασιτεχνών (amateur radio band). Οι εξουσιοδοτημένοι ραδιοερασιτέχνες χειριστές (amateur radio operators) μπορούν να λειτουργούν τις συσκευές που χρησιμοποιούν το *IEEE 802.11b/g* [40] σύμφωνα με το άρθρο 97 του νόμου που αναφέρεται στην Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών, επιτρέποντας αυξημένη ισχύ στην έξοδο αλλά όχι εμπορικό περιεχόμενο ή κρυπτογράφηση.

Το πρότυπο *IEEE 802.11n* [42] είναι επίσης μία προταθείσα προσθήκη στο πρότυπο *IEEE 802.11* [38] για τη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος. Το πρότυπο *IEEE 802.11n* αναμένεται να είναι πολύ πιο γρήγορο από τα άλλα πρότυπα, όπως π.χ. τα *IEEE 802.11b* και *IEEE 802.11g* [41], και υπάρχουν πολλοί ειδικοί οι οποίοι διακηρύσσουν ότι αυτή η ασύρματη τεχνολογία θα δώσει τελικά τη δυνατότητα στους καταναλωτές να κινηθούν πέρα από το παραδοσιακό ενσύρματο 10/100 LAN.

Το πρότυπο *IEEE 802.11i* [43] αποτελεί προσθήκη του προτύπου *IEEE 802.11* [38], έκδοση 1999 (Reaff 2003). Αφορά στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων – ειδικές απαιτήσεις – τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα (Local and metropolitan area networks). Ειδικές απαιτήσεις - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) και προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (PHY) - Προσθήκη 6: Επεκτάσεις ασφαλείας (Security Enhancements) σε επίπεδο MAC.

Το πρότυπο *IEEE 802.11h* [44] αφορά στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων – ειδικές απαιτήσεις LAN/MAN – Part 11: Wireless LAN Medium

Access Control (MAC) και προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (PHY): Φάσμα και προσθήκες διαχείρισης εκπεμπόμενης ισχύος (Spectrum and Transmit Power Management Extensions) στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz στην Ευρώπη.

Το πρότυπο *IEEE 802.11j* [45] αποτελεί προσθήκη του προτύπου *IEEE 802.11*, έκδοση 2004. Αφορά την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ επικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων – ειδικές απαιτήσεις – τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα (Local and metropolitan area networks) – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) και προδιαγραφές φυσικού επιπέδου (PHY) – Προσθήκη 7: Λειτουργία στην Ιαπωνία στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 4.9 GHz – 5 GHz.

Το πρότυπο *IEEE 802.11d* [46] αποτελεί μία προσθήκη στις προδιαγραφές του προτύπου *IEEE 802.11* υποστηρίζοντας "πρόσθετα ρυθμιστικά πεδία ορισμού" (additional regulatory domains). Αυτή η υποστήριξη συμπεριλαμβάνει την προσθήκη ενός στοιχείου για πληροφορίες χωρών στα beacons, αιτήσεις διερεύνησης (probe requests), και αποκρίσεις διερευνήσεων (probe responses). Το στοιχείο για πληροφορίες χωρών απλοποιεί τη δημιουργία του *IEEE 802.11* [σημεία ασύρματης πρόσβασης - Wireless access points] και των συσκευών πελατών (client devices) που συναντώνται σε κανονισμούς που επιβάλλονται σε διάφορα μέρη του κόσμου. Η προσθήκη έχει ενσωματωθεί στο δημοσιευμένο πρότυπο IEEE 802.11-2007#802.11-2007 [IEEE 802.11-2007].

Το πρότυπο *IEEE 802.11e* [47] αποτελεί και αυτό βελτιωμένη έκδοση του προτύπου *IEEE 802.11* προσδιορίζοντας μία σειρά από βελτιώσεις στην ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service) των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων τοπικής εμβέλειας, μέσα από τροποποιήσεις του επιπέδου MAC. Αυτό το πρότυπο θεωρείται ότι είναι εξέχουσας σπουδαιότητας σε εφαρμογές οι οποίες είναι ευαίσθητες στη χρονική καθυστέρηση, όπως είναι, π.χ. το Voice over Wireless IP και το Streaming Multimedia. Η τροποποίηση αυτού του προτύπου ενσωματώθηκε στο δημοσιευμένο πρότυπο *IEEE 802.11* [38] το 2007.

2.3.3 Διαφορές Μεταξύ Ασύρματων Δικτύων Ad Hoc και Δικτύων Αισθητήρων

Οι βασικές διαφορές μεταξύ ασύρματων δικτύων ad hoc και δικτύων αισθητήρων είναι οι εξής:

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ότι σε ένα δίκτυο ad hoc.
- Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολύ πιο πυκνά τοποθετημένοι από ότι σε ένα δίκτυο ad hoc.
- Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολύ πιο επιρρεπείς σε βλάβες και πολύ πιο εύκολο να καταστραφούν εξ' αιτίας του γεγονότος ότι λειτουργούν εκτεθειμένοι σε αντίξοες συνθήκες και η αντικατάστασή τους είναι πολύ δύσκολη, αν όχι ανέφικτη.
- Η τοπολογία ενός δικτύου αισθητήρων αλλάζει πολύ συχνά.
- Στα περισσότερα δίκτυα ad hoc, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι από *Σημείο σε Σημείο (point-to-point)*, ενώ αντίθετα, στα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιείται κυρίως η *Εκπομπή (broadcast)*.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι έχουν περιορισμένη αποθηκευτική ικανότητα (μνήμη), επεξεργαστική ισχύ και διαθέσιμα ποσά ενέργειας.
- Ο κάθε αισθητήριο κόμβος δε διαθέτει τη δική του διεύθυνση (ID) ώστε να είναι αναγνωρίσιμος από το παγκόσμιο δίκτυο, και τούτο εξαιτίας της πολυπλοκότητας που εισάγει αυτό (π.χ. μεγάλο μέγεθος επικεφαλίδας), αλλά και λόγω του εξαιρετικά μεγάλου αριθμού αισθητήριων κόμβων στο δίκτυο.

2.4 Ιδιαιτερότητες στη Σχεδίαση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, η δομή και η λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων διαφέρει ουσιαστικά από αυτήν των παραδοσιακών δικτύων. Στη συνέχεια αυτής της ενότητας παρουσιάζονται, όσο γίνεται αναλυτικότερα, οι ιδιαιτερότητες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη, όχι μόνο κατά τη σχεδίαση των αισθητήριων κόμβων, αλλά και κατά τον προγραμματισμό των πλέον κατάλληλων πρωτοκόλλων.

2.4.1 Μεγάλη Εξάρτηση των Κόμβων από την Κατανάλωση Ενέργειας

Η απαίτηση για πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί το σημαντικότερο περιορισμό. Προκειμένου όμως να είναι εφικτή αυτή η απαίτηση, είναι απαραίτητη η ταυτόχρονη συνύπαρξη δύο εξίσου σημαντικών παραγόντων.

- Πρώτον, η χρήση υλικών με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, και
- Δεύτερον, η χρήση τεχνικών και πρωτοκόλλων που θα εξασφαλίζουν την αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας.

Ενέργεια καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των *τριών Βασικών Λειτουργιών του κάθε Αισθητήριου Κόμβου*, δηλαδή,

- κατά την ανίχνευση και μέτρηση πληροφοριών από το περιβάλλον,
- κατά την επεξεργασία των πληροφοριών που έχουν ληφθεί, και
- κατά την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και του σταθμού βάσης.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε επίπεδο υλικού (Hardware) επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καταναλώνουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια ανά κύκλο του ρολογιού, ενώ βρίσκεται παράλληλα σε εξέλιξη μεγάλη έρευνα η οποία σχετίζεται με τη χρήση των πλέον κατάλληλων τύπων μπαταριών που θα τροφοδοτούν τους αισθητήριους κόμβους. Επιπλέον, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για την εξεύρεση των καταλληλότερων μεθόδων που θα έχουν ως στόχο την παράταση ζωής των αισθητήριων κόμβων. Αυτές οι μέθοδοι εστιάζονται στην άντληση ενέργειας από το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα από τον ήλιο με χρήση ηλιακών συλλεκτών φωτός, ή ακόμη και από τις δονήσεις του εδάφους [15], [48].

2.4.1.1 Κατανάλωση Ενέργειας κατά τη Διάρκεια της Επεξεργασίας Δεδομένων

Πρόσφατες έρευνες [8] έχουν δείξει ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στη φάση της επεξεργασίας δεδομένων είναι κατά πολύ μικρότερη από εκείνη που καταναλώνεται στη φάση της επικοινωνίας (εκπομπή/λήψη δεδομένων).

Οι προσπάθειες των ερευνητών εστιάζονται στην όσο το δυνατόν καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνουν από τη μονάδα ανίχνευσης ώστε να στέλνονται λιγότερα και μικρότερα πακέτα κατά τη διάρκεια της εκπομπής/λήψης. Για αυτόν ακριβώς το σκοπό είναι απαραίτητη η σχεδίαση των πλέον κατάλληλων, ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης που θα διασφαλίζουν την παραπάνω απαίτηση.

Η ενέργεια, την οποία καταναλώνει ένας επεξεργαστής, εξαρτάται από δύο πολύ σημαντικούς παράγοντες:

- την τάση και
- τη συχνότητα λειτουργίας του.

Σε αυτήν εδώ την περίπτωση, το περίγραμμα μέσα στο οποίο κινούμαστε για την εξοικονόμηση ενέργειας, ονομάζεται *Δυναμικός Χρονοπρογραμματισμός Τάσης (Dynamic Voltage Scheduling – DVS)*. Αυτό το σχήμα εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ο μικροεπεξεργαστής του κόμβου εργάζεται όσο το δυνατόν λιγότερες φορές με το μέγιστο της απόδοσής του (αναλυτική περιγραφή αυτού του σχήματος αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4).

2.4.1.2 Μεγάλη Κατανάλωση Ενέργειας κατά τη Διάρκεια της Επικοινωνίας

Μεγάλη έρευνα, όσον αφορά τις τεχνικές και τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των διαθέσιμων ποσών ενέργειας, διεξάγεται κυρίως προς την κατεύθυνση περιορισμού της διάρκειας επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήριων κόμβων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα, με ακτίνες laser (οπτικά), με υπέρυθρες και με ραδιοσυχνότητες (RF). Παρά το γεγονός ότι οι δύο πρώτοι τρόποι ασύρματης επικοινωνίας απαιτούν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, προτιμάται τελικά η ιδιαίτερα δημοφιλής επικοινωνία με χρήση ραδιοσυχνοτήτων, ενώ, βεβαίως, δημιουργείται ταυτόχρονα η ανάγκη κατασκευής περισσότερο ενεργειακά αποδοτικών ράδιο-πομποδεκτών. Το πλαίσιο μέσα στο οποίο κινούμαστε, προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, ονομάζεται *Δυναμική Διαχείριση της Ισχύος (Dynamic Power Management – DPM)* (αναλυτική περιγραφή αυτού του σχήματος αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4).

Άλλοι σημαντικοί παράγοντες ελαχιστοποίησης της καταναλισκόμενης ενέργειας από τους αισθητήριους κόμβους, είναι η επιλογή:

- της κατάλληλης *Τεχνικής Διαμόρφωσης*,
- της κατάλληλης *Τεχνικής Αποδιαμόρφωσης*,
- της κατάλληλης *Τεχνικής Φιλτραρίσματος*, καθώς και
- της κατάλληλης *Ζώνης Συχνοτήτων*.

Τα είδη διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα είναι συνήθως η OOK (On-Off Keying), η ASK (Amplitude Shift Keying), και η FSK (Frequency Shift Keying).

- Η OOK αποτελεί μία παραλλαγή της ASK όπου δεν υπάρχει φέρον κατά τη διάρκεια μετάδοσης του λογικού μηδέν (0). Είναι μία αρκετά δημοφιλής μέθοδος διαμόρφωσης λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής, αφενός, και λόγω του πλεονεκτήματος που διαθέτει ώστε να επιτρέπει στον πομπό να παραμένει αδρανής (idle) κατά τη διάρκεια μετάδοσης του λογικού μηδέν, αφετέρου. Ως εκ τούτου, εξοικονομείται αρκετή ενέργεια. Όμως, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και ένα σημαντικό μειονέκτημα. Είναι πολύ ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου και αρκετά ευάλωτη σε σφάλματα συγχρονισμού κατά τη μετάδοση μεγάλου μήκους στοιχειοσειρών από μηδενικά, αφού ο δέκτης παραμένει αδρανής κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.
- Η FSK παρουσιάζει πολύ καλύτερη συμπεριφορά στην παρουσία ανεπιθύμητων σημάτων, αλλά είναι πολύ δυσκολότερη η κατασκευή της.
- Η ASK επηρεάζεται λιγότερο από το θόρυβο, σε σύγκριση με την OOK, ενώ η κατασκευή της είναι ευκολότερη και συνεπώς κοστίζει λιγότερο από την FSK.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, ότι οι τεχνικές OOK και ASK απαιτούν την παρουσία μιας διάταξης *Αυτομάτου Ελέγχου Κέρδους (AGC – Automatic Gain Control)* για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, η οποία, όμως, δεν είναι απαραίτητη στην FSK.

Η επιλογή της κατάλληλης ζώνης συχνοτήτων για τις ασύρματες ζεύξεις είναι πολύ σημαντική διότι αφορά το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης κεραίας, αφενός, και την εξοικονόμηση της ενέργειας, αφετέρου. Για βέλτιστη εκπομπή και λήψη σήματος συνιστάται η χρήση κεραίας $\lambda/4$, όπου λ το μήκος κύματος του φέροντος. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί, ότι η χρησιμοποίηση υψηλότερων συχνοτήτων συνεπάγεται την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας. Έχοντας λοιπόν κανείς κατά νου όσα ήδη έχουν αναφερθεί, καταλήγει εύκολα στο συμπέρασμα ότι μία πολύ καλή επιλογή είναι η χρησιμοποίηση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής ζώνης συχνοτήτων (ISM band – Industrial, Scientific and Medicine band), και μάλιστα, πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση της συχνότητας των 433 MHz για την Ευρώπη και των 916 MHz για τη Βόρεια Αμερική. Το μεγάλο πλεονέκτημα της ζώνης συχνοτήτων ISM είναι η δωρεάν χρήση της, το τεράστιο φάσμα και η παγκόσμια διαθεσιμότητα.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η χρήση μιας εξαιρετικά ευρείας ζώνης συχνοτήτων (Ultra Wide Band 3.1 GHz -10.6 GHz), η οποία προτείνεται ως μία πολύ καλή επιλογή επειδή βοηθά στην αντιμετώπιση των απωλειών και στην εξοικονόμηση ενέργειας.

2.4.1.3 Τεχνική Multihop

Η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήριων κόμβων, ή μεταξύ ενός αισθητήριου κόμβου και του σταθμού βάσης, πραγματοποιείται μέσω διαδρομών πολλαπλών βημάτων (multihop communication) λόγω της μεγάλης χωρικής πυκνότητας με την οποία εμφανίζονται αυτοί οι κόμβοι στο ασύρματο δίκτυο [15], [49]. Επειδή η ισχύς του σήματος RF είναι ανάλογη του r^{-4} , όπου r η απόσταση επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων, είναι πάρα πολύ πιθανό να συμφέρει περισσότερο, από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, η μετάδοση πολλών μηνυμάτων σε μικρές αποστάσεις, παρά η μετάδοση ενός μηνύματος σε μεγάλη απόσταση.

Άρα, η μέθοδος multihop, εκτός των άλλων, έχει το πλεονέκτημα να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας.

2.4.2 Μεγάλη Χωρική Πυκνότητα των Αισθητήριων

Ο αριθμός των κόμβων, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήριων, μπορεί να είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων ή και χιλιάδων ακόμη, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αριθμός των κόμβων είναι πιθανόν να προσεγγίσει την οριακή τιμή των εκατομμυρίων.

Επίσης, είναι εξίσου πιθανόν, αυτός ο τεράστιος αριθμός των αισθητήριων κόμβων να αναπτύσσεται σε περιοχές περιορισμένης έκτασης. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη χωρική πυκνότητα των αισθητήριων κόμβων. Η χωρική πυκνότητα εξαρτάται άμεσα από το είδος της εκάστοτε εφαρμογής. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές επιτήρησης οικιών, ο αριθμός των κόμβων κυμαίνεται μεταξύ 25 και 100 ανά περιοχή [50], ενώ σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως είναι π.χ. η παρακολούθηση της λειτουργίας μηχανημάτων, ο αριθμός των κόμβων μπορεί να είναι, ενδεικτικά, περίπου 500 ανά 5 m² [7].

Από όλα αυτά συμπεραίνεται ότι τα πρωτόκολλα που θα χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν αυτού του είδους τις απαιτήσεις, θα πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζονται τη μεγάλη πυκνότητα και τον πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων.

2.4.3 Ανοχή σε Σφάλματα

Η μη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών (DoS – Denial of Service) από κάποιους κόμβους του δικτύου είναι ένα πάρα πολύ συχνό φαινόμενο, ανάλογα βέβαια και με το είδος της εφαρμογής.

Για παράδειγμα, σε εφαρμογές που έχουν ως φυσικό τους χώρο την ύπαιθρο, ή σε στρατιωτικές εφαρμογές που σχετίζονται με την επιτήρηση του πεδίου μάχης, είναι πολύ πιθανόν εξωτερικοί παράγοντες να θέσουν εκτός λειτουργίας έναν ή περισσότερους κόμβους. Αντίθετα, κόμβοι οι οποίοι ανιχνεύουν τα επίπεδα υγρασίας ή θερμοκρασίας σε ένα σπίτι δεν είναι ευάλωτοι σε εξωγενείς παράγοντες.

Όπως έχει ήδη πολλές φορές αναφερθεί, η διάρκεια ζωής ενός αισθητήρα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη διάρκεια ζωής της πηγής που τον τροφοδοτεί με ενέργεια, επειδή οι αισθητήρες έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν αυτόνομα, χωρίς καμία επίβλεψη, και μάλιστα σε χώρους όπου δεν υπάρχει πρόβλεψη για αντικατάσταση της μπαταρίας τους. Συνεπώς, το ζητούμενο είναι να μην επηρεάζεται η λειτουργία του ασύρματου δικτύου αισθητήρων από την αδυναμία ανταπόκρισης κάποιων κόμβων, είτε εξαιτίας φυσικής τους καταστροφής, είτε εξαιτίας εξάντλησης των διαθέσιμων ενεργειακών τους αποθεμάτων. Αυτό το θέμα αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως αξιοπιστία ή ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance) [11].

Συνοψίζοντας, ο ορισμός που προκύπτει από τα όσα ήδη έχουν αναφερθεί, είναι ο εξής: *“Ανοχή σε σφάλματα είναι η ικανότητα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων να διατηρεί αδιάλειπτα τη λειτουργικότητά του άσχετα με τις όποιες αποτυχίες των κόμβων του”*. Ως εκ τούτου, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, είναι τελείως απαραίτητη η σχεδίαση πρωτοκόλλων τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη την ανοχή σε σφάλματα.

2.4.4 Μη Σταθερή Τοπολογία

Η φύση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθιστά τη διατήρηση της τοπολογίας του δικτύου μία πραγματική πρόκληση. Η ανάπτυξη αυτού του είδους δικτύων σε μη προσβάσιμες περιοχές, και για ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών, γίνεται με έναν εντελώς τυχαίο τρόπο, όπως για παράδειγμα με τη ρίψη αισθητήριων κόμβων,

- Σε απροσπέλαστο δάσος από αεροπλάνο, ή καταπέλτη, ή
- Στο βυθό της θάλασσας από το κατάστρωμα κάποιου πλοίου.

Όμως, η τοπολογία του δικτύου ενδέχεται να αλλάξει από τη μη ανταπόκριση κάποιων κόμβων, τόσο από έλλειψη ενέργειας, όσο και από φυσική τους καταστροφή. Επιπλέον, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάξει δυναμικά, επειδή κάποιοι από τους κόμβους είναι εφοδιασμένοι με ένα σύστημα κίνησης για την παρακολούθηση κάποιου συνεχώς μεταβαλλόμενου φαινομένου.

Τέλος, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης επιπλέον κόμβων στο δίκτυο, με σκοπό, είτε την περαιτέρω επέκταση του δικτύου, είτε την αντικατάσταση ορισμένων κόμβων οι οποίοι έχουν παρουσιάσει κάποια δυσλειτουργία ή έχουν καταστραφεί. Φυσικά, η προσθήκη των νέων κόμβων θα γίνεται με τυχαίο τρόπο, οπότε η τοπολογία του δικτύου να μπορεί να αλλάξει και πάλι.

Από όσα μέχρι στιγμής έχουν αναφερθεί καθίσταται πλέον σαφές ότι κατά την εγκατάσταση και λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα και τεχνικές που να διασφαλίζουν τα εξής:

- Αυτονομία και λειτουργία του δικτύου χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.
- Μείωση του κόστους εγκατάστασης.
- Μη απαίτηση ανάγκης για προκαταρκτική σχεδίαση ή οργάνωση.
- Αύξηση της ευελιξίας για την τοποθέτηση των αισθητήριων κόμβων.
- Δυνατότητα για περαιτέρω επέκταση του δικτύου.
- Βελτιστοποίηση της αυτό-οργάνωσης και της ανοχής σε σφάλματα.

2.5 Πιθανές Αιτίες Δυσλειτουργίας ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύσσονται και βελτιώνονται σήμερα με πολύ γοργούς ρυθμούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αισθητήριοι κόμβοι εξαναγκάζονται να δρουν σε ένα φοβερά ανταγωνιστικό περιβάλλον χωρίς να τους επιτρέπεται η έστω και μικρή πιθανότητα αποτυχίας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις όπου οι αισθητήριοι κόμβοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν σωστά και τούτο οφείλεται σε πολλούς και ποικίλους λόγους, όπως:

- Οι αισθητήριοι κόμβοι λειτουργούν με μπαταρίες ή ακόμη και με ενέργεια την οποία λαμβάνουν από το περιβάλλον, όπως είναι π.χ. η ηλιακή. Τα αποθέματα ενέργειας που διαθέτουν είναι πιθανόν, είτε να μειωθούν, είτε να εξαντληθούν, είτε να μην είναι προσωρινά διαθέσιμα.
- Η επικοινωνία μεταξύ των αισθητήριων κόμβων πραγματοποιείται με τη βοήθεια των μονάδων επικοινωνίας που διαθέτουν, και η οποία εξαρτάται άμεσα από τις κάθε είδους διαταραχές, όπως είναι για παράδειγμα, ο θόρυβος, η παραμόρφωση και οι παρεμβολές από άλλες συσκευές.
- Οι αισθητήριοι κόμβοι, λόγω του μικρού τους μεγέθους και βάρους, είναι πολύ πιθανόν να μετακινηθούν από τις αρχικές τους θέσεις και να τεθούν εκτός της εμβέλειας επικοινωνίας. Ένας πιθανός λόγος μετακίνησής τους είναι, για παράδειγμα, ένας δυνατός άνεμος.

2.6 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Οι πρώτες έρευνες σε θέματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων πραγματοποιήθηκαν από επιστήμονες του στρατού. Από αυτές τις έρευνες προέκυψε ένα πολύ μεγάλο πλήθος εφαρμογών ευρείας γκάμας οι οποίες ξεκινούν από μεγάλης κλίμακας δίκτυα, π.χ. ακουστικής επιτήρησης των ωκεανών, μέχρι μικρής κλίμακας δίκτυα, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα τα οποία αποτελούνται από μη επιτηρούμενους αισθητήριους κόμβους εδάφους για την ανίχνευση διαφόρων φαινομένων. Η ραγδαία μείωση του κόστους αλλά και του μεγέθους των αισθητήριων κόμβων συνέβαλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη πολλών ακόμη δυναμικών εφαρμογών που έχουν σχέση, για παράδειγμα, με την ιατρική, τη βιομηχανία, την ασφάλεια των κτηρίων, κτλ.

Ένας αισθητήριοι κόμβος, όπως είναι για παράδειγμα ο MICA2, μπορεί να περιλαμβάνει μία σχετικά μεγάλη γκάμα αισθητήρων, όπως: αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης και φωτός, αισθητήρες επιταχυνσιομετρικούς, βαρομετρικούς, μικρόφωνα, μαγνητόμετρα, και πολλά άλλα ακόμη είδη αισθητήρων με κατάλληλες αναλογικές εισόδους.

Στο εμπόριο κυκλοφορούν ακόμη και μερικοί εξειδικευμένοι κόμβοι οι οποίοι περιλαμβάνουν τα εξής είδη αισθητήρων: σεισμικοί, οπτικοί, με ραντάρ, με υπέρηχους και με υπέρυθρες [51].

Όλοι οι αισθητήρες που έχουν ήδη αναφερθεί είναι σε θέση να παρακολουθούν τις εκάστοτε σημειούμενες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών παρέχοντας στον ενδιαφερόμενο χρήστη πληροφορίες σχετικά με τις διακυμάνσεις, π.χ. της πίεσης, της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του φωτός, του θορύβου, της διάρθρωσης του εδάφους, της παρουσίας ή μη συγκεκριμένων τύπων αντικειμένων μέσα στο πεδίο επιτήρησής τους, των επιπέδων μηχανικής πίεσης που ασκείται σε ενσωματωθέντα αντικείμενα, της κίνησης οχημάτων, αλλά και της ταχύτητας, κατεύθυνσης και μεγέθους κάποιου συγκεκριμένου αντικειμένου.

Με βάση την προσφερόμενη ποικιλία των πληροφοριών, η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθίσταται εξαιρετικά σημαντική, αλλά και πολλές φορές αναγκαία σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Πολλοί είναι οι τομείς της επιστήμης, και όχι μόνο, που έχουν επιδείξει μεγάλο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και να τις εκμεταλλευτούν σε τέτοιο βαθμό ώστε να ικανοποιηθούν οι

ανάγκες τους. Αναφέρονται ενδεικτικά οι σπουδαιότεροι από αυτούς [4,5], [52]: Ιατρική, περιβάλλον, περιβαλλοντικοί οργανισμοί, παρακολούθηση οδικής και εναέριας κυκλοφορίας, στρατός, βιομηχανικές και κατασκευαστικές εταιρείες, οικιακές εφαρμογές, κτλ.

Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Κάποιες από αυτές βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, κάποιες άλλες αποτελούν ήδη εμπορικά προϊόντα, ενώ κάποιες ακόμη έχουν ενταχθεί σε ερευνητικά προγράμματα, τα οποία χρησιμοποιούν τα δίκτυα αισθητήρων ως εργαλείο.

2.6.1 Ιατρικές Εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βρίσκουν τεράστιες εφαρμογές στον τομέα της υγείας. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμεύσουν ως μέσον παροχής βοήθειας σε άτομα με ειδικές ανάγκες, στην παρακολούθηση των φυσιολογικών δεδομένων ενός ασθενούς από απόσταση, στην παρακολούθηση και διάγνωση ασθενειών (τηλεϊατρική), στον εντοπισμό και την παρακολούθηση ιατρών και ασθενών σε νοσοκομειακή μονάδα και επίσης στη διαχείριση φαρμάκων [4,5].

2.6.1.1 Παρακολούθηση των Φυσιολογικών Δεδομένων Ασθενούς από Απόσταση

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων συγκεντρώνει τα φυσιολογικά δεδομένα από έναν επιλεγμένο ασθενή και στη συνέχεια τα αποθηκεύει για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου να τα χρησιμοποιήσει όποτε προκύψει ανάγκη. Οι μικροί σε μέγεθος κόμβοι παρέχουν τη δυνατότητα στους γιατρούς να αναγνωρίσουν έγκαιρα προκαθορισμένα συμπτώματα. Ταυτόχρονα επιτρέπουν μεγαλύτερη ευχέρεια κινήσεων στον ασθενή, παρέχοντας του έτσι μία καλύτερη ποιότητα ζωής, σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς τρόπους θεραπείας [4,5], [49].

2.6.1.2 Παρακολούθηση Ιατρών και Ασθενών σε Νοσοκομείο

Μία άλλη εξίσου σπουδαία εφαρμογή είναι ο εντοπισμός και η παρακολούθηση των ιατρών, αλλά και των ασθενών, σε νοσοκομειακή μονάδα [4,5]. Κάθε ασθενής φέρει επάνω του μικρούς σε μέγεθος αισθητήριους κόμβους, καθένας εκ των οποίων εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό. Για παράδειγμα, ένας αισθητήριος κόμβος μπορεί να ανιχνεύει τους χτύπους της καρδιάς, ενώ κάποιος άλλος μπορεί να ανιχνεύει ταυτόχρονα την πίεση του αίματος. Επίσης οι γιατροί μπορούν να φέρουν επάνω τους έναν ειδικό αισθητήρα ο οποίος θα βοηθούσε στον άμεσο εντοπισμό τους μέσα στο χώρο του νοσοκομείου.

2.6.1.3 Διαχείριση Φαρμάκων σε Νοσοκομείο

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομείο [4,5]. Με την εγκατάσταση αισθητήριων κόμβων σε φάρμακα, ελαχιστοποιείται η πιθανότητα λήψης λανθασμένης φαρμακευτικής αγωγής από ασθενή.

2.6.2 Στρατιωτικές Εφαρμογές

Μερικά από τα πολύ βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι: η ταχύτητα, η μεγάλη ποικιλία τρόπων εγκατάστασης, η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης, η λειτουργία χωρίς επίβλεψη, καθώς και η ανοχή τους σε λάθη. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν ιδανικά προκειμένου να ενσωματωθούν σε στρατιωτικά συστήματα, όπως: συστήματα εντολών, ελέγχου, επικοινωνίας, ευφυΐας, άμυνας, παρακολούθησης (κατασκοπίας), αναγνώρισης και στόχευσης.

Επειδή τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται, κατά κύριο λόγο, στην πυκνή τους χωρική εγκατάσταση, η καταστροφή μερικών κόμβων, από τις εχθρικές δυνάμεις, δεν μπορεί να επηρεάσει μία στρατιωτική επιχείρηση στο βαθμό που θα την επηρέαζε η καταστροφή των παραδοσιακών τύπων αισθητήρων [4,5], [52]. Στη συνέχεια αναφέρονται μερικές από τις πλέον συνήθεις εφαρμογές.

2.6.2.1 Παρακολούθηση του Πεδίου της Μάχης

Η παρακολούθηση του πεδίου της μάχης είναι μία από τις πολλές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για στρατιωτικούς σκοπούς. Εδάφη ζωτικής σημασίας, δρομολόγια πρόσβασης και μονοπάτια μπορούν να καλυφθούν γρήγορα με ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και να παρακολουθούνται διαρκώς παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες που σχετίζονται με τις κινήσεις των εχθρικών δυνάμεων. Εξίσου σημαντική είναι επίσης και η παρακολούθηση της πορείας κινούμενων στόχων. Παρά το γεγονός ότι η παρακολούθηση κινούμενων στόχων έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς μελέτης στα παραδοσιακού τύπου δίκτυα αισθητήρων, όμως, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε ειδική μέριμνα, ώστε αυτά να εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα της συγχώνευσης των δεδομένων χωρίς να υπερφορτώνουν στο ελάχιστο το συνεργαζόμενο δίκτυο. Με την εξέλιξη των στρατιωτικών επιχειρήσεων θα είναι πολύ εύκολη η προσαρμογή και η ταχύτατη αντικατάσταση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων από άλλα καινούργια τα οποία θα είναι σε θέση να καλύπτουν πλήρως τις νέες ανάγκες [53].

2.6.2.2 Παρακολούθηση Εξοπλισμού και Πυρομαχικών των Φίλιων Δυνάμεων

Η παρακολούθηση του εξοπλισμού και των πυρομαχικών των φίλιων δυνάμεων αποτελεί μία εξίσου σημαντική εφαρμογή. Οι διοικητές, με τη χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν την κατάσταση των μονάδων τους καθώς επίσης και του εξοπλισμού αλλά και των πυρομαχικών τους. Κάθε στρατιώτης, όχημα και εξοπλισμός μπορούν να εφοδιαστούν με αισθητήρες οι οποίοι θα αναφέρουν την εκάστοτε κατάσταση. Αυτές οι αναφορές θα συγκεντρώνονται σε κεντρικούς κόμβους (σταθμούς βάσης) και στη συνέχεια θα προωθούνται στα κατάλληλα στρατιωτικά κλιμάκια. Επίσης είναι δυνατόν, τα δεδομένα που λαμβάνονται να αθροίζονται με τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από άλλες μονάδες του ίδιου επιπέδου έτσι ώστε να παρέχεται μία συνολικότερη εικόνα των φίλιων δυνάμεων [4,5], [52].

2.6.2.3 Παρακολούθηση Ναρκοπεδίου

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και στην παρακολούθηση ναρκοπεδίων προκειμένου να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία τους. Σε κάθε νάρκη έχει τοποθετηθεί και από ένας αισθητήρας, και όλες μαζί σχηματίζουν ένα δίκτυο ad hoc πολλαπλών βημάτων. Οι ζεύξεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων είναι κάτω από συνεχή στενή παρακολούθηση. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι κάποιος από τους κόμβους δεν επικοινωνεί με τους υπόλοιπους, (δηλαδή ότι έχει εξουδετερωθεί η νάρκη), τότε αντικαθίσταται άμεσα [4,5].

2.6.2.4 Ανίχνευση και Αναγνώριση Ραδιοβιολογικής, χημικής και Πυρηνικής Απειλής

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση και αναγνώριση ραδιοβιολογικής, χημικής και πυρηνικής απειλής [4,5], [52]. Σε περίπτωση ραδιοβιολογικού, χημικού και πυρηνικού πολέμου, είναι ζωτικής σημασίας η παροχή ακριβούς και έγκαιρης πληροφόρησης σχετικά με την ύπαρξη μόλυνσης και μάλιστα όταν υπάρχουν άνθρωποι κοντά στο σημείο όπου έχει σημειωθεί η έκρηξη του ανάλογου όπλου. Τα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία έχουν εγκατασταθεί μέσα σε περιοχές των φίλιων δυνάμεων, χρησιμοποιούνται κατά βάση ως

συστήματα αναγνώρισης και προειδοποίησης για ύπαρξη τέτοιου είδους ουσιών. Μπορούν να παρέχουν στις φίλιες δυνάμεις, έγκαιρα και ανελλιπώς, χρήσιμες πληροφορίες ώστε να αντιδρούν γρηγορότερα και να μειώνουν έτσι δραστικά τις απώλειες. Εκτός από τα παραπάνω, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αναγνώριση μιας περιοχής η οποία έχει προσβληθεί από ραδιοβιολογική ή χημική ή πυρηνική επίθεση, δίχως να είναι απαραίτητο να εκτεθεί σε άμεσο κίνδυνο η ομάδα ανίχνευσης.

2.6.2.5 Ανίχνευση και Κατασκοπία των Εχθρικών Δυνάμεων και του Εδάφους

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου αποδοτικά στην ανίχνευση του εδάφους ή την κατασκοπία των εχθρικών δυνάμεων λόγω της ταχύτητας εγκατάστασης και της συλλογής δεδομένων που τα διακρίνει [4,5], [52]. Πιο συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν σε εχθρικά εδάφη και να συγκεντρώνουν έγκαιρα, μέσα σε ελάχιστα λεπτά, πολύτιμες και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικές με τις εχθρικές δυνάμεις και το έδαφος πριν ακόμη προλάβει ο εχθρός να τα καταστρέψει.

2.6.2.6 Ανίχνευση Στρατιωτικών Οχημάτων

Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την ανίχνευση στρατιωτικών οχημάτων. Το δίκτυο αυτό θα πρέπει να είναι εύρωστο και πολύ δύσκολα ανιχνεύσιμο. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους κόμβους θα πρέπει να αποστέλλονται στο σταθμό βάσης με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια. Οι αισθητήριοι κόμβοι ρίπτονται ελεύθερα στην υπό παρακολούθηση περιοχή από ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Αμέσως μετά την προσεδάφισή τους αρχίζουν να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους και να εκτελούν υπολογιστικές πράξεις σχετικές με την ταχύτητα και την πορεία των οχημάτων που πρέπει να παρακολουθούν. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την επεξεργασία αποστέλλονται κατευθείαν στο σταθμό βάσης ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος που πετάει διαρκώς πάνω από την υπό παρακολούθηση περιοχή.

2.6.2.7 Ανίχνευση Στόχων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εμφυτευτούν στα συστήματα πλοήγησης των «έξυπνων πυρομαχικών», ελαχιστοποιώντας έτσι τις περιπτώσεις όπου τα βλήματα πλήττουν εσφαλμένους στόχους [24].

2.6.2.8 Εντοπισμός Ελεύθερων Σκοπευτών

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον εντοπισμό της θέσης των ελεύθερων σκοπευτών. Το δίκτυο αποτελείται από κόμβους οι οποίοι είναι σε θέση να ανιχνεύουν και να επεξεργάζονται κρουστικά κύματα κάνοντας χρήση ειδικού τύπου αισθητήρων. Όλοι οι αισθητήριοι κόμβοι είναι διασκορπισμένοι σε μία περιοχή όπου σχηματίζουν ένα ασύρματο δίκτυο πολλαπλών βημάτων. Κάθε κόμβος επεξεργάζεται τα κρουστικά κύματα που λαμβάνει, ενώ ταυτόχρονα ένας άλλος κύριος κόμβος συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους υπόλοιπους κόμβους στο δίκτυο και εντοπίζει τη θέση του ελεύθερου σκοπευτή με ακρίβεια μέχρι και ενός περίπου μέτρου και με χρονική καθυστέρηση μικρότερη των δύο δευτερολέπτων. Όλες οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί εκτελούνται με τη βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή ο οποίος είναι σε θέση να εκτελεί πολύπλοκες λειτουργίες.

2.6.3 Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

Το περιβάλλον αποτελεί έναν από τους ιδανικότερους χώρους για την εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, για τον απλούστατο λόγο ότι μπορεί να μετρηθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος φυσικών μεγεθών, όπως είναι π.χ. η θερμοκρασία, η οποία αποτελεί μία από τις πλέον σημαντικές μεταβλητές και αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, η πίεση αλλά και η υγρασία [53]. Οι αισθητήρες που παρακολουθούν το περιβάλλον χρησιμοποιούνται για να εξετάζουν προσεκτικά τον τρόπο απόκρισης της βλάστησης στις εκάστοτε παρουσιαζόμενες μεταβολές του κλίματος αλλά και στις διάφορες ασθένειες. Οι ακουστικοί αισθητήρες αλλά και οι αισθητήρες εικόνας (οι οποίοι διεγείρονται με την εμφάνιση κάποιας εικόνας) είναι σε θέση να αναγνωρίζουν αποτυπώματα και να μετρούν τον πληθυσμό των άγριων πτηνών καθώς και των άλλων ειδών της πανίδας στην υπό παρακολούθηση περιοχή. Μπορούν επίσης να παρακολουθούν τις κινήσεις των πτηνών και των αγρίων ζώων όταν αυτά αποδημούν ή μεταναστεύουν σε άλλες περιοχές.

2.6.3.1 Ανίχνευση Δασικών Πυρκαγιών

Μία άλλη πολύ σημαντική εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, είναι η ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών. Οι αισθητήριои κόμβοι τοποθετούνται σε κάποιο δάσος, είτε τυχαία, είτε στη βάση κάποιου στρατηγικού σχεδιασμού και ανιχνεύουν, όχι μόνο την ύπαρξη φωτιάς, αλλά και την ακριβή της προέλευση και στη συνέχεια να μεταβιβάζουν τις πληροφορίες που έλαβαν στους άμεσα ενδιαφερόμενους [4,5]. Μπορούν επίσης να συνεργάζονται μεταξύ τους ώστε να πραγματοποιούν κατανομημένη ανίχνευση του χώρου και να παρακάμπτουν δέντρα ή βράχους που μπορεί να τους είναι εμπόδιο στην εργασία ανίχνευσης [52].

2.6.3.2 Ανίχνευση Πλημμυρών

Μία άλλη σπουδαία περιβαλλοντική εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, είναι η ανίχνευση πλημμυρών [52]. Το ALERT [54] είναι ένα σύστημα ανίχνευσης πλημμυρών, το οποίο αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ αλλά χρησιμοποιείται και σήμερα από άλλες χώρες, όπως είναι για παράδειγμα, η Κίνα, η Ινδία, η Αυστραλία, η Αργεντινή, κ.ά.

Τα συστήματα ανίχνευσης ALERT περιλαμβάνουν αισθητήρες βροχόπτωσης, αισθητήρες μέτρησης της στάθμης του νερού και μετεωρολογικούς αισθητήρες. Αυτοί οι αισθητήρες συλλέγουν τα κατάλληλα δεδομένα από το περιβάλλον τους και στη συνέχεια διοχετεύουν αυτό το πλήθος των πληροφοριών προς μία κεντρική βάση δεδομένων όπου πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία και αξιολόγησή τους.

2.6.3.3 Παρακολούθηση της Συμπεριφοράς των Ζώων

Η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των ζώων αποτελεί αντικείμενο πρωταρχικής σημασίας για τους ζωολόγους διότι τους βοηθά να αποκτήσουν πληρέστερη γνώση σε θέματα που σχετίζονται με τις κινήσεις των ζώων και με τους διαφόρους ήχους που αυτά παράγουν.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε μία κατασκήνωση από το τμήμα τεχνολογίας και επιστήμης του Πανεπιστημίου του Χονγκ-Κονγκ [55]. Ο σκοπός αυτού του πειράματος ήταν η ανίχνευση της συμπεριφοράς των βατράχων στην κατασκήνωση όπου κατά τη διάρκεια της άνοιξης, όπως είναι γνωστό, οι βάτραχοι συνηθίζουν να κοάζουν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε δώδεκα πλατφόρμες MICA2 οι μισές από τις οποίες έφεραν τις πλακέτες αισθητήρων MTS310CA, ενώ οι υπόλοιπες έφεραν τις πλακέτες MTS420CA. Παρά τη μεγάλη δυνατότητα που διέθεταν οι πλακέτες για τη

μέτρηση πολλών διαφορετικών μεγεθών, κατάφεραν να μετρήσουν μόνο τρία μεγέθη: υγρασία, θερμοκρασία και ήχο.

2.6.3.4 Παρατήρηση Άγριων Πτηνών

Ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται σήμερα για την παρατήρηση της αναπαραγωγικής συμπεριφοράς ενός μικρού πτηνού στην πολιτεία Maine των ΗΠΑ. Είναι πράγματι πολύ δύσκολο να παρατηρήσει κανείς από κοντά αυτά τα πτηνά διότι ενοχλούνται, όπως άλλωστε είναι φυσικό, από την ανθρώπινη παρουσία. Σε αυτήν εδώ την περίπτωση, η χρήση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων φαντάζει ως ο καλύτερος τρόπος για την παρατήρηση και την κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Η περίοδος αναπαραγωγής διαρκεί επτά μήνες και οι βιολόγοι ενδιαφέρονται για τις ίδιες τους τις φωλιές, για τις περιβαλλοντικές συνθήκες (όπως, π.χ. θερμοκρασία, υγρασία κτλ.) μέσα και έξω από τις φωλιές τους κατά τη διάρκεια αναπαραγωγής, για τα σημεία αναπαραγωγής τους καθώς και για τις παραμέτρους επιλεγμένων σημείων αναπαραγωγής.

Οι κόμβοι, που τοποθετούνται μέσα στις φωλιές των πτηνών, διαθέτουν αισθητήρες ανίχνευσης υγρασίας, θερμοκρασίας, πίεσης, φωτεινότητας κτλ. αλλά και υπέρυθρες ακτίνες προκειμένου να ανιχνεύουν την παρουσία των πτηνών. Οι φωλιές είναι συνήθως πολύ κοντά η μία με την άλλη ώστε να σχηματίζουν συστοιχίες (clusters), και έτσι οι κόμβοι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα ασύρματο δίκτυο πολλών βημάτων. Κάθε συστοιχία περιλαμβάνει έναν κόμβο ο οποίος φέρει μία κατευθυντική κεραία μεγάλης εμβέλειας και η οποία συνδέει τη συστοιχία με τον κύριο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης συνδέεται με μία βάση δεδομένων μέσω δορυφορικής ζεύξης. Οι αισθητήρες λαμβάνουν δείγματα μία φορά το λεπτό και στέλνουν τις μετρήσεις στη βάση δεδομένων μέσω του υπολογιστή του σταθμού βάσης.

2.6.3.5 Ανίχνευση των Σύνθετων Βιολογικών Οργανισμών του Περιβάλλοντος

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση των σύνθετων βιολογικών οργανισμών του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες οι οποίοι έχουν ενσωματωθεί στην εξωτερική επιφάνεια δορυφόρων αλλά και αεροσκαφών είναι χρήσιμοι για την παρακολούθηση μεγάλης κλίμακας βιοδιαφορών, όπως είναι για παράδειγμα η χωρική πολυπλοκότητα των επικρατέστερων ειδών φυτών.

2.6.3.6 Ανίχνευση και Μελέτη των Ωκεανών

Ο ωκεανός είναι ένας μαγευτικός τόπος και παραμένει σχετικά ανεξερεύνητος, σε σύγκριση με την ξηρά. Τα υποθαλάσσια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν ακόμη και στον πυθμένα των ωκεανών ανιχνεύοντας και μετρώντας διάφορα χρήσιμα για τους ωκεανολόγους μεγέθη.

2.6.4 Λοιπές Εφαρμογές

Ο αριθμός των εφαρμογών όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παραμένει ανεξάντλητος. Αυτό το γεγονός καθιστά πολύ δύσκολο το έργο της ταξινόμησής τους. Στη συνέχεια παρατίθεται μία σειρά από εφαρμογές η οποία δεν μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις προηγούμενες κατηγορίες.

2.6.4.1 Οικιακές Εφαρμογές

Ο οικιακός αυτοματισμός είναι ίσως το πλέον δημοφιλές πεδίο εφαρμογής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία, έξυπνοι αισθητήρες και μηχανισμοί

κίνησης μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορες οικιακές συσκευές, όπως: ψυγεία, καταψύκτες, ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων, βίντεο, κτλ. Αυτοί οι ειδικοί αισθητήρες μπορούν να αλληλεπιδρούν όχι μόνο μεταξύ τους, αλλά και με ένα εξωτερικό δίκτυο, όπως είναι για παράδειγμα το Διαδίκτυο ή κάποιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το γεγονός παρέχει τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να διαχειρίζονται τις οικιακές συσκευές από οπουδήποτε και εάν ευρίσκονται.

Ο σχεδιασμός ενός έξυπνου περιβάλλοντος βασίζεται σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: στην ανθρωποκεντρική και στην τεχνοκεντρική.

- Στην *Ανθρωποκεντρική Προσέγγιση*, ένα έξυπνο περιβάλλον θα πρέπει να προσαρμόζεται προς τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών, σε ότι αφορά τις δυνατότητες εισόδου/εξόδου.
- Στην *Τεχνοκεντρική Προσέγγιση*, πρέπει να αναπτυχθούν καινοτόμες τεχνολογίες υλικών, δικτυακές λύσεις καθώς και ενδιάμεσες συσκευές.

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να προσαρμοσθούν σε έπιπλα αλλά και σε οικιακές συσκευές και να επικοινωνούν, όχι μόνο μεταξύ τους, αλλά και με τον εξυπηρετητή (server) του χώρου μέσα στον οποίο ευρίσκονται. Ο εξυπηρετητής του δωματίου είναι επίσης δυνατόν να επικοινωνεί και με τους εξυπηρετητές των υπόλοιπων δωματίων έχοντας έτσι μία άμεση πληροφόρηση για τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρουν, όπως για παράδειγμα, εκτύπωση, σάρωση, αποστολή και λήψη φαξ, κ.ο.κ. Οι υπολογισμοί των μετρούμενων μεγεθών σε αυτό το περιβάλλον εργασίας θα πρέπει να είναι αξιόπιστοι, ανελλιπείς και διαφανείς.

2.6.4.2 Εφαρμογές στην Ασφάλεια Κτηρίων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ασφάλεια κτηρίων από αντιτρομοκρατικές ενέργειες [53]. Κτήρια και εγκαταστάσεις ζωτικής σημασίας, όπως: εγκαταστάσεις παραγωγής ρεύματος, τηλεπικοινωνιακά κέντρα, κτλ. πρέπει να προστατεύονται από ενδεχόμενες τρομοκρατικές επιθέσεις. Δίκτυα με οπτικούς, ακουστικούς και άλλου είδους αισθητήρες μπορούν να αναπτυχθούν μέσα ή γύρω από τέτοιου είδους κτήρια για την προστασία τους. Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν εγκαίρως τις οποιοσδήποτε πιθανές απειλές. Τα βελτιωμένα συστήματα αλληλοεπικάλυψης και ανίχνευσης των αισθητήρων μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα ψευδοσυναγερμών η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη συγχώνευση των πληροφοριών που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες.

2.6.4.3 Εφαρμογές στον Περιβαλλοντικό Έλεγχο σε Συγκρότημα Γραφείων

Σήμερα τα περισσότερα συγκροτήματα γραφείων διαθέτουν κεντρικά ελεγχόμενη θέρμανση και κλιματισμό. Επειδή η ροή του αέρα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χώρο, π.χ. γραφείο, τότε η κάθε μία πλευρά αυτού του χώρου θα έχει και διαφορετική θερμοκρασία, έστω και ακόμη λίγων βαθμών. Ένα κατανεμημένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που εγκαθίσταται στο συγκεκριμένο χώρο μπορεί να ελέγχει όχι μόνο τη ροή του αέρα αλλά και τη θερμοκρασία σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Έχει υπολογισθεί ότι η εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου είναι πιθανόν να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας ακόμη και κατά δύο μονάδες BTU (British Thermal Units) η οποία αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, π.χ. για τις Η.Π.Α., αξίας 55 δις δολαρίων το χρόνο, και μείωση στην εκπομπή υδρογονανθράκων κατά 35 εκατ. τόνους [4,5], [39], [52].

2.6.4.4 Εφαρμογές σε Αλληλεπιδραστικά Μουσεία

Σήμερα, σε αρκετά μουσεία του κόσμου μπορεί κανείς να αλληλεπιδρά με τα εκθέματα, τα οποία μπορούν να ανταποκριθούν όχι μόνο στο άγγιγμα αλλά και στην ομιλία. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούν, ιδίως τα παιδιά, να διδάσκονται από αυτά ενώ ταυτόχρονα θα μπορούν να συμμετέχουν σε ένα διαρκές πείραμα δράσης/αντίδρασης που θα τους διδάξει για το περιβάλλον και τις επιστήμες. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, ο ρόλος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε έναν τέτοιο χώρο είναι σημαντικός. Ένα παράδειγμα μουσείου αυτού του είδους είναι και το Deutsches Museum στο Μόναχο της Γερμανίας.

2.6.4.5 Εφαρμογές στη Ρύθμιση της Οδικής Κυκλοφορίας των Οχημάτων

Μία ακόμη πολύ χρήσιμη εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η ρύθμιση της οδικής κυκλοφορίας των οχημάτων. Σήμερα, πολλοί οδικοί κόμβοι φέρουν υπέργειους, επίγειους ή και υπόγειους αισθητήρες οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους ενσύρματα για την ανίχνευση των οχημάτων και το χειρισμό των φωτεινών σηματοδοτών. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ειδικές κάμερες σε δρόμους με μεγάλη κυκλοφορία οχημάτων οι οποίες καταγράφουν την κίνηση και στέλνουν πολύτιμες πληροφορίες σε κεντρικούς σταθμούς βάσης από όπου γίνεται και η κατάλληλη ρύθμιση, εφόσον χρειαστεί. Όμως, οι αισθητήρες, καθώς και τα ενσύρματα δίκτυα στα οποία ανήκουν, κοστίζουν ακριβά, οπότε η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε ένα πολύ μικρό αριθμό οδικών κόμβων. Αυτό το γεγονός είναι πλέον αρκετό ώστε να δοθεί η σκυτάλη σε φθηνά και ευέλικτα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αλλάζοντας έτσι εκ βάθρων το τοπίο του ελέγχου και της παρακολούθησης του οδικού δικτύου. Αισθητήρες εξαιρετικά χαμηλού κόστους εγκαθίστανται σε κάθε διασταύρωση για την ανίχνευση οχημάτων και την καταγραφή της ταχύτητάς τους. Οι αισθητήριοι κόμβοι θα επικοινωνούν με άλλους γειτονικούς τους με τελικό αποτέλεσμα την ενιαία χαρτογράφηση της οδικής κυκλοφορίας.

2.6.4.6 Εφαρμογές στην Ανίχνευση και Παρακολούθηση Κλοπής Οχημάτων

Αισθητήριοι κόμβοι είναι δυνατόν να εγκατασταθούν σε μία γεωγραφική περιοχή με στόχο την ανίχνευση και αναγνώριση κλοπών οχημάτων μέσα σε αυτή και στη συνέχεια αναφέρουν τις κλοπές που εντόπισαν σε απομακρυσμένους χρήστες.

2.6.4.7 Εφαρμογές στη Γεωργία

Η εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στη γεωργία εξελίσσεται πλέον σε σημαντικό παράγοντα εκμετάλλευσής τους. Με τη χρήση αυτών των δικτύων είναι δυνατόν να παρακολουθούνται, σε πραγματικό χρόνο, τα ακριβή επίπεδα πόσιμου νερού, διάβρωσης και μόλυνσης του εδάφους. Οι διάφορες πληροφορίες που συλλέγονται, αποστέλλονται σε κάποιο σταθμό βάσης (κεντρικό υπολογιστή) προκειμένου να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης από τους άμεσα ενδιαφερομένους.

Επίσης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης διαφόρων παραγόντων, όπως είναι για παράδειγμα, το χρώμα των φύλλων, η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, κτλ., οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την ανάπτυξη των φυτών και ανάλογα με τα αποτελέσματα να ενεργοποιείται ο μηχανισμός της αυτόματης άρδευσης. Η πλατφόρμα MICA2, η οποία είναι εφοδιασμένη με την κάρτα αισθητήρων MDA300 αποτελεί μία πολύ καλή λύση για εφαρμογές ακριβείας στη γεωργία.

2.6.4.8 Διάσωση Ανθρώπων που έχουν Πέσει Θύματα Χιονοστιβάδων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης και για τη διάσωση ανθρώπων οι οποίοι είναι θαμμένοι κάτω από χιονοστιβάδες. Σκοπός τους είναι ο εντοπισμός των ανθρώπων που έχουν θαφτεί κάτω από αυτές, η παροχή πληροφοριών (σχετικές με την κατάσταση των θυμάτων) προς τις ομάδες διάσωσης και η παροχή προτεραιότητας σε ασθενείς που είναι εκτεθειμένοι σε μεγαλύτερο κίνδυνο (με βάση π.χ., τους κτύπους της καρδιάς, την αναπνοή, κτλ.).

Σήμερα, πολλοί άνθρωποι, οι οποίοι εκτίθενται σε τέτοιου είδους κινδύνους (σκιέρ, αναρριχητές, κτλ.), φέρουν επάνω τους έναν αισθητήριο κόμβο ο οποίος είναι εφοδιασμένος με οξύμετρο (αισθητήρια συσκευή που μετρά τα επίπεδα οξυγόνου στο αίμα) και επιτρέπει τη μέτρηση των λειτουργιών της καρδιάς και της αναπνοής. Εκτός από αυτό, οι κόμβοι διαθέτουν επίσης και έναν αισθητήρα οξυγόνου για την ανίχνευση αεροθυλάκων γύρω από το καταπλακωμένο θύμα. Όλα αυτά τα δεδομένα συγκεντρώνονται από τον κόμβο που φέρει επάνω του το θύμα και αποστέλλονται προς την ομάδα διάσωσης η οποία τα διαβάζει με τη βοήθεια ενός προσωπικού ψηφιακού βοηθού (PDA – Personal Digital Assistant).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ

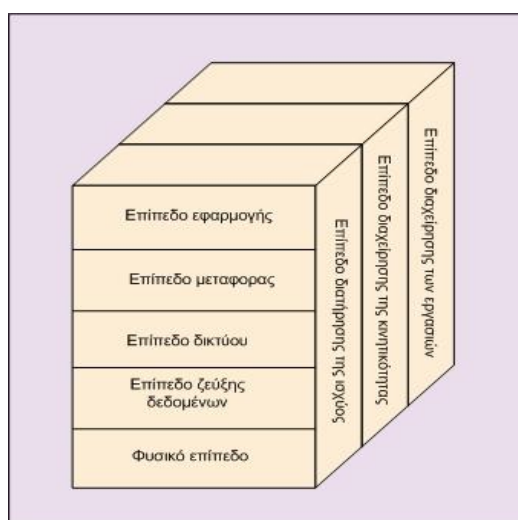
3.1 Εισαγωγή

Η στοίβα πρωτοκόλλων (protocol stack), η οποία χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης (sink) και από τους αισθητήρες στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, απεικονίζεται στο Σχήμα 3-1, και παρουσιάζει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

- Έχει επίγνωση των θεμάτων που άπτονται της ισχύος και της δρομολόγησης δεδομένων,
- Ενσωματώνει τα δεδομένα στα πρωτόκολλα δικτύων,
- Επικοινωνεί με τους γειτονικούς κόμβους στο δίκτυο μέσω του ασύρματου μέσου μετάδοσης και με αρκετή επάρκεια ισχύος, και
- Συμβάλλει θετικά στις προσπάθειες συνεργασίας των κόμβων [4,5].

Η στοίβα πρωτοκόλλων αποτελείται από τα εξής βασικά επίπεδα ή στρώματα (layers):

- *Φυσικό Επίπεδο* (physical layer),
- *Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων* (data link layer),
- *Επίπεδο Δικτύου* (network layer),
- *Επίπεδο Μεταφοράς* (transport layer),
- *Επίπεδο Εφαρμογής* (application layer),
- *Επίπεδο Διαχείρισης της Ισχύος* (power management plane),
- *Επίπεδο Διαχείρισης της Κινητικότητας* (mobility management plane), και
- *Επίπεδο Διαχείρισης των Εργασιών* (task management plane).



Σχήμα 3-1: Στοίβα πρωτοκόλλων σταθμού βάσης και αισθητήριων κόμβων

Στο *Φυσικό Επίπεδο* υπάρχει η ανάγκη χρήσης απλών αλλά στιβαρών τεχνικών διαμόρφωσης, εκπομπής και λήψης.

Επειδή το περιβάλλον ενός δικτύου αισθητήρων είναι συνήθως θορυβώδες, και επειδή οι κόμβοι είναι δυνατόν να μετακινούνται μέσα στο εν λόγω πεδίο, το πρωτόκολλο ελέγχου μέσης

πρόσβασης – MAC (Medium Access Control) protocol – πρέπει να γνωρίζει τη διαθέσιμη ενέργεια των κόμβων και να είναι σε θέση να ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις οι οποίες προκαλούνται από τις ταυτόχρονες μεταδόσεις γειτονικών κόμβων.

Το *Επίπεδο Δικτύου* φροντίζει για τη δρομολόγηση των δεδομένων που παρέχονται από το επίπεδο μεταφοράς.

Το *Επίπεδο Μεταφοράς* είναι υπεύθυνο για την εξασφάλιση της συνεχούς ροής δεδομένων εφόσον αυτό απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων.

Διαφορετικοί τύποι λογισμικού εφαρμογής μπορούν να επινοηθούν και να χρησιμοποιηθούν από το *Επίπεδο Εφαρμογής*. Αυτό εξαρτάται βασικά από το είδος της επιτελούμενης εργασίας ανίχνευσης του φυσικού περιβάλλοντος [4,5].

Επιπλέον, τα *Επίπεδα Διαχείρισης της Ισχύος*, της *Κινητικότητας* και των *Εργασιών* έχουν σαν σκοπό να παρακολουθούν το ποσό της διαθέσιμης ισχύος, να καταγράφουν την κινητικότητα και να διαχειρίζονται τις εργασίες των κόμβων. Τα εν λόγω επίπεδα βοηθούν τους αισθητήριους κόμβους στο συντονισμό του έργου ανίχνευσης και μέτρησης του φυσικού περιβάλλοντος, καθώς και στον υποβιβασμό της ολικής κατανάλωσης ισχύος.

Το *Επίπεδο Διαχείρισης της Ισχύος* ορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο κάθε αισθητήριος κόμβος θα χρησιμοποιεί την ισχύ που διαθέτει. Για παράδειγμα, οποιοσδήποτε κόμβος θα μπορεί να θέτει το δέκτη του εκτός λειτουργίας μετά τη λήψη ενός μηνύματος από κάποιον από τους γειτονικούς του κόμβους. Αυτό γίνεται προκειμένου να αποφευχθεί η λήψη διπλότυπων (ή αντιγράφων) μηνυμάτων. Επιπλέον, όταν η ισχύς ενός κόμβου είναι χαμηλή, εκπέμπει ένα μήνυμα προς τους γείτονές του ειδοποιώντας τους ότι εξαντλούνται τα αποθέματα ισχύος που διαθέτει και έτσι δεν θα μπορεί πλέον να συμμετέχει στη δρομολόγηση δεδομένων. Η ισχύς που θα του έχει απομείνει θα χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για εργασίες ανίχνευσης και μέτρησης του φυσικού του περιβάλλοντος [4,5].

Το *Επίπεδο Διαχείρισης της Κινητικότητας* ανιχνεύει και καταγράφει τις κινήσεις των κόμβων έτσι ώστε να μπορεί πάντοτε να ανακαλύπτει μία διαδρομή προς το σταθμό βάσης (χρήστη). Επιπλέον, ο κάθε κόμβος οφείλει να γνωρίζει ποιους έχει για γείτονες. Οι κόμβοι, εφόσον γνωρίζουν τους γείτονές τους, θα μπορούν να αξιοποιούν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα διαθέσιμα ποσά ισχύος τους και να διαχειρίζονται τις εργασίες που τους έχουν ανατεθεί.

Το *Επίπεδο Διαχείρισης των Εργασιών* σχεδιάζει και διανέμει τις εργασίες που πρέπει να γίνουν σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι οι κόμβοι μιας περιοχής δεν είναι υποχρεωμένοι να εκτελούν όλοι ταυτόχρονα το έργο της ανίχνευσης και μέτρησης του περιβάλλοντός τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, κάποιοι από τους κόμβους να εκτελέσουν το παραπάνω έργο περισσότερες φορές από ότι κάποιοι άλλοι, και αυτό εξαρτάται από το επίπεδο της διαθέσιμης ισχύος τους.

Τα επίπεδα διαχείρισης είναι απαραίτητα ώστε οι κόμβοι να εργάζονται ομαδικά με έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο, να δρομολογούν τα δεδομένα προς ένα ασύρματο κινητό δίκτυο αισθητήρων, και να μοιράζονται τους πόρους του συστήματος. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση κάθε επιπέδου χωριστά [4,5].

3.2 Το Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο (physical layer) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι υπεύθυνο για:

- την επιλογή της συχνότητας,
- τη δημιουργία της συχνότητας του φέροντος κύματος,

- τη φώραση (ή ανίχνευση) του σήματος,
- τη διαμόρφωση και
- την κρυπτογράφηση των δεδομένων.

Μέχρι στιγμής, η πρόταση που έχει γίνει ευρέως αποδεκτή για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αφορά τη ζώνη των 915 MHz (ISM - Industrial, Scientific and Medical – Βιομηχανική, Επιστημονική και Ιατρική) [4,5].

Η *Δημιουργία της Συχνότητας* και η *Φώραση του Σήματος* είναι θέματα που αφορούν κατά κύριο λόγο τη σχεδίαση του βασικού υλικού μέρους και του πομποδέκτη και δεν κρίνεται σκόπιμο να ασχοληθούμε περισσότερο με αυτά, καθόσον είναι πέραν του σκοπού της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Το φυσικό επίπεδο επικεντρώνεται κυρίως:

- σε θέματα διάδοσης του σήματος,
- στον έλεγχο ισχύος και, ως εκ τούτου, στην εξοικονόμηση ενέργειας και
- στα σχήματα διαμόρφωσης.

Η ασύρματη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις είναι πολύ πιθανόν να κοστίζει σε πολυπλοκότητα ενέργειας και υλοποίησης. Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση του φυσικού επιπέδου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, θα πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε υπόψη, σαν πρώτη προτεραιότητα, και πάνω από οτιδήποτε άλλο (π.χ. διάδοση και θέματα εξασθένησης του σήματος), το σημαντικό θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας.

Γενικά, η ελάχιστη ισχύς εξόδου που απαιτείται για την εκπομπή ενός σήματος σε μία απόσταση d είναι ανάλογη προς το d^n , όπου $2 \leq n < 4$. Επιπλέον, μετρήσεις που έχουν γίνει στα [8], [56] δείχνουν ότι η ισχύς μετάδοσης του σήματος αρχίζει να ελαττώνεται με υψηλότερους ρυθμούς (υψηλότερους εκθέτες n), για μεταδόσεις σε μικρές αποστάσεις και από κεραιές μικρού ύψους που βρίσκονται πλησιέστερα προς το έδαφος.

Ο σχεδιαστής του φυσικού επιπέδου, στην προσπάθειά του να επιλύσει αυτά τα προβλήματα, είναι πάρα πολύ σημαντικό να γνωρίζει τις εσωτερικές ιδιομορφίες αυτού του επιπέδου και να τις εκμεταλλεύεται στο έπακρο. Για παράδειγμα, η επικοινωνία *Πολλαπλών Βημάτων* (multi-hop), σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να ξεπεράσει αποτελεσματικά τα προβλήματα της *Επισκίασης* (shadowing) και των *απωλειών μονοπατιού* (path loss), εάν η πυκνότητα των κόμβων είναι αρκετά μεγάλη. Κατά παρόμοιο τρόπο, ενώ οι απώλειες μετάδοσης του σήματος και η χωρητικότητα του καναλιού περιορίζουν την αξιοπιστία του δικτύου, αυτό τούτο το γεγονός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για *Χωροταξική Επαναχρησιμοποίηση της Συχνότητας* (spatial frequency reuse).

Επί του παρόντος, αναζητούνται *Ενεργειακά Αποδοτικές Λύσεις* για το φυσικό επίπεδο, και παρά το γεγονός ότι κάποια από αυτά τα θέματα έχουν ήδη επισημανθεί, το φυσικό επίπεδο παραμένει, σε μεγάλο βαθμό, ένα ανεξερεύνητο πεδίο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ακολουθεί μία αναφορά από τις υπάρχουσες ιδέες οι οποίες αφορούν τα παραπάνω θέματα.

Η επιλογή ενός καλού σχήματος διαμόρφωσης (modulation scheme) είναι αποφασιστικής σημασίας για αξιόπιστη επικοινωνία σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

Στο [7] συγκρίνονται δυαδικά (Binary) και πολυψήφια (M-ary) σχήματα διαμόρφωσης. Παρά το γεγονός ότι ένα M-ary σχήμα είναι σε θέση να μειώσει το χρόνο εκπομπής σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα, με το να στέλνει πολλαπλά δυαδικά ψηφία (bits) ανά σύμβολο, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή σύνθετων κυκλωμάτων και την αυξημένη κατανάλωση ράδιο-ισχύος.

Αυτές οι παράμετροι εξισορρόπησης διατυπώνονται στο [7], και συμπεραίνεται ότι κάτω από συνθήκες εκκίνησης, όπου τον κυρίαρχο ρόλο παίζει η ισχύς, το δυαδικό σχήμα διαμόρφωσης είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό, διότι καταναλώνει τη λιγότερη δυνατή ισχύ.

Στο [57] παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός *Διαποδιαμορφωτή* (modem – modulator/demodulator) χαμηλής ισχύος ευρέως φάσματος για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτή η αρχιτεκτονική χαμηλής ισχύος μπορεί να εφαρμοσθεί σε μία *Τεχνολογία Ολοκληρωμένου Κυκλώματος Συγκεκριμένης Εφαρμογής* (ASIC – *Application-Specific Integrated Circuit*) προκειμένου να βελτιώσει ακόμη περισσότερο την αποδοτικότητα.

Η ζώνη των *Εξαιρετικά Υψηλών Συχνοτήτων* (UWB – *Ultra Wide Band*) – ή της *Ασύρματης Μετάδοσης Παλμών* (IR – *Impulse Radio*) – έχει χρησιμοποιηθεί πολύ σε παλμικά ραντάρ βασικής ζώνης καθώς και σε συστήματα εντοπισμού θέσης και έχει πρόσφατα επισύρει την προσοχή σε εφαρμογές επικοινωνίας ιδιαίτερα σε αυτές που σχετίζονται άμεσα με ασύρματα δίκτυα εσωτερικού χώρου. Η UWB εμπεριέχει μετάδοση βασικής ζώνης και ως εκ τούτου δεν απαιτεί τη χρήση ενδιάμεσων ραδιοσυχνοτήτων φέροντος κύματος. Γενικά, εδώ χρησιμοποιείται η *Διαμόρφωση Θέσης Παλμού* (PPM – *Pulse Position Modulation*). Το βασικότερο πλεονέκτημα της UWB είναι η προσαρμοστικότητα της σε *Δίκτυα Πολλαπλού Μονοπατιού* (multi-path networks) [59]. Η χαμηλή ισχύς μετάδοσης των σημάτων αλλά και η απλή κατασκευή του πομποδέκτη καθιστούν την UWB μία πολύ ελκυστική λύση για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.2.1 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα

Το φυσικό επίπεδο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων παραμένει ακόμη μία ανεξερεύνητη περιοχή. Τα ανοιχτά θέματα προς έρευνα ποικίλουν από το είδος της διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί και μέχρι τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών πομποδεκτών. Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής:

- ο *Σχήματα Διαμόρφωσης*: Για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, πρέπει να αναπτυχθούν απλά και με χαμηλή κατανάλωση ισχύος σχήματα διαμόρφωσης. Το σχήμα διαμόρφωσης μπορεί να είναι είτε *Βασικής Ζώνης* (baseband), είτε *Ζώνης Διέλευσης* (passband).
- ο *Στρατηγικές* προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσμενείς επιπτώσεις που παρατηρούνται κατά τη διάδοση του σήματος.
- ο *Σχεδίαση Υλικού Μέρους*: Πρέπει να προχωρήσει η σχεδίαση μικρών σε μέγεθος μονάδων ανίχνευσης και επεξεργασίας δεδομένων, χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, με ταυτόχρονη έρευνα για την εξεύρεση νέων ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών διαχείρισης υλικού. Μερικές από αυτές τις στρατηγικές αφορούν θέματα:
 - διαχείρισης συχνοτήτων λειτουργίας,
 - μείωσης ισχύος μεταγωγής (switching power), καθώς και
 - πρόβλεψη του φορτίου στις μονάδες επεξεργαστών [4,5].

3.3 Το Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων

Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer) είναι υπεύθυνο για την:

- Πολύπλεξη ροών (ή ρευμάτων) δεδομένων (data streams),
- Ανίχνευση των πλαισίων δεδομένων,
- Πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης και τον έλεγχο σφαλμάτων.

Εξασφαλίζει την αξιόπιστη και αποδοτική επικοινωνία μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων (από σημείο σε σημείο – point-to-point) σε ένα δίκτυο, αλλά και την επικοινωνία μεταξύ ενός κόμβου και ενός πολυκομβικού δικτύου (από σημείο σε πολλαπλό σημείο – point-to-multipoint) [4,5].

Στη συνέχεια αναλύονται οι στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και αφορούν κυρίως τον έλεγχο πρόσβασης στο μέσον μετάδοσης και τον έλεγχο σφαλμάτων.

3.3.1 Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο Μετάδοσης

Το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης (MAC – Medium Access Control protocol), σε ένα ασύρματο multihop δίκτυο αισθητήρων, πρέπει να επιτυγχάνει δύο πολύ βασικούς στόχους:

- ο *Πρώτος Στόχος*: Η δημιουργία του Δικτύου Υποδομής. Επειδή χιλιάδες αισθητήριοι κόμβοι είναι πυκνά διασκορπισμένοι σε ένα πεδίο αισθητήρων το πρωτόκολλο MAC οφείλει να εγκαθιστά ζεύξεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων για τη μεταφορά των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται η βασική υποδομή η οποία είναι εντελώς απαραίτητη για την από τμήμα σε τμήμα διαδρομής (hop-by-hop) ασύρματη επικοινωνία, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται στο δίκτυο η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης.
- ο *Δεύτερος Στόχος*: Η δίκαιη και αποδοτική κατανομή των πόρων επικοινωνίας μεταξύ των αισθητηρίων κόμβων [4,5].

3.3.1.1 Λόγοι για Μη Χρήση Κάποιων Πρωτοκόλλων MAC σε Δίκτυα Αισθητήρων

Έχει ήδη αναφερθεί με έμφαση σε προηγούμενες ενότητες, ότι απαιτούνται νέα πρωτόκολλα και αλγόριθμοι για την αποτελεσματική διαχείριση των περιορισμένων πόρων αλλά και την πλήρη ανταπόκρισή τους στις ειδικές απαιτήσεις εφαρμογών που προβάλλουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σημασία αυτών των περιορισμών, ας εξετάσουμε πρώτα τα πρωτόκολλα MAC που χρησιμοποιούνται σε άλλα ασύρματα δίκτυα καθώς και τους λόγους για τους οποίους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Σ' ένα *Κυβελωτό Σύστημα (cellular system)* οι σταθμοί βάσης συνδέονται ενσύρματα μεταξύ τους και σχηματίζουν έτσι τον κορμό του δικτύου. Κάθε κινούμενος κόμβος απέχει μόνο κατά ένα τμήμα διαδρομής ή βήμα (hop) από τον πλησιέστερο σταθμό βάσης. Αυτός ο τύπος δικτύου αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως τύπος δικτύου που *βασίζεται στην υποδομή (infrastructure-based)*.

Ο πρωταρχικός στόχος του πρωτοκόλλου MAC, σε τέτοιου είδους συστήματα, είναι η παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών (QoS – Quality of Service) και η αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης. Εδώ, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι στην κυριολεξία δευτερεύουσας σημασίας επειδή οι σταθμοί βάσης διαθέτουν απεριόριστα ποσά ενέργειας και ο κινούμενος χρήστης έχει τη δυνατότητα, ανά πάσα στιγμή, να φορτίσει την μπαταρία της κινητής συσκευής του. Άρα, ένα τέτοιο σχήμα πρόσβασης (πρωτόκολλο MAC), με αυτά τα χαρακτηριστικά, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διότι σε αυτά δεν υπάρχει ένας κεντρικός κόμβος που να μπορεί να επικοινωνεί με όλους τους υπόλοιπους κόμβους, όπως ακριβώς κάνει ο σταθμός βάσης. Αυτό καθιστά το συγχρονισμό όλων των κόμβων του δικτύου ένα πολύ δύσκολο έργο. Εκτός αυτού, η αποδοτικότητα της ισχύος επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής του δικτύου αισθητήρων και ως εκ τούτου αυτό αποτελεί ένα θέμα τεράστιας σημασίας που δεν μπορεί να μη ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Το *Bluetooth* και τα *Κινητά Δίκτυα Ad hoc (MANETs – Mobile Ad hoc NETWORKS)* ίσως μοιάζουν περισσότερο από κάθε άλλο δίκτυο με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το *Bluetooth* είναι ένα χωρίς υποδομή (infrastructureless) σύστημα μικρής εμβέλειας, που έχει ως στόχο να αντικαταστήσει με ραδιοζεύξεις (RF links) τα καλώδια επικοινωνίας μεταξύ των ηλεκτρονικών τερματικών συσκευών των χρηστών. Η τοπολογία του δικτύου *Bluetooth* είναι τύπου αστέρα, όπου ο κάθε κύριος κόμβος (master node) έχει τη δυνατότητα να συνδέεται ασύρματα με άλλους επτά, το πολύ, κόμβους ώστε να σχηματίζει ένα πικο-δίκτυο (piconet). Κάθε πικο-δίκτυο χρησιμοποιεί ένα κεντρικά προσδιορισμένο TDMA (Time-Division Multiple Access – πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου) καθώς και ένα *Πρότυπο Αναπήδησης Συχνότητας* (frequency hopping pattern). Η ισχύς μετάδοσης είναι τυπικά γύρω στα 20 dBm, ενώ η εμβέλεια εκπομπής είναι της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων.

Το πρωτόκολλο MAC στα MANETs έχει ως αποστολή το σχηματισμό της υποδομής του δικτύου και τη διατήρησή της καθ' όλη τη διάρκεια κίνησης των κόμβων. Κατά συνέπεια, πρωταρχικός στόχος είναι η παροχή ποιότητας υπηρεσιών σε συνθήκες διαρκούς κίνησης. Παρά το γεγονός ότι οι κόμβοι είναι φορητές συσκευές τροφοδοτούμενες από μπαταρίες, είναι πολύ εύκολο να αντικατασταθούν από το χρήστη, όποτε κρίνεται απαραίτητο, και συνεπώς το θέμα της ενέργειας είναι πλέον δευτερεύουσας σημασίας.

Σε αντίθεση με αυτά τα δύο συστήματα που μόλις περιγράψαμε, το δίκτυο αισθητήρων είναι πάρα πολύ πιθανόν να αποτελείται από περισσότερους κόμβους. Στα δίκτυα αισθητήρων η ισχύς μετάδοσης (περίπου 0 dBm), καθώς και η ράδιο-εμβέλεια των κόμβων, είναι κατά πολύ μικρότερες από αυτές των MANETs ή των *Bluetooth*. Σε ένα δίκτυο αισθητήρων, η τοπολογία αλλάζει πολύ πιο συχνά, και αυτό οφείλεται, κατά κύριο λόγο, είτε στη διαρκή κίνηση των κόμβων, είτε στο γεγονός ότι κάποιιοι κόμβοι είναι δυνατόν, τελείως ξαφνικά, να τεθούν εκτός λειτουργίας. Επιπλέον, η κινητικότητα των κόμβων σε ένα MANET είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν ενός δικτύου αισθητήρων. Ουσιαστικά, η πραγματική ανάγκη που προβάλλουν τα δίκτυα αισθητήρων για εξοικονόμηση ενέργειας δεν αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα, ούτε των MANETs, αλλά ούτε και του *Bluetooth*, κατά συνέπεια, τα πρωτόκολλα MAC των προαναφερθέντων δικτύων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια στα δίκτυα αισθητήρων.

3.3.1.2 Πρωτόκολλα Επιπέδου MAC Κατάλληλα για Χρήση σε Δίκτυα Αισθητήρων

Μέχρι στιγμής, έχουν προταθεί οι εκδόσεις (versions) *Σταθερής Κατανομής* (fixed allocation) και *Τυχαίας Πρόσβασης στο Μέσο Μετάδοσης* (random access) των MAC πρωτοκόλλων [17], [59]. Τα *Βασιζόμενα στην Απαίτηση* (demand-based) σχήματα MAC μπορεί να μην είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εξ' αιτίας της πολύ μεγάλης τους επιβάρυνσης σε μετάδοση μηνυμάτων, αφενός, και στην καθυστέρηση για την αποκατάσταση της ζεύξης, αφετέρου.

Συμπερασματικά, πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι το είδος του πρωτοκόλλου MAC που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα αισθητήρων, θα πρέπει, οπωσδήποτε, να υποστηρίζει λειτουργίες για την όσο το δυνατόν περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας (power-saving mode). Ο πλέον προφανής τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας είναι να τίθεται ο πομποδέκτης εκτός λειτουργίας, όποτε δε χρησιμοποιείται. Παρά το γεγονός, ότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι οι αισθητήριοι κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μικρά πακέτα. Έτσι λοιπόν, αν τη μία στιγμή ο πομποδέκτης είναι σε λειτουργία, προκειμένου να στείλει ένα μικρό αριθμό μικρών πακέτων, και αμέσως μετά τίθεται εκτός λειτουργίας, τότε η ενέργεια που θα καταναλώνει μπορεί να είναι πολύ περισσότερη από ότι αν είχε αφεθεί να λειτουργεί όλο αυτό το διάστημα. Συνεπώς, η λειτουργία για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αποδίδει μόνο όταν αυτή χρησιμοποιείται για

χρόνο μεγαλύτερο από ότι ένα κατώφλι. Περισσότερες πληροφορίες για θέματα εξοικονόμησης ενέργειας δίδονται στο κεφάλαιο 4 που αφορά τους μηχανισμούς ελέγχου και διατήρησης ισχύος σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.3.2 Έλεγχος Σφαλμάτων

Μία πρόσθετη σημαντική λειτουργία του επιπέδου ζεύξης δεδομένων είναι ο έλεγχος σφαλμάτων στη μετάδοση δεδομένων. Στα δίκτυα επικοινωνίας υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί ελέγχου σφαλμάτων:

- ο Ο έλεγχος σφαλμάτων κατά την αποστολή (FEC – Forward Error Correction) και
- ο Η αυτόματη απαίτηση επανάληψης (ARQ –Automatic Repeat Request).

Η χρησιμότητα του μηχανισμού ARQ στα multihop δίκτυα αισθητήρων περιορίζεται εξ' αιτίας της πρόσθετης κατασπατάλησης ενέργειας που δημιουργείται από τις συνεχείς αναμεταδόσεις των πακέτων. Όμως, από την άλλη πλευρά, η πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης είναι πολύ μεγαλύτερη στο FEC, οπότε απαιτείται η ενσωμάτωση μηχανισμών διόρθωσης σφαλμάτων.

Με βάση τα όσα ήδη έχουν αναφερθεί, συμπεραίνεται ότι, η χρήση απλών μηχανισμών ελέγχου σφαλμάτων, με χαμηλής πολυπλοκότητας κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση, θα ήταν πολύ πιθανόν η πλέον ενδεδειγμένη λύση για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στην επόμενη ενότητα δίνεται μία σύντομη περιγραφή των βασικών παραγόντων σχεδίασης του FEC στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.3.2.1 Έλεγχος Σφαλμάτων κατά την Αποστολή (FEC - Forward Error Correction)

Η αξιοπιστία των ζεύξεων αποτελεί σημαντική παράμετρο στη σχεδίαση οποιουδήποτε ασύρματου δικτύου, πόσο μάλλον όταν πρόκειται για δίκτυα αισθητήρων, εξ' αιτίας της απρόβλεπτης και δύσκολης φύσης των καναλιών που συναντάται σε διάφορα σενάρια εφαρμογής. Κάποιες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα ο εντοπισμός ή ιχνηλασία κινητού (*mobile tracking*) και η παρακολούθηση μηχανών (*machine monitoring*), απαιτούν εξαιρετική ακρίβεια δεδομένων.

Ο ρυθμός ελέγχου δυαδικών ψηφίων (BER – Bit Error Rate) σε κανάλι είναι ένας πολύ καλός δείκτης αξιοπιστίας της ζεύξης. Αποδεικνύεται ότι ο BER είναι απευθείας ανάλογος προς την ταχύτητα συμβόλων R_s και αντιστρόφως ανάλογος προς το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR – *Signal-to-Noise ratio*) (E_s/N_0), αφενός, και το επίπεδο ισχύος του πομπού P_{out} αφετέρου.

Αξιόπιστη επικοινωνία δεδομένων μπορεί να υπάρξει, είτε με την αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος εξόδου (P_{out}), είτε με χρήση του κατάλληλου FEC. Η πρώτη εκ των δύο λύσεων δεν είναι εφικτή για το λόγο ότι ο κάθε αισθητήριος κόμβος έχει πολύ περιορισμένα διαθέσιμα ποσά ενέργειας. Έτσι λοιπόν στρεφόμαστε προς το FEC. Με τη χρήση του FEC μπορεί να επιτευχθεί ένα δεδομένο BER με χαμηλή ισχύ εκπομπής. Όμως, εδώ θα πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη η πρόσθετη ισχύς επεξεργασίας που απαιτείται για την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση. Αυτή η ισχύς επεξεργασίας αντλείται από τα ήδη περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα του αισθητήριου κόμβου. Αυτό μπορεί να είναι ένα κρίσιμο και πολύ σοβαρό θέμα στα δίκτυα αισθητήρων, αλλά ασήμαντο στα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα. Εάν η ισχύς επεξεργασίας των δεδομένων είναι μεγαλύτερη από το κέρδος που θα προκύψει από την κωδικοποίηση, τότε η όλη διαδικασία είναι ενεργειακά μη αποδοτική.

Στο [7] θεωρείται ένα αργό κανάλι εξασθένησης Rayleigh, μη επιλεγμένης συχνότητας, όπου χρησιμοποιούνται κώδικες περιέλιξης (convolutional codes) για το FEC. Αποδεικνύεται ότι, η μέση καταναλισκόμενη ενέργεια, ανά χρήσιμο δυαδικό ψηφίο, παρουσιάζει μία εκθετική αύξηση σε σχέση με το περιορισμένο μήκος του κώδικα και είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα

κωδικοποίησης. Επιπλέον, βρέθηκε επίσης ότι το FEC είναι γενικά ανεπαρκές, εφόσον η κωδικοποίηση εκτελείται με τη χρήση μικροεπεξεργαστή, οπότε συνιστάται η προσθήκη ενός αποκωδικοποιητή Viterbi επάνω στην πλακέτα. Από ότι μέχρι στιγμής είναι γνωστό, πολλά σχήματα κωδικοποίησης παραμένουν ακόμη ανεξερεύνητα. Απλές τεχνικές κωδικοποίησης, που να καθιστούν εύκολη την αποκωδικοποίηση, είναι πολύ πιθανόν να αποτελέσουν μία ενεργειακά αποδοτική λύση για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

3.3.2.2 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα

Παρά το γεγονός ότι έχουν ήδη προταθεί κάποια σχήματα για την πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, η σχεδίαση του πρωτοκόλλου ζεύξης δεδομένων παραμένει ακόμη ένα πολύ ανοιχτό θέμα προς έρευνα. Θέματα κλειδιά προς έρευνα αποτελούν:

- Τα *Πρωτόκολλα Επιπέδου MAC για Δίκτυα Αισθητήρων με Κινούμενους Κόμβους*: Τα διάφορα σχήματα που έχουν προταθεί ως τώρα (SMACS και EAR) [59], δουλεύουν αρκετά καλά κυρίως σε σταθερά δίκτυα αισθητήρων. Υποθέτουν ότι ένας κινούμενος κόμβος έχει πολλούς σταθερούς κόμβους ως γείτονες. Αυτοί οι αλγόριθμοι χρειάζονται βελτίωση προκειμένου να χειρίζονται εκτεταμένη κίνηση κόμβων. Θέματα κινητικότητας και ανίχνευσης φέροντος, για σχήματα που έχουν ως βάση το CSMA, αποτελούν ακόμη ένα ευρύ ανεξερεύνητο πεδίο.
- *Ο Προσδιορισμός των Χαμηλότερων Ορίων Ενέργειας που Απαιτείται για την Αυτόματη Οργάνωση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων*.
- *Σχήματα Κωδικοποίησης για τον Έλεγχο Σφαλμάτων*: Ο έλεγχος σφαλμάτων σε δίκτυα αισθητήρων είναι εξαιρετικά σημαντικός για κάποιες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στη μετάδοση των δεδομένων, όπως είναι για παράδειγμα, ο εντοπισμός κινούμενων κόμβων και η παρακολούθηση μηχανών. Η προσαρμογή των ήδη υπάρχοντων μηχανισμών ελέγχου σφαλμάτων στα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί ένα θέμα το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί επισταμένα.
- *Ενεργειακά Αποδοτικοί Τρόποι Λειτουργίας*: Προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, θα πρέπει οι κόμβοι να εισέρχονται σε κατάσταση μειωμένης δραστηριότητας από τη στιγμή που αρχίζουν να εξαντλούνται τα ποσά ενέργειας που διαθέτουν. Η διαχείριση των μεταβάσεων από τη μία κατάσταση στην άλλη (ON-OFF), για αυτούς τους κόμβους, είναι ένα ακόμη θέμα προς μελέτη.

3.4 Το Επίπεδο Δικτύου

Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι πυκνά διασκορπισμένοι σε μικρή απόσταση ο ένας από τον άλλο σε μία περιοχή, είτε πολύ κοντά στο υπό παρακολούθηση φαινόμενο, είτε ακόμη και μέσα σε αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, απαιτούνται ειδικά multihop ασύρματα πρωτόκολλα δρομολόγησης (wireless routing protocols) προκειμένου να φτάσουν τα δεδομένα από τους αισθητήριους κόμβους στο σταθμό βάσης (sink). Οι παραδοσιακές ad hoc τεχνικές δρομολόγησης δεν ταιριάζουν συνήθως στα δίκτυα αισθητήρων για τους λόγους που έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

Το επίπεδο δικτύου (Network layer), στα δίκτυα αισθητήρων, σχεδιάζεται συνήθως σύμφωνα με τις παρακάτω αρχές:

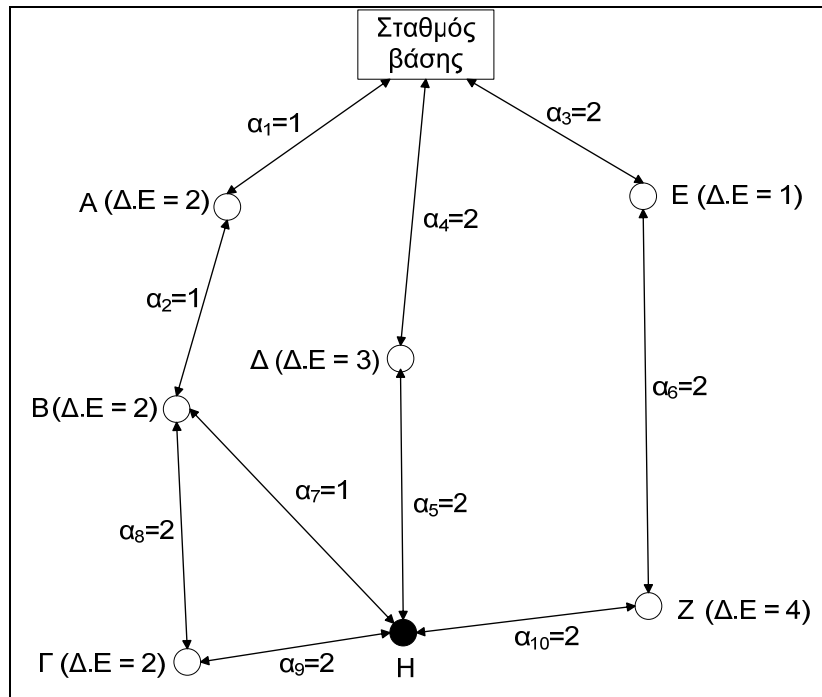
- Η αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων παραμένει ένας από τους σπουδαιότερους παράγοντες και ως εκ τούτου θα πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη.
- Τα δίκτυα αισθητήρων είναι κατ' εξοχήν δεδομένο-κεντρικά (data centric).

- Η συσσώρευση των δεδομένων παραμένει χρήσιμη μόνο όταν δεν προβάλλει εμπόδια στην προσπάθεια συνεργασίας μεταξύ των αισθητήριων κόμβων.
- Σε ένα ιδανικό δίκτυο αισθητήρων οι κόμβοι δεν έχουν τη δική τους μοναδική διεύθυνση: αναγνωρίζονται με βάση την εκάστοτε θέση τους σε αυτό και από τις ιδιότητες του φαινομένου που παρατηρούν.

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά παραδείγματα δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ενεργειακά αποδοτικές διαδρομές (routes) μπορούν να εντοπιστούν,

- είτε με βάση τη Διαθέσιμη Ενέργεια ($\Delta.E$) (Available Power – PA) των αισθητήριων κόμβων,
- είτε με βάση την Ενέργεια (α) που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων από τον ένα κόμβο στον άλλο.



Σχήμα 3-2: Η αποδοτικότητα ισχύος των δρόμων (I)

Στο Σχήμα 3-2, ο κόμβος H είναι ο πηγαίος κόμβος ή κόμβος αφετηρία (source node), ο οποίος ανιχνεύει και μετρά τα φαινόμενα και στη συνέχεια στέλνει τα αποτελέσματα των μετρήσεών του στο σταθμό βάσης (Σ.Β). Οι πιθανές διαδρομές, τις οποίες μπορεί να ακολουθήσει προκειμένου να βρίσκεται σε επικοινωνία με το σταθμό βάσης, είναι οι εξής:

- Διαδρομή 1: Σ.Β-A-B-H, συνολική $\Delta.E = 3$, συνολική απαιτούμενη ενέργεια $\alpha=4$
- Διαδρομή 2: Σ.Β-A-B-Γ-H, συνολική $\Delta.E = 6$, συνολική απαιτούμενη ενέργεια $\alpha = 6$
- Διαδρομή 3: Σ.Β-Δ-H, συνολική $\Delta.E = 5$, συνολική απαιτούμενη ενέργεια $\alpha = 3$
- Διαδρομή 4: Σ.Β-E-Z-H, συνολική $\Delta.E = 5$, συνολική απαιτούμενη ενέργεια $\alpha = 6$

Μία ενεργειακά αποδοτική διαδρομή, για δρομολόγηση πακέτων, επιλέγεται με βάση μία από τις παρακάτω μεθόδους:

- Διαδρομή Μέγιστης Διαθέσιμης Ενέργειας: Προτιμάται η διαδρομή εκείνη που έχει τη μέγιστη συνολική διαθέσιμη ενέργεια ($\Delta.E$). Η συνολική διαθέσιμη ενέργεια υπολογίζεται

αθροίζοντας τις επί μέρους Δ.Ε. κάθε κόμβου κατά μήκος της διαδρομής. Με βάση αυτήν την προσέγγιση επιλέγεται η διαδρομή 2 ως η καλύτερη (Σχήμα 3-2). Όμως, η διαδρομή 2 συμπεριλαμβάνει όλους τους κόμβους της διαδρομής 1 συν έναν επιπλέον κόμβο. Ως εκ τούτου, παρά το γεγονός ότι έχει τη μεγαλύτερη διαθέσιμη ενέργεια, δεν είναι ενεργειακά αποδοτική. Άρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι, ως εναλλακτική λύση, πρέπει να επιλέγονται διαδρομές που να μπορούν μεν να συνδέουν τον πηγαίο κόμβο με το σταθμό βάσης, αλλά να μην αποτελούν μέρος άλλων διαδρομών. Έτσι, απαλείφοντας τη διαδρομή 2, επιλέγεται η διαδρομή 4 ως η πλέον ενεργειακά αποδοτική, όταν χρησιμοποιείται το σχήμα της διαδρομής με τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια [4,5].

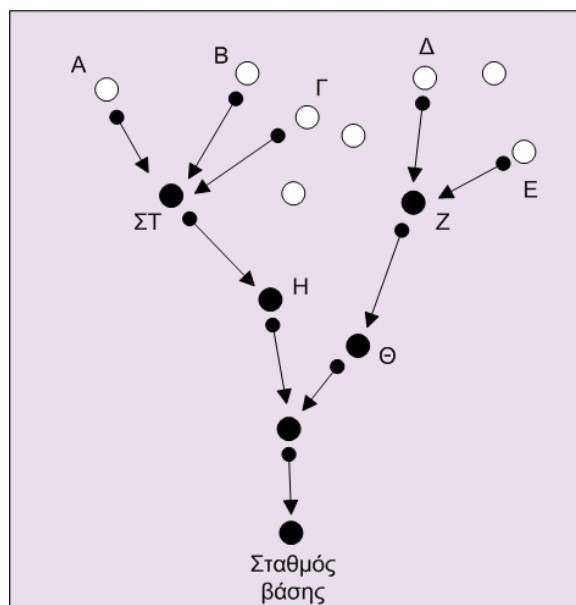
- *Διαδρομή Ελάχιστης Ενέργειας:* Η διαδρομή ελάχιστης ενέργειας είναι εκείνη που καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια (μικρότερο a) για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων από τον πηγαίο κόμβο προς το σταθμό βάσης. Η διαδρομή ελάχιστης ενέργειας (Σχήμα 3-2) είναι η διαδρομή 1.
- *Διαδρομή με τον Ελάχιστο Αριθμό Βημάτων:* Εδώ επιλέγεται ως η καλύτερη διαδρομή εκείνη που χρησιμοποιεί τα λιγότερα βήματα ή τμήματα διαδρομών (hops) για να φτάσει στο σταθμό βάσης. Η διαδρομή 3 (Σχήμα 3-2), για αυτό το σχήμα, επιλέγεται ως η πλέον ενεργειακά αποδοτική. Στο σημείο αυτό αξίζει να παρατηρήσουμε ότι τα σχήματα ελάχιστης ενέργειας και ελάχιστου αριθμού βημάτων διαδρομών (hops) επιλέγουν την ίδια διαδρομή, εφόσον η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων, σε κάθε ζεύξη, είναι ίδια (π.χ. όλα τα a είναι τα ίδια). Ως εκ τούτου, συμπεραίνεται ότι, όταν οι κόμβοι εκπέμπουν με την ίδια ισχύ και χωρίς την ύπαρξη οποιουδήποτε ελέγχου ισχύος, τότε η διαδρομή με τον ελάχιστο αριθμό κόμβων είναι ισοδύναμη με τη διαδρομή ελάχιστης ενέργειας [4,5].
- *Διαδρομή Μέγιστης Διαθέσιμης Ελάχιστης Ενέργειας Κόμβου:* Εδώ προτιμάται η διαδρομή της οποίας η ελάχιστη διαθέσιμη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από τις ελάχιστες διαθέσιμες ενέργειες των υπόλοιπων διαδρομών. Με βάση τα παραπάνω, και με βάση το Σχήμα 3-2, η διαδρομή 3 έρχεται πρώτη στην κατάταξη διότι είναι η πλέον ενεργειακά αποδοτική, και η διαδρομή 1 είναι η δεύτερη ενεργειακά πιο αποδοτική. Αυτό το σχήμα αποκλείει τον κίνδυνο χρησιμοποίησης ενός αισθητήριου κόμβου με χαμηλή διαθέσιμη ενέργεια, πολύ νωρίτερα από τους υπόλοιπους κόμβους, διότι βρίσκεται σε μία τέτοια διαδρομή όπου οι κόμβοι της έχουν πολύ υψηλή διαθέσιμη ενέργεια.

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι ότι η δρομολόγηση στα δίκτυα αισθητήρων μπορεί να είναι *δεδομένο-κεντρική*. Η δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση βασίζεται στο ενδιαφέρον που εκδηλώνει ο σταθμός βάσης, ή κάποιοι κόμβοι, για κάποια συγκεκριμένα δεδομένα, και μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Οι σταθμοί βάσης μεταδίδουν πακέτα σε όλους τους κόμβους ενημερώνοντας αυτούς για το είδος των δεδομένων που επιθυμούν να λάβουν [6].
- Οι αισθητήριοι κόμβοι διαφημίζουν τα δεδομένα που διαθέτουν [60] και αναμένουν αιτήσεις (requests) από τους υπόλοιπους ενδιαφερόμενους κόμβους.

Η δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση απαιτεί ονομασία η οποία να βασίζεται στα χαρακτηριστικά γνώρισμα [10]. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι αναγνωρίζονται με βάση τις ιδιότητες του φαινομένου που παρατηρούν. Εδώ οι χρήστες δεν ενδιαφέρονται για τα δεδομένα του κάθε κόμβου χωριστά, αλλά ενδιαφέρονται περισσότερο για να μάθουν το χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού τούτου του φαινομένου. Για παράδειγμα, ενδιαφέρονται περισσότερο να πληροφορηθούν για δεδομένα που απαντούν σε αναζητήσεις του τύπου «*Ποιες είναι εκείνες οι περιοχές όπου η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 30°C;*», παρά να πληροφορηθούν «*τη θερμοκρασία που μέτρησε ο αισθητήριος κόμβος*».

Η ονομασία, η οποία βασίζεται στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, χρησιμοποιείται για τη διεκπεραίωση ερωτήσεων (queries) κάνοντας χρήση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των φαινομένων. Επιπλέον, η ονομασία, η οποία βασίζεται στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, καθιστά πολύ σημαντικές τις λειτουργίες εκπομπής, πολλαπλής εκπομπής, γεω-εκπομπής (geocasting), και οποιουδήποτε άλλου τύπου εκπομπής.



Σχήμα 3-3: Η αποδοτικότητα ισχύος των δρόμων (II)

Η συγκέντρωση δεδομένων (data aggregation) είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων πλήρωσης κενών (implosion) και επικάλυψης (overlap) που υπάρχουν στη δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση [60]. Σε αυτήν την τεχνική, μπορούμε να φανταστούμε το δίκτυο αισθητήρων ως ένα ανεστραμμένο δέντρο πολλαπλής εκπομπής (multicast), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3, όπου ο σταθμός βάσης ζητά από τους ακραίους αισθητήριους κόμβους να του αναφέρουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες των φαινομένων. Τα δεδομένα που καταφθάνουν από τους διάφορους αισθητήριους κόμβους συγκεντρώνονται σε έναν από αυτούς και αυτός με τη σειρά του τα προωθεί στους επόμενους. Για παράδειγμα, ο κόμβος ΣΤ συγκεντρώνει τα δεδομένα από τους κόμβους Α, Β και Γ, ενώ ο κόμβος Ζ συγκεντρώνει τα δεδομένα από τους κόμβους Δ και Ε, (Σχήμα 3-3). Τη συγκέντρωση των δεδομένων μπορούμε να τη δούμε ως ένα σύνολο από αυτοματοποιημένες μεθόδους οι οποίες συνδυάζουν τα δεδομένα που προέρχονται από πολλούς διαφορετικούς κόμβους σε ένα σύνολο πληροφοριών που έχουν κάποιο νόημα [61]. Η συγκέντρωση δεδομένων είναι επίσης γνωστή ως *Συγχώνευση Δεδομένων (data fusion)* [60]. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά τη συγκέντρωση των δεδομένων, διότι οι προδιαγραφές τους (π.χ. οι θέσεις των κόμβων ανταποκριτών) δεν θα πρέπει να παραληφθούν. Προδιαγραφές τέτοιου είδους μπορεί να είναι χρήσιμες σε ορισμένες εφαρμογές.

Μία άλλη σημαντική λειτουργία του επιπέδου δικτύου είναι να παρέχει *Διαδικτυακή Λειτουργία (internetworking)* με εξωτερικά δίκτυα, όπως π.χ., με άλλα δίκτυα αισθητήρων, με συστήματα ελέγχου και εντολοδότησης, αλλά και με το Διαδίκτυο (Internet). Ένα σενάριο είναι οι σταθμοί βάσης να χρησιμοποιούνται ως πύλες (gateway) προς άλλα δίκτυα. Ένα άλλο σενάριο είναι η δημιουργία ενός δικτύου ραχοκοκαλιάς αποτελούμενο από όλους τους σταθμούς βάσης, το οποίο θα χρησιμοποιείται για την πρόσβαση σε άλλα εξωτερικά δίκτυα μέσω πύλης.

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά από τα πλέον συνήθη πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία έχουν προταθεί ως καλές λύσεις για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο LEACH αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

3.4.1 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Σε αυτήν την ενότητα επιχειρείται μία ανασκόπηση των ευρύτερα γνωστών πρωτοκόλλων δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [52].

- *Δρομολόγηση Ανάλογα με τη Δομή του Δικτύου*
 - Ομοιόμορφη ή Επίπεδη Δρομολόγηση (flat-based routing),
 - Ιεραρχική Δρομολόγηση (hierarchical-based routing), και
 - Θεσική Δρομολόγηση (location-based routing).

Στην *Ομοιόμορφη Δρομολόγηση*, όλοι οι κόμβοι έχουν τυπικά τους ίδιους ρόλους ή την ίδια λειτουργικότητα.

Στην *Ιεραρχική Δρομολόγηση*, οι κόμβοι διαδραματίζουν διαφορετικούς ρόλους στο δίκτυο.

Στη *Θεσική Δρομολόγηση* γίνεται εκμετάλλευση της θέσης των αισθητήριων κόμβων προκειμένου να δρομολογηθούν τα δεδομένα στο δίκτυο.

- *Δρομολόγηση Ανάλογα με τη Λειτουργικότητα*

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης θεωρείται “*Προσαρμόσιμο*” (*adaptive*) εφόσον υπάρχει δυνατότητα ελέγχου κάποιων παραμέτρων του συστήματος προκειμένου αυτό να προσαρμόζεται προς τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και προς τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα.

Επιπρόσθετα, αυτά τα πρωτόκολλα, ανάλογα με τις λειτουργίες που εκτελούν, μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής “*Τεχνικές Δρομολόγησης*”:

- Πολλαπλών Διαδρομών (Multipath-based),
- Αναζήτησης Πληροφοριών (Query-based),
- Διαπραγμάτευσης (Negotiation-based), και
- Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS-based), ή Συνάφειας (Coherent-based).
- Δρομολόγηση Ανάλογα με τον Τρόπο που η Πηγή Εντοπίζει τη Διαδρομή προς τον Προορισμό

Εκτός από τις ήδη αναφερθείσες ταξινομήσεις, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις επιπλέον κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που η πηγή ή αφετηρία εντοπίζει τη διαδρομή (route) προς τον προορισμό (destination).

- *Proactive protocols* (οι διαδρομές υπολογίζονται πριν προκύψει ανάγκη).
- *Reactive protocols* (όλες οι διαδρομές υπολογίζονται κατόπιν ζήτησης).
- *Hybrid protocols* (χρησιμοποιούν συνδυασμό των δύο πρωτοκόλλων).

Όταν οι αισθητήριοι κόμβοι είναι *Στατικοί ή Σταθεροί*, τότε είναι προτιμότερη η χρήση *Proactive* πρωτοκόλλων δρομολόγησης με βάση τους πίνακες (table-driven routing protocols), παρά η χρήση πρωτοκόλλων των οποίων όλες οι διαδρομές υπολογίζονται κατόπιν ζήτησης (*Reactive*). Σε αυτό εδώ το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ένα πολύ σημαντικό ποσό ενέργειας καταναλώνεται για την εξεύρεση της καταλληλότερης διαδρομής και την εγκατάσταση των πρωτοκόλλων reactive [62].

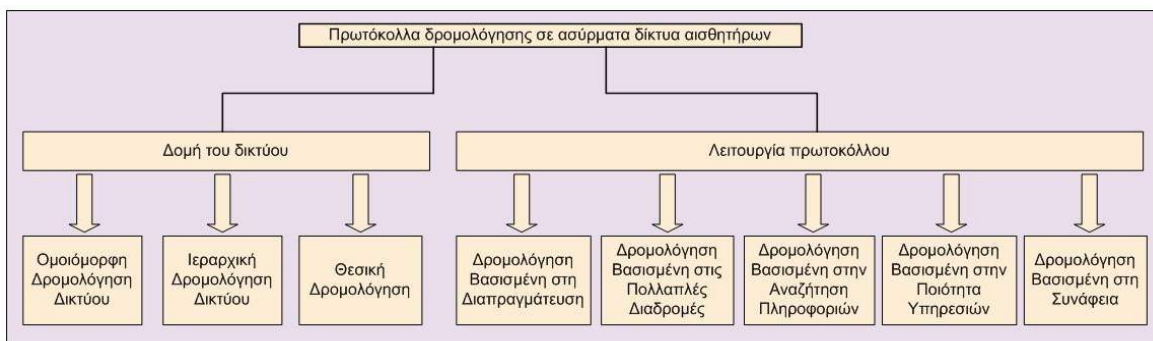
➤ Δρομολόγηση με Συνεργάσιμα Πρωτόκολλα

Υπάρχει μία ακόμη κατηγορία πρωτοκόλλων τα οποία καλούνται “Συνεργάσιμα” (*cooperative*). Στη δρομολόγηση με συνεργάσιμα πρωτόκολλα, οι κόμβοι αποστέλλουν δεδομένα προς έναν κεντρικό κόμβο, όπου εκεί μπορούν να συγκεντρωθούν και να υποστούν ίσως μία περαιτέρω επεξεργασία, μειώνοντας έτσι ακόμη περισσότερο το κόστος δρομολόγησης σε όρους κατανάλωσης ενέργειας.

➤ Δρομολόγηση με Πρωτόκολλα που Βασίζονται σε Πληροφορίες “Συγχρονισμού” (*Timing*) και “Θέσης” (*Position*)

Εδώ δίνεται μία μεγαλύτερη προσοχή σε αυτού του είδους τα πρωτόκολλα.

Για λόγους καλύτερης οργάνωσης αυτής της θεματικής ενότητας, χρησιμοποιείται μία ταξινόμηση η οποία συνάδει με τη δομή του δικτύου καθώς και με τη λειτουργία των πρωτοκόλλων (κριτήρια δρομολόγησης – *routing criteria*). Η ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων απεικονίζεται στο Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4: Ταξινόμηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

3.4.1.1 Πρωτόκολλα Βασισμένα στη Δομή του Δικτύου - Ομοιόμορφη Δρομολόγηση

3.4.1.1.1 SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation)

Η οικογένεια προσαρμόσιμων (*adaptive*) πρωτοκόλλων SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation* – Πρωτόκολλα Αισθητήρων για Πληροφορίες μέσω Διαπραγμάτευσης) που προτείνεται από τους Heinzelman *et al.* στα [12], [60,63] έχει σχεδιαστεί για να καλύψει τις ατέλειες του κλασικού σχήματος υπερχειλίσης ή πλημμύρας (*Flooding*) μέσα από διαπραγμάτευση και προσαρμογή των πόρων (*resource adaptation*).

Το SPIN βασίζεται στην εξής ιδέα: Οι κόμβοι λειτουργούν πιο αποτελεσματικά και εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια με το να στέλνουν μετά-δεδομένα, δηλαδή, πληροφορίες οι οποίες περιγράφουν τα διαθέσιμα δεδομένα αντί να στέλνουν τα ίδια τα δεδομένα. Για παράδειγμα, οι αισθητήριοι κόμβοι πρέπει να παρακολουθούν τις μεταβολές στα ενεργειακά τους αποθέματα.

Στο SPIN υπάρχουν τρία είδη μηνυμάτων, το ADV, το REQ και το DATA. Ο κάθε αισθητήριος κόμβος, πριν από την αποστολή ενός μηνύματος DATA, μεταδίδει ένα μήνυμα ADV το οποίο περιέχει έναν περιγραφητή (*descriptor*), π.χ. μετά-δεδομένα, του μηνύματος DATA. Εάν κάποιος γείτονας ενδιαφέρεται για τα δεδομένα, τότε στέλνει ένα μήνυμα REQ για τα DATA, και στη συνέχεια τα δεδομένα στέλνονται σε αυτόν το γειτονικό αισθητήριο κόμβο. Κατόπιν, ο αισθητήριος κόμβος επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να στέλνονται πακέτα με δεδομένα μόνο σε όσους κόμβους ενδιαφέρονται για αυτά. Στο σημείο αυτό θα πρέπει

να υπενθυμίσουμε ότι το πρωτόκολλο SPIN βασίζεται στη δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση (data-centric routing) [60], όπου οι κόμβοι μεταδίδουν ένα μήνυμα ADV, το οποίο διαφημίζει τα διαθέσιμα δεδομένα, και αναμένουν αιτήσεις (REQuests – REQs) από τους ενδιαφερόμενους.

3.4.1.1.2 Directed Diffusion (κατευθυνόμενη διάχυση)

Στο [6] προτείνεται το παράδειγμα της διασποράς δεδομένων με *Κατευθυνόμενη Διάχυση (directed diffusion)* το οποίο έχει ως εξής: Ο σταθμός βάσης εκπέμπει ένα μήνυμα *ενδιαφέροντος*, προς όλους τους κόμβους του δικτύου αισθητήρων, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά μία περιγραφή των εργασιών που πρέπει να γίνουν. Έτσι, σε κάθε εργασία αντιστοιχεί ένα μήνυμα περιγραφής. Στη συνέχεια, ο κάθε κόμβος αποθηκεύει αυτό το μήνυμα ενδιαφέροντος στη μνήμη του. Το μήνυμα ενδιαφέροντος περιέχει διάφορα πεδία, όπως είναι το πεδίο χρονοσφραγίδας (timestamp) και τα πεδία βαθμωτών ανυσμάτων (gradients), τα οποία χρησιμοποιούνται για την εύρεση της διαδρομής που οδηγεί πίσω στο σταθμό βάσης. Καθώς λοιπόν το μήνυμα ενδιαφέροντος διαδίδεται στο δίκτυο αισθητήρων, εγκαθίσταται ταυτόχρονα και η διαδρομή που οδηγεί πίσω στο σταθμό βάσης. Όταν οι κόμβοι έχουν να στείλουν δεδομένα στο σταθμό βάσης χρησιμοποιούν την ήδη εγκατεστημένη διαδρομή. Η διάδοση των μηνυμάτων ενδιαφέροντος και δεδομένων αποφασίζεται σε τοπικό επίπεδο. Επίσης, ο σταθμός βάσης οφείλει να ανανεώνει και να ενισχύει το ενδιαφέρον του από τη στιγμή που θα αρχίσει να λαμβάνει δεδομένα από τους κόμβους (πηγή). Πρέπει να τονιστεί, ότι ο μηχανισμός της *Κατευθυνόμενης Διάχυσης (directed diffusion)* βασίζεται στη δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση, όπου, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο σταθμός βάσης μεταδίδει το μήνυμα ενδιαφέροντος.

3.4.1.1.3 Rumor Routing (δρομολόγηση διάδοσης)

Το πρωτόκολλο *Rumor Routing* (δρομολόγηση διάδοσης) [64] είναι μία ακόμη παραλλαγή του *Directed Diffusion* και απευθύνεται σε περιβάλλον όπου δεν είναι εφαρμόσιμα τα κριτήρια της γεωγραφικής δρομολόγησης. Γενικά, το *Directed Diffusion* διοχετεύει το ερώτημα (query) με τη μέθοδο της υπερχειλίσης (flooding) σε ολόκληρο το δίκτυο εφόσον δεν υπάρχει κανένα απολύτως γεωγραφικό κριτήριο για τη διάχυση των εργασιών. Όμως, σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει πολύ μικρή ζήτηση δεδομένων από τους κόμβους και έτσι δεν είναι απαραίτητη η χρήση της μεθόδου της υπερχειλίσης.

Μία εναλλακτική μέθοδος είναι να διοχετευθούν τα γεγονότα με τη μέθοδο της υπερχειλίσης εφόσον ο αριθμός τους είναι μικρός αλλά είναι μεγάλος ο αριθμός των ερωτημάτων. Το πρωτόκολλο *Rumor Routing* βρίσκεται κάπου ανάμεσα στην υπερχειλίση των γεγονότων και στην υπερχειλίση των ερωτημάτων.

Η βασική ιδέα είναι να δρομολογηθούν τα ερωτήματα προς τους κόμβους εκείνους οι οποίοι έχουν παρατηρήσει ένα συγκεκριμένο γεγονός και όχι να πλημμυρίσουμε ολόκληρο το δίκτυο για να πάρουμε την πληροφορία για τα γεγονότα που συμβαίνουν σε αυτό.

Προκειμένου να πλημμυρίσει το δίκτυο με γεγονότα, ο αλγόριθμος *Rumor Routing* χρησιμοποιεί πακέτα με μεγάλη διάρκεια ζωής τα οποία ονομάζονται *agents*. Όταν κάποιος κόμβος ανιχνεύσει ένα γεγονός, το προσθέτει στον τοπικό του πίνακα και στη συνέχεια παράγει έναν *agent*. Οι *agents* ταξιδεύουν σε ολόκληρο το δίκτυο φέρνοντας στους απομακρυσμένους κόμβους την πληροφορία για τα τοπικά γεγονότα.

Όταν κάποιος κόμβος δημιουργήσει ένα ερώτημα για κάποιο γεγονός, τότε οι κόμβοι που γνωρίζουν τη διαδρομή μπορούν να ανταποκριθούν στο ερώτημα κάνοντας αναφορά στο δικό τους πίνακα γεγονότων. Έτσι αποφεύγεται το κόστος που συνεπάγεται από την υπερχειλίση ολόκληρου του δικτύου. Ο *Rumor Routing* διατηρεί μόνο ένα μονοπάτι μεταξύ της πηγής και του

προορισμού, αντίθετα με ότι συμβαίνει στο *Directed Diffusion* όπου τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω πολλαπλών μονοπατιών με χαμηλές ταχύτητες.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξομοίωση του συστήματος δείχνουν ότι το *Rumor Routing* επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας συγκρινόμενο με την υπερχειλίση των γεγονότων και μπορεί επίσης να διαχειριστεί την αποτυχία του κόμβου. Όμως, το *Rumor Routing* συμπεριφέρεται καλά μόνο όταν είναι μικρός ο αριθμός των γεγονότων. Δεν ενδείκνυται όταν πρόκειται για μεγάλο αριθμό γεγονότων διότι το κόστος συντήρησης των *agents* αλλά και των πινάκων καταγραφής των γεγονότων είναι αρκετά υψηλό.

3.4.1.1.4 Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA)

Ο αλγόριθμος “*Minimum Cost Forwarding Algorithm*” (MCFA) [65] εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η κατεύθυνση της δρομολόγησης είναι πάντοτε γνωστή (π.χ. προς το σταθερό εξωτερικό σταθμό βάσης). Ως εκ τούτου, ένας αισθητήριο κόμβος δε χρειάζεται να έχει μία μοναδική ταυτότητα (ID) ούτε και να συντηρεί ένα πίνακα δρομολόγησης. Αντί γι’ αυτό, ο κάθε κόμβος διατηρεί μόνο μία εκτίμηση του ελάχιστου κόστους από αυτόν προς το σταθμό βάσης. Το κάθε μήνυμα που πρόκειται να προωθηθεί από τον αισθητήριο κόμβο εκπέμπεται προς τους γείτονές του. Όταν κάποιος κόμβος λάβει το μήνυμα, ελέγχει κατ’ αρχήν εάν αυτό υπάρχει στο μονοπάτι ελάχιστου κόστους που βρίσκεται ανάμεσα σε αυτόν και το σταθμό βάσης. Εάν πράγματι συμβαίνει αυτό, τότε αναμεταδίδει το μήνυμα στους γείτονές του. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη στιγμή που θα φθάσει στο σταθμό βάσης.

Gradient-Based Routing (GBR)

Οι Schurgers *et al.* [66] προτείνουν μία ελαφρά τροποποιημένη έκδοση του “*Directed Diffusion*” η οποία ονομάζεται “*Gradient-Based Routing*” (GBR). Η ιδέα είναι να διατηρηθεί ο αριθμός των κόμβων τη στιγμή που το ενδιαφέρον διαχέεται σε ολόκληρο το δίκτυο. Έτσι, ο κάθε κόμβος μπορεί να ανακαλύψει τον ελάχιστο αριθμό βημάτων μέχρι το σταθμό βάσης που ονομάζεται «*ύψος του κόμβου – height of the node*». Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος ενός κόμβου και στο ύψος ενός γειτονικού του κόμβου θεωρείται ότι είναι το βαθμωτό άνυσμα (gradient) αυτής της ζεύξης. Ένα οποιοδήποτε πακέτο προωθείται προς μία ζεύξη με το μεγαλύτερο βαθμωτό άνυσμα.

Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν εδώ κάποιες βοηθητικές τεχνικές, όπως, π.χ. data aggregation, εξάπλωση της κίνησης (traffic spreading) καθώς και το GBR, προκειμένου να κατανεύμουν ομοιόμορφα την κίνηση σε ολόκληρο το δίκτυο.

Κόμβοι οι οποίοι συμπεριφέρονται ως αναμεταδότες (relays) σε πολλαπλά μονοπάτια μπορούν να δημιουργήσουν μία οντότητα συνδυασμού δεδομένων (data combining entity) προκειμένου να μαζέψουν τα δεδομένα. Εξ’ άλλου παρουσιάζονται εδώ τρεις διαφορετικές *Τεχνικές Εξάπλωσης Δεδομένων* οι οποίες είναι οι εξής:

- *Stochastic scheme*: Σύμφωνα με αυτό το στοχαστικό σχήμα, όταν υπάρχουν δύο ή περισσότερα επόμενα βήματα (hops) με το ίδιο βαθμωτό άνυσμα, τότε ο κόμβος επιλέγει στην τύχη το ένα από αυτά.
- *Energy-based scheme*: Σύμφωνα με αυτό το βασισμένο στην ενέργεια σχήμα, όταν η ενέργεια κάποιου κόμβου πέσει κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι, τότε αυτός ο κόμβος αυξάνει το ύψος του ώστε να αποτρέψει τους υπόλοιπους κόμβους να του στείλουν δεδομένα.
- *Stream-based scheme*: Η ιδέα σε αυτό το βασισμένο στο ρεύμα σχήμα είναι να εκτρέψει νέα ρεύματα μακριά από τους κόμβους εκείνους οι οποίοι επί του παρόντος αποτελούν μέρος του μονοπατιού άλλων ρευμάτων.

Τα σχήματα που αφορούν στην εξάπλωση δεδομένων κοπιάζουν για να επιτύχουν μία ομοιόμορφη κατανομή της κίνησης σε ολόκληρο το δίκτυο, πράγμα όμως το οποίο βοηθά στην εξισορρόπηση του φορτίου στους αισθητήριους κόμβους συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου.

Οι τεχνικές που αναφέρθηκαν μπορούν κάλλιστα να εφαρμοσθούν και σε άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης με σκοπό την αύξηση της απόδοσής τους. Μέσα από την προσομοίωση έχει δειχθεί ότι το GBR υπερτερεί κατά πολύ του *Directed Diffusion* όσον αφορά τη συνολική ενέργεια επικοινωνίας.

3.4.1.1.5 Information-Driven Sensor Querying (IDSQ) και Strained Anisotropic Diffusion Routing (CADR)

Το σχήμα με γενικό τίτλο «δρομολόγηση περιορισμένης ανισοτροπικής διάχυσης (*Strained Anisotropic Diffusion Routing - CADR*)» [67] είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο προσπαθεί να αποτελέσει ένα γενικό τύπο του *Directed Diffusion*. Εδώ προτείνονται δύο *Βασικές Τεχνικές*, συγκεκριμένα:

- Η τεχνική «Αναζήτηση αισθητήρα μέσα από πληροφορίες - *Information-Driven Sensor Querying (IDSQ)*» και
- Η τεχνική «Δρομολόγηση περιορισμένης ανισοτροπικής διάχυσης - *Strained Anisotropic Diffusion Routing (CADR)*»

Η ιδέα είναι η αναζήτηση αισθητήρων και η δρομολόγηση δεδομένων προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το κέρδος της πληροφορίας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της χρονικής καθυστέρησης (latency) και του εύρους ζώνης. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση μόνο των αισθητήρων εκείνων που βρίσκονται πλησιέστερα σε κάποιο ιδιαίτερο γεγονός και με τη δυναμική ρύθμιση των διαδρομών δεδομένων.

Η βασικότερη διαφορά αυτού του σχήματος με το σχήμα *Directed Diffusion* είναι η θεώρηση του κέρδους της πληροφορίας εκτός από το κόστος επικοινωνίας.

Στο CADR ο κάθε κόμβος αξιολογεί τον αντικειμενικό σκοπό *πληροφορίας/κόστους* και στη συνέχεια δρομολογεί τα δεδομένα βασιζόμενος στις απαιτήσεις του τοπικού βαθμωτού ανύσματος (gradient) *πληροφορίας/κόστους* καθώς και στις απαιτήσεις του τελικού χρήστη (end-user). Το μέτρο χρησιμότητας της πληροφορίας μοντελοποιείται με τη χρήση της θεωρίας αποτίμησης του προτύπου (standard estimation theory).

Το IDSQ βασίζεται σε ένα πρωτόκολλο όπου ο ερωτών κόμβος (querying node) μπορεί να προσδιορίσει τον κόμβο εκείνο που έχει τη δυνατότητα να δώσει τις πλέον χρήσιμες πληροφορίες με ταυτόχρονη εξισορρόπηση του ενεργειακού κόστους. Ενώ το IDSQ παρέχει έναν τρόπο επιλογής της βέλτιστης σειράς των αισθητήρων προκειμένου να επιτευχθεί το μέγιστο δυνατό κέρδος πληροφορίας, δεν προσδιορίζει ιδιαίτερα τον τρόπο με τον οποίο η ερώτηση (query) και η πληροφορία δρομολογούνται μεταξύ των αισθητήριων κόμβων και του σταθμού βάσης.

Ως εκ τούτου, το IDSQ μπορεί να το δει κάποιος ως μία συμπληρωματική διαδικασία βελτιστοποίησης.

Επειδή το CADR διαχέει τις ερωτήσεις χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από δοκιμαστικές πληροφορίες για να επιλέξει εκείνους τους αισθητήριους κόμβους που θα λάβουν τα δεδομένα, οι πειραματικές μελέτες προσομοίωσης επιβεβαίωσαν ότι αυτό το σχήμα είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό από το *Directed Diffusion* όπου οι ερωτήσεις διαχέονται ισότροπα, φθάνοντας πρώτες στους πλησιέστερους γειτονικούς κόμβους.

3.4.1.1.6 COUGAR

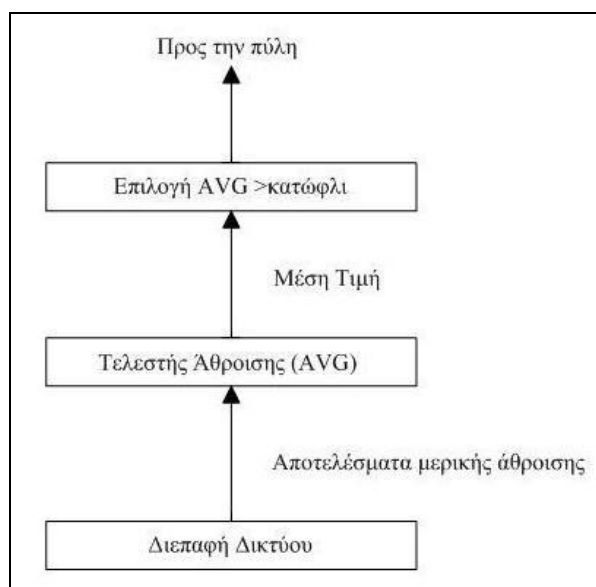
Το COUGAR [68] (κωδική ονομασία του HTML) είναι ένα δεδομενοκεντρικό (data-centric) πρωτόκολλο το οποίο θεωρεί το δίκτυο ως ένα τεράστιο καταναμημένο σύστημα βάσης δεδομένων.

Η βασική του ιδέα είναι:

- Να χρησιμοποιηθούν δηλωτικά ερωτήματα (declarative queries) προκειμένου να αφαιρεθεί η επεξεργασία ερωτημάτων από τις λειτουργίες του επιπέδου δικτύου, όπως για παράδειγμα, επιλογή σχετικών αισθητήρων κτλ. και
- Να χρησιμοποιηθεί ενδοδικτυακή (in-network) συσσώρευση δεδομένων (data aggregation) προκειμένου να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας.

Το COUGAR προτείνει μία αρχιτεκτονική για το σύστημα βάσης δεδομένων των αισθητήρων όπου οι κόμβοι επιλέγουν έναν κόμβο ως επικεφαλής για να προβεί στη συσσώρευση και την αποστολή δεδομένων προς την πύλη ή το σταθμό βάσης.

Η αρχιτεκτονική απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5, και αποτελεί την επανασχεδίαση αυτής που προτείνεται στο [68].



Σχήμα 3-5: Πλάνο ερωτημάτων σε επικεφαλής κόμβο

Ερμηνεία Σχήματος 3-5: Ο επικεφαλής κόμβος λαμβάνει όλες τις ενδείξεις, υπολογίζει το μέσο όρο και εφόσον αυτός βρεθεί να είναι μεγαλύτερος από μία συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου τότε τον στέλνει στην πύλη.

Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία ενός πλάνου ερωτημάτων (query plan), το οποίο θα προσδιορίζει τις απαραίτητες πληροφορίες που έχουν σχέση με τη ροή των δεδομένων καθώς και με τον ενδοδικτυακό υπολογισμό των εισερχομένων ερωτημάτων και στη συνέχεια θα τα στέλνει στους αρμόδιους κόμβους.

Το πλάνο ερωτημάτων περιγράφει επίσης τον τρόπο με τον οποίο θα επιλέγεται ο επικεφαλής κόμβος για την υποβολή του ερωτήματος.

Η αρχιτεκτονική παρέχει τη δυνατότητα ενδοδικτυακού υπολογισμού για όλους τους αισθητήριους κόμβους. Μία τέτοιου είδους δυνατότητα διασφαλίζει την εξοικονόμηση ενέργειας

ιδιαίτερα όταν είναι τεράστιος ο αριθμός των αισθητήρων που παράγουν και στέλνουν δεδομένα προς τον επικεφαλής κόμβο.

Μολονότι το COUGAR παρέχει μία λύση η οποία δεν εξαρτάται από το επίπεδο του δικτύου προκειμένου να υποβάλλει τα όποια ερωτήματα στους αισθητήρες, έχει μερικές ατέλειες (ή αδυναμίες) που είναι οι εξής:

- Πρώτα από όλα, με το να εισηγείται ένα επιπλέον επίπεδο ερωτημάτων σε κάθε αισθητήριο κόμβο θα επιφέρει μία πρόσθετη επιβάρυνση σε αυτούς, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και την αποθήκευση δεδομένων.
- Δεύτερον, ένας ενδοδικτυακός υπολογισμός δεδομένων από διαφορετικούς κόμβους θα απαιτήσει συγχρονισμό, όπως για παράδειγμα, ένας κόμβος αναμετάδοσης (relaying node) θα πρέπει να περιμένει το κάθε πακέτο από την κάθε αφικνούμενη πηγή (incoming source), πριν να στείλει τα δεδομένα στον επικεφαλής κόμβο.
- Τρίτον, οι επικεφαλής κόμβοι θα πρέπει να συντηρούνται δυναμικά προκειμένου να προληφθεί η αποτυχία τους.

3.4.1.1.7 Active Query Forwarding in Sensor Networks (ACQUIRE)

Ένας σχετικά καινούργιος δεδομένο-κεντρικός μηχανισμός υποβολής ερωτημάτων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι το ACQUIRE (ACtive QUery forwarding In sensoR nEtworks) [69]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο [59], η παρούσα προσέγγιση θεωρεί το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ως μία κατανεμημένη βάση δεδομένων και είναι πολύ κατάλληλη για πολύπλοκα ερωτήματα τα οποία αποτελούνται από αρκετά δευτερεύοντα ερωτήματα (sub-queries).

Ο μηχανισμός υποβολής ερωτημάτων λειτουργεί ως εξής: Το ερώτημα προωθείται από το σταθμό βάσης και ο κάθε κόμβος που λαμβάνει το ερώτημα προσπαθεί να ανταποκριθεί μονομερώς χρησιμοποιώντας την πληροφορία που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί στη λανθάνουσα μνήμη (pre-cached information) για να τη στείλει σε κάποιον άλλο αισθητήρα. Εάν η πληροφορία που βρίσκεται ήδη αποθηκευμένη στη λανθάνουσα μνήμη δεν είναι ενημερωμένη (up-to-date), τότε οι κόμβοι συλλέγουν πληροφορίες από τους γείτονές τους με μία πρόβλεψη (look-ahead) d βημάτων (hops). Μόλις επιλυθεί πλήρως το ερώτημα, τότε ξαναστέλνεται πίσω στο σταθμό βάσης, είτε μέσα από το αντίστροφο είτε μέσα από το συντομότερο μονοπάτι.

Ένας από τους κυριότερους λόγους που έγιναν η αφορμή για την πρόταση αυτού του σχήματος (ACQUIRE) είναι ο χειρισμός πολύπλοκων ερωτημάτων για δεδομένα όπου η απόκριση μπορεί να διασφαλισθεί από πολλούς κόμβους. Στις δεδομένοκεντρικές προσεγγίσεις, όπως είναι για παράδειγμα η *Directed Diffusion* (που χρησιμοποιεί το μηχανισμό υποβολής ερωτημάτων ο οποίος βασίζεται στην υπερχειλίση για συνεχή και σωρευτικά ερωτήματα), δεν θα είχε κανένα νόημα να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος μηχανισμός για πολύπλοκα ερωτήματα τα οποία έχουν άμεση σχέση με το θέμα της κατανάλωσης ενέργειας.

Ο μηχανισμός ACQUIRE παρέχει μία ικανοποιητική διεργασία υποβολής ερωτημάτων μέσα από την προσαρμογή της τιμής της παραμέτρου d . Να σημειωθεί ότι εάν το d είναι ίσο με το μέγεθος του δικτύου, τότε το πρωτόκολλο συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο όπως συμπεριφέρεται η διεργασία της υπερχειλίσης. Εξάλλου, το ερώτημα πρέπει να διανύσει περισσότερα βήματα εάν το d είναι πάρα πολύ μικρό.

Για να υπολογισθεί το κόστος ενέργειας του σχήματος ACQUIRE έχει βρεθεί ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο συγκρίνεται με τη μέθοδο της υπερχειλίσης και με την έρευνα δακτυλίου (ring search) π.χ. κλιμακωτή αύξηση του αριθμού των βημάτων. Η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου d υπολογίζεται για ένα πλέγμα αισθητήρων όπου ο κάθε κόμβος έχει τέσσερις άμεσους γείτονες.

Όμως, δεν υπάρχει καμία επισημοποίηση των αποτελεσμάτων μέσα από την προσομοίωση και επιπλέον δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα κόστη λήψης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των υπολογισμών.

Το πρόβλημα της επιλογής του επόμενου κόμβου, για την προώθηση του ερωτήματος που απευθύνει το ACQUIRE, έχει μελετηθεί από το CADR [67] και από το Rumor Routing [64].

Στο CADR, οι ερωτώντες κόμβοι χρησιμοποιούν το μηχανισμό IDSQ προκειμένου να προσδιορίσουν τον κόμβο εκείνο που θα παρέχει την πλέον χρήσιμη πληροφορία κάνοντας χρήση της θεωρίας αποτίμησης (estimation theory).

Το Rumor Routing [64] προσπαθεί να προωθήσει το ερώτημα σε εκείνον τον κόμβο ο οποίος γνωρίζει το μονοπάτι προς τον κόμβο που αναζητά.

Επειδή οι κόμβοι ενημερώνονται για τα γεγονότα από τους πράκτορες γεγονότων (event agents), ο ευριστικός (heuristic) προσδιορισμός της διαδρομής ενός πράκτορα γεγονότων επηρεάζει πάρα πολύ τη διαδικασία επιλογής του επόμενου βήματος. Στο ACQUIRE, ο επόμενος κόμβος στον οποίο προωθείται το ερώτημα επιλέγεται είτε τυχαία είτε με βάση το μέγιστο δυναμικό της ικανοποίησης του ερωτήματος.

3.4.1.2 Πρωτόκολλα Βασισμένα στη Δομή του Δικτύου - Ιεραρχική Δρομολόγηση

Το σημαντικότερο πρωτόκολλο δρομολόγησης αυτής της κατηγορίας είναι το LEACH το οποίο αναλύεται διεξοδικά στο κεφάλαιο 4. Ακολουθεί η περιγραφή εξίσου σημαντικών πρωτοκόλλων.

3.4.1.2.1 Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)

Το PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems) [70] είναι ένα σχεδόν βέλτιστο (near optimal) πρωτόκολλο βασισμένο στην αλυσίδα (chain-based protocol) και αποτελεί βελτίωση του πρωτοκόλλου LEACH. Το PEGASIS σχηματίζει αλυσίδες από αισθητήριους κόμβους με τέτοιο τρόπο ώστε ο κάθε κόμβος να επικοινωνεί με ένα γειτονικό του κόμβο και μόνο ένας κόμβος επιλέγεται εκ περιτροπής από την αλυσίδα για να επικοινωνήσει με το σταθμό βάσης (base station ή sink). Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε κύκλο (round).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της εξομοίωσης δείχνουν ότι το PEGASIS συμπεριφέρεται καλύτερα από το LEACH κατά 100% μέχρι 300% όταν το 1%, το 20%, το 50%, και το 100% των κόμβων «πεθαίνουν» για διαφορετικά μεγέθη δικτύων και τοπολογιών

3.4.1.2.2 Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocols (TEEN) and Adaptive Periodic TEEN (APTEEN)

Στο [71] και [72] προτείνονται δύο ιεραρχικά πρωτόκολλα τα οποία ονομάζονται «*Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocols*» και είναι το TEEN και το APTEEN (Adaptive Periodic TEEN). Αυτά τα πρωτόκολλα προτάθηκαν για εφαρμογές που είναι κρίσιμες ως προς το χρόνο (time-critical applications).

➤ *TEEN (Threshold-Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocols)*

Στο πρωτόκολλο TEEN οι αισθητήριοι κόμβοι ανιχνεύουν διαρκώς το μέσον, αλλά η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται λιγότερο συχνά. Ένας επικεφαλής αισθητήριος κόμβος (CH - Cluster Head) στέλνει προς τα μέλη του ένα *κατώφλι υψηλής ενέργειας* (hard threshold), το οποίο είναι η τιμή κατωφλίου του ανιχνευόμενου χαρακτηριστικού μεγέθους (sensed attribute), καθώς

και ένα κατώφλι χαμηλής ενέργειας (soft threshold), το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο παρά μία μικρή μεταβολή της τιμής του ανιχνευόμενου μεγέθους που δίνει το ερέθισμα (τριγγάρει ή σκανδαλίζει) στον κόμβο για να θέσει σε λειτουργία τον πομπό του και να αρχίσει τη μετάδοση.

Έτσι λοιπόν, το κατώφλι υψηλής ενέργειας προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό των μεταδόσεων με το να επιτρέπει στους κόμβους να μεταδίδουν μόνο όταν το ανιχνευόμενο μέγεθος βρίσκεται μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Το κατώφλι χαμηλής ενέργειας μειώνει ακόμη περισσότερο τον αριθμό των μεταδόσεων οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση πιθανόν να συνέβαιναν εφόσον θα υπήρχε ελάχιστη ή καμία μεταβολή στο ανιχνευόμενο μέγεθος. Μία μικρότερη τιμή του κατωφλίου χαμηλής ενέργειας δίνει μία ακριβέστερη εικόνα του δικτύου, με κόστος όμως την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Ως εκ τούτου, ο χρήστης είναι σε θέση να ελέγχει τις δύο αντιτιθέμενες έννοιες, δηλαδή εάν επιθυμεί να έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ακρίβεια δεδομένων, ή το αντίστροφο.

Όταν οι επικεφαλής κόμβοι (CHs) πρόκειται να αλλάξουν, τότε δημοσιοποιούνται (εκπέμπονται) νέες τιμές για τις προηγούμενες παραμέτρους.

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι ότι εάν, για κάποιο λόγο, δεν ληφθούν αυτά τα κατώφλια ενέργειας, τότε οι κόμβοι δεν θα επικοινωνήσουν ποτέ μεταξύ τους, και φυσικά ο χρήστης δεν θα λάβει ποτέ οποιαδήποτε δεδομένα από το δίκτυο.

Οι κόμβοι ανιχνεύουν διαρκώς το περιβάλλον τους. Την πρώτη φορά που κάποια παράμετρος λάβει την τιμή του δικού της κατωφλίου υψηλής ενέργειας, δίνει το έναυσμα στον κόμβο να ανοίξει τον πομπό του και να αρχίσει να στέλνει τα δεδομένα που πήρε από την ανίχνευση του περιβάλλοντός του. Η τιμή που προκύπτει από αυτήν τη μέτρηση (δηλ. η τιμή που ανιχνεύθηκε – sensed value) αποθηκεύεται σε μία εσωτερική μεταβλητή η οποία καλείται (SV – Sensed Value).

Οι κόμβοι θα μεταδώσουν δεδομένα στην τρέχουσα περίοδο της συστοιχίας, μόνον εφόσον επαληθεύονται οι παρακάτω συνθήκες:

- Η τρέχουσα τιμή του μεγέθους που ανιχνεύθηκε είναι μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου υψηλής ενέργειας.
- Η τρέχουσα τιμή του μεγέθους που ανιχνεύθηκε διαφέρει από την SV κατά μία τιμή, η οποία είναι ίση ή μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου χαμηλότερης ενέργειας.
- Επειδή η μετάδοση των μηνυμάτων απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από ότι απαιτείται για την ανίχνευση των δεδομένων, αυτό το γεγονός συνεπάγεται ότι η κατανάλωση ενέργειας αυτού του σχήματος είναι μικρότερη από αυτήν των proactive δικτύων. Η τιμή του κατωφλίου χαμηλής ενέργειας μπορεί να μεταβάλλεται. Σε κάθε χρονική μεταβολή της συστοιχίας, εκπέμπονται καινούργιες παράμετροι, οπότε ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τις αλλάξει όποτε θέλει.
- *APTEEN (Adaptive Periodic TEEN)*

Το APTEEN είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο το οποίο μεταβάλλει την περιοδικότητα ή τις τιμές κατωφλίου που χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο TEEN ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και τον τύπο της εφαρμογής.

Στο APTEEN, οι επικεφαλής κόμβοι (CHs) εκπέμπουν τις παρακάτω παραμέτρους:

- *Χαρακτηριστικά (Attributes – A)*: Είναι ένα σύνολο από φυσικές παραμέτρους για τις οποίες ο χρήστης ενδιαφέρεται να αποκτήσει πληροφορίες.
- *Κατώφλια (Thresholds)*: Τα κατώφλια αποτελούνται από το κατώφλι υψηλής ενέργειας (HT – Hard Threshold) και το κατώφλι χαμηλής ενέργειας (ST – Soft Threshold).

- ο *Χρονοδιάγραμμα* (Schedule): Το TDMA Schedule εκχωρεί μία χρονοθυρίδα (slot) σε κάθε κόμβο.
- ο *Χρόνος Μέτρησης* (CT – Count Time): Είναι η μέγιστη χρονική περίοδος μεταξύ δύο διαδοχικών αναφορών που στέλνονται από έναν κόμβο.

Οι κόμβοι διερευνούν διαρκώς το περιβάλλον τους και εκπέμπουν μόνο εκείνοι οι κόμβοι οι οποίοι ανιχνεύουν μία τιμή δεδομένων η οποία είναι ίση ή μεγαλύτερη από εκείνη του HT. Μόλις κάποιος κόμβος ανιχνεύσει μία τιμή η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή HT, αρχίζει να μεταδίδει δεδομένα μόνο όταν η τιμή αυτού του μεγέθους μεταβάλλεται κατά ένα ποσό το οποίο είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το ST. Εάν τώρα κάποιος κόμβος δεν στείλει δεδομένα για μία χρονική περίοδο ίση με CT, τότε εξαναγκάζεται να ανιχνεύσει και πάλι το περιβάλλον του και να μεταδώσει εκ νέου τα δεδομένα. Εδώ χρησιμοποιείται ένα χρονοδιάγραμμα TDMA, και σε κάθε κόμβο της συστοιχίας εκχωρείται μία χρονοσχισημή αναμετάδοσης (retransmission slot). Λόγω αυτού του γεγονότος, το APTEEN χρησιμοποιεί ένα τροποποιημένο χρονοδιάγραμμα TDMA για να υλοποιήσει το υβριδικό δίκτυο.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του σχήματος APTEEN είναι τα εξής:

- Συνδυάζει και τις δύο πολιτικές, την proactive και τη reactive.
- Προσφέρει μεγάλη ευελιξία με το να επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίζει το διάστημα CT (CT interval). Οι τιμές κατωφλίου για κατανάλωση ενέργειας μπορούν να ελέγχονται μέσα από τη μεταβολή του CT αλλά και των τιμών κατωφλίου.

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι πρόσθετη πολυπλοκότητα που απαιτείται προκειμένου να υλοποιηθούν οι λειτουργίες κατωφλίου και το CT.

Οι προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για το TEEN και το APTEEN έχουν δείξει ότι αυτά τα δύο πρωτόκολλα υπερέχουν κατά πολύ του πρωτοκόλλου LEACH. Τα πειράματα έχουν αποδείξει ότι η λειτουργία του APTEEN βρίσκεται κάπου ανάμεσα στο LEACH και στο TEEN, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τη διάρκεια ζωής του δικτύου. *Το TEEN παρέχει την καλύτερη επίδοση* για το λόγο ότι μειώνει αισθητά τον αριθμό των μεταδόσεων.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα και των δύο αυτών σχημάτων είναι:

- Η επιβάρυνση και η πολυπλοκότητα που έχουν σχέση με το σχηματισμό των συστοιχιών σε πολλαπλά επίπεδα,
- Η μέθοδος υλοποίησης λειτουργιών που έχουν ως βάση το κατώφλι, και
- Ο τρόπος χειρισμού της ονοματοδοσίας των ερωτημάτων (queries) που έχουν ως βάση το χαρακτηριστικό (attribute-based).

3.4.1.2.3 Minimum Energy Communication Network (MECN) and SMECN

➤ *MECN (Minimum Energy Communication Network)*

Στο [73] προτείνεται το πρωτόκολλο MECN (*Minimum Energy Communication Network*), το οποίο υπολογίζει ένα ενεργειακά αποδοτικό δευτερεύον δίκτυο, για ένα συγκεκριμένο δίκτυο αισθητήρων, με τη χρήση του GPS (Global Positioning System) χαμηλής ισχύος.

Το MECN προσδιορίζει μία περιοχή αναμεταδόσεων (relay region) για κάθε κόμβο. Η περιοχή αναμεταδόσεων αποτελείται από κόμβους οι οποίοι βρίσκονται σε μία ευρύτερη περιβάλλουσα περιοχή (surrounding area) όπου η μετάδοση μέσα από αυτούς τους κόμβους είναι περισσότερο ενεργειακά αποδοτική από την απευθείας μετάδοση. Ο χώρος που περιβάλλει (enclosure) έναν

κόμβο i δημιουργείται με τη λήψη της ένωσης (union) όλων των περιοχών αναμετάδοσης στις οποίες μπορεί να έχει πρόσβαση ο κόμβος i .

Η βασική ιδέα του MECN είναι η εύρεση ενός υποδικτύου (ή δευτερεύοντος δικτύου) που θα έχει λιγότερους κόμβους και θα απαιτεί λιγότερη ισχύ για να μεταδώσει μηνύματα ανάμεσα σε δύο ειδικούς κόμβους. Με αυτόν τον τρόπο εντοπίζονται παγκόσμια μονοπάτια ελάχιστης ισχύος (global minimum power paths) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση επιτόπιας έρευνας (localized search) για κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη τη δική του περιοχή αναμετάδοσης.

Το MECN είναι αυτόματα ανασχηματιζόμενο (self-reconfiguring) και συνεπώς έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται δυναμικά σε οποιαδήποτε αστοχία κόμβου ή στην προσθήκη (ή ανάπτυξη) νέων αισθητήρων στο δίκτυο.

➤ *SMECN (Small SMECN)*

Το SMECN (Small SMECN) [74] αποτελεί προέκταση του MECN.

Στο MECN υποθέτουμε ότι ο κάθε κόμβος μπορεί να μεταδώσει σε οποιονδήποτε άλλον κόμβο, αυτό όμως δεν είναι πάντοτε εφικτό.

Στο SMECN λαμβάνονται υπόψη τα όποια εμπόδια παρεμβληθούν ανάμεσα σε δύο κόμβους. Όμως, υποτίθεται ότι το δίκτυο είναι ακόμη πλήρως συνδεδεμένο, όπως και στην περίπτωση του MECN.

Το υποδίκτυο, το οποίο έχει δημιουργηθεί από το SMECN για αναμετάδοση με την ελάχιστη δυνατή καταναλισκόμενη ισχύ, είναι πολύ πιθανόν να είναι μικρότερο (σε ότι αφορά τον αριθμό των παρυφών) από εκείνο που έχει δημιουργηθεί από το MECN. Ως εκ τούτου, το υποδίκτυο (π.χ. δευτερεύων γράφος G' - subgraph G') που δημιουργήθηκε από το SMECN είναι μικρότερο από εκείνο που δημιουργήθηκε από το MECN εφόσον η περιοχή εκπομπής είναι κυκλική γύρω από τον κόμβο που εκπέμπει για μία δεδομένη ρύθμιση ισχύος.

Ο δευτερεύων γράφος G' του γράφου που αντιπροσωπεύει το δίκτυο αισθητήρων, ελαχιστοποιεί τη χρήση ενέργειας ικανοποιώντας τις εξής συνθήκες:

- Ο αριθμός των παρυφών (edges) στο G' είναι μικρότερος από αυτόν του G , ενώ περιλαμβάνει ταυτόχρονα όλους τους κόμβους του G .
- Η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων από έναν κόμβο σε όλους τους γειτονικούς του στον υπογράφο G' είναι μικρότερη από την ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση σε όλους του γείτονές του στον γράφο G . Υποθέτουμε ότι $r = (u, u_1, \dots, v)$ είναι ένα μονοπάτι μεταξύ u και v το οποίο συνδέει (spans) $k-1$ ενδιάμεσους κόμβους u_1, \dots, u_{k-1} . Η ολική κατανάλωση ισχύος ενός μονοπατιού, όπως το r δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C(r) = \sum_{i=0}^{k-1} (p(u_i, u_{i+1}) + c) \quad (3.1)$$

Όπου: $u=u_0$ και $v=u_k$, και η ισχύς που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων με αυτό το πρωτόκολλο είναι:

$$p(u, v) = t \cdot d(u, v)^n \quad (3.2)$$

Για κάποια κατάλληλη σταθερά t , το n είναι ο εκθέτης της απώλειας καναλιού των μοντέλων υπαίθριας ασύρματης μετάδοσης (outdoor radio propagation models) $n \geq 2$, και $d(u, v)$ είναι η

απόσταση μεταξύ u και v . Υποτίθεται ότι μία λήψη στο δέκτη απαιτεί ένα σταθερό ποσό ισχύος το οποίο δηλώνεται με το c .

Το υποδίκτυο που υπολογίστηκε από το SMECN βοηθάει στην αποστολή μηνυμάτων σε μονοπάτια ελάχιστης ενέργειας. Όμως, ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι τοπικός με την έννοια ότι στην πραγματικότητα δεν βρίσκει το μονοπάτι ελάχιστης ενέργειας, απλά δημιουργεί ένα υποδίκτυο το οποίο του εγγυάται τη δική του ύπαρξη. Επιπλέον το υποδίκτυο που έχει δημιουργηθεί από το SMECN παρέχει την πιθανότητα στο μονοπάτι που χρησιμοποιείται ότι είναι εκείνο που απαιτεί τη λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, η εύρεση ενός υποδικτύου με λιγότερο αριθμό παρυφών εισάγει περισσότερη επιβάρυνση στον αλγόριθμο.

3.4.1.2.4 Self-Organizing Protocol (SOP)

Οι Subramanian *et al.* [75] προτείνουν το πρωτόκολλο της αυτόματης αναδιοργάνωσης (*SOP - Self-Organizing Protocol*) καθώς και μία ταξινόμηση εφαρμογής την οποία χρησιμοποίησαν για να δομήσουν την αρχιτεκτονική που στήριξε ετερογενείς αισθητήρες. Αυτοί οι αισθητήρες μπορεί να είναι σταθεροί ή κινούμενοι (*stationary or mobile*). Οι αισθητήρες ανιχνεύουν το περιβάλλον και στη συνέχεια προωθούν τα αποτελέσματα της μέτρησης προς ένα προσδιορισμένο σύνολο κόμβων οι οποίοι συμπεριφέρονται ως δρομολογητές. Οι κόμβοι δρομολογητές είναι σταθεροί και σχηματίζουν τη ραχοκοκαλιά για τις επικοινωνιακές ανάγκες. Τα δεδομένα που έχουν περισυλλεγεί προωθούνται μέσω των δρομολογητών προς τους περισσότερο ισχυρούς κόμβους σταθμούς βάσης (*Base Stations – BS*). Κάθε αισθητήριος κόμβος πρέπει να καταφέρει να φτάσει μέχρι το δρομολογητή προκειμένου να αποτελέσει μέρος του δικτύου.

Εδώ προτείνεται μία αρχιτεκτονική δρομολόγησης η οποία απαιτεί διευθυνσιοδότηση για κάθε αισθητήριο κόμβο. Οι αισθητήριοι κόμβοι προσδιορίζονται μέσω της διεύθυνσης του κόμβου δρομολογητή στον οποίον έχουν συνδεθεί. Η αρχιτεκτονική δρομολόγησης είναι ιεραρχική, δηλαδή, σχηματίζονται ομάδες κόμβων και συγχωνεύονται όποτε παραστεί ανάγκη. Ο αλγόριθμος LML (*Local Markov Loops*), ο οποίος πραγματοποιεί ένα τυχαίο περίπατο μέχρι τα *spanning trees* ενός γράφου, χρησιμοποιήθηκε όχι μόνο για να υποστηρίξει την ανοχή σε σφάλματα αλλά και ως μέσο εκπομπής. Μία τέτοια προσέγγιση είναι παρόμοια με την ιδέα ενός εικονικού πλέγματος (*virtual grid*) που χρησιμοποιείται σε κάποια άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στην τοποθεσία.

Σε αυτήν την προσέγγιση μπορεί κανείς να απευθυνθεί κατ' ιδίαν στους αισθητήριοις κόμβους της αρχιτεκτονικής δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου απαιτείται επικοινωνία με κάποιον συγκεκριμένο κόμβο. Επιπλέον, αυτός ο αλγόριθμος καταλογίζει μόνο ένα πολύ μικρό κόστος για τη συντήρηση των πινάκων δρομολόγησης και για τη διατήρηση μιας εξισορροπημένης ιεραρχίας δρομολόγησης. Έχει βρεθεί επίσης ότι η ενέργεια που καταναλώνεται για την εκπομπή ενός μηνύματος είναι σαφώς μικρότερη από αυτήν που καταναλώνεται στο πρωτόκολλο SPIN. Όμως αυτό το πρωτόκολλο δεν είναι ένα κατ' απαίτηση (*on-demand*) πρωτόκολλο, και μάλιστα κατά τη φάση της οργάνωσης του αλγορίθμου, και κατά συνέπεια εισάγει μία επιπλέον επιβάρυνση.

Ένα ακόμη θέμα έχει να κάνει με το σχηματισμό της ιεραρχίας. Θα μπορούσαν να σημειωθούν πολλές διακοπές στο δίκτυο με συνέπεια την αύξηση του κόστους εξαιτίας της εφαρμογής της φάσης αναδιοργάνωσης.

3.4.1.2.5 Sensor Aggregates Routing

Στο [76] προτείνονται αλγόριθμοι για τη δημιουργία και τη συντήρηση ενός συνονθυλεύματος αισθητήρων (*sensor aggregates*). Σκοπός είναι η επιλεκτική παρακολούθηση της δραστηριότητας

του στόχου σε κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον (σε εφαρμογές παρακολούθησης στόχου). Ένα συνονθύλευμα από αισθητήρες περιλαμβάνει εκείνους τους αισθητήρες του δικτύου που ικανοποιούν το κριτήριο ομαδοποίησης για μία από κοινού αποστολή επεξεργασίας.

Οι αισθητήρες που βρίσκονται σε ένα πεδίο κατανέμονται σε συστοιχίες ανάλογα με την ισχύ του σήματος που έχουν ανιχνεύσει, έτσι υπάρχει μόνο μία κορυφή ανά συστοιχία. Στη συνέχεια επιλέγονται οι τοπικοί επικεφαλής της συστοιχίας. Μία κορυφή μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα στόχο, πολλούς στόχους, ή ακόμη κανένα στόχο εφόσον η κορυφή δημιουργείται από πηγές θορύβου.

Για να επιλεγεί ο επικεφαλής της συστοιχίας απαιτείται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Εάν κάποιος κόμβος, αφού έχει προηγουμένως ανταλλάξει πακέτα με όλους τους γειτονικούς του μονοβηματικούς (one-hop) κόμβους, ανακαλύψει ότι έχει το ισχυρότερο σήμα, τότε γίνεται αρχηγός. Αυτός ο βασισμένος στην αρχηγία αλγόριθμος παρακολούθησης υποθέτει ότι ο μοναδικός ηγέτης γνωρίζει τη γεωγραφική περιοχή συνεργασίας.

3.4.1.2.6 Virtual Grid Architecture Routing

Στο [77] προτείνεται ένα ενεργειακά αποδοτικό παράδειγμα δρομολόγησης το οποίο χρησιμοποιεί συσσώρευση δεδομένων και ενδοδικτυακή επεξεργασία (in-network processing) προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Εξαιτίας της στασιμότητας των κόμβων και της εξαιρετικά χαμηλής τους κινητικότητας σε πολλές εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων, μία λογική προσέγγιση είναι η διάταξή τους σε μία σταθερή τοπολογία. Εδώ χρησιμοποιείται μία μη εξαρτώμενη από το GPS προσέγγιση για τη δημιουργία σταθερών, ισοδύναμων, γειτονικών, και μη επικαλυπτόμενων συστοιχιών με συμμετρικά σχήματα. Σε αυτό εδώ το πρωτόκολλο έχουν χρησιμοποιηθεί συστοιχίες τετραγωνικού σχήματος προκειμένου να επιτευχθεί μία σταθερή ευθύγραμμη ιδεατή τοπολογία. Μέσα σε κάθε ζώνη έχει επιλεγεί κατάλληλα ένας κόμβος για να συμπεριφέρεται ως επικεφαλής συστοιχίας.

Η συσσώρευση των δεδομένων πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα: τοπικό και στη συνέχεια καθολικό. Το σύνολο των επικεφαλής συστοιχιών, οι οποίοι καλούνται τοπικοί συσσωρευτές (local aggregators), πραγματοποιούν τοπική συσσώρευση δεδομένων, ενώ μία ομάδα από αυτούς χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση καθολικής συσσώρευσης και ονομάζονται κύριοι συσσωρευτές (master aggregators).

3.4.1.2.7 Two-Tier Data Dissemination (TTDD)

Η προσέγγιση που παρουσιάζεται στο [78] με τίτλο “*Two-Tier Data Dissemination*” – TTDD – *διασπορά δεδομένων σε δύο επίπεδα*) τροφοδοτεί με δεδομένα πολλούς κινητούς σταθμούς βάσης (BS). Στο TTDD, κάθε πηγή δεδομένων δημιουργεί εκ των προτέρων (proactively) μία δομή πλέγματος η οποία χρησιμοποιείται για τη διασπορά δεδομένων στους κινητούς σταθμούς βάσης και υποθέτει ότι οι αισθητήριοι κόμβοι είναι σταθεροί και ενημερωμένοι ως προς τη θέση τους, ενώ οι αποδέκτες μπορούν δυναμικά να αλλάζουν τις θέσεις τους.

Μόλις συμβεί κάποιο γεγονός (event) οι κόμβοι που το περιβάλλουν επεξεργάζονται το σήμα και ένας από αυτούς γίνεται πηγή ώστε να παράγει αναφορές δεδομένων. Οι κόμβοι είναι ενήμεροι της αποστολής τους, πράγμα το οποίο δεν θα αλλάζει συχνά.

Για τη δημιουργία της δομής του πλέγματος, ένας κόμβος πηγή επιλέγει τον εαυτό του ως το διασταυρούμενο σημείο έναρξης του πλέγματος, και κατόπιν στέλνει ένα μήνυμα ανακοίνωσης δεδομένων σε κάθε ένα από τα γειτονικά του διασταυρούμενα σημεία χρησιμοποιώντας απλή γεωγραφική προώθηση. Όταν το μήνυμα φτάσει στον κόμβο που βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο διασταύρωσης (αυτό προσδιορίζεται στο μήνυμα) θα σταματήσει. Κατά τη διάρκεια αυτής

της διαδικασίας, κάθε ενδιάμεσος κόμβος αποθηκεύει την πληροφορία που έλαβε από την πηγή και προωθεί περαιτέρω το μήνυμα προς τα γειτονικά του σημεία διασταύρωσης, εκτός από εκείνο από το οποίο προήλθε. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να σταματήσει το σήμα στα όρια του δικτύου. Οι κόμβοι που αποθηκεύουν την πληροφορία, η οποία προήλθε από την πηγή, επιλέγονται ως σημεία διασποράς (dissemination points). Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας η δομή του πλέγματος είναι πλέον γεγονός.

Πίνακας 3-1: Σύγκριση μεταξύ ομοιόμορφης και ιεραρχικής δρομολόγησης

Ιεραρχική Δρομολόγηση	Ομοιόμορφη Δρομολόγηση
Χρονοδιάγραμμα βασισμένο στην εξασφάλιση	Χρονοδιάγραμμα βασισμένο στο συναγωνισμό
Αποφυγή συγκρούσεων	Υπάρχει επιβάρυνση από συγκρούσεις
Μειωμένος κύκλος δέσμευσης οφειλόμενος στην περιοδική κατάσταση ύπνου	Μεταβλητός κύκλος δέσμευσης μέσα από τον έλεγχο του χρόνου ύπνου των κόμβων
Συσσώρευση δεδομένων από τον επικεφαλής της συστοιχίας	Ο κόμβος στο multihop μονοπάτι αθροίζει τα εισερχόμενα δεδομένα από τους γειτονικούς κόμβους
Απλή αλλά όχι βέλτιστη δρομολόγηση	Η δρομολόγηση μπορεί να γίνει βέλτιστη αλλά με μία πρόσθετη πολυπλοκότητα
Απαιτεί καθολικό και τοπικό συγχρονισμό	Οι ζεύξεις σχηματίζονται χωρίς συγχρονισμό
Επιβάρυνση από το σχηματισμό της συστοιχίας σε ολόκληρο το δίκτυο	Οι διαδρομές σχηματίζονται μόνο σε εκείνες τις περιοχές που έχουν να στείλουν δεδομένα
Μικρότερη χρονική καθυστέρηση καθώς το δίκτυο πολλαπλών βημάτων που έχει σχηματιστεί από τους επικεφαλής της συστοιχίας είναι πάντοτε διαθέσιμο	Χρονική καθυστέρηση κατά την αφύπνιση των ενδιάμεσων κόμβων και κατά την εγκατάσταση του πολλαπλού μονοπατιού
Η απώλεια της ενέργειας είναι ομοιόμορφη	Η απώλεια της ενέργειας εξαρτάται από τα σχέδια κίνησης
Η απώλεια της ενέργειας δεν μπορεί να ελεγχθεί	Η απώλεια της ενέργειας προσαρμόζεται προς τα σχέδια κίνησης
Δίκαιη εκχώρηση του καναλιού	Δεν εγγυάται την αμεροληψία

Χρησιμοποιώντας το πλέγμα, ένας σταθμός βάσης μπορεί να πλημμυρίσει το δίκτυο με κάποιο ερώτημα (query) το οποίο θα προωθηθεί προς το πλησιέστερο σημείο διασποράς, μέσα στην τοπική κυψέλη, για να λάβει τα δεδομένα. Κατόπιν το ερώτημα προωθείται σε άλλα σημεία διασποράς προς τα πάνω (upstream). Στη συνέχεια, τα δεδομένα που έχουν ζητηθεί διοχετεύονται προς τα κάτω προς την πηγή ακολουθώντας το αντίστροφο μονοπάτι. Οι σταθμοί βάσης κινούνται μέσα στο πεδίο αισθητήρων με προώθηση τροχιάς (trajectory forwarding).

➤ *Σύγκριση Μεταξύ TTDD και Directed Diffusion*

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση μεταξύ των TTDD και *Directed Diffusion* απέδειξαν ότι το TTDD μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μικρότερες χρονικές καθυστερήσεις στη διανομή των δεδομένων. Όμως, μπορεί να είναι αρκετά υψηλή η επιβάρυνση που συνεπάγεται από τη συντήρηση και την εκ νέου εκτέλεση των πράξεων στο πλέγμα καθώς μεταβάλλεται η τοπολογία του δικτύου. Επιπλέον, το TTDD προϋποθέτει την ύπαρξη ενός πολύ

ακριβούς συστήματος εντοπισμού θέσης το οποίο δεν είναι ακόμη διαθέσιμο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

➤ *Σύγκριση Μεταξύ Ιεραρχικής και Ομοιόμορφης Δρομολόγησης*

Η σύγκριση μεταξύ ιεραρχικής και ομοιόμορφης δρομολόγησης φαίνεται στον Πίνακα 3-1.

3.4.1.3 Πρωτόκολλα Βασισμένα στη Δομή του Δικτύου – Θεσική Δρομολόγηση

Τα σημαντικότερα πρωτόκολλα θεσικής δρομολόγησης, που βασίζονται στη δομή του δικτύου, είναι το “*Geographic Adaptive Fidelity*” (GAF) και το SPAN. Στις επόμενες ενότητες δίδεται η περιγραφή μερικών ακόμη πρωτοκόλλων αυτής της κατηγορίας.

3.4.1.3.1 Geographic and Energy-Aware Routing (GEAR)

Ο Yu *et al.* [79] μελέτησαν τη χρήση γεωγραφικών πληροφοριών κατά τη διασπορά ερωτημάτων σε κατάλληλες περιοχές επειδή τα ερωτήματα δεδομένων (data queries) περιλαμβάνουν, πολύ συχνά, γεωγραφικά χαρακτηριστικά.

Το πρωτόκολλο GEAR χρησιμοποιεί ενεργειακά και γεωγραφικά ενημερωμένους heuristics επιλογής γειτόνων για να δρομολογήσει ένα πακέτο προς τον προορισμό.

Βασική ιδέα: Να περιορισθεί ο αριθμός των ενδιαφερόντων του *Directed Diffusion* σε μία ορισμένη περιοχή και όχι σε ολόκληρο το δίκτυο, οπότε ο GEAR εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια από το *Directed Diffusion*.

3.4.1.3.2 MFR, DIR και GEDIR

Οι Stojmenovic και Lin [80] περιέγραψαν και συζήτησαν βασικούς τοπικούς αλγόριθμους δρομολόγησης. Αυτά τα πρωτόκολλα διαπραγματεύονται βασικές μεθόδους οι οποίες βασίζονται στην απόσταση, στην πρόοδο και στην κατεύθυνση. Τα βασικά θέματα που εξετάζονται εδώ είναι η ορθή και η ανάστροφη φορά (forward and backward directions).

Ένας κόμβος πηγή, ή οποιοσδήποτε άλλος ενδιάμεσος κόμβος, θα επιλέξει έναν από τους γείτονές του σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένα κριτήρια.

Οι *Μέθοδοι Δρομολόγησης* που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι:

- MFR (*Most Forward within Radius* – η μεγαλύτερη προώθηση δεδομένων μέσα στο ακτινικό επίπεδο συμμετρίας),
- GEDIR (*Geographic Distance Routing* – δρομολόγηση σε γεωγραφική απόσταση). Αποτελεί μία διαφορετική εκδοχή των greedy αλγορίθμων, της greedy μεθόδου διπλού βήματος, και της εναλλακτικής greedy μεθόδου.
- DIR (*compass routing method* – μέθοδος δρομολόγησης καμπύλης τροχιάς).

Ο GEDIR είναι ένας greedy αλγόριθμος ο οποίος μετακινεί το πακέτο πάντοτε προς το γείτονα του που συμβαίνει εκείνη τη χρονική στιγμή να είναι η κορυφή και του οποίου η απόσταση προς τον προορισμό είναι η ελάχιστη δυνατή. Ο αλγόριθμος αποτυγχάνει όταν το πακέτο διασχίσει την ίδια κορυφή δύο φορές διαδοχικά.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το MFR και οι greedy μέθοδοι έχουν το ίδιο μονοπάτι προς τον προορισμό.

Στη μέθοδο DIR, ο καλύτερος γείτονας έχει την πιο κοντινή κατεύθυνση (π.χ. γωνία) προς τον προορισμό. Με άλλα λόγια, επιλέγεται ο γείτονας με τη μικρότερη γωνιακή απόσταση από τη φανταστική γραμμή που ενώνει τον τρέχοντα κόμβο με τον προορισμό.

Στο MFR, ο καλύτερος γείτονας A θα ελαχιστοποιήσει το εσωτερικό γινόμενο ανυσμάτων (dot product) \overline{DA} . Το \overline{DS} (όπου S και D είναι ο κόμβος πηγή και ο κόμβος προορισμού αντίστοιχα) και το \overline{SD} αντιπροσωπεύουν την Ευκλείδειο απόσταση (Euclidian distance) μεταξύ των δύο κόμβων S και D . Εναλλακτικά θα μπορούσε κάποιος να μεγιστοποιήσει το εσωτερικό γινόμενο $\overline{SD} \cdot \overline{SA}$. Κάθε μία μέθοδος παύει να προωθεί το μήνυμα προς τον κόμβο εκείνο για τον οποίο η καλύτερη επιλογή είναι να ξαναστείλει το μήνυμα πίσω στον προηγούμενο κόμβο.

Το GEDIR και το MFR δεν εξαρτώνται από βρόχους (loop-free), ενώ το DIR μπορεί να δημιουργήσει βρόχους εκτός και αν έχει απομνημονευθεί η προηγούμενη κίνηση ή έχει επιβληθεί μία χρονοσφραγίδα (timestamp).

Μία συγκριτική μελέτη [80] η οποία έγινε μεταξύ αυτών των αλγορίθμων απέδειξε ότι οι τρεις βασικοί αλγόριθμοι είχαν συγκρίσιμες επιδόσεις, όσον αφορά στην ταχύτητα διανομής και στην κατά μέσο όρο διεύρυνση (dilation). Επιπλέον, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι οι κόμβοι στο MFR επιλέγουν τον ίδιο γείτονα προώθησης μηνυμάτων στο 99% των περιπτώσεων, και μάλιστα τα επιλεγμένα μονοπάτια ήταν ίδια στις περισσότερες περιπτώσεις.

3.4.1.3.3 The Greedy Other Adaptive Face Routing (GOAFR)

Στο [81] προτείνεται ένας γεωμετρικός αλγόριθμος ad hoc δρομολόγησης ο οποίος συνδυάζει greedy και face δρομολόγηση. Ο greedy αλγόριθμος GOAFR (*Greedy Other Adaptive Face Routing*) επιλέγει πάντοτε το γείτονα που βρίσκεται πλησιέστερα προς τον κόμβο εκείνο ο οποίος θα είναι ο επόμενος για δρομολόγηση.

Ο OFR (*Other Face Routing*) είναι μία παραλλαγή του FR (*Face Routing*). Ο αλγόριθμος FR [81] είναι ο πρώτος που εγγυάται την επιτυχία εάν συνδεθεί η πηγή με τον προορισμό. Όμως, το κόστος στη χειρότερη περίπτωση του FR είναι ανάλογο προς το μέγεθος του δικτύου, όσον αφορά στον αριθμό των κόμβων.

Ο πρώτος αλγόριθμος ο οποίος θα μπορούσε να συναγωνισθεί με την καλύτερη διαδρομή στη χειρότερη περίπτωση, είναι ο AFR (*Adaptive Face Routing*). Όμως, με όρισμα χαμηλού ορίου (lower bound argument), ο AFR αποδεικνύεται ότι είναι ασύμπτωτα (asymptotically) ο βέλτιστος για τη χειρότερη περίπτωση. Ο AFR δεν είναι αποδοτικός στις περιπτώσεις του μέσου όρου.

Οι συγγραφείς του παρόντος άρθρου έχουν αποδείξει ότι ο GOAFR μπορεί να επιτύχει και τα δύο, δηλαδή το βέλτιστο στη χειρότερη περίπτωση και την αποδοτικότητα στην περίπτωση του μέσου όρου. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι ο GOAFR υπερτερεί έναντι άλλων πολύ γνωστών αλγορίθμων, όπως είναι ο GPSR και ο AFR.

3.4.1.4 Πρωτόκολλα Βασισμένα στη Λειτουργία του Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στις Πολλαπλές Διαδρομές (multipath routing protocols)

Δύο από τα βασικότερα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το “*Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks*” [82] και το “*Energy-Aware Routing for Low-Energy Ad hoc Sensor Networks*” [83]. Λεπτομερής περιγραφή αυτών των πρωτοκόλλων αναφέρεται στο επόμενο κεφάλαιο 4.

3.4.1.5 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στη Λειτουργία του Δικτύου-Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στην Αναζήτηση Πληροφοριών (Query-Based Routing Protocols)

Δύο από τα βασικότερα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το “*Directed Diffusion*” και το “*Rumor Routing*”. Λεπτομερής περιγραφή αυτών των πρωτοκόλλων αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα.

3.4.1.6 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στη Λειτουργία του Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στη Διαπραγμάτευση (Negotiation-Based Routing Protocols)

Το βασικότερο πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το “*SPIN*” του οποίου η λεπτομερής περιγραφή αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα.

3.4.1.7 Πρωτόκολλα Βασισμένα στη Λειτουργία του Δικτύου-Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στην Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS-Based Routing Protocols)

3.4.1.7.1 Sequential Assignment Routing (SAR)

Το SAR (*Sequential Assignment Routing*) [84] είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και που εισήγαγε την έννοια της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στις αποφάσεις δρομολόγησης.

Μία Απόφαση Δρομολόγησης στο SAR εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- Ενεργειακούς πόρους
- Ποιότητα υπηρεσιών σε κάθε μονοπάτι, και
- Το επίπεδο προτεραιότητας του κάθε πακέτου.

Για να αποφευχθεί η αποτυχία της απλής διαδρομής, χρησιμοποιούνται σχήματα προσέγγισης πολλαπλού μονοπατιού και επιτόπιας αποκατάστασης μονοπατιού. Για να δημιουργηθούν πολλαπλά μονοπάτια από έναν κόμβο πηγή, κατασκευάζεται ένα δένδρο του οποίου η ρίζα είναι στον κόμβο πηγή και απλώνεται μέχρι τον κόμβο προορισμού. Τα μονοπάτια του δένδρου κατασκευάζονται ενώ αποφεύγονται κόμβοι χαμηλής ενέργειας ή εγγύησης ποιότητας υπηρεσιών. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας κάθε αισθητήριος κόμβος θα αποτελεί τμήμα ενός δένδρου πολλαπλού μονοπατιού.

Το SAR είναι ένα οδηγούμενο από πίνακα πρωτόκολλο πολλαπλού μονοπατιού (table-driven Multipath tree) που σκοπό έχει την εξοικονόμηση ενέργειας και την ανοχή σε σφάλματα. Ο σκοπός του SAR είναι να ελαχιστοποιήσει τη μέση σταθμισμένη μετρική (metric) ποιοτικού ελέγχου (QoS) καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

3.4.1.7.2 SPEED: A Stateless Protocol for Real-time Communication in Sensor Networks

Στο [85] προτείνεται ένα ακόμη πρωτόκολλο δρομολόγησης για ποιότητα υπηρεσιών (QoS) το οποίο παρέχει εγγύηση μεταφοράς δεδομένων από τη μία μέχρι την άλλη άκρη του δικτύου. Αυτό το πρωτόκολλο ονομάζεται SPEED και απαιτεί όπως κάθε κόμβος τροφοδοτεί συνεχώς το δίκτυο

με πληροφορίες που έχουν σχέση με τους γειτονικούς του κόμβους και χρησιμοποιεί γεωγραφική προώθηση μηνυμάτων για να εντοπίζει τα μονοπάτια.

Επιπλέον, το SPEED κοπιάζει προκειμένου να διασφαλίσει μία συγκεκριμένη ταχύτητα για κάθε πακέτο στο δίκτυο έτσι ώστε η κάθε εφαρμογή να μπορεί να κάνει για αυτά (τα πακέτα) μία σωστή εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο διαιρώντας την απόσταση που μεσολαβεί μέχρι το σταθμό βάσης με την ταχύτητα του πακέτου πριν λάβει κάποια απόφαση αποδοχής.

Ακόμη, το SPEED μπορεί να προσφέρει αποφυγή συμφόρησης (congestion avoidance) όταν το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο ή υπερπλήρες (congested).

Η υπομονάδα δρομολόγησης (routing module) ονομάζεται SNGF (*Stateless Nondeterministic Geographic Forwarding*) και συνεργάζεται με άλλες τέσσερις υπομονάδες στο επίπεδο δικτύου (network layer).

Η εκτίμηση της χρονικής καθυστέρησης σε κάθε κόμβο γίνεται βασικά με υπολογισμό του χρόνου που παρήλθε πριν ακόμη ληφθεί ένα μήνυμα ACK από κάποιο γειτονικό κόμβο ως απάντηση σε πακέτο δεδομένων που έχει μεταδοθεί. Παρατηρώντας τις τιμές χρονικής καθυστέρησης, το SNGF επιλέγει τον κόμβο εκείνο που συγκεντρώνει τις απαιτήσεις ταχύτητας.

➤ *Σύγκριση Μεταξύ SPEED, DSR και AODV*

Το SPEED έχει καλύτερες επιδόσεις από το DSR και το AODV όσον αφορά την από άκρο σε άκρο χρονική καθυστέρηση. Επιπλέον, η συνολική ενέργεια μετάδοσης είναι μικρότερη και τούτο οφείλεται κυρίως στην απλότητα του αλγόριθμου δρομολόγησης. Η επιβάρυνση από τα πακέτα ελέγχου είναι μικρότερη.

3.4.1.8 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στη Λειτουργία του Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Βασισμένα στη Συνάφεια ή μη (Coherent and Non-Coherent Routing Protocols)

Η επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία στη λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Ως εκ τούτου, οι τεχνικές δρομολόγησης περιλαμβάνουν διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων.

Γενικά, οι αισθητήριοι κόμβοι συνεργάζονται μεταξύ τους προκειμένου να επεξεργαστούν διαφορετικά δεδομένα τα οποία έχουν πλημμυρίσει την περιοχή του δικτύου.

Δύο ακόμη παραδείγματα τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων που έχουν προταθεί στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι τα εξής [84]:

- *Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Συνάφειας Βασισμένα στην Επεξεργασία των Δεδομένων (coherent and data-processing-based routing protocols), και*
- *Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Μη Συνάφειας Βασισμένα στην Επεξεργασία των Δεδομένων (coherent and non-coherent data-processing-based routing protocols)*

Αναλυτικότερα:

Στα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Μη Συνάφειας που Βασίζονται στην Επεξεργασία των Δεδομένων (*non-coherent data-processing-based routing protocols*) οι κόμβοι επεξεργάζονται επί τόπου τα ακατέργαστα δεδομένα πριν να τα στείλουν σε άλλους κόμβους για περαιτέρω επεξεργασία. Οι κόμβοι οι οποίοι εκτελούν περαιτέρω επεξεργασία ονομάζονται συσσωρευτές (aggregators).

Πίνακας 3-2: Συγκριτική Παρουσίαση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Πρωτόκολλα	Ταξινόμηση	Κινητικότητα	Ενημερότητα Θέσης	Χρήση Ισχύος	Βασισμένο στη διαπραγμάτευση	Συσφόρευση Αεδομένων	Εντοπισμός	Ποιότητα Υπηρεσιών	Πολυπλοκότητα Κατάστασης	Επεκτασιμότητα	Πολλαπλό Μονοπάτι	Βασισμένο στο Ερώτημα
SPIN	flat	Πιθανή	Όχι	Περιορ.	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Ναι	Ναι
Direct diffusion	flat	Περιορ.	Όχι	Περιορ.	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Ναι	Ναι
Rumor routing	flat	Πολύ Περιορ.	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Καλή	Όχι	Ναι
GBR	flat	Περιορ.	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Ναι
MCFA	flat	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Καλή	Όχι	Όχι
CADR	flat	Όχι	Όχι	Περιορ.	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Όχι
COUGAR	flat	Όχι	Όχι	Περιορ.	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Ναι
ACQUIRE	flat	Περιορ.	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Ναι
EAR	flat	Περιορ.	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Ναι
LEACH	Hierarchical	Σταθερό BS	Όχι	Μέγιστη	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	CHs	Καλή	Όχι	Όχι
TEEN & APTEEN	Hierarchical	Σταθερό BS	Όχι	Μέγιστη	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	CHs	Καλή	Όχι	Όχι
PEGASIS	Hierarchical	Σταθερό BS	Όχι	Μέγιστη	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Χαμ.	Καλή	Όχι	Όχι
MECN & SMECN	Hierarchical	Όχι	Όχι	Μέγιστη	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Χαμηλ.	Όχι	Όχι
OP	Hierarchical	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Χαμηλ.	Όχι	Όχι
HPAR	Hierarchical	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Καλή	Όχι	Όχι
VGA	Hierarchical	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	CHs	Καλή	Ναι	Όχι
Sensor aggregate	Hierarchical	Περιορ.	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Καλή	Όχι	Πιθ.
TTDD	Hierarchical	Ναι	Ναι	Περιορ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Μέτρ.	Χαμηλ.	Πιθ.	Πιθ.
GAF	Location	Περιορ.	Όχι	Περιορ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Καλή	Όχι	Όχι
GEAR	Location	Περιορ.	Όχι	Περιορ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Όχι
SPAN	Location	Περιορ.	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Όχι
MFR, GEDIR	Location	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ.	Περιορ.	Όχι	Όχι
GOAFR	Location	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμ	Καλή	Όχι	Όχι	Όχι
SAR	Location	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Ναι	Ναι	Όχι	ναι	Μέτρ.	Περιορ.	Όχι	Ναι
SPEED	QoS	Όχι	Όχι	Μη Διαθ.	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Μέτρ.	Περιορ.	Όχι	Ναι

Στα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης Συνάφειας που Βασίζονται στην Επεξεργασία των Δεδομένων (*coherent data-processing-based routing protocols*) τα δεδομένα προωθούνται στους συσσωρευτές μετά από μία υποτυπώδη (ελάχιστη) επεξεργασία. Η ελάχιστη επεξεργασία περιλαμβάνει τυπικά εργασίες όπως είναι η χρονοσφράγιση (timestamping) και ο περιορισμός παραγωγής αντιγράφων.

Για δρομολόγηση με εξοικονόμηση ενέργειας επιλέγεται κανονικά η επεξεργασία συνάφειας.

Οι λειτουργίες *Μη Συνάφειας* έχουν σχετικά χαμηλό φορτίο κίνησης δεδομένων. Από την άλλη μεριά, επειδή η επεξεργασία *Συνάφειας* παράγει δεδομενορεύματα μεγάλου μήκους (long data streams), η εξοικονόμηση ενέργειας πρέπει να επιτευχθεί μέσα από το καταλληλότερο μονοπάτι.

Στο [84] έχουν προταθεί απλοί και πολλαπλοί νικητές αλγόριθμοι (winner algorithms) για επεξεργασία *Μη Συνάφειας* και *Συνάφειας*, αντίστοιχα.

Στον *Αλγόριθμο Απλού Νικητή* (Single Winner algorithm – SWE), επιλέγεται ένας απλός κόμβος συσσώρευσης δεδομένων (aggregator) ο οποίος θα προβεί στην εκτέλεση πολύπλοκων επεξεργασιών. Η επιλογή αυτού του κόμβου γίνεται με βάση τα ενεργειακά του αποθέματα και την επεξεργαστική του ικανότητα. Στο τέλος της επεξεργασίας SWE, το δίκτυο θα καλυφθεί πλήρως από ένα *ελάχιστου βήματος δέντρο* (minimum-hop spanning tree)

Στον *Αλγόριθμο Πολλαπλού Νικητή* (Multiple Winner algorithm – MWE) προτείνεται μία απλή επέκταση του SWE. Όταν όλοι οι κόμβοι είναι πηγές και στέλνουν τα δεδομένα τους στον κεντρικό κόμβο συσσώρευσης δεδομένων (central aggregator node), θα καταναλώνεται ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, και ως εκ τούτου αυτή η διαδικασία απαιτεί μεγάλο κόστος.

Ένας τρόπος για να μειωθεί το ενεργειακό κόστος είναι ο περιορισμός του αριθμού των πηγών που στέλνουν δεδομένα στον κεντρικό κόμβο συσσώρευσης δεδομένων. Ο κάθε κόμβος, αντί να κρατάει αρχείο μόνο για τον καλύτερο υποψήφιο κύριο κόμβο συσσώρευσης δεδομένων (master aggregator node), θα κρατάει αρχείο μόνο για μέχρι n από αυτούς τους υποψήφιους κόμβους. Στο τέλος της διαδικασίας MWE, ο κάθε αισθητήριος κόμβος του δικτύου θα έχει ένα σύνολο από μονοπάτια ελάχιστης ενέργειας προς κάθε κόμβο πηγή.

Συμπερασματικά, το SWE χρησιμοποιείται για να βρίσκει τον κόμβο με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Αυτός ο κόμβος μπορεί να είναι κεντρικός κόμβος για επεξεργασία συνάφειας. Γενικά, η διαδικασία MWE έχει μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση, μεγαλύτερη επιβάρυνση, και χαμηλότερη επεκτασιμότητα από αυτήν των δικτύων μη συνάφειας.

3.4.1.9 Πλέον Δημοφιλή Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

3.4.1.9.1 DSR (Dynamic Source Routing)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSR (*Dynamic Source Routing protocol for mobile ad hoc networks*) [86] απευθύνεται κυρίως σε κινητά ad hoc δίκτυα (MANETs – Mobile Ad hoc NETWORKS). Κάθε πακέτο δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθεί περιλαμβάνει όλους τους αισθητήριους κόμβους από τους οποίους θα πρέπει να περάσει προκειμένου να φθάσει στον προορισμό. Αυτή η ιδιότητα είναι γνωστή ως «*Δρομολόγηση Πηγής*» (*source routing*) και απαιτεί να γνωρίζει ο αποστολέας (sender) την πλήρη διαδρομή προς τον προορισμό. Το πρωτόκολλο DSR βασίζεται σε δύο βασικές διαδικασίες:

- ο *Τη Διαδικασία Ανακάλυψης της Διαδρομής* (*route discovery process*). Αυτή βασίζεται στην υπερχειλίση ή πλημμύρα (flooding) και χρησιμοποιείται για να ανακαλύπτει νέες διαδρομές (routes) με δυναμικό τρόπο.

- ο *Τη Διαδικασία Διατήρησης της Διαδρομής* (route maintenance process). Αυτή ανιχνεύει περιοδικά το δίκτυο και το πληροφορεί για τις όποιες μεταβολές έχουν γίνει στην τοπολογία του.

3.4.1.9.2 DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης DSDV (*highly dynamic Destination-Sequenced Distance Vector routing for mobile computers*) [87] έχει σαν βάση τους πίνακες δρομολόγησης (table-driven protocol). Προβάλλει την απαίτηση στον κάθε κόμβο να προωθεί περιοδικά σε ολόκληρο το δίκτυο πληροφορίες σχετικές με την ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης. Βελτιώνει τα παραδοσιακά πρωτόκολλα με διανύσματα απόστασης (distance vector protocols) με το να εισάγει ελευθερία βρόχων (loop-freedom) στους πίνακες δρομολόγησης. Στο DSDV, ο κάθε κόμβος συντηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης με αριθμούς ακολουθίας, στον οποίο έχει συμπεριλάβει το επόμενο βήμα διαδρομής (hop) για τον κάθε προορισμό που μπορεί να φτάσει. Οι αριθμοί ακολουθίας δίνουν τη δυνατότητα στους κινητούς κόμβους (mobile nodes) να διακρίνουν τις παλιές από τις νέες διαδρομές. Ο κάθε κόμβος εκπέμπει περιοδικά τον πίνακα δρομολόγησης προς όλο το δίκτυο, ώστε με αυτόν τον τρόπο να διατηρηθεί η συνέπεια των πινάκων.

3.4.1.9.3 AODV (Ad hoc On demand Distance Vector)

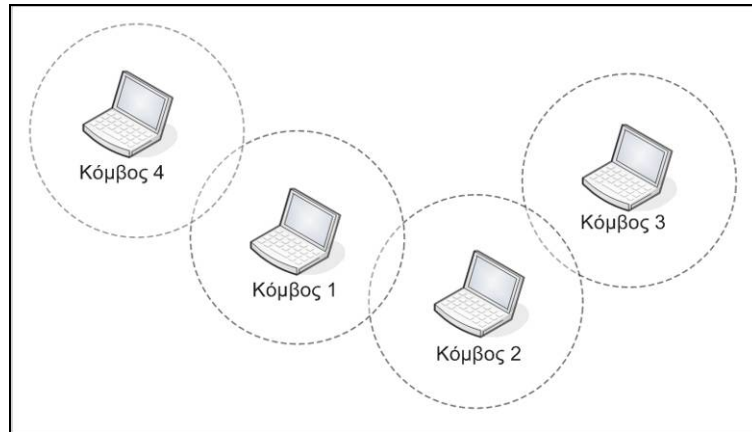
Το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector routing protocol*) [88] αποτελεί συνδυασμό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης DSR και DSDV. Χρησιμοποιεί το μηχανισμό κατ' απαίτηση του DSR για την ανακάλυψη και διατήρηση της διαδρομής και τη βήμα-προς-βήμα (hop-by-hop) δρομολόγηση καθώς και τον αριθμό ακολουθίας του DSDV. Ενώ το DSR χρησιμοποιεί τη μνήμη του κόμβου (node cache) για τη διατήρηση των πληροφοριών, το AODV χρησιμοποιεί τους πίνακες δρομολόγησης (routing tables), έναν ανά προορισμό, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο DSDV.

Το AODV είναι μία μέθοδος δρομολόγησης των πακέτων μεταξύ των κινητών υπολογιστών ή κόμβων. Τους επιτρέπει να περάσουν τα μηνύματά τους μέσα από τους γείτονές τους προκειμένου να φθάσουν σε εκείνους του κόμβους με τους οποίους δεν έχουν τη δυνατότητα της απευθείας επικοινωνίας. Το AODV επιτυγχάνει αυτό με το να ανακαλύπτει τις διαδρομές από τις οποίες θα περάσουν τα μηνύματα. Επιπλέον, το AODV διασφαλίζει ότι αυτές οι διαδρομές δεν περιέχουν βρόχους και προσπαθεί να εντοπίσει την ελάχιστη δυνατή διαδρομή. Το AODV είναι επίσης σε θέση να διαχειρίζεται τις όποιες μεταβολές συμβαίνουν στις διαδρομές και να δημιουργεί νέες, εφόσον διαπιστώσει ότι υπάρχει κάποιο σφάλμα.

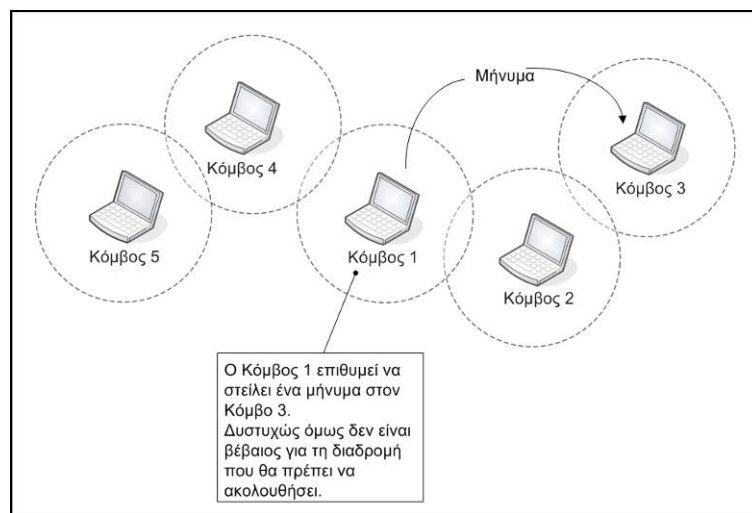
Το Σχήμα 3-6 απεικονίζει ένα σύνολο από τέσσερις κόμβους σε ασύρματο δίκτυο. Οι κύκλοι δείχνουν εμφανώς την εμβέλεια επικοινωνίας του κάθε κόμβου χωριστά. Εξαιτίας της περιορισμένης εμβέλειας, ο κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνεί μόνο με τους κόμβους που βρίσκονται δίπλα του [89,90].

Οι κόμβοι με τους οποίους μπορεί να επικοινωνήσει κανείς απευθείας θεωρούνται ως γειτονικοί. Ένας κόμβος παρακολουθεί στενά τους γείτονές του με το να προσπαθεί να ακούσει ένα μήνυμα HELLO το οποίο εκπέμπει ο κάθε κόμβος σε τακτά διαστήματα.

Όταν κάποιος κόμβος βρεθεί σε τέτοια θέση που να θέλει να στείλει ένα μήνυμα σε κάποιον άλλο κόμβο ο οποίος δεν είναι γείτονάς του, τότε εκπέμπει ένα μήνυμα RREQ (Route REQuest – απαίτηση διαδρομής). Το μήνυμα απαίτησης διαδρομής RREQ περιέχει αρκετά δυαδικά ψηφία (bits) τα οποία παρέχουν βασικές πληροφορίες οι οποίες αφορούν στην *Πηγή* (ή αφετηρία), τον *Προορισμό*, τη *Διάρκεια Ζωής* (lifespan) του μηνύματος, καθώς και τον *Αριθμό Ακολουθίας* ή *Σειράς* (sequence number) ο οποίος χρησιμεύει ως *Μοναδικό Αναγνωριστικό* (ID).



Σχήμα 3-6: Ασύρματο δίκτυο με τέσσερις κόμβους



Σχήμα 3-7: Φάση I: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3

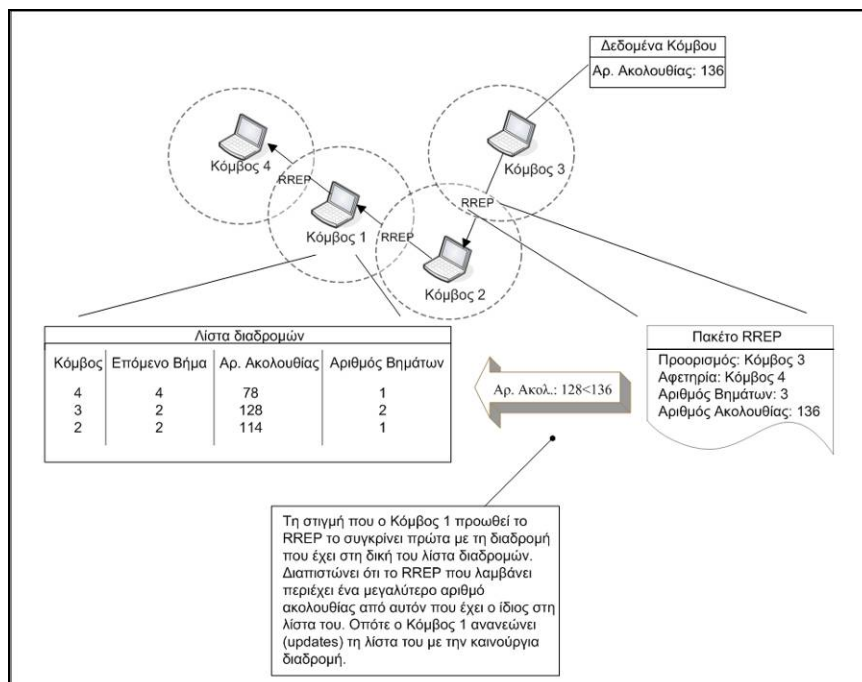
Στο παράδειγμα που ακολουθεί, ο Κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει κάποιο μήνυμα στον Κόμβο 3 (Σχήμα 3-7). Οι γειτονικοί κόμβοι του Κόμβου 1 είναι οι Κόμβοι 2 και 4. Επειδή ο Κόμβος 1 δεν μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με τον Κόμβο 3 (Σχήμα 3-8), τότε ο Κόμβος 1 εκπέμπει ένα μήνυμα RREQ. Το μήνυμα RREQ μπορούν να το λάβουν οι Κόμβοι 2 και 4.

Όταν οι γείτονες του Κόμβου 1 λάβουν το μήνυμα RREQ, τότε έχουν δύο επιλογές: Εάν γνωρίζουν μία διαδρομή προς τον προορισμό ή εάν είναι οι ίδιοι ο προορισμός, τότε μπορούν να στείλουν πίσω στον Κόμβο 1 ένα μήνυμα απάντησης διαδρομής (RREP – Route REPLY), διαφορετικά είναι υποχρεωμένοι να στείλουν ξανά στους γείτονές τους το μήνυμα RREQ. Το μήνυμα στέλνεται και ξαναστέλνεται μέχρι να εξαντληθεί η διάρκεια ζωής τους (lifespan). Εάν ο Κόμβος 1 δεν λάβει καμία απάντηση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε στέλνει και πάλι το μήνυμα RREQ, μόνο που αυτή τη φορά το μήνυμα RREQ θα έχει μία μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ένα καινούργιο αριθμό ID.

Όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν τον Αριθμό Ακολουθίας στο RREQ προκειμένου να διασφαλίσουν ότι δεν ξαναστέλνουν το ίδιο RREQ.

Στο παράδειγμά μας, ο Κόμβος 2 έχει μία διαδρομή προς τον κόμβο 3 και απαντά στο RREQ με το να στείλει ένα μήνυμα RREP. Ο Κόμβος 4, εξάλλου, δεν έχει μία διαδρομή προς τον Κόμβο 3, οπότε ξαναστέλνει το RREQ.

τους οποίους συνομιλεί.. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός ακολουθίας, τόσο πιο πρόσφατη είναι η διαδρομή. Με αυτόν τον τρόπο οι άλλοι κόμβοι είναι σε θέση να γνωρίζουν ποιους από τους κόμβους έχει την ακριβέστερη πληροφορία.



Σχήμα 3-10: Φάση IV: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3

Στο παράδειγμά μας, ο Κόμβος 1 προωθεί ένα μήνυμα RREP προς τον Κόμβο 4. Παρατηρεί ότι η διαδρομή που αναφέρεται στο RREP περιέχει έναν καλύτερο αριθμό ακολουθίας από τη διαδρομή που έχει ο ίδιος (Κόμβος 1) στη δική του λίστα διαδρομών (routing list). Οπότε, ο Κόμβος 1 αντικαθιστά τη τρέχουσα διαδρομή που περιέχεται στη λίστα του με τη διαδρομή που περιέχεται στο RREP.

➤ Μηνύματα Σφάλματος

Το μήνυμα σφάλματος διαδρομής (RERR – Route ERROR message) επιτρέπει στον AODV να προβαίνει στη διόρθωση των διαδρομών σε περίπτωση που οι κόμβοι κινούνται από εδώ και από εκεί.

Μόλις κάποιος κόμβος λάβει το μήνυμα RERR απευθύνεται στον Πίνακα Διαδρομών (Routing Table) και σε όλες εκείνες τις διαδρομές οι οποίες περιέχουν τους «κακούς» κόμβους.

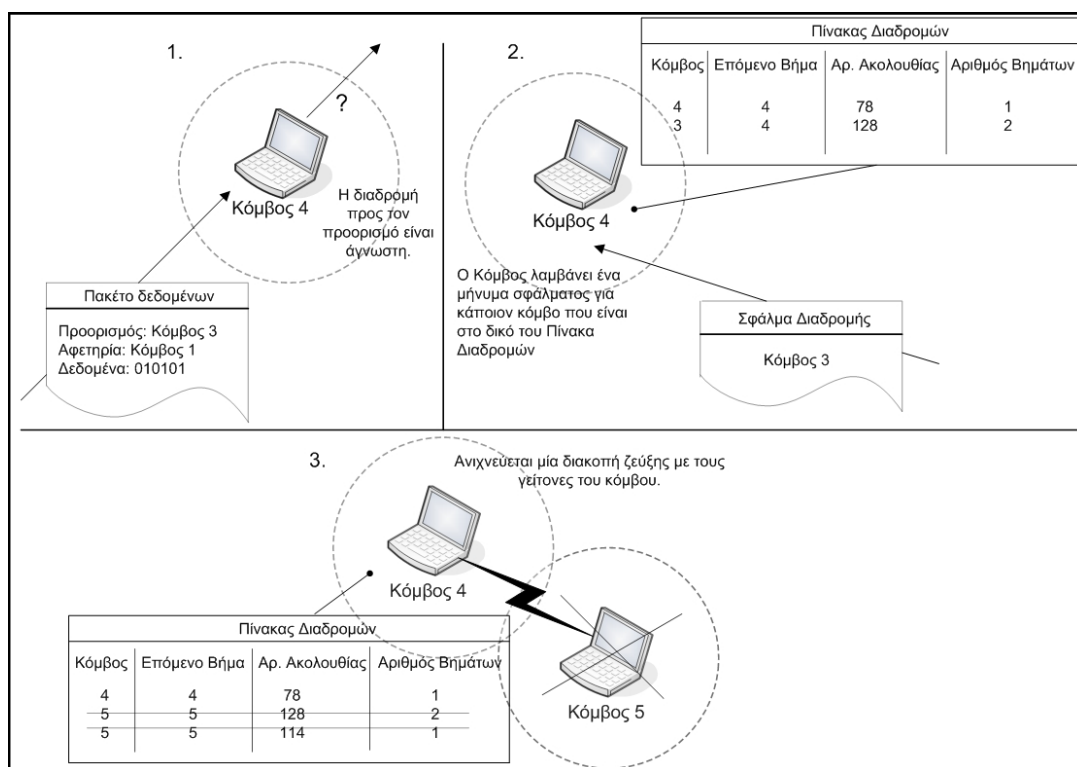
Τα παρακάτω διαγράμματα επεξηγούν τις τρεις δυνατές περιπτώσεις κάτω από τις οποίες ένας κόμβος θα μπορούσε να στείλει ένα μήνυμα RERR στους γείτονές του.

Στο Πρώτο Σενάριο, ο Κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο Δεδομένων το οποίο θα πρέπει να προωθήσει αλλά όμως δε διαθέτει μία διαδρομή προς τον προορισμό. Το πραγματικό πρόβλημα δεν είναι ότι ο κόμβος δε διαθέτει κάποια διαδρομή. Το πρόβλημα είναι ότι κάποιος άλλος κόμβος νομίζει ότι η σωστή διαδρομή προς τον προορισμό είναι διαμέσου αυτού του κόμβου.

Στο Δεύτερο Σενάριο, ο κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα RERR το οποίο προκαλεί την ακύρωση τουλάχιστον μιας από τις διαδρομές του. Εάν συμβεί αυτό, τότε ο κόμβος θα στείλει ένα RERR το οποίο θα περιέχει όλους τους νέους κόμβους οι οποίοι δεν θα είναι τώρα προσπελάσιμοι.

Στο Τρίτο Σενάριο, ο κόμβος ανακαλύπτει ότι δεν μπορεί να επικοινωνήσει με έναν από τους γείτονές του. Όταν συμβεί αυτό, τότε αυτός απευθύνεται στον Πίνακα Διαδρομών προκειμένου

να εντοπίσει ποια διαδρομή χρησιμοποιεί ο γείτονας για το επόμενο βήμα και τη σημειώνει ως άκυρη. Στη συνέχεια στέλνει ένα μήνυμα RERR το οποίο περιέχει την ταυτότητα του γείτονα, καθώς και τις άκυρες διαδρομές.



Σχήμα 3-11: Φάση V: Ο κόμβος 1 επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα στον κόμβο 3

3.4.1.9.4 OLSR (Optimized Link State Routing)

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης OLSR (*Optimized Link State Routing protocol – Πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης βελτιστοποιημένης ζεύξης*) [91,92] αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τα *Κινητά ad hoc Δίκτυα* (MANETs – mobile ad hoc networks).

Λειτουργεί ως ένα *proactive* πρωτόκολλο το οποίο αντλεί πληροφορίες από τους πίνακες και μέσω αυτού του τρόπου ανταλλάσσει ανελλιπώς πληροφορίες τοπολογίας με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.

Χρησιμοποιεί την τεχνική MPR (*Multi-Point Relaying – Αναμετάδοση Πολλαπλών Σημείων*) για υπερχειλίση μηνυμάτων. Οι κόμβοι οι οποίοι έχουν επιλεγεί από κάποιους γειτονικούς κόμβους ως MPR (αναμεταδότες πολλαπλών σημείων) ανακοινώνουν περιοδικά αυτήν την πληροφορία στα δικά τους μηνύματα ελέγχου. Έτσι, ένας κόμβος ανακοινώνει στο δίκτυο ότι έχει προσβασιμότητα (reachability) στους κόμβους οι οποίοι τον έχουν επιλέξει ως MPR.

Στον υπολογισμό μιας διαδρομής, τα MPRs χρησιμοποιούνται προκειμένου να σχηματίσουν τη διαδρομή από ένα δεδομένο κόμβο προς οποιονδήποτε προορισμό εντός του δικτύου. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τα MPR για να διευκολύνει την αποτελεσματική υπερχειλίση ή πλημμύρα (efficient flooding) των μηνυμάτων ελέγχου στο δίκτυο.

Το OLSR έχει υιοθετήσει την ιδέα της προώθησης (forwarding) και της αναμετάδοσης (relaying) από το HIPERLAN (ένα πρωτόκολλο του επιπέδου MAC) και έχει τυποποιηθεί από το ETSI.

3.4.1.9.5 TORA (Temporarily-Ordered Routing Algorithm)

Ο TORA (*Temporarily-Ordered Routing Algorithm – Προσωρινά διατεταγμένος αλγόριθμος δρομολόγησης*) [93] είναι ένας εύκολα προσαρμοζόμενος αλγόριθμος ο οποίος βασίζεται στην αρχή της εγκάρσιας διάβασης ζεύξεων (link traversal). Προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την επιβάρυνση που οφείλεται σε τοπολογικές μεταβολές με το να περιορίσει τα μηνύματα δρομολόγησης σε ένα μικρό αριθμό κόμβων στη «γειτονιά» που συμβαίνουν αυτές οι μεταβολές. Αυτό δε, αποτελεί και το κλειδί της σχεδίασης του TORA.

Το πρωτόκολλο TORA υλοποιεί τρεις βασικές διαδικασίες (processes):

- *Διαδικασία Δημιουργίας Διαδρομής κατ' Απαίτηση (On-Demand Route Create process).*
- *Διαδικασία Συντήρησης Διαδρομής (Route Maintenance process).*
- *Διαδικασία Διαγραφής Διαδρομής (Erase Route process).* Το TORA προσπαθεί να διαγράψει τις άκυρες διαδρομές (invalid routes) και τίθεται σε κίνηση από έναν κόμβο που ανιχνεύει την κατάτμηση ή το διαμερισμό (partition) του δικτύου. Η διαγραφή διαδρομών περιλαμβάνει την πλημμύρα του δικτύου με ένα πακέτο «καθαρισμού».

Το πρωτόκολλο TORA υλοποιείται πάνω στο IMEP (*Internet MANET Encapsulation Protocol*) το οποίο υλοποιεί μία αξιόπιστη διανομή δρομολόγησης μηνυμάτων ελέγχου από έναν κόμβο προς κάθε γειτονικό του κόμβο, μεταδίδοντας περιοδικά μία ακολουθία μηνυμάτων BEACON-HELLO μεταξύ του πομπού και των δεκτών. Αυτή η εξάρτηση του πρωτοκόλλου θα επηρεάσει την αποδοτικότητα αυτού του πρωτοκόλλου.

Το πρωτόκολλο TORA δημιουργεί έναν *a*-κυκλικό γράφο (DAG), ο οποίος βασίζεται σε μετρικές (metrics) «ύψους», προκειμένου να δημιουργήσει και να συντηρήσει διαδρομές. Το ύψος διαφέρει από προορισμό σε προορισμό οπότε υπάρχει ένα DAG για κάθε προορισμό.

Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να δημιουργήσει μία διαδρομή εκπέμπει ένα μήνυμα QUERY στους γείτονές του. Αυτό το μήνυμα αναμεταδίδεται στο δίκτυο μέχρι τη στιγμή που θα φθάσει στον κόμβο προορισμό ή σε κάποιον κόμβο ο οποίος γνωρίζει τον προορισμό. Ο κόμβος απαντά με ένα μήνυμα UPDATE το οποίο περιέχει το ύψος σε σχέση με τον προορισμό, και το οποίο μεταδίδεται πίσω προς την πηγή. Κάθε κόμβος που λαμβάνει το μήνυμα UPDATE καθορίζει το δικό του ύψος το οποίο είναι μεγαλύτερο κατά ένα από αυτό του γείτονά του που του το έστειλε.

Ο χρόνος αποτελεί μία πολύ βασική παράμετρο του TORA επειδή το μέτρο ύψους εξαρτάται από αυτόν. Εξαιτίας αυτής της εξάρτησης από το χρόνο, το TORA απαιτεί από όλους τους κόμβους να έχουν το ίδιο ρολόι (χρησιμοποιώντας π.χ. το πρωτόκολλο NTP).

Οι μετρικές του πρωτοκόλλου TORA είναι οι εξής πέντε:

- Ο λογικός χρόνος της πτώσης της ζεύξης.
- Μία μοναδική ταυτότητα του κόμβου η οποία καθόρισε το νέο επίπεδο αναφοράς,
- Ένα δυαδικό ψηφίο-δείκτης ανάκλασης,
- Μία παράμετρος διάταξης της μετάδοσης, και
- Μία μοναδική ταυτότητα κόμβου.

Το επίπεδο μεταφοράς περιγράφεται από τις τρεις πρώτες μετρικές. Κάθε φορά που ο κόμβος χάνει την τελευταία του προς τα κάτω (downstream) σύνδεση εξαιτίας κάποιας αποτυχίας, τότε προσδιορίζεται ένα καινούργιο επίπεδο αναφοράς.

Το TORA μπορεί να είναι ασταθές εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιεί τη μεταξύ των κόμβων συνεργασία. Σε περίπτωση όπου πολλαπλά σύνολα κόμβων ανιχνεύσουν και διαγράψουν

διαδρομές βασιζόμενα το ένα σύνολο στο άλλο, τότε μπορεί να υπάρξουν ταλαντεύσεις, όμως αυτές θα είναι προσωρινού χαρακτήρα οπότε τελικά θα συγκλίνουν οι διαδρομές.

➤ *Τελικά Συμπεράσματα από τη Σύγκριση Μεταξύ των Πρωτοκόλλων AODV, DSDV, DSR, και TORA*

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση της εξομοίωσης μας επιτρέπουν να συμπεράνουμε τα εξής σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας:

- Γενικά, τα καθαρά ή αμιγή πρωτόκολλα κατ' απαίτηση (*pure on-demand protocols*), όπως είναι το DSR και το AODV έχουν σαφώς καλύτερες επιδόσεις από το DSDV, και μάλιστα πολύ καλύτερες από το TORA.
- Από όλα τα σενάρια που διερευνήθηκαν, το TORA παρουσιάζει το χειρότερο δείκτη επίδοσης.
- Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των κόμβων με ταυτόχρονη συντήρηση του αριθμού των πηγών κίνησης καθιστά το TORA μη κλιμακούμενο με αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας κατά 518% ενώ οι κόμβοι κινούνται από 25 μέχρι 50.
- Το DSDV παρουσιάζει μία πολύ σταθερή συμπεριφορά σε όλα τα δοκιμασμένα σενάρια, και τούτο οφείλεται κυρίως στη φιλοσοφία του που απορρέει από τον πίνακα (*table-driven philosophy*).
- Το DSR κανονικά έχει καλύτερες επιδόσεις από το AODV, εκτός από τα στατικά δίκτυα όπου εκεί παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

➤ *Σύγκριση Μεταξύ AODV και DSDV.*

Υπάρχουν αρκετά σενάρια όπου το AODV παρουσιάζει χειρότερες επιδόσεις από το DSDV, τυπικά όταν επιτρέπονται μακρύτερες διαδρομές.

➤ *Σύγκριση Μεταξύ DSR και AODV.*

Μέσα από το συνδυασμό της *επιβάρυνσης πακέτων των byte (byte packet overhead)*, η οποία είναι μεγαλύτερη στο DSR, και του αριθμού των πακέτων διαδρομής, ο οποίος είναι μεγαλύτερος στο AODV, οδηγούμαστε σε μία γενική κατανάλωση ενέργειας η οποία ευνοεί το DSR σε όλες τις εκτελέσεις εξομοίωσης. Έτσι λοιπόν, η επιβάρυνση των byte στο DSR, η οποία οφείλεται στις επικεφαλίδες δρομολόγησης των πηγών, δεν είναι σημαντική.

Σαν γενικό συμπέρασμα θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα πρωτόκολλα σε επίπεδο ζεύξης δεδομένων της τρέχουσας γενιάς είναι πιθανόν να χρειαστούν κάποια ρύθμιση για να ελαχιστοποιήσουν το κόστος ισχύος της διεπαφής του δικτύου (*network interface*).

Όπως έχει αποδειχθεί, το κόστος αποστολής πακέτων είναι μεγαλύτερο από το κόστος που συνεπάγεται όταν ο κόμβος είναι αδρανής (*idle*). Όμως, τα επίπεδα εφαρμογής και μεταφοράς μπορούν να καταστήσουν το κόστος αδράνειας ως το κυρίαρχο κόστος. Οποιοδήποτε πρωτόκολλο αφήνει αδρανή έναν κινητό δέκτη, χωρίς λόγο, σπαταλά ενέργεια.

3.4.1.9.6 Flooding

Το *Flooding* (πλημμύρα ή υπερχειλίση) [60] είναι ένας κλασικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για την αναμετάδοση δεδομένων χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης και η διατήρηση της τοπολογίας.

Στο Flooding, μόλις κάποιος κόμβος λάβει ένα πακέτο δεδομένων το μεταδίδει προς όλους τους γείτονές του και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φθάσει το πακέτο στον προορισμό του, ή μέχρι το πακέτο να φθάσει στο μέγιστο αριθμό βημάτων (*hops*).

➤ *Μειονέκτημα της Μεθόδου Υπερχείλισης*

Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος της υπερχείλισης είναι εύκολα υλοποιήσιμη, παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- *Implosion* (συγκέντρωση). Προκαλείται από τα αντίγραφα μηνυμάτων (duplicated messages) που στέλνονται στον ίδιο κόμβο.
- *Overlap* (επικάλυψη). Όταν δύο κόμβοι ανιχνεύουν την ίδια περιοχή στέλνουν παρόμοια πακέτα στον ίδιο γειτονικό κόμβο.
- *Resource Blindness* (τύφλωση πόρων). Καταναλώνονται πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ενεργειακοί περιορισμοί.

3.4.1.9.7 Gossiping

Το *Gossiping* (διάδοση - κουτσομπολιό) [94], όπως και το *Flooding*, είναι και αυτό ένας κλασικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για την αναμετάδοση δεδομένων χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης και η διατήρηση της τοπολογίας.

Το *Gossiping* αποτελεί μία ελαφρά βελτιωμένη έκδοση του *Flooding*. Σύμφωνα με αυτό, ο κόμβος αποδέκτης στέλνει το πακέτο προς έναν τυχαία επιλεγέντα κόμβο, ο οποίος με τη σειρά του επιλέγει κάποιον άλλον τυχαίο γείτονα για να προωθήσει το πακέτο κ.ο.κ.

Το *Gossiping* αποφεύγει το πρόβλημα της συγκέντρωσης (implosion) με το να στέλνει το πακέτο προς έναν τυχαία επιλεγέντα κόμβο αντί να το εκπέμπει σε ολόκληρο το δίκτυο. Όμως, αυτή η επιλογή προκαλεί καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων δια μέσου των κόμβων.

3.4.1.9.8 EAR (Eavesdrop And Register)

Το EAR (*Eavesdrop And Register – Κρυφάκουσμα και Καταχώρηση*) [84] σχεδιάστηκε προκειμένου να καλύψει τις επικοινωνιακές ανάγκες μεταξύ κινητών και σταθερών επί του εδάφους κόμβων. Σε αυτό το πρωτόκολλο είναι επιθυμητή η δημιουργία σύνδεσης με την ελάχιστη δυνατή ανταλλαγή μηνυμάτων. Ως εκ τούτου, ο κινούμενος κόμβος, για να διατηρήσει την ενέργεια που έχει, αναλαμβάνει πλήρως την ευθύνη της δημιουργίας της σύνδεσης. Ο κινούμενος κόμβος διατηρεί αρχείο το οποίο συμπεριλαμβάνει όλους τους κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή του και παίρνει αποφάσεις handoff (για το πότε θα προωθήσει το μήνυμα προς άλλους κόμβους) οποτεδήποτε ο λόγος του σήματος προς θόρυβο (SNR- Signal-to-Noise Ratio) πέσει κάτω από μία τιμή κατωφλίου.

Ο αλγόριθμος EAR έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι διαφανής στο πρωτόκολλο που ακολουθείται από τους σταθερούς κόμβους. Η πρώτη θυρίδα (slot) που ακολουθεί μετά την περίοδο εκκίνησης (bootup period) δεσμεύεται (reserved) για τους κινούμενους κόμβους δίνοντας τους έτσι μεγαλύτερη προτεραιότητα.

Ο αλγόριθμος EAR χρησιμοποιεί την εκπομπή μηνυμάτων πρόσκλησης (invitation messages) ως έναυσμα (trigger) κατά την περίοδο εκκίνησης. Ο κινούμενος κόμβος απλά κρυφακούει (eavesdrop) αυτά τα μηνύματα και δημιουργεί ένα αρχείο όλων αυτών των σταθερών κόμβων μέσα στην περιοχή ακρόασης (hearing area).

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τέσσερα βασικά μηνύματα:

- ο *Broadcast Invite* (BI). Ο σταθερός κόμβος προσκαλεί άλλους κόμβους προκειμένου να ενωθούν με αυτόν.

- *Mobile Invite* (MI). Ο κινούμενος κόμβος ανταποκρίνεται στο μήνυμα BI.
- *Mobile Response* (MR). Ο σταθερός κόμβος αποδέχεται την αίτηση MI.
- *Mobile Disconnect* (MD). Ο κινούμενος κόμβος πληροφορεί το σταθερό κόμβο για την έναρξη της διαδικασίας αποσύνδεσης.

Πίνακας 3-3: Σύντομη περιγραφή των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στο επίπεδο δικτύου

Πρωτόκολλο Δρομολόγησης	Περιγραφή
SPIN	Αποστέλλει δεδομένα στους αισθητήριους κόμβους μόνον εφόσον εκδηλώσουν το ανάλογο ενδιαφέρον. Περιλαμβάνει τρεις τύπους μηνυμάτων: ADV, REQ και DATA.
Directed Diffusion	Δημιουργεί διαδρομές προκειμένου να διευκολυνθεί η μετάδοση των δεδομένων από την πηγή προς τον προορισμό κατά τη διάρκεια της διασποράς ενδιαφέροντος.
SMECN	Δημιουργεί ένα δευτερεύον γράφημα (subgraph) του ασύρματου δικτύου αισθητήρων το οποίο περιλαμβάνει τη διαδρομή με την ελάχιστη ενέργεια.
Flooding	Εκπέμπει δεδομένα προς όλους τους γειτονικούς του αισθητήριους κόμβους, ανεξάρτητα εάν αυτοί τα έχουν ήδη λάβει σε προηγούμενη εκπομπή.
SAR	Δημιουργεί πολλαπλά δέντρα, όπου η ρίζα του κάθε δέντρου γειτονεύει με το σταθμό βάσης και απέχει από αυτόν μόνο κατά ένα βήμα διαδρομής (hop). Επιλέγει ένα δέντρο για να ξαναστείλει δεδομένα πίσω στο σταθμό βάσης, σύμφωνα με τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα και της πρόσθετης παραμέτρου ποιότητας υπηρεσιών (QoS metric).
LEACH	Σχηματίζει συστοιχίες προκειμένου να ελαχιστοποιήσει την απώλεια ενέργειας.
Gossiping	Αποστέλλει δεδομένα προς έναν τυχαία επιλεγέντα αισθητήριο κόμβο.

Ο κινούμενος κόμβος συνεχίζει να καταχωρεί στο αρχείο του κάθε κόμβο που στέλνει ένα μήνυμα BI. Μόλις ο σταθερός κόμβος λάβει ένα μήνυμα MI προσδιορίζει αμέσως εάν έχει διαθέσιμη κάποια TDMA θυρίδα (slot) για επικοινωνία. Το μήνυμα MR στέλνεται μόνο όταν μπορεί να διευθετηθεί η αίτηση των κινούμενων κόμβων. Καθώς βελτιώνεται ή χειροτερεύει ο λόγος του σήματος προς θόρυβο (SNR), είναι πιθανόν να σταλεί ένα μήνυμα MD ή να απαιτηθεί μία καινούργια σύνδεση. Προκειμένου να αποφευχθεί η επικοινωνιακή επιβάρυνση, απουσιάζουν όλες οι αναγνωρίσεις και χρησιμοποιούνται timeouts για να εμποδιστεί η ασαφής αναμονή στην περίπτωση που δεν λαμβάνεται καμία απάντηση στο MI. Αφού ο κινούμενος κόμβος επικοινωνεί με λίγους σταθερούς κόμβους, το μήκος του TDMA πλαισίου (frame) του είναι κλάσμα του υπέρ πλαισίου (super frame) που χρησιμοποιείται από τους σταθερούς κόμβους.

3.4.2 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα

Στον Πίνακα 3.3 απεικονίζεται η ανασκόπηση (overview) μερικών από τα πλέον συνήθη πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία έχουν προταθεί για χρήση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτά τα πρωτόκολλα ή θα πρέπει να βελτιωθούν, ή θα πρέπει να αναπτυχθούν άλλα καινούργια τα οποία θα είναι κατάλληλα για μεγαλύτερες τοπολογίες και υψηλότερη επεκτασιμότητα (scalability).

3.5 Το Επίπεδο Μεταφοράς

Η ανάγκη ύπαρξης του επιπέδου μεταφοράς καταδεικνύεται στο [48]. Αυτό το επίπεδο είναι ιδιαίτερα απαραίτητο όταν είναι επιθυμητή η πρόσβαση στο δίκτυο αισθητήρων μέσα από το Διαδίκτυο ή μέσα από άλλα εξωτερικά δίκτυα. Μέχρι στιγμής, από ότι είναι γνωστό, δεν έχουν προταθεί κάποιοι συγκεκριμένοι μηχανισμοί για τα δίκτυα αισθητήρων σε επίπεδο μεταφοράς. Το TCP με τους σημερινούς του μηχανισμούς παραθύρου εκπομπής ταιριάζει απόλυτα με τα ακραία χαρακτηριστικά περιβάλλοντος του δικτύου αισθητήρων. Μία πρόταση, όπως για παράδειγμα η κατάτμηση του TCP (TCP splitting), πιθανόν να είναι αναγκαία διότι θα υποχρεώσει τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων να αλληλεπιδρούν με άλλα δίκτυα, όπως π.χ. το Διαδίκτυο. Σύμφωνα με αυτήν την πρόταση, οι συνδέσεις TCP καταλήγουν στον κόμβο οποίος αποτελεί το σταθμό βάσης (sink node) και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα ειδικό επίπεδο μεταφοράς το οποίο μπορεί να χειρίζεται την επικοινωνία ανάμεσα στο σταθμό βάσης και στους αισθητήριους κόμβους (Σχήμα 2-1). Με αυτόν τον τρόπο η επικοινωνία ανάμεσα στο χρήστη και στο σταθμό βάσης μπορεί να γίνει με UDP ή TCP μέσω του Διαδικτύου ή δορυφόρου. Από την άλλη πλευρά, όμως, η επικοινωνία ανάμεσα στο σταθμό βάσης και στους αισθητήριους κόμβους, μπορεί να γίνει αμιγώς με πρωτόκολλα τύπου UDP εξαιτίας της περιορισμένης μνήμης του κάθε κόμβου.

Σε αντίθεση με τα πρωτόκολλα, όπως για παράδειγμα το TCP, τα σχήματα επικοινωνίας απ' άκρη σ' άκρη (end-to-end communication schemes) στα δίκτυα αισθητήρων δεν βασίζονται στην καθολική (ή γενική) διευθυνσιοδότηση (global addressing). Η αναγνώριση των κόμβων γίνεται με βάση τις ιδιότητες του φαινομένου που παρατηρούν και τα πακέτα οφείλουν να χρησιμοποιούν αυτόν το μηχανισμό προκειμένου να φτάσουν στον προορισμό τους. Παράγοντες, όπως είναι η κατανάλωση ενέργειας και η επεκτασιμότητα (scalability), αλλά και κάποια ακόμη χαρακτηριστικά, όπως είναι η δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση, σημαίνουν ότι τα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν διαφορετικό χειρισμό σε επίπεδο μεταφοράς. Έτσι, οι απαιτήσεις αυτές κάνουν πιο έντονη την ανάγκη για νέους τύπους πρωτοκόλλων σε αυτό το επίπεδο (μεταφοράς).

3.5.1 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα

Η ανάπτυξη πρωτοκόλλων σε επίπεδο μεταφοράς αποτελεί πρόκληση διότι οι αισθητήριοι κόμβοι επηρεάζονται από τους παράγοντες που ήδη έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, κυρίως από τα περιορισμένα διαθέσιμα ποσά ενέργειας και μνήμης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι κόμβοι να μην είναι σε θέση να αποθηκεύουν μεγάλο αριθμό δεδομένων στη μνήμη τους, όπως κάνουν π.χ. οι εξυπηρετητές (servers) στο Διαδίκτυο, ενώ η χρήση μηνυμάτων επαλήθευσης θεωρείται απαγορευτική λόγω των περιορισμένων πόρων. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν νέα σχήματα κατάτμησης της απ' άκρη σ' άκρη επικοινωνίας, πιθανόν στους σταθμούς βάσης, τα οποία θα φροντίζουν ώστε η επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και των κόμβων, στο δίκτυο αισθητήρων, να γίνεται με πρωτόκολλα τύπου UDP, ενώ το παραδοσιακό πρωτόκολλο TCP/UDP να χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το Διαδίκτυο.

3.6 Το Επίπεδο Εφαρμογής

Ο χώρος των πρωτοκόλλων, σε επίπεδο εφαρμογής στα δίκτυα αισθητήρων, παραμένει ακόμη ανεξερεύνητος σε πολύ μεγάλη έκταση. Σε αυτήν την ενότητα εξετάζονται τρία πιθανά πρωτόκολλα σε επίπεδο εφαρμογής:

- Το SMP (Sensor Management Protocol – πρωτόκολλο διαχείρισης αισθητήρων),
- Το TADAP (Task Assignment and Data Advertisement protocol – πρωτόκολλο προσδιορισμού έργου και διαφήμισης δεδομένων) και

- Το SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination Protocol – πρωτόκολλο αναζήτησης και διασποράς δεδομένων).

Όλα τα παραπάνω πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής αποτελούν ανοιχτά θέματα προς έρευνα.

3.6.1 Πρωτόκολλο Διαχείρισης Αισθητήρων

Η σχεδίαση ενός πρωτοκόλλου διαχείρισης αισθητήρων σε επίπεδο εφαρμογής παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν πολλές διαφορετικές περιοχές εφαρμογής και η πρόσβαση σε αυτές μέσα από δίκτυα, όπως είναι για παράδειγμα το Διαδίκτυο, αποτελεί το βασικό στόχο σχεδίασης [8]. Ένα πρωτόκολλο διαχείρισης σε επίπεδο εφαρμογής καθιστά διαφανές το υλικιστικό (Hardware) αλλά και το λογισμικό (Software) των κατωτέρων επιπέδων σε εφαρμογές διαχείρισης των δικτύων αισθητήρων.

Οι διαχειριστές συστημάτων αλληλεπιδρούν με τα δίκτυα αισθητήρων κάνοντας χρήση του SMP.

Αντίθετα με ότι συμβαίνει σε πολλά άλλα δίκτυα, τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από κόμβους οι οποίοι δε διαθέτουν κάποιο μοναδικό στοιχείο αναγνώρισης και συνήθως λειτουργούν χωρίς καμία υποδομή. Ως εκ τούτου, το SMP θα πρέπει να επικοινωνεί με τους κόμβους κάνοντας χρήση της ονοματοδοσίας βάσει ιδιοτήτων, αλλά και της τοποθεσίας βάσει διευθυνσιοδότησης, προκειμένου να μπορεί να πραγματοποιεί τις παρακάτω λειτουργίες:

- Να εισάγει στους αισθητήριους κόμβους κανόνες που να έχουν σχέση με τη συγκέντρωση δεδομένων (data aggregation), την ονοματοδοσία βάσει ιδιοτήτων, και τη δημιουργία συστοιχιών (clustering).
- Να ανταλλάσσει δεδομένα που να έχουν σχέση με τους αλγόριθμους εύρεσης θέσης.
- Να φροντίζει για το συγχρονισμό των αισθητήριων κόμβων.
- Να μετακινεί τους αισθητήριους κόμβους.
- Να θέτει τους αισθητήριους κόμβους ENTOΣ/ΕΚΤΟΣ λειτουργίας.
- Να αναζητά πληροφορίες (querying) σχετικές με την κατάσταση των κόμβων αισθητήρων, καθώς και με τη διάρθρωση και την αναδιάρθρωση του δικτύου.
- Να παρέχει πιστοποίηση (authentication), διανομή κλειδιών, και ασφάλεια στα δίκτυα επικοινωνίας δεδομένων.

3.6.2 Πρωτόκολλο Προσδιορισμού Έργου και Διαφήμισης Δεδομένων

Μία άλλη σημαντική λειτουργία στα δίκτυα αισθητήρων είναι η διασπορά ενδιαφέροντος. Οι χρήστες στέλνουν το ενδιαφέρον τους, είτε σε κάποιον αισθητήριο κόμβο, είτε σε ένα υποσύνολο κόμβων, είτε σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτό το ενδιαφέρον πιθανόν να αφορά, είτε κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του φαινομένου, είτε κάποιο ερέθισμα.

Μία άλλη προσέγγιση είναι η διαφήμιση των διαθέσιμων δεδομένων. Σύμφωνα με αυτήν, οι αισθητήριοι κόμβοι διαφημίζουν στους χρήστες τα δεδομένα που διαθέτουν, και στη συνέχεια αυτοί (οι χρήστες) αναζητούν τα δεδομένα που τους ενδιαφέρουν.

Ένα πρωτόκολλο σε επίπεδο εφαρμογής που να παρέχει στο χρήστη λογισμικό με αποδοτικές μονάδες διασύνδεσης (interfaces) για διασπορά ενδιαφέροντος, είναι πολύ χρήσιμο για λειτουργίες κατώτερου επιπέδου, όπως είναι για παράδειγμα η δρομολόγηση δεδομένων.

3.6.3 Πρωτόκολλο Αναζήτησης και Διασποράς Δεδομένων

Το SQDDP παρέχει εφαρμογές χρηστών με μονάδες διασύνδεσης για την πραγματοποίηση ερωτήσεων (queries), αποκρίσεων σε ερωτήσεις και συλλογής εισερχομένων αποκρίσεων.

Οι ερωτήσεις δεν απευθύνονται γενικά σε συγκεκριμένους κόμβους. Αντί για αυτό, προτιμάται η βάση ιδιοτήτων ή τοποθεσίας ονοματοδοσία.

Για παράδειγμα, «οι θέσεις των κόμβων που μετρούν θερμοκρασία μεγαλύτερη από 30°C» είναι μία βάση ιδιοτήτων ερώτηση. Παρομοίως, «θερμοκρασίες που έχουν μετρηθεί στην περιοχή A» είναι ένα παράδειγμα ονοματοδοσίας βάσει τοποθεσίας.

Η γλώσσα ερώτησης αισθητήρων και ανάθεσης έργου SQTL (*Sensor Query and Tasking Language*) [10] προτείνεται ως εφαρμογή και παρέχει ένα ακόμη μεγαλύτερο σύνολο υπηρεσιών. Η SQTL υποστηρίζει τρεις τύπους συμβάντων που ορίζονται από τις εξής λέξεις κλειδιά: *receive*, *every* και *expire*.

- Το *receive* προσδιορίζει συμβάντα που δημιουργούνται από έναν αισθητήριο κόμβο όταν αυτός λάβει κάποιο μήνυμα.
- Το *every* προσδιορίζει συμβάντα που λαμβάνουν χώρα περιοδικά και οφείλονται σε διαλείμματα (timeouts) του χρονομετρητή (timer). Τέλος,
- Το *expire* προσδιορίζει συμβάντα που λαμβάνουν χώρα μετά την εκπνοή του χρόνου του χρονομετρητή. Εάν κάποιος αισθητήριος κόμβος λάβει ένα μήνυμα που απευθύνεται σε αυτόν, και το μήνυμα περιέχει ένα κείμενο (script), τότε ο αισθητήριος κόμβος θα εκτελέσει αυτό το κείμενο.

3.6.4 Ανοιχτά Θέματα προς Έρευνα

Παρόλο που έχει προταθεί η SQTL, χρειάζεται να αναπτυχθούν και άλλα ακόμη πρωτόκολλα σε επίπεδο εφαρμογής προκειμένου να διασφαλιστεί ένα σημαντικό επίπεδο υπηρεσιών. Το SMP παρέχει τη δυνατότητα στο λογισμικό να εκτελεί εργασίες διαχείρισης, όπως για παράδειγμα, κίνηση και συγχρονισμό αισθητήριων κόμβων. Οι έρευνες που διεξάγονται σήμερα θα πρέπει να επικεντρωθούν κυρίως στο TADAP και στο SQDDP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η ενέργεια είναι το πολυτιμότερο αγαθό στα ασύρματα δίκτυα λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας των φορητών συσκευών. Το πρόβλημα της κατανάλωσης ενέργειας παρουσιάζεται εντονότερο στα δίκτυα ad hoc επειδή οι κόμβοι είναι κινούμενα τερματικά με περιορισμένο βάρος και μέγεθος.

Ο έλεγχος, η διαχείριση αλλά και η διατήρηση της ισχύος διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο, όχι μόνο επειδή περιορίζουν τις παρεμβολές μεταξύ των χρηστών αλλά και επειδή με τη χρήση τους επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος.

Η διαχείριση της ισχύος είναι εξίσου σημαντική στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διότι καλείται να διασφαλίσει τα βασικά επίπεδα λειτουργικότητας του συστήματος, όπως είναι η συνδεσιμότητα (connectivity), η ρυθμαπόδοση (throughput) και η χρονική καθυστέρηση (delay).

Η σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως είναι η τοπολογία του δικτύου, το κόστος παραγωγής, οι περιορισμοί που επιβάλλονται από το υλικό μέρος των αισθητήριων κόμβων, και, ίσως, το σπουδαιότερο όλων είναι η κατανάλωση ισχύος [4,5].

Συνεπώς, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα πρωτόκολλα διαχείρισης ισχύος καθώς και η ταξινόμησή τους αποτελούν τα θέματα κλειδιά τα οποία πρόκειται να αναλυθούν λεπτομερώς στις ενότητες που ακολουθούν.

4.1 Γενική Εισαγωγή στον Έλεγχο και τη Διαχείριση της Ισχύος

Η *Πρώτη Ερώτηση* που θα πρέπει να απαντηθεί είναι: «Γιατί τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν τον έλεγχο και τη διαχείριση της ισχύος;»

Η ενέργεια, η οποία καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήριων κόμβων, προσδιορίζεται ως το άθροισμα α) της ενέργειας η οποία απαιτείται για την αποστολή δεδομένων με τη χρήση ενός ραδιοπομποδέκτη (radio transceiver), και β) της ενέργειας η οποία απαιτείται για την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των δεδομένων.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων οφείλουν να λειτουργούν καταναλώνοντας την ελάχιστη δυνατή απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας προκειμένου να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής των κόμβων. Όμως, για να είναι αυτό εφικτό, θα πρέπει να εκπληρώνουν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Τεχνολογία η οποία θα απαιτεί την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας για την εκτέλεση υπολογισμών.
- Χρησιμοποίηση εξαρτημάτων επικοινωνίας τα οποία θα απαιτούν για τη λειτουργία τους την ελάχιστη δυνατή ισχύ.
- Λογισμική υποδομή η οποία θα απαιτεί επίσης την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.
- Σηματοδότηση χαμηλής ισχύος.

Ο διαμοιρασμός ή διαμερισμός (partitioning) των αισθητήριων κόμβων θα πρέπει αναγκαστικά να ληφθεί σοβαρά υπόψη προκειμένου να διασφαλισθεί, αφενός μεν, η επεξεργασία δεδομένων με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, αφετέρου δε, η μεταξύ των κόμβων επικοινωνία [95,96].

Οι ασύρματοι αισθητήριοι κόμβοι είναι κινητές συσκευές (moving devices) με αρκετούς περιορισμούς που σχετίζονται τόσο με την κατανάλωση ενέργειας, όσο και με την εκτέλεση πράξεων. Αυτοί οι περιορισμοί οφείλονται κυρίως στο χαμηλό τους κόστος, στο περιορισμένο τους μέγεθος και βάρος, καθώς και στην ad hoc μέθοδο ανάπτυξής τους στο πεδίο εφαρμογής [4,5]. Μάλιστα, σε αρκετά σενάρια εφαρμογής, η αναπλήρωση των ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων (δηλαδή, πιο απλά, το ξαναγέμισμα της μπαταρίας τους) πιθανόν να είναι αδύνατη. Ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής των κόμβων συνδέεται άμεσα με τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων (multihop), ο κάθε κόμβος διαδραματίζει τον εξής διπλό ρόλο:

- Του *Δημιουργού Δεδομένων* (data originator), (ή αλλιώς, της γεννήτριας ή πηγής), καθώς και
- Του *Δρομολογητή Δεδομένων* (data router).

Η απώλεια ακόμη και ελάχιστων αισθητήριων κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές στο δίκτυο, και μάλιστα είναι πολύ πιθανόν να απαιτηθεί μία εκ νέου δρομολόγηση ή επαναδρομολόγηση (rerouting) των πακέτων και αναδιοργάνωση ολόκληρου του δικτύου. Συνεπώς, η διατήρηση της ενέργειας, αλλά και οι μηχανισμοί διατήρησης της ισχύος αποκτούν πρόσθετη σπουδαιότητα.

Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι, τα πρωτόκολλα ελέγχου ισχύος αποτελούν ένα πολύ σημαντικό θέμα (issue), όχι μόνο διότι περιορίζουν τις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων, αλλά γιατί κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή χρήση των πόρων του συστήματος.

Η *Δεύτερη Ερώτηση* στην οποία πρέπει να δοθεί μία απάντηση είναι: «*Ποιο είναι το κόστος της διαχείρισης ισχύος;*». Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη διαχείριση ισχύος, έχει τις δικές του παρενέργειες (side effects) αλλά και τις δικές του αδυναμίες (drawbacks) διότι η κατασκευή και η συντήρηση ενός πρωτοκόλλου ισχύος απαιτεί συνήθως πρόσθετο κόστος, συγκρινόμενο με ένα ενσύρματο δίκτυο αισθητήρων. Το κόστος της διαχείρισης ισχύος αποτελεί το μείζον θέμα για την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας ενός σχήματος ελέγχου ισχύος.

Η χρησιμότητα αλλά και τα μειονεκτήματα ενός πρωτοκόλλου ισχύος μπορούν να προσδιοριστούν ξεκάθαρα με την ανάλυση του κόστους του από διαφορετική σκοπιά, ποιοτικά ή ποσοτικά.

Το λειτουργικό μέρος του αισθητήριου κόμβου εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής που υποστηρίζει, και προσδιορίζεται από:

- Τη συχνότητα συλλογής δεδομένων,
- Το μέγεθος του πακέτου των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί,
- Τη διάρκεια των μετρήσεων,
- Το είδος του αισθητήριου κόμβου που αποτελεί μέρος του δικτύου και τα χαρακτηριστικά του.

4.2 Ταξινόμηση των Πρωτοκόλλων Ελέγχου Ισχύος

Η σχεδίαση που αφορά την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνει το υλικό μέρος (hardware) και την ασύρματη δικτύωση (wireless networking).

Για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων θα πρέπει η κατανάλωση ισχύος του υλικού μέρους αλλά και της ασύρματης δικτύωσης να ελαττωθούν στο ελάχιστο δυνατό προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής των αισθητήριων κόμβων του δικτύου.

➤ *Υλικό Μέρος*

Ο όρος «υλικό μέρος» αναφέρεται στη σχεδίαση όλων των ηλεκτρονικών καρτών (hardware platforms) οι οποίες συνθέτουν τους αισθητήριους κόμβους.

Οι πλέον σημαντικές κατηγορίες στη σχεδίαση του υλικού μέρους είναι:

- Η ψηφιακή σχεδίαση κυκλωμάτων (digital circuit design),
- Τα μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS – Micro-ElectroMechanical Systems),
- Η ολοκλήρωση ή ενοποίηση συστημάτων (system integration) και
- Η σχεδίαση ραδιοσυχνοτήτων (RF - Radio Frequency).

➤ *Ασύρματη Δικτύωση*

Η ασύρματη δικτύωση είναι η δεύτερη κατηγορία που αναφέρθηκε προηγουμένως και ασχολείται με ενεργά αποδοτικούς αλγόριθμους και πρωτόκολλα [95,96].

Έτσι, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι υπάρχοντες *Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος* (Power Conservation Mechanisms – PCM), στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες [97]:

- στους *Ενεργούς* (Active) μηχανισμούς και
- στους *Παθητικούς* (Passive) μηχανισμούς (Σχήμα 4-1).

Ο όρος *Active* αναφέρεται σε μηχανισμούς οι οποίοι επιτυγχάνουν εξοικονόμηση ενέργειας στον κόμβο με έξυπνη χρήση ενεργειακά αποδοτικών πρωτοκόλλων δικτύου (χωρίς να θέτουν εκτός λειτουργίας το ραδιοπομποδέκτη του κόμβου).

Αντίθετα, ο όρος *Passive* αναφέρεται σε μηχανισμούς οι οποίοι επιτυγχάνουν εξοικονόμηση ενέργειας στον κόμβο με το να θέτουν εκτός λειτουργίας το ραδιοπομποδέκτη που διαθέτει [90]. Στη συνέχεια εξετάζονται αναλυτικά και οι δύο μηχανισμοί.

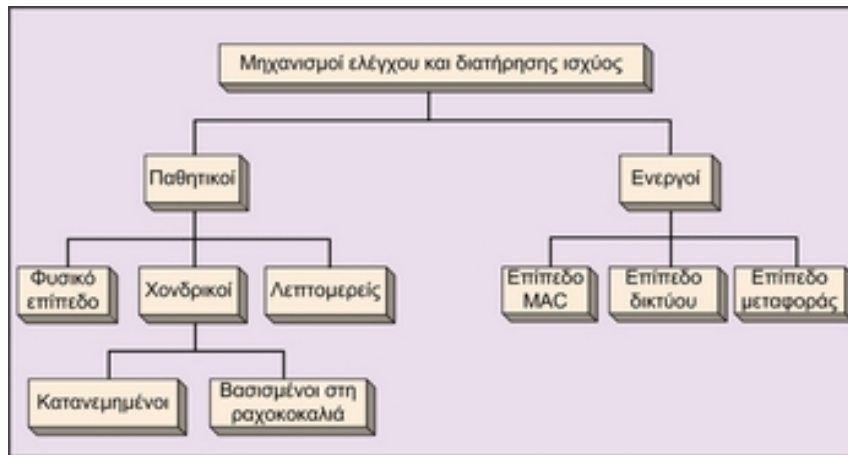
4.2.1 Παθητικοί Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος

Οι παθητικοί μηχανισμοί ελέγχου και διαχείρισης της ισχύος μειώνουν την ενέργεια που καταναλώνεται από τους αισθητήριους κόμβους με το να θέτουν εκτός λειτουργίας τον πομποδέκτη τους, εφόσον δεν υπάρχει καμία επικοινωνιακή δραστηριότητα [98].

Η *Περιοδική Διαχείριση* (ή χειμέρια νάρκη ή λήθαργος – *Periodic hibernation*) είναι ένας ακόμη συνώνυμος όρος ο οποίος χρησιμοποιείται πάρα πολύ στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με αυτό το πρωτόκολλο, ο ασύρματος πομποδέκτης τίθεται εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια εκείνων των χρονικών περιόδων όπου ο αισθητήριος κόμβος δεν είναι σε θέση ούτε να στείλει αλλά ούτε και να λάβει κάποιο σήμα [99].

➤ *Πρωτόκολλο IEEE 802.11*

Η ιδέα της απενεργοποίησης του πομποδέκτη πρωτοεμφανίστηκε στο βασικό πρωτόκολλο IEEE 802.11 [38], [100]. Σύμφωνα με αυτό, μόλις ο αισθητήριος κόμβος ακούσει ένα NAV (*Network Allocation Vector – διάνυσμα κατανομής δικτύου*) μεταπηδά (switch to) στην κατάσταση ύπνου (sleep mode) αφού προηγουμένως θέσει εκτός λειτουργίας τον πομποδέκτη του κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Εδώ, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο *χρονομετρητής* NAV (NAV timer) μετρά πάντοτε αφαιρετικά ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το κανάλι. Το περιεχόμενο του αφαιρετικού χρονομετρητή ελαττώνεται μόνο όταν το μέσον παραμένει αδρανές (idle).



Σχήμα 4-1: Μπλοκ διάγραμμα μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος

Στο IEEE 802.11 [38], κάθε κινητός αισθητήριος κόμβος (mobile sensor node) του δικτύου πρέπει να αφυπνισθεί (wake-up) κατά τη διάρκεια της περιόδου ATIM (*Announcement Traffic Indication Message – Μήνυμα με ένδειξη αναγγελίας κίνησης*) κατά τη διάρκεια της οποίας οι πομποδέκτες ενημερώνουν τον κόμβο προορισμού τους ότι δεν πρέπει να μεταπηδήσει στην κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας (power-save mode). Εάν ο τελευταίος δε λάβει καμία ειδοποίηση, τότε μπορεί να μεταπηδήσει στην κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας και να αφυπνισθεί ακριβώς στην αμέσως επόμενη περίοδο ATIM [100-103].

Ένας αισθητήριος κόμβος, ο οποίος έχει το ρόλο του αποστολέα, μπορεί να αναβάλλει (defer) επίσης την εκπομπή του (ή τουλάχιστον να μειώσει την ταχύτητα εκπομπής (transmission rate) του όταν διαπιστώσει ότι είναι κακή η ποιότητα του καναλιού. Είναι πολύ πιθανόν να προσπαθήσει να αντισταθμίσει οποιαδήποτε απώλεια όταν αρχίζει να καλυτερεύει η ποιότητα του καναλιού.

Σε αυτήν τη Διατριβή πραγματοποιήθηκε μία μικρή βελτίωση της ταξινόμησης των μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος, η οποία είχε προταθεί από τους C. Srisathapornphat *et al.* [98], με την προσθήκη του φυσικού επιπέδου στην κατηγορία των παθητικών μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος [97].

Έτσι, σύμφωνα με αυτή τη νέα δομή, οι παθητικοί μηχανισμοί ελέγχου και διατήρησης της ισχύος ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τα δυνατά επίπεδα ελέγχου για απενεργοποίηση του πομποδέκτη (turn-off the radio):

- Διατήρηση της Ισχύος στο Φυσικό Επίπεδο (*Physical Layer Power Conservation*)
- Διατήρηση της Ισχύος με Μηχανισμούς Fine-Grain (*Fine-Grain Power Conservation*)
- Διατήρηση Ισχύος με Μηχανισμούς Coarse-Grain (*Coarse-Grain Power Conservation*)

4.2.1.1 Διατήρηση της Ισχύος στο Φυσικό Επίπεδο

Η εφαρμογή τεχνικών διακοπής λειτουργίας (turn-off techniques) στο φυσικό επίπεδο μπορεί να δημιουργήσει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας η οποία επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (*Central Processing Unit – CPU*) κατά τη διάρκεια αδρανών καταστάσεων του συστήματος.

Τα σχήματα DVS (*Dynamic Voltage Scaling – Δυναμική κλιμάκωση της τάσης*) [104-106], και DPM (*Dynamic Power Management – Δυναμική διαχείριση της ισχύος*) [107] αποτελούν τυπικά παραδείγματα παθητικών μηχανισμών αυτής της κατηγορίας.

4.2.1.2 Διατήρησης της Ισχύος με Μηχανισμούς Fine-Grain

Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας, το επίπεδο MAC (*Medium Access Control – Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο*) θα αποφασίσει αν κάποιο πλαίσιο εκπομπής απευθύνεται σε αυτό ή όχι. Εφόσον διαπιστώσει ότι δεν αποτελεί τον προορισμό του μηνύματος, τότε προβαίνει στη διακοπή λειτουργίας του πομποδέκτη για τόσο χρόνο όσο διαρκεί ένα και μόνο πλαίσιο εκπομπής. Αυτό το σχήμα ονομάζεται «*Fine-Grain Power Conservation MAC layer initiated scheme – Σχήμα εκκίνησης του επιπέδου MAC διατήρησης της ισχύος με μηχανισμό Fine-Grain*» [98].

Με το να επιτρέπεται στο επίπεδο MAC να αποφασίζει για το εάν και πότε θα θέσει τον πομποδέκτη εκτός λειτουργίας, ο αισθητήριο κόμβος μπορεί να εξοικονομήσει ισχύ από τα εκπεμπόμενα πλαίσια που δεν απευθύνονται σε αυτόν. Επιπλέον, δε θα υπάρχει καμία καθυστέρηση σε όλη την εισερχόμενη κίνηση στον κόμβο, επειδή ο κόμβος δε θα έχει τεθεί ποτέ σε κατάσταση εκτός λειτουργίας για χρόνο μεγαλύτερο από αυτόν που διαρκεί ένα πλαίσιο εκπομπής [98].

Το PAMAS [108] αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτού του μηχανισμού.

4.2.1.3 Διατήρησης της Ισχύος με Μηχανισμούς Coarse-Grain

Αντίθετα με την προηγούμενη μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας, η παρούσα μέθοδος έχει ως βάση το μηχανισμό *Coarse-Grain* ο οποίος χρησιμοποιεί πληροφόρηση που προέρχεται από το ανώτερο επίπεδο εφαρμογής προκειμένου να αποφασίσει αν και πότε θα θέσει εκτός λειτουργίας τον πομποδέκτη. Μία εφαρμογή, η οποία λειτουργεί συνήθως σε ανώτερο επίπεδο από αυτό του MAC, ασκεί έλεγχο στο τελευταίο προκειμένου να θέσει εκτός λειτουργίας τη βαθμίδα ή υπομονάδα ασύρματης επικοινωνίας (radio interface module) του κόμβου. Ως εκ τούτου, η βαθμίδα ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να τίθεται εκτός λειτουργίας για πολύ περισσότερο χρόνο από αυτόν που απαιτείται για την εκπομπή ενός και μόνο πλαισίου MAC [98].

Για την υλοποίηση των μηχανισμών *Coarse-Grain* υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

- *Κατανεμημένη Προσέγγιση (Distributed approach)*
- *Προσέγγιση Κορμού (Backbone-based approach)*

4.2.1.3.1 Κατανεμημένη Προσέγγιση

Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, οι αισθητήριοι κόμβοι προγραμματίζουν χρονικά (schedule) τα δικά τους διαστήματα ύπνου (sleeping intervals) βασιζόμενοι είτε στην εσωτερική πληροφόρηση είτε/και στην πληροφόρηση που έχουν από τους γειτονικούς τους κόμβους. Ο συντονισμός των χρονοδιαγραμμάτων ύπνου (sleeping schedules) μεταξύ των αισθητήριων κόμβων πραγματοποιείται εν δυνάμει (implicitly) μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων beacon ή hello. Όλοι οι αισθητήριοι κόμβοι του δικτύου είναι ισοδύναμοι όσον αφορά τη λειτουργικότητά τους (functionality) [98].

Μερικά από τα πλέον γνωστά υπάρχοντα σχήματα που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι τα [114-121] τα οποία αναλύονται σε επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου.

- *Σύγκριση Μεταξύ των Μηχανισμών Fine-Grain και Coarse-Grain*

Η σύγκριση μεταξύ των προσεγγίσεων *Fine-Grain* και *Coarse-Grain*, με βάση το μέγεθος της ισχύος που μπορεί να εξοικονομήσει η κάθε μία εξ αυτών, καταδεικνύει ότι η δεύτερη εκ των δύο (*Coarse-Grain*) εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια από την πρώτη, αλλά μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση στην εισερχόμενη κίνηση (η οποία κατευθύνεται προς τους

αισθητήριους κόμβους που βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου), όπως φαίνεται συνοπτικά στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Διαφορές μεταξύ Fine-Grain και Coarse-Grain μηχανισμών ελέγχου Ισχύος

Παθητικοί Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος	Η απόφαση λαμβάνεται από το επίπεδο	Πομποδέκτης κλειστός για χρόνο εκπομπής	Ενέργεια εξοικονομείται από κάθε πλαίσιο εκπομπής	Ποσό ενέργειας που εξοικονομείται	Χρονική καθυστέρηση
Fine-Grain	MAC	ενός απλού πλαισίου MAC	Ναι	μικρό	μεγάλη
Coarse-Grain	ανώτερο του MAC	μεγαλύτερο από ενός απλού πλαισίου MAC	Όχι	μεγάλο	μικρή

Προσέγγιση Κορμού

Ένα πρωτόκολλο λειτουργεί με βάση την τεχνική του κορμού, εφόσον δημιουργηθεί η κατάλληλη υποδομή κορμού (backbone infrastructure) όπου οι μηχανισμοί για την εξοικονόμηση ενέργειας θα αναπτύσσονται στους αισθητήριους κόμβους της.

Τα πρωτόκολλα των οποίων η λειτουργία βασίζεται στον κορμό είναι σε θέση να εκτελούν συντονιστικό έργο για τους γύρω αισθητήριους κόμβους, όπως π.χ., συγχρονισμό των χρονοδιαγραμμάτων τους ύπνου προκειμένου να διασφαλιστεί αρκετό εύρος ζώνης και να λειτουργούν ως πληρεξούσιοι (proxy) για τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου [98]. Στον Πίνακα 4-2 απεικονίζονται οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο βασικών προσεγγίσεων, κατανεμημένης (distributed) και βασισμένης στον κορμό (backbone-based).

Πίνακας 4-2: Βασικές διαφορές μεταξύ των προσεγγίσεων Distributed και Backbone-based

Προσέγγιση Coarse-Grain	Απαιτείται υποδομή	Ανεξάρτητο χρονοδιάγραμμα των διαστημάτων ύπνου των κόμβων
Distributed	Όχι	Ναι
Backbone-based	Ναι	Όχι

Το SPAN [116] είναι ένα πολύ συνηθισμένο coarse-grain σχήμα για εξοικονόμηση ενέργειας το οποίο χρησιμοποιεί τον κορμό για τη διευκόλυνση της δρομολόγησης. Το SPAN τροποποιεί επίσης το IEEE 802.11 ad-hoc standard [38] στην κατάσταση λειτουργίας για εξοικονόμηση ενέργειας και το χρησιμοποιεί προκειμένου να επιμηκύνει το διάστημα ύπνου περισσότερο από ένα πλαίσιο εκπομπής MAC και για να ελαττώσει το ρίσκο χαμένων πακέτων και χρονικής καθυστέρησης.

4.2.2 Ενεργοί Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος

Οι ενεργοί μηχανισμοί ελέγχου και διατήρησης της ισχύος (active power conservation mechanisms) μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας των αισθητήριων κόμβων βασιζόμενοι στην ιδέα της βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους (αντί να θέτουν εκτός λειτουργίας την κάρτα

επικοινωνίας τους) [98]. Λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα πρωτοκόλλων: Φυσικό, MAC, Δικτύου και Μεταφοράς.

4.2.2.1 Επίπεδο MAC

Μία ενδεδειγμένη μέθοδος ρύθμισης και προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύος σε ένα κατάλληλο επίπεδο για την παραγωγή ισχυρού σήματος τέτοιου ώστε να είναι σε θέση να φθάσει στον επόμενο προορισμό, είναι ο έλεγχος του ρυθμού κατανάλωσης της ισχύος με άμεση συνέπεια τη μείωση της πιθανότητας των συγκρούσεων (collision probability) [98]. Ένα αντιπροσωπευτικό επιλεγμένο σχήμα αυτής της κατηγορίας είναι το [117].

Συνεπώς, η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας σύγκρουσης, συμβάλλει τα μέγιστα στη μείωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται στην επανεκπομπή (retransmission).

4.2.2.2 Επίπεδο Δικτύου

Το επίπεδο δικτύου περιλαμβάνει δύο βασικά σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας:

- Δρομολόγηση με Ενημέρωση Ισχύος (Power-Aware Routing - PAR) και
- Δρομολόγηση για Μέγιστη Διάρκεια Ζωής (Maximum Lifetime Routing - MLR)

4.2.2.2.1 Δρομολόγηση με Ενημέρωση Ισχύος (Power-Aware Routing)

Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να βρίσκουν εκείνη τη διαδρομή που θα καταναλώνουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Όμως, αυτή η προσέγγιση είναι πολύ πιθανόν να συντομεύσει τη διάρκεια ζωής ορισμένων αισθητήριων κόμβων στο «καυτό σημείο» (hot spot), εάν συμβαίνει αυτοί οι κόμβοι να βρίσκονται στο μονοπάτι ελάχιστης ενέργειας με αυξημένη κίνηση [98].

4.2.2.2.2 Δρομολόγηση για Μέγιστη Διάρκεια Ζωής (Maximum Lifetime Routing)

Σε αντίθεση με το σχήμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, η δρομολόγηση για μέγιστη διάρκεια ζωής αντισταθμίζει τις απώλειες ενέργειας μεταξύ των αισθητήριων κόμβων προκειμένου να επιμηκύνει τη *Λειτουργική Διάρκεια Ζωής* (operational lifetime) του δικτύου. Επιπρόσθετα, αρκετά πρωτόκολλα δρομολόγησης ad hoc έχουν ως βάση το μηχανισμό εκείνο ο οποίος δημιουργεί μία *Ιδεατή ή Εικονική Υποδομή* (virtual infrastructure) πάνω από ένα ομοιόμορφο (ή επίπεδο) δίκτυο (flat network) και ως σκοπό να ελαττώσει τον αριθμό των κόμβων που εμπλέκονται στη δρομολόγηση και που έχει ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη δυνατή χρήση της ισχύος [98]. Τυπικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι αυτό που προτείνεται στο [118].

Πίνακας 4-3: Χρησιμοποιούμενες τεχνικές και μειονεκτήματα των PAR και MLR

Σχήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας στο Επίπεδο Δικτύου	Χρησιμοποιούμενη Τεχνική για Κατανάλωση μικρότερης Ισχύος	Μειονεκτήματα
Power-Aware Routing (PAR)	Τα Πρωτόκολλα Δρομολόγησης βρίσκουν την κατάλληλη Διαδρομή	Μείωση της Διάρκειας Ζωής των Κόμβων εάν βρίσκονται στο Μονοπάτι Ελάχιστης Ισχύος με Αυξημένη Κίνηση
Maximum Lifetime Routing (MLR)	Αντιστάθμιση των Απωλειών Ενέργειας μεταξύ των Κόμβων	Χαμηλή Χρήση Ισχύος εάν δεν μειωθεί στο Ελάχιστο ο Αριθμός των Κόμβων.

Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές καθώς και τα μειονεκτήματα των δύο βασικών σχημάτων εξοικονόμησης ενέργειας που ήδη αναφέρθηκαν, απεικονίζονται στον Πίνακα 4-3.

4.2.2.3 Επίπεδο Μεταφοράς

Το πρωτόκολλο ελέγχου μεταφοράς (TCP – Transmission Control Protocol) δε σχεδιάστηκε αρχικά ως ένα πρωτόκολλο εξοικονόμησης ενέργειας [110]. Το ATCP και το TCP-Probing [120] μπορούν να αλλάξουν τη συμπεριφορά αναμεταδόσεων του TCP με τη μείωση των μη αναγκαίων αναμεταδόσεων στο ελάχιστο δυνατό προκειμένου να επιτύχουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερη ρυθμαπόδοση (throughput) [98].

Πίνακας 4-4: Κύρια χαρακτηριστικά μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος

Μηχανισμοί Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος	Χρησιμοποιούμενη Τεχνική	Επίπεδο Εφαρμογής
Παθητικοί	Πομποδέκτης «εκτός λειτουργίας»	Όλα
Ενεργοί	Έξυπνη Χρήση των Ενεργειακά Αποδοτικών Πρωτοκόλλων Δικτύου	Όλα

Ένα από τα ήδη υπάρχοντα σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας αυτής της κατηγορίας, είναι αυτό που προτείνεται στο [121] από τους S. Agrawal, και S. Singh. Αυτό το σχήμα είναι στην πραγματικότητα μία πειραματική μελέτη η οποία χρησιμοποιεί επαρκώς την ενέργεια του ασύρματου σταθμού προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση του TCP.

Στον Πίνακα 4-4 συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο βασικών μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος.

4.3 Σχήματα Παθητικών Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος

Σε αυτήν την ενότητα επιχειρείται μία πλήρης μελέτη και ανάλυση των σημαντικότερων *Παθητικών Σχημάτων και Πρωτοκόλλων Ελέγχου Ισχύος* τα οποία χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Όλη η μελέτη βασίζεται στην προαναφερθείσα ταξινόμηση των *Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης Ισχύος (PCM – Power Conservation Mechanisms)* και επικεντρώνεται κυρίως στην *Κατάσταση Λειτουργίας Υπνου/Αφύπνισης (sleep/awake mode)*.

4.3.1 Σχήματα Φυσικού Επιπέδου

Η εφαρμογή τεχνικών “εκτός λειτουργίας” (turn-off techniques) μπορεί να δημιουργήσει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας όταν το σύστημα βρεθεί σε *Παθητική Κατάσταση ή μη ενεργό κατάσταση ή κατάσταση αναμονής ή κατάσταση αδράνειας (idle state)*. Όμως, εξοικονόμηση ενέργειας είναι επίσης δυνατή και στην *Ενεργό Κατάσταση (active state)*, μέσα από τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αισθητήριων κόμβων.

Εάν θεωρηθεί ότι ο επεξεργαστής δεν είναι πάντοτε απαραίτητο να λειτουργεί με τη μέγιστή του απόδοση, τότε μπορούν να εξοικονομηθούν σημαντικά ποσά ενέργειας, χωρίς αυτό να επηρεάζει στο ελάχιστο τη μέγιστή του απόδοση. Ο επεξεργαστής θα πρέπει να συντονίζεται πάντοτε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ρυθμαπόδοση αποφεύγοντας τους αδρανείς κύκλους (idle cycles). Αυτό, πολύ απλά συνεπάγεται τη δυναμική προσαρμογή της τάσης και της συχνότητας λειτουργίας του επεξεργαστή ανάλογα με τις στιγμιαίες απαιτήσεις της επεξεργασίας.

Μία από τις πλέον υποσχόμενες μεθόδους για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο φυσικό επίπεδο είναι η χρήση του *Επεξεργαστή Μεταβλητής Ταχύτητας* (VSP – Variable Speed Processor) [95].

4.3.1.1 Dynamic Voltage Scheduling (DVS)

Το «*Δυναμικό Χρονοδιάγραμμα Τάσης*» (Dynamic Voltage Scheduling – DVS) είναι το πρώτο πρωτόκολλο ελέγχου ισχύος που εξετάζεται και αναφέρεται κυρίως στον επεξεργαστή μεταβλητής ταχύτητας (VSP) του φυσικού επιπέδου. Είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός ελαχιστοποίησης της ενέργειας της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) επιτυγχάνοντας έτσι τις απαιτήσεις που περιγράφονται στα [103-106], [122]. Αυτός ο μηχανισμός ορίζει μία συγκεκριμένη τάση για κάθε εργασία του επεξεργαστή για να είναι δυνατή η εκμετάλλευση του χρόνου μειωμένης δραστηριότητας (slack time) [95].

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η μείωση της συχνότητας λειτουργίας (operating frequency) κατά τη διάρκεια περιόδων μειωμένης δραστηριότητας έχει ως αποτέλεσμα τη γραμμική μείωση της ισχύος κατανάλωσης χωρίς να επηρεάζεται η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται ανά εργασία επεξεργασίας (processing task). Η μείωση της τάσης λειτουργίας (operational voltage) συνεπάγεται μεγαλύτερες κρίσιμες χρονικές καθυστερήσεις μονοπατιών (greater critical path delays), με αποτέλεσμα τη συνεχή προσπάθεια συμβιβασμού με τη μέγιστη απόδοση (peak performance) [95].

Έτσι, η κύρια ιδέα του DVS είναι να επιτρέπει σε συσκευές, όπως είναι π.χ. οι επεξεργαστές μεταβλητής ταχύτητας (VSPs), να μεταβάλλουν δυναμικά (ενώ λειτουργούν, και κάτω από λογισμικό έλεγχο) την ταχύτητά τους ανάλογα με τη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας (συχνότητα ρολογιού - clock frequency) (τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του επεξεργαστή), προκειμένου να προσαρμόζονται προς το φορτίο (workload), δηλαδή, προκειμένου να αντιμετωπίζουν δυναμικά τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της λειτουργίας (performance) χωρίς να την υποβαθμίζουν [95].

Η μείωση της κατανάλωσης ισχύος ενός επεξεργαστή VSP μπορεί να επιτευχθεί με την εκμετάλλευση των αδρανών διαστημάτων (idle intervals) του. Αυτό του επιτρέπει να παρέχει την ελάχιστη δυνατή απαιτούμενη συχνότητα ρολογιού με τη μέγιστη δυνατή απόδοση ενέργειας (energy efficiency). Για να είναι όμως αυτό εφικτό, το DVS απαιτεί μία ειδική κατηγορία αλγορίθμων που ονομάζονται *Χρονοπρογραμματιστές Τάσης* (Voltage Schedulers - VSs), και οι οποίοι προσδιορίζουν την ταχύτητα του επεξεργαστή κατά το χρόνο λειτουργίας του (run-time).

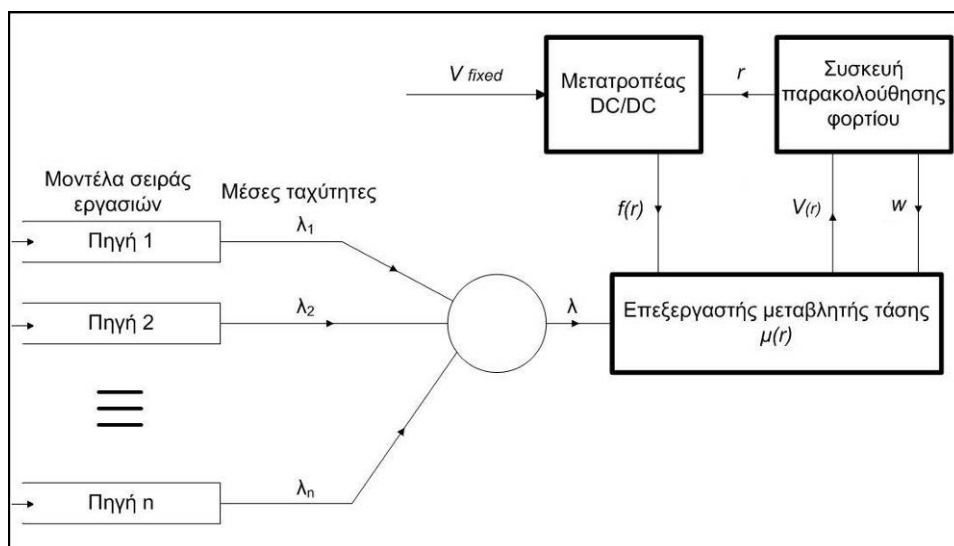
Η υλοποίηση του DVS, με ένα γενικού σκοπού μικροεπεξεργαστή, απαιτεί μία σημαντική λογισμική υποστήριξη (software support) και νέες μετρικές (metrics) για την πλήρη πραγματοποίηση και κατανόηση των πλεονεκτημάτων αυτής της δυνατότητας.

Ειδικότερα: Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο υπολογιστικό φορτίο (time-varying computational load) είναι αυτό που χαρακτηρίζει τα περισσότερα συστήματα μικροεπεξεργαστών. Όμως, το δυσκολότερο μέρος του προβλήματος εντοπίζεται στο γεγονός ότι τα μελλοντικά φορτία (workloads) δεν είναι συνήθως αιτιοκρατικά ή νομοτελειακά (deterministic). Ως εκ τούτου, η απόδοση του μικροεπεξεργαστή εξαρτάται από την πρόβλεψη των μελλοντικών φορτίων. Η ταχύτητα (rate) με την οποία πραγματοποιείται η δυναμική δημιουργία του χρονοδιαγράμματος τάσης (DVS) πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη διότι ασκεί σημαντική επίδραση στη λειτουργικότητα και την ενέργεια. Ένας χαμηλός ρυθμός ενημέρωσης (update rate) συνεπάγεται μεγαλύτερο μέσον όρο φορτίου, συμβάλλοντας έτσι στη χρήση λιγότερης ενέργειας.

Η λειτουργία με ενημέρωση (ή εκσυγχρονισμό - update performance) όπως επίσης το ενεργειακό κόστος γίνονται τμηματικά (amortized) για ένα μεγαλύτερο χρονικό πλαίσιο (time frame). Ένας

χαμηλός ρυθμός ενημέρωσης συνεπάγεται πολύ καλύτερες επιδόσεις επειδή το σύστημα δεν θα ανταποκριθεί απότομα σε μία ξαφνική αύξηση του φορτίου. Στο Σχήμα 4-2 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός επεξεργαστή DVS.

Τα Μοντέλα Σειράς Εργασιών (task queue models) είναι τα διάφορα γεγονότα (events) ενός επεξεργαστή, όπως είναι για παράδειγμα, οι εισοδοί/έξοδοι (inputs/outputs), οι οδηγοί δισκετών (disk drives), οι ενδιάμεσοι σύνδεσμοι (links) του δικτύου, κτλ.



Σχήμα 4-2: Μπλοκ διάγραμμα ενός επεξεργαστή DVS

Κάθε μία από τις n πηγές (sources) παράγει γεγονότα (events) με μέσο ρυθμό (average rate) λ_k (όπου $k = 1,2,3,\dots,n$). Ένας χρονοπρογραμματιστής (scheduler) λειτουργικού συστήματος (Operating System - OS) δε διαχειρίζεται μόνο εργασίες (tasks) αλλά αποφασίζει επίσης και για το γεγονός εκείνο που θα πρέπει να εκτελεστεί στον επεξεργαστή με τη μέση ταχύτητα λ . Αυτή η ταχύτητα ισούται με το άθροισμα των n μέσων ταχυτήτων αφίξεων (average arrival rates). Ο επεξεργαστής προσφέρει μία χρονικά μεταβαλλόμενη (time-varying) ταχύτητα επεξεργασίας $\mu(r)$.

Ο πυρήνας (ή καρδιά - kernel) του λειτουργικού συστήματος καταμετρά τους αδρανείς κύκλους (idle cycles) και υπολογίζει το κανονικοποιημένο φορτίο (normalized workload) κατά τη διάρκεια της υπό εποπτεία περιόδου.

Η συσκευή ελέγχου του φορτίου (workload monitor) ρυθμίζει την ταχύτητα επεξεργασίας r με βάση το φορτίο w και με βάση τα προηγούμενα φορτία κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατήρησης. Αυτή η ταχύτητα r αποφασίζει για την τάση λειτουργίας (operating voltage) $V(r)$ καθώς και για τη συχνότητα λειτουργίας (operating frequency) $f(r)$. Ως εκ τούτου, συμπεριφέρεται ως σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου [84], [94-96].

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την πειραματική μελέτη δείχνουν ότι η προτεινόμενη τεχνική επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία ανέρχεται στο 80%. Για την απόκτηση αυτών των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τεχνικές:

- Τεχνική VS (Voltage Scheduling) με ανοιχτή (σε λειτουργία) την τροφοδοσία.
- Τεχνική VS με χρονοθυρίδες μεταξύ των εργασιών (intra-task timeslot).
- Τεχνική VS με το προτεινόμενο buffering.
- Προτεινόμενη τεχνική με πολλαπλές δευτερεύουσες εργασίες.

4.3.1.2 Dynamic Power Management (DPM) in Wireless Sensor Networks

Η «Δυναμική Διαχείριση της Ισχύος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων» (Dynamic Power Management – DPM – in wireless sensor networks), η οποία προτάθηκε από τους Amit Sinha και Anantha Chandrakasan στο [106], είναι μία ακόμη τεχνική διαχείρισης ισχύος η οποία κατευθύνεται από το λειτουργικό σύστημα (operating-system-directed) του φυσικού επιπέδου η οποία συμβάλλει σε μία πρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας και κατά συνέπεια στη δυναμική αύξηση της διάρκειας ζωής του αισθητήριου κόμβου.

Το DPM είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός μείωσης της ισχύος του συστήματος χωρίς να υποβαθμίζει πολύ την απόδοσή του. Αυτό το μοντέλο, του οποίου η λειτουργία έχει βασιστεί στο προαναφερθέν σύστημα DVS [103-105], [123], ασχολείται με τη μεταγωγή (switching) της κατάστασης του κόμβου με αποδοτικό τρόπο από άποψη ισχύος (power efficient manner).

Η βασική ιδέα αυτού του πρωτοκόλλου είναι να τίθενται εκτός λειτουργίας (turn off) οι βασικές μονάδες του κόμβου (δηλαδή, ο αισθητήρας μαζί με τον αναλογικό/ψηφιακό του μετατροπέα, ο επεξεργαστής, η μνήμη και ο πομποδέκτης) όταν δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία τους (δηλαδή όταν δεν υπάρχουν κάποια γεγονότα) και να ενεργοποιούνται πάλι (να αφυπνίζονται - wake up) όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο. Μία τέτοιου είδους κατανάλωση ισχύος, η οποία καθοδηγείται από τα γεγονότα, είναι πολύ καλή στο να επιτύχει τη μέγιστη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Αυτή η μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας, σε πρώτη ματιά, παρέχει σημαντικά ενεργειακά οφέλη, όμως, δεν θα πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι οι αισθητήριου κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους με το να στέλνουν μικρά πακέτα δεδομένων. Όσο πιο μικρά είναι τα πακέτα δεδομένων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την εκκίνηση (start-up energy). Αυτό συμβαίνει γιατί η μεταγωγή του αισθητήριου κόμβου από τη μία κατάσταση στην άλλη απαιτεί κάποιο πεπερασμένο χρόνο και κάποιους πεπερασμένους πόρους (resources). Η μετάβαση στην κατάσταση ύπνου (sleep-state transitioning) επιβαρύνεται με την αποθήκευση της κατάστασης του επεξεργαστή και με την ισχύ που καταναλώνεται για να τεθεί το σύστημα εκτός λειτουργίας (turning-off power). Η αφύπνιση (awakening) απαιτεί επίσης ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Ως εκ τούτου, εάν κάποιος θέτει τον πομποδέκτη συνεχώς εκτός λειτουργίας, κατά τη διάρκεια κάθε μιας αδρανούς χρονοσχισμής, και πάνω από κάποιο χρονικό διάστημα, θα διαπιστώσει στο τέλος ότι έχει καταναλώσει πολύ περισσότερη ενέργεια από αυτήν που θα κατανάλωνε εάν είχε αφήσει τον πομποδέκτη σε λειτουργία (ON). Άρα, η λειτουργία της μονάδας, η οποία έχει τεθεί στη θέση εξοικονόμησης ενέργειας, είναι ενεργειακά αποδοτική μόνο όταν ο χρόνος που δαπανάται σε αυτή τη θέση είναι μεγαλύτερος από ένα ορισμένο κατώφλι. Είναι πλέον ολοφάνερο ότι η υλοποίηση της σωστής πολιτικής για τη μετάβαση στην κατάσταση ύπνου είναι κρίσιμη για την επιτυχία του DPM [4,5].

Μπορεί να υπάρχουν αρκετοί τέτοιοι χρήσιμοι τρόποι λειτουργίας (modes of operation) για τον ασύρματο αισθητήριου κόμβο οι οποίοι εξαρτώνται πράγματι από τον αριθμό των καταστάσεων των στοιχείων που τον αποτελούν. Κάθε τρόπος λειτουργίας μπορεί να χαρακτηριστεί από την ισχύ που καταναλώνει και από την επιβάρυνση που δέχεται λόγω της χρονικής καθυστέρησης (latency). Η τελευταία είναι η μετάβαση από και προς εκείνο τον τρόπο λειτουργίας.

Το σχήμα DPM προτείνει πέντε τρόπους λειτουργίας με εξοικονόμηση ενέργειας (Πίνακας 4-5). Ο χρόνος κατωφλίου (threshold time) έχει βρεθεί ότι εξαρτάται από τους χρόνους μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη (transition times). Έτσι, θα πρέπει κανείς να είναι πολύ προσεκτικός όταν χρησιμοποιεί το DPM προκειμένου να επιτύχει τη μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής του αισθητήριου κόμβου. Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται όταν τίθεται ο κόμβος εκτός λειτουργίας (off), όμως, σε πολλές περιπτώσεις είναι πιθανόν να μη μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων πότε θα απαιτηθεί μία συγκεκριμένη συσκευή για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Οι ερευνητές Amit Sinha και Anantha Chandrakasan [106] χρησιμοποίησαν ένα

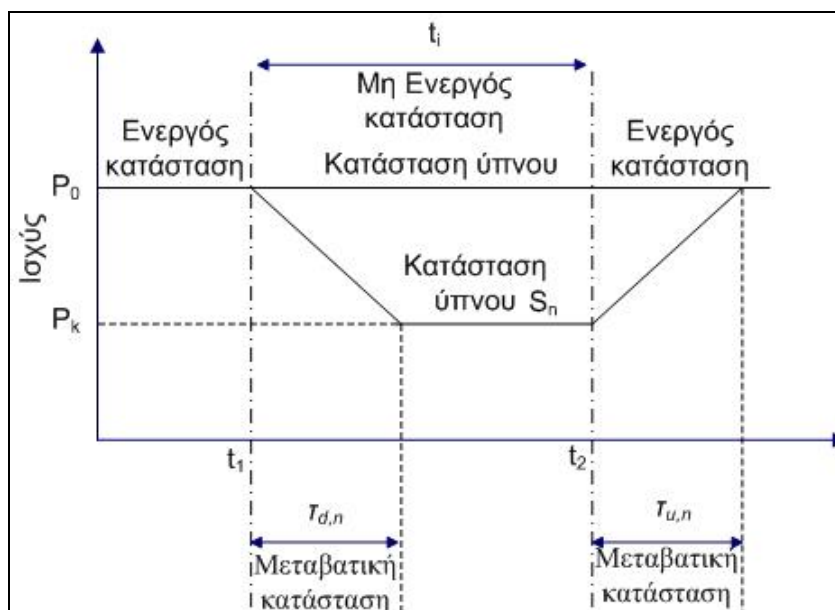
δίκτυο του οποίου η σύνθεση περιλάμβανε n ομογενείς αισθητήριους κόμβους (homogeneous sensor nodes) οι οποίοι ήσαν κατανομημένοι σε μία περιοχή ορθογωνίου σχήματος. Κάθε κόμβος περιλάμβανε N ενσωματωμένες μονάδες (αισθητήρας-ες με αναλογικό/ ψηφιακό μετατροπέα, επεξεργαστής, μνήμη και πομποδέκτης) οι οποίες μπορούσαν να βρίσκονται σε διαφορετικές καταστάσεις ύπνου (sleep-states). Αυτό το μοντέλο περιγράφει την κατανάλωση ισχύος σε διαφορετικά επίπεδα καταστάσεων ύπνου του κόμβου. Η κατάσταση ύπνου του κάθε κόμβου αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό των καταστάσεων ισχύος των επί μέρους μονάδων του. Ως εκ τούτου, ένας κόμβος θα έχει τις καταστάσεις ύπνου που απεικονίζονται στον Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-5: Χρήσιμες καταστάσεις ύπνου του αισθητήριου κόμβου

Καταστάσεις Ύπνου	Αισθητήρας με A/D Μετατροπέα	Επεξεργαστής	Μνήμη	Πομποδέκτης
S_0	on	Ενεργός (Active)	Ενεργός (Active)	T_x, R_x
S_1	on	Μη Ενεργός (Idle)	σε κατάσταση Ύπνου	T_x
S_2	on	σε κατάσταση Ύπνου	σε κατάσταση Ύπνου	R_x
S_3	on	σε κατάσταση Ύπνου	σε κατάσταση Ύπνου	off
S_4	off	σε κατάσταση Ύπνου	σε κατάσταση Ύπνου	off

Όπου: T_x (Transmit - εκπέμπω), R_x (Receive - λαμβάνω)

Κάθε κατάσταση ύπνου (sleep state) χαρακτηρίζεται από το μέγεθος της ισχύος που αυτή καταναλώνει και από την επιβάρυνση της χρονικής καθυστέρησης (latency). Όσο πιο βαθύς είναι ο ύπνος, τόσο πιο μικρή είναι η κατανάλωση ισχύος, και τόσο μεγαλύτερη η χρονική καθυστέρηση.



Σχήμα 4-3: Μεταβατικές καταστάσεις ισχύος και χρονικής καθυστέρησης

Στον Πίνακα 4-5 φαίνεται ότι δεν είναι χρήσιμοι όλοι οι συνδυασμοί των καταστάσεων ύπνου του αισθητήριου κόμβου. Για παράδειγμα, εάν ο επεξεργαστής βρίσκεται στην ανενεργό (ή μη ενεργό κατάσταση - idle state), τότε η μνήμη δεν έχει κανέναν απολύτως λόγο να είναι στην ενεργό κατάσταση, άρα θα πρέπει, να είναι στη μη ενεργό κατάσταση. Αυτό και μόνο το γεγονός αφαιρεί κάποιους συνδυασμούς από τις καταστάσεις του αισθητήρα.

Ας θεωρήσουμε ότι $P_n(T_{th,0})$ είναι η πιθανότητα όπου δεν συμβαίνει κανένα γεγονός σε ολόκληρη την περιοχή η οποία καλύπτεται από τον κόμβο n .

Ας θεωρήσουμε επίσης ότι ένα γεγονός συνέβη τη χρονική στιγμή T_1 και ότι το επόμενο γεγονός συνέβη τη χρονική στιγμή $T_2 = T_1 + T_i$. Τη χρονική στιγμή T_1 , ο κόμβος n επιθυμεί να μεταπηδήσει από την ενεργό κατάσταση S_0 στην κατάσταση ύπνου n . Η κάθε κατάσταση έχει μία κατανάλωση ισχύος P_n , και χρόνους μετάβασης $T_{d,n}$ and $T_{u,n}$. Η ενέργεια $E_{save,n}$ που εξοικονομεί ο αισθητήριος κόμβος n δίδεται από την εξίσωση (4.1).

$$E_{save,n} = P_{0,T_i} - \left(\frac{P_0 + P_n}{2} \right) \cdot (T_{d,n} + T_{u,n}) - P_n(T_i - T_{d,n}) \quad (4.1)$$

Μία τέτοιου είδους μετάβαση είναι χρήσιμη μόνο όταν $E_{save,n} > 0$. Αυτό οδηγεί στην τιμή κατωφλίου του κόμβου ($T_{th,n}$) και δίδεται από την εξίσωση (4.2).

$$T_{th,n} = \frac{1}{2} \left[T_{d,n} + \left(\frac{P_0 + P_n}{P_0 - P_n} \right) T_{u,n} \right] \quad (4.2)$$

Από την τελευταία εξίσωση (4.2) εξάγεται το εξής συμπέρασμα: *Όσο μεγαλύτερη είναι η επιβάρυνση από τη χρονική καθυστέρηση μετάβασης από την κατάσταση s_0 στην κατάσταση s_n , τόσο πιο μεγάλο είναι το κατώφλι κέρδους/ενέργειας (energy/gain threshold). Έτσι, το σύστημα ωθεί τον κόμβο στην κατάσταση ύπνου S_n με το να ελέγξει την πιθανότητα ενός γεγονότος να συμβεί στο αντίστοιχο κατώφλι χρόνου ύπνου $T_{th,n}$. Ο κόμβος n ενημερώνει (updates) επίσης το P_{th} μετά από κάθε γεγονός. Όλες οι καταστάσεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρέπει να ελέγχονται από το λειτουργικό σύστημα του κόμβου.*

Οι ερευνητές A. Sinha και A. Chandrakasan [106] απέδειξαν, μέσω της πειραματικής τους μελέτης, ότι: Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανένας τρόπος διαχείριση της ισχύος, υπάρχει μία ομοίμορφη κατανάλωση ενέργειας σε όλους τους κόμβους. Η χρήση ενός υψηλότερου $P_{th,0}$ θα είχε ως αποτέλεσμα τις συχνές μεταβάσεις σε καταστάσεις ύπνου.

Εάν τα γεγονότα συμβαίνουν πολύ γρήγορα, τότε αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την πρόκληση υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας, πράγμα το οποίο συνδέεται αναπόφευκτα με το κόστος ενέργειας που καταναλώνεται κατά την αφύπνιση (wake-up energy cost). Εξάλλου, μία μικρότερη τιμή του $P_{th,0}$ θα συνεπαγότανε την εμφάνιση ενός απαράδεκτου σχήματος για τη μετάβαση στην κατάσταση ύπνου, και ως εκ τούτου, τη μικρότερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Το μειονέκτημα αυτού του πρωτοκόλλου είναι ότι παρουσιάζει ένα πεπερασμένο και μικρό παράθυρο ταχυτήτων μεταξύ των αφίξεων (inter-arrival rates) λ_{tot} επάνω από το οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι fine-grained καταστάσεις ύπνου (όσο δηλαδή διαρκεί ένα πλαίσιο). Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στις επιβαρύνσεις ενέργειας και χρονικής καθυστέρησης (energy and latency overheads), τόσο πιο μεγάλη είναι η χρονική περιοχή μεταξύ των αφίξεων (inter-arrival time range) όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι καταστάσεις ύπνου. Έτσι, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας θα συνδέεται με το κόστος της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την αφύπνιση.

➤ Σύγκριση Μεταξύ των Πρωτοκόλλων DVS και DPM

- Και τα δύο πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας (DVS και DPM) αναφέρονται στον επεξεργαστή μεταβλητής ταχύτητας (VSP) του φυσικού επιπέδου, επιτυγχάνοντας μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται στη CPU.
- Το DVS προσαρμόζει την τάση τροφοδοσίας (power supply voltage) καθώς και τη συχνότητα λειτουργίας του στις μεταβολές του φορτίου (workload), ενώ
- Το DPM χρησιμοποιεί ένα ένθετο μικρό-λειτουργικό σύστημα (embedded micro-operating system) για να επιτύχει τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται στον αισθητήριο κόμβο, εκμεταλλευόμενο την κατάσταση ύπνου, αλλά και την ενεργό διαχείριση της ισχύος.

4.3.1.3 Energy-Efficient System Partitioning for Distributed Wireless Sensor Networks

Οι A. Wang και A. Chandrakasan στο [114] προτείνουν το σχήμα “*Energy Efficient System Partitioning for Distributed Wireless Sensor Networks*” (EESP) το οποίο αναφέρεται στην εξοικονόμηση ενέργειας στο φυσικό επίπεδο. Πρόσφατα, η έρευνα έδειξε ότι η τοπική επεξεργασία (local computation) των δεδομένων (που ανιχνεύονται στο περιβάλλον από τον αισθητήρα) στον κόμβο μπορεί να είναι πολύ ενεργειακά αποδοτική διότι με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η μετάδοση περιττών (ή πλεοναζόντων – redundant) δεδομένων. Μία από τις καλύτερες τεχνικές που έχουν προταθεί, σε επίπεδο ολοκληρωμένου κυκλώματος (chip level), είναι η εκμετάλλευση του παραλληλισμού και της κλιμάκωσης της τάσης (voltage scaling) [124].

Ο καταμερισμός (ή διαίρεση – partitioning) του υπολογιστικού μέρους (της επεξεργασίας των δεδομένων) σε πολλούς αισθητήριους κόμβους, καθώς και η παράλληλη εκτέλεσή του επιτρέπει μεγαλύτερο έλεγχο της χρονικής καθυστέρησης (latency). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας μέσα από την κλιμάκωση της τάσης (voltage scaling) και την κλιμάκωση της συχνότητας (frequency scaling).

Ο παραλληλισμός του υπολογιστικού μέρους (computation) οδηγεί στη μείωση του επιπέδου παροχής τάσης (voltage supply level) καθώς και στη μείωση της συχνότητας ρολογιού των αισθητήριων κόμβων, η οποία, με τη σειρά της, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος (energy-efficient signal processing algorithms), οι οποίοι «τρέχουν» σε επίπεδο αισθητήριων κόμβων (δηλαδή στο φυσικό επίπεδο), είναι πολύ σημαντική.

Ειδικότερα: Ένας τρόπος για να μπορεί να βελτιώσει κανείς την απόδοση ενέργειας είναι η συνεργασία μεταξύ των αισθητήριων κόμβων σε ολόκληρο το ασύρματο δίκτυο [124]. Αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο, λαμβάνουν δεδομένα τα οποία παρουσιάζουν πολύ μεγάλη σχέση μεταξύ τους.

Προκειμένου να περιορισθούν στο ελάχιστο δυνατό οι πλεονάζουσες πληροφορίες στο ασύρματο δίκτυο, οι αισθητήρες ομαδοποιούνται σε συστοιχίες (clusters), οπότε η επεξεργασία του σήματος γίνεται τοπικά μέσα στην ίδια τη συστοιχία. Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι σε θέση να διακρίνουν και να αποσπάζουν τις σχετικές πληροφορίες μέσα από την επεξεργασία του σήματος και να μειώσουν έτσι το κόστος επικοινωνίας. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντική η σχεδίαση επεξεργαστών σήματος χαμηλής ισχύος (low-power signal processors) για κάθε κόμβο, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη ο ενεργειακά αποδοτικός συστημικός διαμερισμός (energy-efficient system partitioning) του υπολογισμού μεταξύ των κόμβων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας [124], δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί μείωση της ενέργειας μέχρι 60% σε εφαρμογές εντοπισμού πηγής (source localization application) με παράλληλη εκτέλεση υπολογισμών (parallelizing computation).

4.3.1.4 Embedded Power Supply for Low-Power DSP

Οι περισσότερες τεχνικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits - ICs) για να εξοικονομήσουν ενέργεια, προϋποθέτουν στατική συμπεριφορά. Με άλλα λόγια, όλες οι παράμετροι των κυκλωμάτων και των συστημάτων επιλέγονται σε χρόνο που έχει ήδη μελετηθεί προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας. Ο αριθμός των λειτουργιών που εκτελούνται ανά δείγμα (sample) σε πολλά συστήματα *Επεξεργαστών Ψηφιακών Σημάτων* (Digital Signal Processors – DSP) μπορεί να ελαχιστοποιηθεί δυναμικά με την εκμετάλλευση στατιστικών των χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων.

Το υπό εξέταση σχήμα “*Embedded Power Supply for Low-Power DSP*” (EPS) [129] αναλύει τη χρήση των δυναμικά ρυθμιζόμενων τροφοδοτικών ως μία μέθοδο για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε συστήματα επεξεργαστών ψηφιακών σημάτων (DSP).

Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές υποβιβασμού της ισχύος (Power-down techniques) προκειμένου να καταστήσουν την κατανάλωση ισχύος ανάλογη προς το υπολογιζόμενο φορτίο (computational workload) ανά δείγμα.

Έτσι, η βασική ιδέα είναι να μειώνεται η τάση τροφοδοσίας (power supply voltage) με παράλληλη μείωση της ταχύτητας του ρολογιού κατά τη διάρκεια των περιόδων όπου το φορτίο εμφανίζεται μειωμένο, αντί να εργάζεται το σύστημα με σταθερή ταχύτητα και να είναι ανενεργό.

Ο Vadim Gutnik και ο Anantha P. Chandrakasan [123] απέδειξαν ότι αυτό το σχήμα μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια από 30% μέχρι 50%. Η συνεχής μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας μπορεί να στρογγυλοποιηθεί με χονδρική κβαντικοποίηση (quantization). Ένας ελεγκτής τεσσάρων επιπέδων είναι αρκετός για να επιτελέσει αυτήν την εργασία.

Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο όταν η τάση μεταβάλλεται στην ίδια κλίμακα χρόνου που μεταβάλλεται και το φορτίο.

4.3.1.5 Energy-Efficient Link Layer for Wireless Micro-Sensor Networks

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το σχήμα “*Energy-Efficient Link Layer for Wireless Micro-Sensor Networks*” (EELL) [125] το οποίο εφαρμόζει ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήριων κόμβων. Ειδικότερα, εξετάζονται ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές οι οποίες προσαρμόζουν τις παραμέτρους των δύο χαμηλότερων επιπέδων (φυσικού και ζεύξης δεδομένων), όπως, ισχύ εκπομπής εξόδου και κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων, στην κατανάλωση ενέργειας του συστήματος.

Επειδή το κόστος μιας ασύρματης επικοινωνίας σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να είναι αρκετά υψηλό, η προσπάθεια για μία όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας για την πραγματοποίηση της επικοινωνίας είναι πολύ σημαντική.

Γενικά, η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για τη μετάδοση ενός σήματος σε απόσταση d είναι ανάλογη προς το d^n όπου $2 \leq n \leq 4$.

Όπου: n είναι μία μεταβλητή που προκύπτει από το πείραμα.

Αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί, είτε:

- με την αύξηση της ισχύος εξόδου (P_{out}) του πομποδέκτη, είτε
- με την προσθήκη του FEC (Forward Error Correction) στα δεδομένα.

Η πιθανότητα σφάλματος δυαδικού ψηφίου (P_b), για οποιαδήποτε σταθερή τιμή της μεταδιδόμενης ισχύος εξόδου (output transmit power), μπορεί να μειωθεί με τη χρήση του FEC. Όμως, το FEC θα απαιτήσει πρόσθετη επεξεργασία, σε οποιαδήποτε ταχύτητα, και κατά συνέπεια

επιπλέον κατανάλωση ενέργειας στον πομπό και στο δέκτη, πράγμα το οποίο δεν είναι καθόλου επιθυμητό.

Αυτό το σχήμα κατάφερε να μειώσει στο ελάχιστο δυνατόν την ενέργεια του συστήματος που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ του πομπού και του δέκτη, διαμοιράζοντας την ενέργεια ανάμεσα στην ισχύ που απαιτείται για τη μετάδοση του σήματος και στην επεξεργασία που απαιτείται για την κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων (error-correction coding).

Ο χρησιμοποιούμενος ασύρματος κόμβος έχει την ικανότητα να κλιμακώνει την κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με:

- τις μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον,
- την κατάσταση του ασύρματου δικτύου, και
- τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται:

- Η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου, και
- Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του αισθητήριου κόμβου.

Έτσι, όλα τα επίπεδα του συστήματος μπορούν να προσαρμόσουν τις παραμέτρους τους (όπως π.χ. διόρθωση σφαλμάτων) προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη χρήση της ενέργειας.

Ο επιλεγμένος επεξεργαστής του αισθητήριου κόμβου [125] προσαρμόστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει δυναμική κλιμάκωση της τάσης (dynamic voltage scaling - DVS).

Το μικρό-λειτουργικό σύστημα (micro-Operating System – μ -OS) προσαρμόστηκε επίσης ώστε να επιτρέπει στο λογισμικό να κλιμακώνει την κατανάλωση ενέργειας του επεξεργαστή.

Ο πομπός και ο δέκτης με Phase-Locked Loop (PLL) μπορούν να τίθενται εκτός λειτουργίας, μέσα από το λογισμικό (ή τον υλικιστικό) έλεγχο της ενέργειας, για να μειωθεί έτσι η κατανάλωση της ενέργειας. Ακολουθεί μία αναλυτική παρουσίαση της ενέργειας που καταναλώνεται για την κωδικοποίηση.

Η κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων μπορούν να πραγματοποιηθούν σε διαφορετικές πλατφόρμες. Η καταναλισκόμενη ενέργεια μπορεί να μετρηθεί απευθείας αντί να γίνεται η μοντελοποίηση της ενέργειας που απαιτείται για την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Η μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται μπορεί να επιτευχθεί μέσα από το συμβιβασμό στην ποιότητα του εγκατεστημένου επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη διατήρηση της ταχύτητας εμφάνισης σφάλματος σε δυαδικά ψηφία (bit error rate - BER) λίγο κάτω από τις απαιτήσεις του χρήστη.

Η μέση κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τις ανάγκες της ραδιοεπικοινωνίας μοντελοποιείται με βάση την ακόλουθη εξίσωση (4.3):

$$E_{radio} = E_{tx} + E_{rx} \quad (4.3)$$

Το ολικό κόστος της ενέργειας της ραδιοεπικοινωνίας λαμβάνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E = P_{tx} (T_{on-tx} + T_{startup-tx}) + P_{out} T_{on-tx} + E_{dsp}^{(e)} + dP_{rx} (T_{on-rx} + T_{startup-rx}) + E_{dsp}^{(d)} \quad (4.4)$$

Όπου:

P_{tx}, P_{rx} Είναι η κατανάλωση της ισχύος του πομποδέκτη (T_x, R_x).

T_{on-tx}, T_{on-rx}	Είναι ο χρόνος εκπομπής/λήψης πραγματικών δεδομένων σε T_x & R_x .
P_{out}	Είναι η μεταδιδόμενη ισχύς εξόδου που οδηγεί την κεραία.
$E_{dsp}^{(d)}$	Είναι η ισχύς κωδικοποίησης.
$E_{dsp}^{(e)}$	Είναι η ισχύς κωδικοποίησης.
$T_{startup-tx}, T_{startup-rx}$	Είναι ο χρόνος εκκίνησης του πομποδέκτη (T_x και R_x)

Από την εξίσωση (4.4) υπολογίζεται η μέση ενέργεια επικοινωνίας για την αποστολή, λήψη, κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση κάθε δυαδικού ψηφίου πληροφορίας.

Συμπέρασμα:

Η χρήση αυτού του αποκωδικοποιητή μπορεί να μειώσει την ενέργεια αποκωδικοποίησης ανά δυαδικό ψηφίο πληροφορίας μέχρι πέντε τάξεις μεγέθους. Έτσι, τα δεδομένα του αισθητήρα μπορούν να κωδικοποιηθούν με τη χρήση ενός συνελκτικού κώδικα (convolutional code) για την επίτευξη χαμηλότερης ισχύος εκπομπής.

4.3.2 Σχήματα Fine-Grain (FG)

4.3.2.1 Power-Aware Multi-Access Protocol with Signaling (PAMAS)

Το PAMAS (*Power-Aware Multi-Access protocol with Signaling for ad hoc networks*) [107] είναι ένα ενεργειακά ενημερωμένο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (multi-access protocol) με σηματοδότηση το οποίο προορίζεται βασικά για τα ασύρματα δίκτυα ad-hoc. Βελτίωσε σημαντικά το θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας (συγκρινόμενο με το standardized IEEE 802.11 Distributed Coordination Function – DCF) [100] με την εφαρμογή της μεθόδου αποφυγής της ακούσιας ακρόασης (overhearing) μεταξύ των γειτονικών αισθητήριων κόμβων.

Δομήθηκε επάνω στο πρωτόκολλο MACAW (Multiple Access with Collision Avoidance Wireless) [126]. Στην πραγματικότητα είναι συνδυασμός του αρχικού πρωτοκόλλου MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) [127] και της ιδέας χρησιμοποίησης ενός ξεχωριστού καναλιού σηματοδότησης (separate signaling channel) [128,129]. Στις ενότητες 4.4.1.1 και 4.4.1.2 υπάρχει λεπτομερής περιγραφή των δύο πρωτοκόλλων MACA και MACAW, αντίστοιχα.

Το κύριο χαρακτηριστικό του PAMAS είναι ότι απαιτεί τη χρήση δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους καναλιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτό συνεπάγεται τη χρήση δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους πομποδεκτών σε κάθε κόμβο.

Το PAMAS δεν επιχειρεί να μειώσει την αδρανή ή άσκοπη ακρόαση (idle listening), η οποία είναι οπωσδήποτε ένα σημαντικό μειονέκτημα συγκρινόμενο με το S-MAC [109], ένα ακόμη σημαντικό πρωτόκολλο εξοικονόμησης ενέργειας (βλ. § 4.3.3.1).

Το PAMAS εξοικονομεί την πολύτιμη ενέργεια της μπαταρίας του κόμβου με το να θέτει εκτός λειτουργίας, με έξυπνο τρόπο, τους αισθητήριους κόμβους οι οποίοι δε βρίσκονται σε κατάσταση ενεργούς μετάδοσης πακέτων.

Στο PAMAS, οι κινητοί αισθητήριοι κόμβοι λήπτες (receiving mobile sensor nodes) εκπέμπουν ένα σήμα κατειλημμένου (busy tone) σε ένα άλλο ξεχωριστό κανάλι ελέγχου, από τη στιγμή που θα αρχίσουν να λαμβάνουν πλαίσια (frames), ενημερώνοντας έτσι τους υπόλοιπους κινητούς κόμβους για το πότε θα πρέπει να τεθούν εκτός λειτουργίας.

Όταν ένας κινητός κόμβος δεν έχει να μεταδώσει κάποια δεδομένα, τότε οφείλει και αυτός να τεθεί εκτός λειτουργίας, εφόσον αντιληφθεί ότι κάποιος γείτονας του αρχίζει να μεταδίδει προς άλλο κόμβο.

Ένας κόμβος θα πρέπει να τίθεται σε κατάσταση εκτός λειτουργίας (turn-off) ακόμη και στην περίπτωση που έχει να στείλει δεδομένα, εφόσον την ίδια χρονική στιγμή τουλάχιστον ένα ζεύγος γειτονικών κόμβων (neighbor-pairs) του βρίσκεται σε επικοινωνία. Ένας κινητός αισθητήριος κόμβος, ο οποίος είχε τεθεί σε κατάσταση εκτός λειτουργίας (turned-off) τη στιγμή που ένα ή περισσότερα από τα γειτονικά του ζεύγη αισθητήριων κόμβων άρχισαν να επικοινωνούν μεταξύ τους, μπορεί άνετα να προσδιορίσει τη χρονική διάρκεια που θα πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας κάνοντας χρήση ενός πρωτοκόλλου ανίχνευσης (probe protocol). Με αυτό το πρωτόκολλο, ο αισθητήριος κόμβος εκτελεί μία δυαδική έρευνα (binary search) προκειμένου να προσδιορίσει το χρόνο που θα περατωθεί η τρέχουσα εκπομπή. Όμως, η απώλεια των πλαισίων ανίχνευσης (probe frames) είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει σημαντική απώλεια ισχύος [107].

Ο Singh, S. και ο C. Raghavendra [112] απέδειξαν ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% (για αραιά συνδεδεμένα μεταξύ τους ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) και μέχρι 70% (για πλήρως συνδεδεμένα μεταξύ τους ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) χωρίς να επηρεάζεται στο ελάχιστο η χρονική καθυστέρηση καθώς και η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (ρυθμαπόδοση - throughput).

➤ Σύγκριση Μεταξύ των Πρωτοκόλλων PAMAS, MACA, MACAW και FAMA

Η σύγκριση μεταξύ των αποδόσεων των πρωτοκόλλων PAMAS, MACA, MACAW και FAMA (Floor Acquisition Multiple Access) [130], αποκαλύπτει ότι το PAMAS είναι το πλέον ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο σε σύγκριση με όλα τα υπόλοιπα, όμως υστερεί έναντι αυτών ως προς τη χρονική καθυστέρηση και τη ρυθμαπόδοση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ διαφορετικών πρωτοκόλλων

Approaches	Throughput/ delay	Fairness	Energy efficiency
MACA	+++	0	+
MACAW	+++	0	+
FAMA	+	+	0
PAMAS	-	0	++

Επεξήγηση συμβολισμών: (το “+” ή το “-” υποδηλώνουν “βελτίωση/υποβάθμιση ποιότητας ή ποσότητας, αντίστοιχα”, ενώ το 0 υποδηλώνει “καμία επίδραση”) [91]

4.3.3 Σχήματα Coarse-Grain Κατανεμημένων Μηχανισμών Ελέγχου Ισχύος

4.3.3.1 S-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

Το “An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks” (Ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο MAC για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) εμφανίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως “SMACS – Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks” ή “S-MAC” [109]. Επιτυγχάνει την εκκίνηση του δικτύου και την οργάνωση του επιπέδου ζεύξης δεδομένων. Είναι ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο (Distributed Protocol) το οποίο παρέχει τη δυνατότητα στους κόμβους να ανακαλύπτουν τους γείτονές τους και να οργανώνουν χρονοδιαγράμματα μετάδοσης/

λήψης για τη μεταξύ τους επικοινωνία, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία κύριων κόμβων (master nodes). Σε αυτό το πρωτόκολλο δεν υπάρχουν συστοιχίες (clusters) ή κεφαλές συστοιχιών (cluster heads) και η τοπολογία είναι επίπεδη (flat). Εδώ, η ανακάλυψη των γειτονικών κόμβων και η φάση ανάθεσης καναλιών συνδυάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχει σχηματιστεί ένα πλήρως οργανωμένο δίκτυο κατά τη στιγμή που κάθε κόμβος επικοινωνεί με τους γείτονές του.

Η γραμμή επικοινωνίας αποτελείται από ένα ζεύγος χρονοθυρίδων οι οποίες χρησιμοποιούνται για μετάδοση πληροφοριών σε μία τυχαία επιλεγμένη και σταθερή συχνότητα. Αυτό είναι πράγματι εφικτό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων επειδή το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Φυσικά, σε έναν τέτοιο μηχανισμό δεν υπάρχει ανάγκη για συγχρονισμό όλων των κόμβων του δικτύου, παρά το γεγονός ότι οι γειτονικοί κόμβοι, που επικοινωνούν σε ένα υποδίκτυο, πρέπει να συγχρονίζονται μεταξύ τους.

Εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός τυχαίου χρονοδιαγράμματος αφύπνισης κατά τη διάρκεια της φάσης σύνδεσης καθώς επίσης και με την απενεργοποίηση του πομποδέκτη κατά τη διάρκεια των αδρανών περιόδων.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία εκτενέστερη περιγραφή αυτού του τόσο σημαντικού πρωτοκόλλου.

Το σχήμα S-MAC εστιάζεται κυρίως στις μεγαλύτερες ενεργοβόρες πηγές (major energy wastage sources), επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα καλή επεκτασιμότητα (scalability), και ικανότητα αποφυγής συγκρούσεων (collision avoidance).

Οι μεγαλύτερες ενεργοβόρες πηγές είναι οι εξής:

- Ακούσια ακρόαση (overhearing),
- Παθητική ακρόαση (idle listening),
- Συγκρούσεις (collisions) και
- Επιβάρυνση από πακέτα ελέγχου (control packet overhead).

Όλοι οι κόμβοι προσπαθούν να επιτύχουν απλό κοινό έργο (single common task), δηλαδή, να μην απαιτούν ίσες ευκαιρίες για να μεταδώσουν τα δεδομένα τους.

Το S-MAC αποτελείται από τις εξής τρεις βασικές συνιστώσες:

- *Περιοδική Ακρόαση και Ύπνος*: Γειτονικοί κόμβοι συγχρονίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ακροάζονται μαζί και να κοιμούνται μαζί (*listen together and sleep together*). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται σημαντική επιβάρυνση ελέγχου.
- *Αποφυγή Συγκρούσεων και Ακούσιας Ακρόασης*: Οι *Συγκρούσεις* μπορούν να αποφευχθούν με την υιοθέτηση ενός σχήματος το οποίο να βασίζεται στην άμιλλα (contention). Η *Ακούσια Ακρόαση* μπορεί να αποφευχθεί με την παραχώρηση αδειας στους κόμβους (οι οποίοι λαμβάνουν πακέτα RTS και CTS, τα οποία δεν προορίζονται για αυτούς) για να μεταπηδήσουν στην κατάσταση ύπνου.
- *Διέλευση Μηνύματος*: Η ενδεδειγμένη μέθοδος εδώ είναι ο κατατεμαχισμός (ή θρυμματισμός – fragmentation) μηνυμάτων μεγάλου μήκους σε άλλα μικρότερα και η μετάδοσή τους με μία ριπή (in a burst).

Με βάση τα παραπάνω, το πρωτόκολλο S-MAC εισηγείται τις ακόλουθες τρεις *Τεχνικές* προκειμένου να επιτύχει τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας:

- Οι γειτονικοί κόμβοι συγχρονίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταπηδούν περιοδικά στην κατάσταση ύπνου. Έτσι δεν καταναλώνουν ενέργεια, είτε όταν ο γειτονικός τους κόμβος

εκπέμπει σε κάποιον άλλον κόμβο, είτε όταν ακροάζονται ένα άδειο κανάλι. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το πρόβλημα της ακούσιας ακρόασης (overhearing).

- Η σημαντική επιβάρυνση του δικτύου από τα πακέτα ελέγχου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για το λόγο ότι οι συγχρονισμένοι γειτονικοί κόμβοι σχηματίζουν ιδεατές ή εικονικές συστοιχίες (virtual clusters) προκειμένου να συγχρονίσουν τις περιόδους τους ύπνου/αφύπνισης (wake-up and sleep). Στην πράξη, δεν υφίσταται πραγματικό πρόβλημα, είτε για τη δημιουργία συστοιχίας (clustering), είτε για τη μεταξύ των συστοιχιών επικοινωνία (inter-cluster communication).
- Η διέλευση μηνυμάτων χρησιμοποιείται για τη μείωση της χρονικής καθυστέρησης, που οφείλεται στον ανταγωνισμό (contention latency), καθώς επίσης και για τη μείωση της επιβάρυνσης από τον έλεγχο.

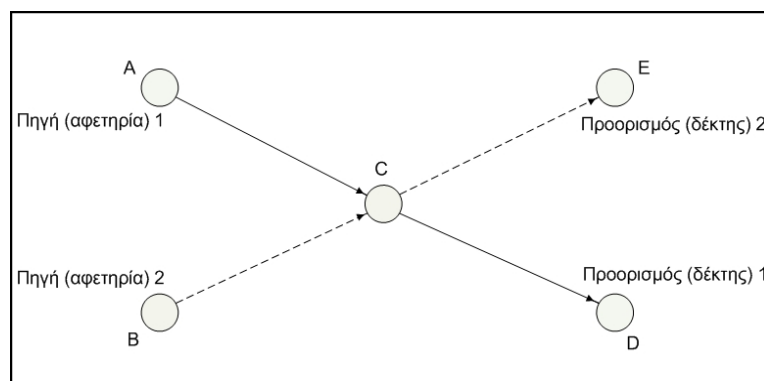
➤ Σύγκριση Μεταξύ του Πρωτοκόλλου S-MAC και του IEEE 802.11

Το πρωτόκολλο S-MAC αποκαλύπτει πολύ καλές ιδιότητες διατήρησης της ενέργειας, συγκρινόμενο με το πρότυπο πρωτόκολλο IEEE 802.11 [38].

- Το επίπεδο MAC μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση της ισχύος, έτσι, το S-MAC ασκεί μεγάλη επιρροή στο ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται, μέσα από την περιοδική αλλαγή των δύο λειτουργικών καταστάσεων (SLEEP/WAKE-UP mode) του αισθητήριου κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο, ο κόμβος μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια, για τον απλούστατο λόγο ότι δεν είναι υποχρεωμένος να εργάζεται διαρκώς, αλλά περιοδικά, και μόνο όταν έχει να στείλει κάποια πακέτα ελέγχου ή δεδομένων.
- Αντίθετα, όταν ένας κόμβος χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IEEE 802.11, είναι πάντοτε ενεργός (active), διότι ανταλλάσσει συνεχώς πακέτα συγχρονισμού με τους γείτονές του, και φυσικά αυτό το γεγονός συνεπάγεται την ταχύτερη κατανάλωση της ενέργειάς του [109].

Μία ακόμη πολύ ενδιαφέρουσα ιδιότητα του πρωτοκόλλου S-MAC είναι ότι μπορεί να εξισορροπεί (make trade-offs) ανάμεσα στην ενέργεια και τη χρονική καθυστέρηση (latency), ανάλογα με τις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες κίνησης (traffic conditions).

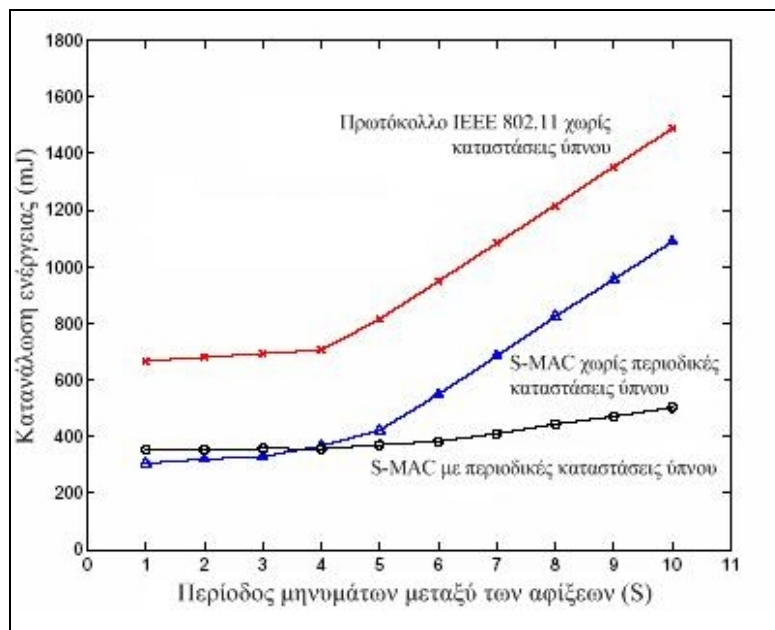
Ο W. Ye *et al.* [109], μετά την εκτέλεση σειράς πειραμάτων, και έχοντας ως βάση την προσομοιωμένη τοπολογία δικτύου δύο βημάτων (two-hop network simulated topology) με δύο πηγές (sources) και δύο αποδέκτες (sinks) (Σχήμα 4-4), έλαβαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-4: Τοπολογία δικτύου δύο βημάτων με δύο πηγές και δύο αποδέκτες

Η τοπολογία είναι απλή, αλλά υπεραρκετή για να δείξει τα βασικά χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων MAC.

Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα [109], το πρότυπο πρωτόκολλο 802.11 MAC χωρίς καταστάσεις ύπνου καταναλώνει υπερδιπλάσια ενέργεια από ότι το S-MAC όταν υπάρχει πολύ μεγάλη κίνηση στο δίκτυο (χρόνος μεταξύ των αφίξεων μηνυμάτων - message inter-arrival time - μικρότερος από 4s). Επιπλέον, η εξοικονόμηση ενέργειας από περιοδική μεταπήδηση στην κατάσταση ύπνου, είναι πολύ περιορισμένη, διότι η παθητική ακρόαση (ή ακρόαση σε κατάσταση αναμονής - idle listening) συμβαίνει πολύ σπάνια. Το S-MAC επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας κυρίως με το να προσπαθεί να αποφύγει την υπερακρόαση (overhearing) και την αποστολή μακροσκελών μηνυμάτων.



Σχήμα 4-5: Μέση κατανάλωση ενέργειας των πομποδεκτών σε κάθε κόμβο πηγή

Το πλήρες (με περιοδική μεταπήδηση στην κατάσταση ύπνου) πρωτόκολλο S-MAC επιτυγχάνει την καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, και υπερτερεί κατά πολύ του IEEE 802.11 MAC, όταν η περίοδος μεταξύ των αφίξεων μηνυμάτων είναι μεγαλύτερη από 4s (το φορτίο κίνησης γίνεται ελαφρύτερο).

➤ *Σύγκριση Μεταξύ S-MAC και PAMAS*

Από τη σύγκριση μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων S-MAC και PAMAS προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το S-MAC δε χρησιμοποιεί καθόλου τη σηματοδότηση εκτός καναλιού (out-of-channel signaling), ενώ το PAMAS απαιτεί τη χρήση δύο ανεξάρτητων ασύρματων καναλιών (radio channels) και κατά συνέπεια δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους ραδιοσυστήματα (πομποδέκτες) σε κάθε αισθητήριο κόμβο.
- Το PAMAS δεν προσπαθεί να ελαττώσει την παθητική ακρόαση (idle listening).

4.3.3.2 EAR – Eavesdrop-And-Register Algorithm

Ο αλγόριθμος EAR (Eavesdrop-And-Register) [4], [59], [131] επιτυγχάνει τη σύνδεση των κινούμενων κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Προσπαθεί να παρέχει συνεχείς υπηρεσίες σε αυτούς κάτω από συνθήκες κίνησης και μη. Εδώ οι κινούμενοι αισθητήριοι κόμβοι έχουν πλήρη έλεγχο της διαδικασίας σύνδεσης και μπορούν επιπλέον να αποφασίζουν για την ακριβή χρονική στιγμή που θα απορρίψουν κάποιες συνδέσεις, μειώνοντας έτσι το φορτίο στο δίκτυο από τα

μηνύματα ελέγχου. Το EAR είναι απόλυτα διαφανές στο S-MAC, επομένως το S-MAC είναι λειτουργικό μέχρι τη στιγμή που θα εμφανιστούν οι πρώτοι κινούμενοι κόμβοι στο δίκτυο.

4.3.3.3 Hybrid TDMA/FDMA-based

Στον “*Hybrid TDMA/FDMA-based*” μηχανισμό [4], [7] θεωρείται ότι το σύστημα αποτελείται από αισθητήριους κόμβους με περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα οι οποίοι επικοινωνούν με το σταθμό βάσης που βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 10 μέτρων και έχει αδιάλειπτη παροχή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση μιας μηχανής με αυστηρές απαιτήσεις, όσον αφορά την καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων, ενώ ο χρησιμοποιούμενος μηχανισμός MAC αποτελεί την εναλλαγή μεταξύ TDMA/FDMA.

Το γνήσιο TDMA παραχωρεί ολόκληρο το εύρος ζώνης σε έναν κόμβο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ενώ το γνήσιο FDMA παραχωρεί σε κάθε κόμβο μόνο ένα πολύ μικρό εύρος ζώνης, δηλαδή μία και μόνη συχνότητα. Το γνήσιο TDMA παρόλο που ελαχιστοποιεί το χρόνο μετάδοσης δεν προτιμάται πάντοτε λόγω της ανάγκης συγχρονισμού όλων των κόμβων.

Στο [7] χρησιμοποιείται μία αναλυτική φόρμουλα για τον προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού καναλιών, προκειμένου να επιτευχθεί η χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Ο βέλτιστος αριθμός καναλιών εξαρτάται από το λόγο της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη μετάδοση προς την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη λήψη. Εάν ο πομπός καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, τότε προτιμάται ο μηχανισμός TDMA. Εάν πάλι ο δέκτης είναι αυτός που καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια, τότε προτιμάται ο μηχανισμός FDMA.

4.3.3.4 TDMA Scheduling for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks

Βασική Ιδέα

Ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) TDMA για εξοικονόμηση ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [115] έχει ως βάση το μηχανισμό διαχείρισης ισχύος του πρωτοκόλλου S-MAC [109] και τον βελτιώνει προκειμένου να ελαχιστοποιήσει την από-άκρο σε-άκρο χρονική καθυστέρηση (end-to-end delay) [138-140].

Το βασικό μειονέκτημα του S-MAC είναι ότι ο κάθε ασύρματος αισθητήριος κόμβος θα πρέπει να περιμένει μέχρι να ξυπνήσει (WakeUP - WU) ο επόμενος κόμβος πριν να στείλει οποιοδήποτε μήνυμα. Το γεγονός αυτό καθιστά την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση ανάλογη προς τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων αναμετάδοσης μηνυμάτων (forwarders) επί το χρόνο ύπνου του κάθε κόμβου [115].

Αντίθετα, σε αυτό το σχήμα, όλοι οι κόμβοι του δικτύου συγχρονίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταπίπτουν ταυτόχρονα στην κατάσταση ύπνου και να αφυπνίζονται κατά τη διάρκεια της περιόδου αφύπνισης (WU).

Αναλυτική Περιγραφή

Οι κόμβοι, αντί να στέλνουν ολόκληρο το μήνυμα κατά τη διάρκεια της περιόδου αφύπνισης, στέλνουν μόνο ένα σύντομο πακέτο WakeUP, το οποίο προωθείται μέχρι να φθάσει στο σταθμό βάσης (gateway). Οι κόμβοι που λαμβάνουν το πακέτο WakeUP παραμένουν σε κατάσταση αναμονής (στη μη ενεργό κατάσταση – idle mode) περιμένοντας την επόμενη λήψη πακέτου, ενώ οι κόμβοι που δεν λαμβάνουν πακέτο WakeUP μεταπηδούν στην κατάσταση ύπνου (sleep mode).

Επίσης, στην περίπτωση συγχώνευσης δύο μονοπατιών (paths) μπορεί να υπάρξει συσσώρευση πολλών πακέτων WakeUP, οπότε μειώνεται η χρονική διάρκεια της αφύπνισης και έτσι αποφεύγονται οι άσκοπες εκπομπές.

Μία επιπλέον βελτίωση που εισάγει το σύστημα είναι να μην αφήνεται ανοικτός (ON) ο πομποδέκτης του κάθε κόμβου για όλη τη διάρκεια της περιόδου αφύπνισης, παρά μόνο για τις συγκεκριμένες χρονοθυρίδες που ο κόμβος περιμένει να έχει λήψη δεδομένων.

Τα βασικά ερωτήματα που θα πρέπει να απαντηθούν είναι:

- Ποια χρονοθυρίδα θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ο κάθε κόμβος για να στείλει τα δικά του μηνύματά αφύπνισης (WU), και
- Σε ποιες χρονοθυρίδες θα πρέπει να ακροάζεται ο κάθε κόμβος.

Το μονοπάτι WakeUP απαιτεί την αναγκαστική εκχώρηση των πρώτων κόμβων του μονοπατιού σε χρονοθυρίδες πολύ νωρίτερα από τους κόμβους που έπονται. Εξάλλου, οι συγκρούσεις μπορούν να αποφευχθούν εφόσον οι κόμβοι, που λαμβάνουν ταυτόχρονα δεν είναι γείτονες του ενός βήματος (το TDMA δεν πάσχει από την κατάσταση του εκτεθειμένου τερματικού). Επίσης, πιθανές μεταδόσεις προς την ίδια κατεύθυνση θα πρέπει να εκχωρούνται σε διαφορετικές χρονοθυρίδες. Όμως, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού οφείλει να μεγιστοποιεί τις παράλληλες λήψεις, οι οποίες δημιουργούνται από κόμβους που δεν είναι γείτονες του ενός βήματος, προκειμένου να ελαχιστοποιήσει το συνολικό μήκος του πλαισίου. Ως εκ τούτου, ο χρονοπρογραμματισμός των χρονοθυρίδων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα μονοπάτια δρομολόγησης καθώς και την πληροφόρηση από το γειτονικό του περιβάλλον.

Αυτοί οι περιορισμοί καθιστούν τελείως ανεπαρκή τα κατανεμημένα σχήματα TDMA χρονοπρογραμματισμού, για το λόγο ότι δεν λαμβάνουν υπόψη την επιθυμητή σειρά των μεταδόσεων (order of transmissions).

Ο αλγόριθμος που ακολουθεί μπορεί να δημιουργήσει ένα TDMA χρονοδιάγραμμα, που να είναι κατάλληλο για μεταδόσεις WU (αφύπνισης) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων [135].

Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού TDMA εκχωρεί μία χρονοθυρίδα μετάδοσης σε κάθε κόμβο χωριστά καθώς και έναν αριθμό από χρονοθυρίδες λήψης για κάθε κόμβο αναμετάδοσης (forwarding node), μία για κάθε ανταποκρινόμενο κόμβο μετάδοσης.

Για να μπορεί ο αλγόριθμος να υπολογίσει το χρονοδιάγραμμα TDMA για κάθε έναν κόμβο που περιέχεται στο δίκτυο, χρειάζεται τις παρακάτω πληροφορίες:

- Τον αριθμό των βημάτων (hops) από τον κόμβο μέχρι το σταθμό βάσης.
- Τους μονοβηματικούς γείτονες (one-hop neighbors) του κόμβου.
- Το επόμενο βήμα του κάθε κόμβου.

Με βάση την παραπάνω πληροφόρηση, υπολογίζεται ο αριθμός των χρονοθυρίδων που πρέπει να λάβει ο κάθε κόμβος πριν να αρχίσει να μεταδίδει.

Το τμήμα του Ψευδοκώδικα (pseudo-code) που ακολουθεί περιγράφει τη λειτουργία του αλγορίθμου.

Η *nodelist* θεωρείται ότι είναι ταξινομημένη σε φθίνοντα βήματα προς το σταθμό βάσης.

Επίσης το *node* \rightarrow *dest* είναι το επόμενο βήμα (hop) του κόμβου, και το *node* \rightarrow *recv* αντιπροσωπεύει τις υπόλοιπες λήψεις που θα πρέπει να κάνει ο κόμβος πριν να αρχίσει να μεταδίδει.

Ψευδοκώδικας

```
do {
  slot = new Slot( );
  collision_set = null;
  foreach node in nodelist {
    if (node->rcv==0 &&
        (node not in collision_set)) {
      slot[node] = "SEND";
      slot[node->dest] = "RCV";
      collision_set.add(
        node->dest->neighbours)
      collision_set.add(node->dest)
      node->dest->rcv-- ;
      nodelist.remove(node) ;
    }
  }
  Frame.add(slot) ;
} while (slot.length > 0).
```

Αξιολόγηση της Επίδοσης (Performance Evaluation)

Η επίδοση των ενημερωμένων από άποψη ισχύος πρωτοκόλλων MAC εξαρτάται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους, όπως είναι π.χ.:

- οι ρυθμοί άφιξης της κίνησης (traffic arrival rates),
- η συμφόρηση του καναλιού (channel congestion),
- η τοπολογία του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, και
- οι αλγόριθμοι δρομολόγησης.

Εδώ επιχειρείται ο ποσοτικός προσδιορισμός εξοικονόμησης ισχύος που επιτυγχάνεται με το προτεινόμενο πρωτόκολλο σε διαφορετικές συνθήκες δικτύου και κίνησης και η σύγκρισή του με άλλα παρόμοια πρωτόκολλα εξοικονόμησης ενέργειας.

Γενικά, η *Κατανάλωση Ισχύος ενός Κόμβου* σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά από την παρακάτω εξίσωση (4.5):

$$P = \text{Prob}\{\text{SEND}\}P_{\text{send}} + \text{Prob}\{\text{RCV}\}P_{\text{rcv}} + \text{Prob}\{\text{IDLE}\}P_{\text{idle}} + \text{Prob}\{\text{SLEEP}\}P_{\text{sleep}} \quad (4.5)$$

Όπου:

- $P_{\text{rob}}\{\text{SEND}\}$, $P_{\text{rob}}\{\text{RCV}\}$, $P_{\text{rob}}\{\text{IDLE}\}$, $P_{\text{rob}}\{\text{SLEEP}\}$ είναι οι πιθανότητες του πομποδέκτη του κόμβου να βρίσκεται στην κατάσταση *SEND*, *RCV*, *IDLE* και *SLEEP*, και
- P_{send} , P_{rcv} , P_{idle} , P_{sleep} είναι τα ποσά της ισχύος που καταναλώνονται όταν ο κόμβος βρίσκεται στην κάθε κατάσταση.

Στην παρούσα ανάλυση έχει θεωρηθεί ότι το P_{sleep} είναι πάρα πολύ μικρό.

Εάν κάποιος συγκεκριμένος κόμβος του δικτύου παράγει τα αρχικά πακέτα μέσω μεγέθους L (σε μονάδες χρόνου εκπομπής) με ταχύτητα (rate) λ_0 , και τα προωθεί στο δίκτυο με ταχύτητα λ_T , τότε πρέπει να βρίσκεται στις καταστάσεις $SEND$ και $RECV$ με τις παρακάτω πιθανότητες (4.6):

$$\text{Prob}\{X = x\} = \begin{cases} (\lambda_0 + \lambda_T)L & x = SEND \\ \lambda_T L & x = RECV \end{cases} \quad (4.6)$$

Εάν ο κόμβος δε βρίσκεται ποτέ στην κατάσταση ύπνου, όταν είναι σε κατάσταση αναμονής (ανενεργός – idle), τότε η πιθανότητα $P_{rob}\{IDLE\}$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (4.7):

$$\text{Pr}\{IDLE\} = 1 - \lambda_0 L - 2\lambda_T L \quad (4.7)$$

Οι παραπάνω πιθανότητες υπολογίζονται χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη:

- οι πιθανές αναμεταδόσεις (re-transmissions) και
- τα πακέτα ελέγχου, όπως $ACKs$, $RTSs$, $CTSs$ κτλ.

Επιπλέον δε, είναι ακριβή, μόνο όταν δεν υπάρχει συμφόρηση (congestion) στο δίκτυο, δηλαδή, όταν: $\lambda_0 L + 2\lambda_T L \ll 1$.

Στο υπόλοιπο μέρος αυτής της εργασίας διερευνάται το θέμα της επίδοσης ισχύος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η οποία παράγει πολύ μικρή κίνηση κάτω από κανονικές συνθήκες. Έτσι οι παραπάνω υποθέσεις είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

Η ισχύς που καταναλώνει ο κόμβος, εφόσον δεν περιέλθει ποτέ στην κατάσταση ύπνου (SLEEP mode), δίνεται από την εξίσωση (4.8):

$$P_{ALWAYS_ON} = (\lambda_0 + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + (1 - \lambda_0 L - 2\lambda_T L)P_{idle} \quad (4.8)$$

Η κατανάλωση ισχύος του πρωτοκόλλου S-MAC δίδεται από την εξίσωση (4.9):

$$P_{S-MAC} = (\lambda_0 + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + (T_i / T_f)(1 - \lambda_0 L - 2\lambda_T L)P_{idle} \quad (4.9)$$

Όπου, T_f είναι η περίοδος, και T_i είναι ο χρόνος αφύπνισης (wakeur time).

Ο χρόνος που δαπανά ένας κόμβος για περιοδικές αφυπνίσεις ισούται με $n(T_{slot}/T_f)$, όπου:

- n είναι ο αριθμός των χρονοθυρίδων που μπορεί να λάβει ο κόμβος,
- T_f είναι η περίοδος, όπως παραπάνω, και
- T_{slot} είναι το μήκος κάθε μιας χρονοθυρίδας TDMA.

Η μετάδοση και η λήψη (των μηνυμάτων αφύπνισης (WU messages) που προηγούνται της μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων, απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια από τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων, και ως εκ τούτου δε λαμβάνονται υπόψη. Όμως, μετά τη λήψη ενός μηνύματος αφύπνισης (WU message), ο κόμβος πρέπει να παραμείνει ξύπνιος μέχρι τη λήψη του πακέτου δεδομένων. Αυτός ο χρόνος αναμονής, που εκφράζεται ως L_{wait} , μπορεί να υπολογισθεί κατά προσέγγιση από το γινόμενο του αριθμού των κόμβων (που μεσολαβούν από την πηγή του πακέτου μέχρι τον υπό εξέταση κόμβο), επί το χρόνο μετάδοσης του πακέτου δεδομένων. Σε περίπτωση που η ταχύτητα άφιξης του πακέτου είναι χαμηλή, συγκρινόμενη με το μεσοδιάστημα

μεταξύ ύπνου/αφύπνισης, η άφιξη των πακέτων WU ισούται με την ταχύτητα άφιξης των πακέτων δεδομένων λ_0 .

Όλα τα παραπάνω παράγουν την εξίσωση (4.10) η οποία αναφέρεται στην *Κατανάλωση Ενέργειας του Αλγόριθμου TDMA*:

$$P_{TDMA} = (\lambda_0 + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + n(T_{slot} / T_f)P_{idle} + L_{wt}L_{wait}P_{idle} \quad (4.10)$$

Τα αποδοτικά πρωτόκολλα MAC με επίδοση ισχύος σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν αρνητική επίδραση στη χρονική καθυστέρηση του συστήματος. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι μεταδόσεις θα πρέπει να περιμένουν μέχρι τη στιγμή που ο αισθητήριος κόμβος θέσει σε λειτουργία τη μονάδα επικοινωνίας του.

Η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση (end-to-end delay), σε ένα δίκτυο αισθητήρων, ορίζεται ως το άθροισμα:

- της χρονικής καθυστέρησης εκπομπής,
- της χρονικής καθυστέρησης πρόσβασης,
- της χρονικής καθυστέρησης αναμονής στην ουρά (queuing delay), και
- της χρονικής καθυστέρησης διάδοσης (propagation delay).

Όταν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι σχετικά χαμηλός, τότε η χρονική καθυστέρηση αναμονής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και να παραλειφθεί, αλλά και η μικρή απόσταση μεταξύ των ασύρματων αισθητήριων κόμβων καθιστά τη χρονική καθυστέρηση διάδοσης επίσης μικρή. Σε μία εκπομπή πολλαπλών βημάτων (multi-hop transmission) με $N-1$ ενδιάμεσους μεταδότες, η μέση χρονική καθυστέρηση μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση (4.11).

$$E\{D(N)\} = N(t_{cs} + L) \quad (4.11)$$

Όπου, t_{cs} είναι ο χρόνος πρόσβασης και t_x είναι η χρονική καθυστέρηση εκπομπής. Η χρονική καθυστέρηση είναι ανάλογη προς τον αριθμό των βημάτων.

Η χρονική καθυστέρηση του πρωτοκόλλου S-MAC υπολογίζεται στο [109] από την εξίσωση (4.12).

$$E\{D(N)\} = N T_f - T_f/2 + t_{cs} + L \quad (4.12)$$

Η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση για το πρωτόκολλο S-MAC υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (4.13) όταν χρησιμοποιείται η τεχνική της “προσαρμοσίμης ακρόασης” (adaptive listening).

$$E\{D(N)\} = N T_f/2 + 2t_{cs} + 2L - T_f/2 \quad (4.13)$$

Και στις δύο περιπτώσεις, η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση είναι ανάλογη προς τον αριθμό των βημάτων επί την περίοδο T_f . Αυτό συμβαίνει διότι η μετάδοση σε κάθε βήμα υφίσταται καθυστέρηση και μέχρι να ξυπνήσει ο επόμενος κόμβος λήπτης. Η τεχνική “*Adaptive listening*” μειώνει την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, αλλά μόνο κατά ένα συντελεστή ίσο με 2.

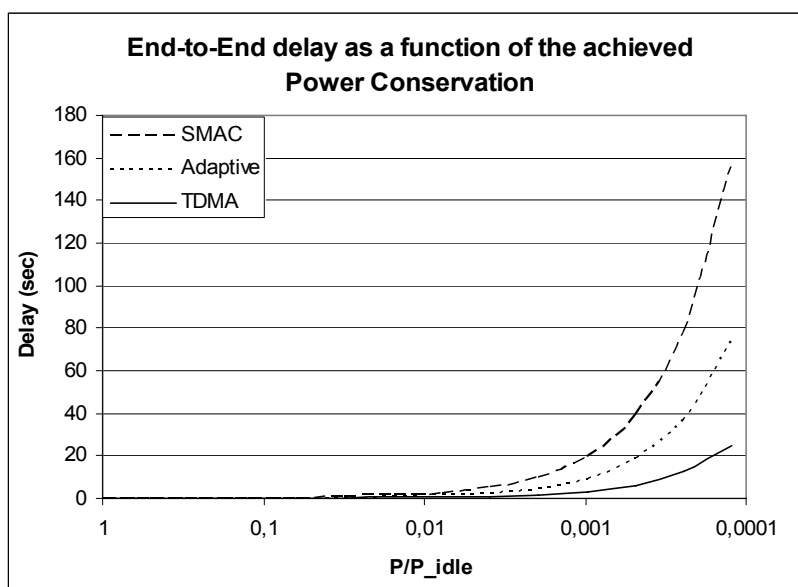
Η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση του αλγόριθμου, που ήδη παρουσιάστηκε, ισούται με την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση της περίπτωσης “*Always-on*” συν τη χρονική

καθυστέρηση που εισάγεται από την εξοικονόμηση της ισχύος. Όταν δημιουργηθεί ένα πακέτο, τότε ο κόμβος θα πρέπει να περιμένει μέχρι να λάβει το επόμενο πλαίσιο TDMA. Τότε, εκπέμπει το Path-WU για να ξυπνήσει όλους τους κόμβους. Επειδή το πακέτο παράγεται με τυχαίο τρόπο, τότε ο μέσος χρόνος μέχρι την άφιξη του επόμενου πλαισίου θα είναι $T_f/2$. Έτσι, η χρονική καθυστέρηση δίδεται από την εξίσωση (4.14).

$$E\{D(N)\} = N(t_{cs} + L) + T_f/2 \quad (4.14)$$

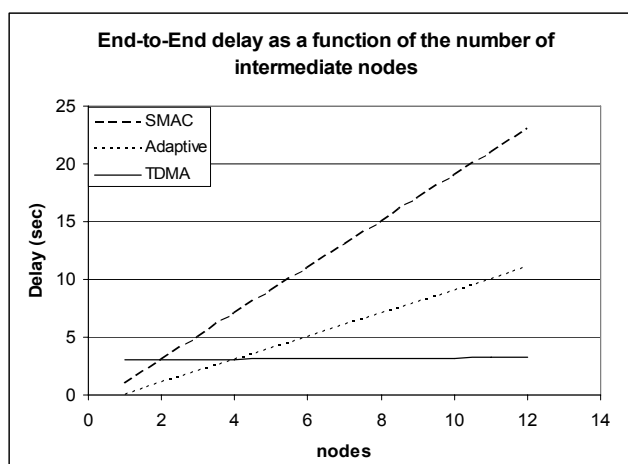
Για να γίνουν κατανοητά τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, σχεδιάστηκε η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση και των τριών σχημάτων (S-MAC, Adaptive, TDMA), σε συνάρτηση με τη διατήρηση της ισχύος και τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων. Οι αριθμητικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- $T_i = T_{slot} = 0.002 \text{ sec}$. Αυτή η τιμή προσδιορίζεται ουσιαστικά από την ακρίβεια του συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων. Επειδή οι αισθητήριοι κόμβοι θεωρούνται ακριβείς, από άποψη κόστους, και επειδή ο εκ νέου συγχρονισμός (re-synchronization) θα πρέπει να γίνεται σε όσο το δυνατόν πιο αραιά χρονικά διαστήματα, επελέγη μία σχετικά μεγάλη τιμή.



Σχήμα 4-6: End-to-end delay σε συνάρτηση με τη διατήρηση ισχύος

- $N = 10$, για το Σχήμα 4.6, και μεταβλητό για το Σχήμα 4-7.
- $L = 0.02 \text{ sec}$. Η χρονική διάρκεια του μηνύματος θεωρείται ότι είναι σχετικά μικρή, επειδή τα μηνύματα των αισθητήρων περιέχουν μία τυπική απλή μέτρηση (π.χ. μέτρηση της θερμοκρασίας).
- $n = 3$. Ο αριθμός των χρονοσχισμών που θα ακροάζεται ο κάθε κόμβος σε κάθε μεσοδιάστημα εξαρτάται από την τοπολογία. Η επιλεγείσα τιμή είναι μικρή εξαιτίας της συσσώρευσης των μηνυμάτων WU.
- $P/P_{idle} = 0,001$, για το Σχήμα 4.7, μεταβλητό για το Σχήμα 4-6.
- Το φορτίο κίνησης σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με μεγάλη διάρκεια ζωής, θα πρέπει να είναι μικρό. Θεωρείται η περίπτωση της πολύ περιορισμένης κίνησης ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η ισχύς που καταναλώνεται και η οποία οφείλεται στην εκπομπή του σήματος. Η κατανάλωση ισχύος προκαλείται κυρίως από την παθητική ακρόαση (idle listening).



Σχήμα 4-7: End-to-end delay σε σχέση με τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων

Στα Σχήματα 4-6 και 4-7 διακρίνεται καθαρά ότι η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση αυξάνεται ταχύτατα στα σχήματα που έχουν ως βάση το S-MAC, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ενδιάμεσων κόμβων. Το προτεινόμενο σχήμα παρέχει πολύ μικρότερους χρόνους καθυστέρησης από άκρο-σε-άκρο για μηνύματα που στέλνονται από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης, σε σενάρια όπου χρησιμοποιούνται πολυάριθμοι κόμβοι για ανίχνευση σπάνιων γεγονότων (events) και για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Συναφείς Μελέτες

Ο Yu *et al.* [136] ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της μετάδοσης των πακέτων με χρονοπρογραμματισμό για συλλογή δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ο Cui S. *et al.* προτείνουν [137] έναν αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού απλής ζεύξης για να κατασκευάσουν το χρονοδιάγραμμα με την ελάχιστη χρονική καθυστέρηση το οποίο δίνει χρονικές διάρκειες στις χρονοθυρίδες για όλες τις ζεύξεις. Επιπλέον, μελέτησαν τη σχέση συμβιβασμού ανάμεσα στη συνολική κατανάλωση ενέργειας και στη χρονική καθυστέρηση.

4.3.3.5 Intra-Super-Frame Power Management for IEEE 802.15.3 WPAN

Η διαχείριση της ισχύος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα για τις φορητές συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες. Ο σκοπός της διαχείρισης ισχύος είναι:

- Να βοηθήσει τις συσκευές να μεταπηδήσουν στην κατάσταση ύπνου.
- Να μειώσει το χρόνο αφύπνισης στο ελάχιστο δυνατό.

Υπάρχουν πολλές εργασίες στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικές με τη σχεδίαση πρωτοκόλλων MAC για διαχείριση της ισχύος σε ασύρματα δίκτυα. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται στο επίπεδο MAC του 802.11 WLAN και καμία αναφορά δεν έχει γίνει μέχρι στιγμής στα συστήματα IEEE 802.15.3. Το IEEE 802.15.3 έχει πρόσφατα προσελκύσει πολύ το ερευνητικό ενδιαφέρον και μπορεί να προσδώσει μεγάλες ταχύτητες και χαμηλής ισχύος ασύρματη συνδεσιμότητα (connectivity) μεταξύ των φορητών συσκευών στα ασύρματα δίκτυα προσωπικής εμβέλειας (Wireless Personal Area Networks - WPAN). Το σχήμα “*Intra-Super-Frame Power Management for IEEE 802.15.3 WPAN*” (ISFPM) [113] εξετάζει όλα τα παραπάνω.

Ειδικότερα, αυτό το σχήμα θα αποτελεί μέσον υποστήριξης του επιπέδου MAC σε ευρυζωνικά δίκτυα (Ultra-Wide Band - UWB). Το IEEE 802.15.3 MAC βασίζεται κυρίως στο TDMA (Time Division Multiple Access) και προσδιορίζει ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο (piconet) το οποίο

επιτρέπει σε έναν αριθμό συσκευών να επικοινωνούν μεταξύ τους με peer-to-peer mode. Μία από τις συσκευές έχει επιλεγεί ως συντονιστής (coordinator) piconet για να εκτελεί τις κεντρικές λειτουργίες ελέγχου, (π.χ. έλεγχο υπηρεσιών, χρονισμό συστήματος, διαχείριση ισχύος, κτλ.). Έτσι, η διαχείριση ισχύος είναι κρίσιμη για τις φορητές συσκευές στο IEEE 802.15.3 WPAN.

Λόγω της ιδιότητας του MAC, που βασίζεται στο TDMA του IEEE 802.15.3, ένα από τα θέματα κλειδιά για τη διαχείριση της ισχύος είναι ο χρονοπρογραμματισμός των πολλαπλών ροών (streams) μεταξύ των πολλών χρηστών για τη μείωση των συνολικών χρόνων αφύπνισης.

Σε αυτό το σχήμα αποκαλύπτεται ότι το πρόβλημα της διαχείρισης ισχύος αποτελεί γενικά ένα πρόβλημα μονοπατιού Hamilton.

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία των γράφων, οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας προσδιορίζουν τα κατώτερα και τα ανώτερα όρια για την ελαχιστοποίηση των χρόνων αφύπνισης.

Προτείνεται ο αποδοτικός αλγόριθμος ελάχιστου βαθμού έρευνας (Minimum-Degree Searching - MDS) για την εύρεση της δευτερεύουσας βέλτιστης σειράς.

Ο Zihua Guo, *et al.* [137] απέδειξαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος MDS είναι συνήθως σχεδόν -βέλτιστος (περισσότερο από 95%) και μπορεί στην πραγματικότητα να επιτύχει το κατώτερο όριο για τους ελάχιστους χρόνους αφύπνισης, στις περισσότερες περιπτώσεις, και υπερέρχει κατά πολύ από τα ήδη υπάρχοντα σχήματα.

4.3.3.6 Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks

Ο T. El Batt *et al.* προτείνουν το πρωτόκολλο “*Joint Scheduling and Power Control for wireless ad hoc networks*” (JSPC) [114] προκειμένου να μειώσουν το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται στον κόμβο για τη μετάδοση των δεδομένων στο δίκτυο επιτυγχάνοντας έτσι την ταυτόχρονη αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

Αυτή η μελέτη έχει δύο βασικούς στόχους:

- *Ο Πρώτος Στόχος* είναι να προσδιοριστεί το σύνολο των χρηστών που επιχειρούν ταυτόχρονα να πραγματοποιήσουν μετάδοση δεδομένων σε μία δεδομένη χρονοθυρίδα, προκειμένου να περιοριστεί ο αριθμός των παρεμβολών που δημιουργούνται κατά τη μετάδοση δεδομένων από τους γειτονικούς κόμβους του δικτύου (ή τους πολλαπλούς χρήστες - multi-user). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο μονο-βηματικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (single-hop throughput) και
- *Ο Δεύτερος Στόχος* είναι να καθοριστεί το σύνολο των αναγκαίων παραμέτρων ισχύος που θα ικανοποιούν τους περιορισμούς SINR (Signal to Interference Noise Ratio - λόγος σήματος προς θόρυβο παρεμβολών) στους αντίστοιχους δέκτες τους προκειμένου να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κάθε κόμβου. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια δύο εναλλασσόμενων φάσεων, ήτοι,
 - Με τη δημιουργία ενός χρονοδιαγράμματος στο οποίο απεικονίζονται οι μεταδόσεις του κάθε κόμβου, και
 - Με τον έλεγχο ισχύος (*power control*).

Ο αλγόριθμος ο οποίος περιγράφει το *Χρονοδιάγραμμα Μεταδόσεων* είναι πολύ σημαντικός διότι με βάση αυτόν συντονίζονται οι μεταδόσεις ανεξάρτητων μεταξύ τους χρηστών προκειμένου να εξαιρεθούν τα ισχυρά επίπεδα παρεμβολών.

Από την άλλη πλευρά, ο *Έλεγχος Ισχύος* πραγματοποιείται με κατανεμημένο τρόπο προκειμένου να προσδιορίζεται έτσι το μέγεθος της επιτρεπτής ισχύος που απαιτείται για μεταδόσεις ενός

απλού βήματος (single-hop transmission requirements). Αυτό γίνεται για τους εξής δύο βασικούς τύπους δικτύων: το TDMA (Time-Division Multiple Access) και το TDMA/CDMA (Time-Division Multiple Access/Code-Division Multiple Access) για ασύρματα δίκτυα ad hoc.

Περιγραφή του Αλγορίθμου

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος “*Joint Scheduling and Power Control Algorithm*” εκτελείται στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας (timeslot) για να χειρίζεται έτσι επιτυχώς τα υπερβολικά επίπεδα παρεμβολών που μπορούν να αναπτυχθούν σε κάποιες χρονοσχισμές. Προσδιορίζει επίσης το μέγιστο επιτρεπτό αριθμό χρηστών που μπορούν να μεταδώσουν με ασφάλεια στην τρέχουσα χρονοθυρίδα (στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας) χωρίς να δημιουργούν παρεμβολές ο ένας στον άλλο γεγονός που θα είχε ως άμεση συνέπεια την καταστροφή των μεταδόσεών τους. Άρα εδώ υπάρχουν δύο στόχοι:

Η παρατήρηση κλειδί που οδήγησε στην ανάπτυξη της προτεινόμενης διφασικής λύσης (two-phase solution) είναι διπλή:

- Πρώτον, η εξέταση των περιορισμών «εγκυρότητας» (validity) ενός δεδομένου σεναρίου εκπομπής είναι πολύ απλούστερη, και από υπολογιστικής άποψης πιο αποδοτική, από την εξέταση της συνθήκης «παραδεκτότητας» (admissibility).
- Δεύτερον, η εξάλειψη ισχυρών επιπέδων παρεμβολών στη φάση της δημιουργίας ενός χρονοδιαγράμματος (scheduling phase) είναι πολύ σημαντική, επειδή αυτές οι παρεμβολές δεν είναι εύκολο να ξεπεραστούν μόνο από τον έλεγχο της ισχύος.

Επιπλέον, η χρήση ενός αλγορίθμου χρονοδιαγράμματος (scheduling algorithm) καθιστά τη δομή του προβλήματος ελέγχου ισχύος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, παρόμοια με αυτήν που υπάρχει στα κυψελωτά δίκτυα (cellular networks). Αυτή η πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση οδήγησε στην εφαρμογή των υπάρχοντων αλγορίθμων ελέγχου ισχύος στα αναδυόμενα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο T. El Batt *et al.* [114] απέδειξαν ότι οι καταναμημένοι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος (distributed power control algorithms), που είχαν χρησιμοποιηθεί στα κυψελωτά δίκτυα, είναι απευθείας εφαρμόσιμοι στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οι δύο ορισμοί που ακολουθούν είναι πάρα πολύ χρήσιμοι για την πλήρη κατανόηση του προβλήματος επειδή σχετίζονται άμεσα με τις φάσεις δημιουργίας του χρονοδιαγράμματος και του ελέγχου ισχύος, αντίστοιχα.

Ορισμός A: Στα TDMA ad hoc ασύρματα δίκτυα, ένα σενάριο θεωρείται ότι είναι έγκυρο εφόσον ικανοποιεί τις ακόλουθες τρεις συνθήκες:

- Απαγορεύεται σε έναν κόμβο να λειτουργεί ταυτόχρονα ως πομπός και ως δέκτης.
- Απαγορεύεται σε έναν κόμβο να είναι ταυτόχρονα δέκτης σε περισσότερους από έναν πομπούς.
- Ένας κόμβος ο οποίος λειτουργεί ως δέκτης οφείλει να απέχει απόσταση D από οποιονδήποτε άλλον κόμβο που λειτουργεί ως πομπός εκείνη την ίδια χρονική στιγμή.

Η δεύτερη και η τρίτη συνθήκη δεν είναι απαραίτητο να ισχύουν εφόσον χρησιμοποιείται το TDMA μαζί με το CDMA. Ο σκοπός της τρίτης συνθήκης είναι η δημιουργία μιας ασφαλούς απόστασης μεταξύ των κόμβων που μεταδίδουν σε μία περιοχή ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές στους δέκτες πριν ακόμη εκτελεστούν οι πολύπλοκοι, από υπολογιστικής άποψης, αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος. Η επιλογή της παραμέτρου D επηρεάζει το μέγεθος της παρεμβολής, η οποία εξαλείφεται λόγω της δημιουργίας χρονοδιαγραμμάτων.

- Εάν η απόσταση D είναι πολύ μικρή, τότε οι κόμβοι που μεταδίδουν πληροφορίες βρίσκονται πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο και έτσι οι παρεμβολές θα πρέπει πλέον να αντιμετωπισθούν από τη φάση του ελέγχου ισχύος. Όμως,
- Εάν η απόσταση D είναι πολύ μεγάλη, τότε οι παρεμβολές αντιμετωπίζονται ήδη από την πρώτη φάση δημιουργίας των χρονοδιαγραμμάτων.

Συμπερασματικά, η επιλογή της παραμέτρου D εξαρτάται άμεσα από το ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο θορύβου (SINR).

Ορισμός B: Ένα σενάριο μετάδοσης με m γραμμές ζεύξης είναι αποδεκτό όταν υπάρχει ένα σύνολο από $P_{ij} \geq 0$ τέτοιο ώστε:

$$\min_{P_{ij}} \left\{ \sum_{m \text{ links}} P_{ij} \right\} \quad (4.15)$$

με περιορισμό: $SINR_{ij} > \beta \quad \forall ij \text{ links}$

Η επιλογή της επίλυσης του προβλήματος σε δύο φάσεις στηρίζεται στις εξής δύο πολύ βασικές παρατηρήσεις:

- *Πρώτη Παρατήρηση:* Ο έλεγχος των περιορισμών εγκυρότητας ενός σεναρίου μετάδοσης είναι κατά πολύ απλούστερος από τον έλεγχο των συνθηκών παραδεκτικότητας που αναφέρονται στο δεύτερο ορισμό.
- *Δεύτερη Παρατήρηση:* Η εξάλειψη των παρεμβολών από την πρώτη φάση δημιουργίας του χρονοδιαγράμματος μεταδόσεων είναι απαραίτητη επειδή αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από τη δεύτερη φάση που είναι ο έλεγχος ισχύος.

Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

- Με βάση το χρονοδιάγραμμα μεταδόσεων, το οποίο ορίζεται στην αρχή κάθε πλαισίου, η φάση χρονοδιαγράμματος ελέγχει κατά πόσο είναι έγκυρο το σενάριο στη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα. Εφόσον διαπιστωθεί ότι είναι έγκυρο, τότε αρχίζει η φάση ελέγχου ισχύος. Εάν όχι, τότε αναζητεί ένα έγκυρο υποσύνολο κόμβων αναβάλλοντας τις μεταδόσεις κόμβων οι οποίες προκαλούν παρεμβολές για την επόμενη χρονοθυρίδα στο πλαίσιο.
- Η φάση ελέγχου ισχύος είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της παραδεκτικότητας ισχύος του έγκυρου σεναρίου που ορίστηκε στη φάση του χρονοδιαγράμματος. Εάν η ισχύς είναι παραδεκτή, τότε οι κόμβοι αρχίζουν να μεταδίδουν στην τρέχουσα χρονοθυρίδα. Σε διαφορετική περίπτωση ο έλεγχος μεταφέρεται και πάλι στη φάση χρονοδιαγράμματος, όπου ένας αλγόριθμος αναζήτησης προσπαθεί να εντοπίσει το βέλτιστο υποσύνολο των κόμβων οι οποίοι είναι παραδεκτοί.

Προβλήματα προς Επίλυση

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσπαθεί να εξασφαλίσει το μέγιστο δυνατό αριθμό επιτυχημένων μεταδόσεων σε κάθε χρονοθυρίδα.

Ο αλγόριθμος χρονοδιαγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σε μη έγκυρο σενάριο μετάδοσης
- Σε έγκυρο αλλά μη παραδεκτό ακόμη σενάριο μετάδοσης

Επομένως, ο αλγόριθμος χρονοδιαγράμματος προσπαθεί να επιλύσει δύο προβλήματα βελτιστοποίησης:

- Βελτιστοποίηση έγκυρου σεναρίου
- Βελτιστοποίηση παραδεκτού σεναρίου
- *Καταναμημένος Έλεγχος Ισχύος*

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος και προτείνονται πιθανές υλοποιήσεις για TDMA και TDMA/CDMA ασύρματα ad hoc δίκτυα.

- *TDMA Ασύρματα Δίκτυα Ad hoc*

Θεωρούμε, κατ' αρχήν, ότι όλοι οι κόμβοι μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων και ότι με βάση το χρονοδιάγραμμα οι κόμβοι μεταδίδουν στους αντίστοιχους γειτονικούς τους σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες.

Ο καταναμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος για τη ζεύξη ανόδου (uplink) από τον κόμβο i παρουσιάζει την ακόλουθη μορφή:

$$P_i(N+1) = \frac{\beta}{SINR_i(N)} P_i(N) \quad \forall i \quad (4.16)$$

Όπου,

P_i : Η ισχύς που μεταδίδεται από τον κόμβο i στο δικό του σταθμό βάσης.

$SINR_i$: Ο λόγος του σήματος προς τις παρεμβολές και το θόρυβο (*Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio*)

N : Ο αριθμός επανάληψης

Θεώρημα 1: Αποδεικνύεται ότι, στην περίπτωση των έγκυρων σεναρίων μετάδοσης σε TDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc, ο παραπάνω καταναμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος συγκλίνει εκθετικά και γρήγορα προς το ελάχιστο διάνυσμα ισχύος, εάν αυτό υπάρχει.

Απόδειξη:

Εδώ θα γίνει η σύγκριση μεταξύ:

- *Της δομής του προβλήματος ελέγχου ισχύος για ένα έγκυρο σενάριο με m γραμμές ζεύξης, όπου: $m \leq n/2$ (και n ο αριθμός των κόμβων) και*
- *Ενός κυψελωτού συστήματος το οποίο έχει m χρήστες σε διαφορετικές κυψέλες (κελιά) και μπορεί να ξαναχρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα.*

Ο σκοπός και στα δύο παραπάνω προβλήματα είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύος μετάδοσης με βάση κάποιους περιορισμούς του SINR.

Η διατύπωση του προβλήματος ελέγχου ισχύος στα ad hoc ασύρματα TDMA δίκτυα έχει την εξής μορφή:

$$\min_{P_{ij}} \{ \sum_{mlinks} P_{ij} \} \quad (4.17)$$

με τον περιορισμό: με περιορισμό: $SINR_{ij} > \beta \quad \forall ij \text{ links}$

Όπου:

P_{ij} = Είναι η ισχύς μετάδοσης από τον κόμβο i στον κόμβο j , και

$$SINR_{ij} = \frac{P_{ij} G_{ij}}{I_j^i \sigma^2}$$

Όπου: G_{ij} είναι το κέρδος ζεύξης (link gain) από τον κόμβο i στον κόμβο j .

$G_{ij} = 1/d_{ij}^4$ (όπου: d_{ij} είναι η απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j)

σ^2 είναι η ισχύς του θερμικού θορύβου του δέκτη

I_j^i είναι η ισχύς της παρεμβολής στον κόμβο j από άλλους μεταδότες εκτός από τον κόμβο i η οποία δίδεται από την εξίσωση (4.18):

$$I_j^i = \sum_{k \neq i, j} P_{kx} G_{kj} \quad \forall x \neq j \text{ και } d_{kx} < d_{kj} \quad (4.18)$$

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι ο δέκτης x , στην παραπάνω έκφραση, εξαρτάται από τα διάφορα σενάρια μετάδοσης.

Όταν πρόκειται για έγκυρα σενάρια μετάδοσης, ο περιορισμός $k \neq j$ ικανοποιεί την πρώτη συνθήκη του πρώτου ορισμού (ότι δηλαδή ένας κόμβος δεν μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή).

Επιπλέον, ο περιορισμός $x \neq j$ είναι απαραίτητος για να ικανοποιεί το δεύτερο ορισμό (ότι δηλαδή ένας κόμβος δεν μπορεί να είναι δέκτης σε περισσότερους από ένα πομπούς).

Τέλος ο περιορισμός $d_{kx} < d_{kj}$ ικανοποιεί τον τρίτο περιορισμό. Η παράμετρος D επιλέγεται ώστε να είναι ίση με την απόσταση ανάμεσα στον κόμβο k που δημιουργεί την παρεμβολή και στον αποδέκτη x .

$$P_{ij} - \frac{\beta}{G_{ij}} \sum_{k \neq i, j} P_{kx} G_{kj} \geq \frac{\beta \sigma^2}{G_{ij}} \quad (4.19)$$

Οι περιορισμοί SINR στη ζεύξη ανόδου μπορούν να μειωθούν, οπότε η εξίσωση (4.19) θα έχει την εξής μορφή:

$$P_i - \frac{\beta}{G_{ii}} \sum_{k \neq i} P_k G_{ki} \geq \frac{\beta \sigma^2}{G_{ij}} \quad (4.20)$$

Για τα κυψελωτά συστήματα, οι τρεις πρώτες συνθήκες του έγκυρου σεναρίου ικανοποιούνται αυτόματα:

Από το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικά κανάλια για τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου,

Από τη δομή του κυψελωτού συστήματος (ότι δηλαδή οι κινούμενοι χρήστες επικοινωνούν μόνο με τον πλησιέστερο σταθμό βάσης) και

Από τους περιορισμούς της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων αντίστοιχα.

Από τις εξισώσεις (4.19) και (4.20) είναι προφανές ότι το πρόβλημα ελέγχου ισχύος για ένα έγκυρο σενάριο σε TDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc παρουσιάζει την ίδια δομή με το πρόβλημα ελέγχου ισχύος στα κυψελωτά συστήματα. Για αυτόν το λόγο, σε ένα σενάριο μετάδοσης δεδομένων με m ζεύξεις, είτε σε κυψελωτά συστήματα, είτε σε TDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc θα υπάρχουν m^2 διαφορετικά link gains ανάμεσα σε όλους του πομπούς και σε όλους τους δέκτες. Η μόνη διαφορά είναι ότι στα κυψελωτά συστήματα, τα ασύρματα τερματικά επικοινωνούν

απευθείας μόνο με το σταθμό βάσης, ενώ στα TDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc ένα ασύρματο τερματικό μπορεί να επικοινωνεί με οποιονδήποτε γειτονικό του κόμβο.

Έτσι λοιπόν, ο καταναμημένος αλγόριθμος ισχύος της εξίσωσης (4.17) μπορεί να βρει εφαρμογή στα TDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc και μπορεί να τροποποιηθεί παίρνοντας την εξής μορφή:

$$P_i(N+1) = \min \left[P_{\max}, \frac{\beta}{SINR_i(N)} P_i(n) \right] \quad (4.21)$$

- *TDMA/CDMA Ασύρματα Δίκτυα Ad hoc*

Σε αυτήν εδώ την περίπτωση θεωρούμε ότι έχουμε ένα TDMA ασύρματο δίκτυο ad hoc επάνω στο οποίο χρησιμοποιείται CDMA.

Θεώρημα 2: Αποδεικνύεται ότι, στην περίπτωση των έγκυρων σεναρίων μετάδοσης σε TDMA/CDMA ασύρματα ad hoc δίκτυα, ο καταναμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος συγκλίνει εκθετικά και γρήγορα προς το ελάχιστο διάλυσμα ενέργειας, εάν αυτό υπάρχει.

Απόδειξη:

Και αυτή τη φορά, ο κύριος στόχος είναι ναδειχθεί η εφαρμοσιμότητα που έχει ο καταναμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος ο οποίος χρησιμοποιείται στα TDMA κυψελωτά συστήματα σε ασύρματα δίκτυα ad hoc. Επιπλέον θα συγκριθεί η δομή του προβλήματος ελέγχου ισχύος για ένα έγκυρο σενάριο με γραμμές m ζεύξης με αυτό ενός κυψελωτού CDMA συστήματος που έχει m χρήστες.

Το πρόβλημα ελέγχου ισχύος για ένα έγκυρο σενάριο μετάδοσης σε ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο θα έχει τη μορφή της εξίσωσης (4.19). Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς της παρεμβολής θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_j^i = \sum_{k \neq i, j} P_{kg} G_{kj} (\overline{p_{ki}}^2 + p_{ki}^2 + \tilde{p}_{ki}^2) \quad (4.22)$$

Με βάση το γεγονός ότι χρησιμοποιείται CDMA, ο περιορισμός $k \neq j$ είναι αρκετός για να υπάρχει ένα έγκυρο σενάριο. Δείχνει ότι κανένας κόμβος δεν επιτρέπεται να είναι ταυτόχρονα και πομπός και δέκτης. Έτσι οι περιορισμοί SINR μπορούν να πάρουν την εξής μορφή:

$$P_{ij} - \frac{\beta}{G_{ij}} \sum_{k \neq i, j} P_{kx} G_{kj} (\overline{p_{ki}}^2 + p_{ki}^2 + \tilde{p}_{ki}^2) \geq \frac{\beta \sigma^2}{G_{ij}} \quad (4.23)$$

Όσον αφορά το πρόβλημα ελέγχου ισχύος στα κυψελωτά συστήματα CDMA είναι εύκολο ναδειχθεί ότι οι περιορισμοί SINR δίνονται από τη σχέση (4.22), όπου ο σταθμός βάσης x παριστάνει τον πλησιέστερο σταθμό βάσης στον κόμβο k . Εξάλλου ο περιορισμός του έγκυρου σεναρίου που έχει αναφερθεί προηγουμένως ικανοποιείται αυτόματα από τις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου. Με βάση την παραπάνω παρατήρηση εξάγεται το εξής συμπέρασμα: Το πρόβλημα ελέγχου ισχύος για ένα έγκυρο σενάριο σε TDMA/CDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc έχει την ίδια ακριβώς δομή με αυτήν των κυψελωτών συστημάτων CDMA. Και στα δύο συστήματα σε ένα σενάριο με m γραμμές ζεύξης θα υπάρχουν m^2 effective link gains. Με ανάλογο τρόπο, ο καταναμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος στο (4.18) και οι ιδιότητες σύγκλισης αποδεικνύονται ότι μπορούν να εφαρμοστούν στα TDMA/CDMA ασύρματα δίκτυα ad hoc.

Συμπέρασμα:

Η πειραματική μελέτη [114] επαληθεύει τη θεωρητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου αλγόριθμου. Αυτή πραγματοποιήθηκε, κατ' αρχή, με τη θεώρηση ενός TDMA ασύρματου δικτύου ad hoc, και στη συνέχεια με τη θεώρηση ενός TDMA/CDMA ασύρματου δικτύου ad hoc.

Επίσης, η πειραματική μελέτη [114] απέδειξε ότι το CDMA πάνω από το TDMA βελτιώνει τη ρυθμαπόδοση (ρυθμό μετάδοσης δεδομένων - throughput) απλού βήματος και μειώνει την κατανάλωση της ισχύος εκπομπής (transmission power consumption) με κόστος την υπερβολική ισχύ επεξεργασίας.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι υπάρχει ακόμη αρκετό περιθώριο για βελτίωση της απόδοσης με την εισαγωγή κατανεμημένων heuristic και επαρκών τακτικών δημιουργίας χρονοδιαγραμμάτων (scheduling) εντός του προτεινόμενου πλαισίου.

4.3.3.7 Geographical Adaptive Fidelity (GAF)

Το πρωτόκολλο με γενικό τίτλο “*Geographical Adaptive Fidelity – γεωγραφική προσαρμοσμη πιστότητα*” (GAF) ή “*geography-informed energy conservation for ad hoc routing*” [120] σχεδιάστηκε καταρχήν ως ένας ενημερωμένος από άποψη ισχύος αλγόριθμος δρομολόγησης με βάση τη θέση (power-aware location-based routing algorithm) για τα κινητά δίκτυα ad-hoc (MANETs). Όμως με την πάροδο του χρόνου αποδείχθηκε ότι είναι επίσης εφαρμόσιμο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Το GAF εξοικονομεί ενέργεια με το να θέτει εκτός λειτουργίας (power-off) τους αισθητήριους κόμβους, οι οποίοι δε χρειάζονται στο δίκτυο, χωρίς αυτό να επιδρά δυσμενώς στην αξιοπιστία της δρομολόγησης. Ο κάθε αισθητήριος κόμβος χρησιμοποιεί τη θέση του, η οποία προσδιορίζεται από το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS – Global Positioning System), προκειμένου να συνδεθεί με κάποιο σημείο στο ιδεατό δίκτυο (virtual grid). Οι αισθητήριοι κόμβοι οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο ακριβώς σημείο θεωρούνται ισοδύναμοι από άποψη κόστους για τη δρομολόγηση πακέτου. Ένας καλός τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας είναι η διατήρηση κάποιων κόμβων (που βρίσκονται σε μία συγκεκριμένη περιοχή του δικτύου) σε κατάσταση ύπνου (sleeping state). Ως εκ τούτου, το GAF μπορεί να αυξήσει αποτελεσματικά τη διάρκεια ζωής του δικτύου καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων. Η αλλαγή κατάστασης των αισθητήριων κόμβων, από την κατάσταση ύπνου στην ενεργό κατάσταση (sleeping to active) γίνεται εναλλακτικά και με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η εξισορρόπηση του φορτίου.

Στο GAF προσδιορίζονται τρεις βασικές καταστάσεις:

- “*Κατάσταση Ανακάλυψης*” (*Discovery state*), για τον εντοπισμό των γειτονικών κόμβων στο δικτυακό πλέγμα (grid).
- “*Ενεργός Κατάσταση*” (*Active state*), για συμμετοχή στη δρομολόγηση.
- “*Κατάσταση Ύπνου*” (*Sleep state*), όταν ο πομποδέκτης είναι εκτός λειτουργίας.

Κάθε κόμβος στο δίκτυο υπολογίζει το χρόνο που θα το εγκαταλείψει και ενημερώνει τους γείτονές του για αυτήν του την ενέργεια. Οι γειτονικοί κόμβοι που βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου ρυθμίζουν το χρόνο παραμονής τους σε αυτήν την κατάσταση σύμφωνα με τις πληροφορίες που έλαβαν, προκειμένου να διατηρηθεί έτσι η αξιοπιστία της δρομολόγησης. Η υλοποίηση του GAF μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε για σταθερούς (non-mobility) είτε για κινητούς (mobility) αισθητήριους κόμβους.

Οι Y. Xu, J. Heidemann, και D. Estrin [120], μέσα από αναλύσεις και μελέτες προσομοίωσης του GAF στα μη τροποποιημένα πρωτόκολλα δρομολόγησης AODV και DSR, απέδειξαν ότι το GAF μπορεί να καταναλώσει 40% με 60% λιγότερη ενέργεια από ότι ένα μη τροποποιημένο (unmodified) ad hoc πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επιπλέον, υποδεικνύουν ότι η διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων αυξάνεται ανάλογα με την πυκνότητα των κόμβων. Για παράδειγμα, μία αύξηση της πυκνότητας των κόμβων κατά τέσσερις φορές οδηγεί σε μία αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου από τρεις μέχρι έξι φορές και αυτό εξαρτάται από τη μορφή ή το σχέδιο της κινητικότητας (mobility pattern). Συμπερασματικά, αυτό το πρωτόκολλο συμπεριφέρεται τουλάχιστον το ίδιο καλά όπως ένα κανονικό ad hoc πρωτόκολλο δρομολόγησης, όσον αφορά τη χρονική καθυστέρηση (latency) και την απώλεια πακέτων (packet loss) και αυξάνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου με την εξοικονόμηση ενέργειας.

Το GAF μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ιεραρχικό πρωτόκολλο (hierarchical protocol), όπου οι συστοιχίες βασίζονται στη γεωγραφική θέση, παρόλο που είναι ένας αλγόριθμος δρομολόγησης ενημερωμένος από άποψη κατανάλωσης ισχύος βασισμένος στη θέση.

4.3.3.8 Adaptive Energy-Conserving Routing for Multi-hop Ad Hoc Networks

Το σχήμα με γενικό τίτλο “*Adaptive Energy-Conserving Routing for multi-hop ad hoc networks*” (AdECoR) [112], παρουσιάζει δύο αλγόριθμους δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα ad hoc με περιορισμούς σε θέματα ενέργειας (energy-constrained). Οι κόμβοι που “τρέχουν” (running) αυτούς τους αλγόριθμους μπορούν να κάνουν κάποιο συμβιβασμό (trade-off) μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ποιότητας παράδοσης των δεδομένων (data delivery quality) σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι λειτουργούν πάνω από τα ήδη υπάρχοντα ad hoc πρωτόκολλα δρομολόγησης κατ’ απαίτηση (on-demand ad hoc routing protocols), όπως είναι το AODV και το DSR, χωρίς να υφίστανται καμία τροποποίηση τα κάτω από αυτά ευρισκόμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης (underlying routing protocols).

Στη συνέχεια περιγράφονται οι δύο πρωταρχικές συνεισφορές αυτού του σχήματος.

- *Πρώτη Συνεισφορά*: “Αλγόριθμοι οι οποίοι θέτουν εκτός λειτουργίας (turn off) τον πομποδέκτη (radio) προκειμένου να βελτιωθεί η κατανάλωση ενέργειας, με πληροφορίες που λαμβάνουν από το επίπεδο εφαρμογής (application-level information)”. Εδώ το κόστος από την τοποθέτηση του πομποδέκτη στην κατάσταση εκτός λειτουργίας είναι η πρόσθετη χρονική καθυστέρηση (latency) και η πιθανή απώλεια πακέτων, σε σύγκριση με τα μη τροποποιημένα πρωτόκολλα. Έτσι λοιπόν σχεδιάστηκε ένας αλγόριθμος εξοικονόμησης ενέργειας (energy-saving algorithm) ο οποίος προσπαθεί να φέρνει μία εξισορρόπηση ανάμεσα στη διατήρηση των διαθέσιμων ενεργειακών αποθεμάτων των κόμβων και στην ποιότητα της παράδοσης των δεδομένων.
- *Δεύτερη Συνεισφορά*: “Η χρήση της πυκνότητας ανάπτυξης των κόμβων (node deployment density) προκειμένου να επιτυγχάνεται προσαρμοστικά η ρύθμιση της αξιοπιστίας της δρομολόγησης”. Το γεγονός αυτό βασίζεται στην εξής παρατήρηση: Στα δίκτυα ad hoc, όπου οι κόμβοι έχουν αναπτυχθεί πυκνά μεταξύ τους (πράγμα που σημαίνει ότι πολλοί από αυτούς μπορούν να ακούσουν ο ένας τον άλλο), συμβαίνει μερικοί από αυτούς τους να είναι ανταλλάξιμοι (interchangeable) για σκοπούς δρομολόγησης. Σε αυτό εδώ το σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει αυτήν την πληροφορία για να αυξήσει ακόμη περισσότερο τους κύκλους δέσμευσης του κόμβου (node duty cycles) και να επιτύχει έτσι την επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου σαν σύνολο.

Οι Y. Xu, *et al.* [112] παρουσίασαν τα εξής αποτελέσματα:

- Οι δύο αλγόριθμοι εξοικονόμησης ενέργειας που προτείνουν καταναλώνουν μόνο το 50% της ενέργειας που καταναλώνει ένα μη τροποποιημένο ad hoc πρωτόκολλο δρομολόγησης με την ίδια χρονική διάρκεια.
 - Σε δίκτυα με σταθερά ενεργειακά αποθέματα (fixed energy budget) συμβαίνουν τα εξής: Όλα τα τυπικά δίκτυα καταναλώνουν την ενέργειά τους την ίδια χρονική στιγμή, ενώ το παρόν σχήμα, με την προσαρμόσιμη αξιοπιστία του, διατηρεί ζωντανό το δίκτυο κατά 50% περισσότερο, από ότι τα τυπικά δίκτυα, και μάλιστα ορισμένοι κόμβοι διατηρούνται ζωντανοί δύο φορές περισσότερο.
- *Σύγκριση Μεταξύ AdECoR και PAMAS*
- Το PAMAS προτείνει ένα πρωτόκολλο MAC το οποίο εξοικονομεί ενέργεια με το να θέτει εκτός λειτουργίας τον πομποδέκτη του προκειμένου να αποφύγει έτσι την κίνηση (cross-traffic) από την ακούσια ακρόαση (overhearing)
 - Το AdECoR λαμβάνει την πληροφόρηση από κάποιο επίπεδο που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο MAC προκειμένου να ελέγχει την ισχύ του πομποδέκτη. (Τα επίπεδα δρομολόγησης και εφαρμογής παρέχουν καλύτερη πληροφόρηση για το πότε δεν είναι απαραίτητη η χρήση του πομποδέκτη.
 - Το AdECoR μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας (turn-off) τον πομποδέκτη για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους με το να επιμηκύνει τα μεσοδιαστήματα ύπνου, επειδή οι κόμβοι είναι ανταλλάξιμοι για σκοπούς δρομολόγησης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση της σημαντικής ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της κατάστασης ύπνου.

4.3.3.9 Distributed Power Control in Ad Hoc Wireless Networks

Εισαγωγή:

Η τοπολογία ενός ad hoc ασύρματου δικτύου δεν είναι προκαθορισμένη και κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου χωρίς να απαιτείται η μεσολάβηση ενός κεντρικού σταθμού βάσης.

Στα ad hoc δίκτυα η τοπολογία μεταβάλλεται πολύ συχνά λόγω της συνεχούς κίνησης των κόμβων. Συστήματα τέτοιου είδους έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Δεν απαιτούν την ύπαρξη υποδομής για να μπορούν να λειτουργήσουν, ενώ μπορούν να επιλέγουν την καταλληλότερη διαδρομή ανάμεσα σε πολλές άλλες προκειμένου να επικοινωνούν με τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου [138]. Η κινητικότητα των κόμβων περιορίζει το μέγεθός τους και κατά συνέπεια τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους. Επομένως, η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί κλειδί στο σχεδιασμό των ad hoc δικτύων.

Στα ασύρματα δίκτυα το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο και πολύτιμο. Σε περίπτωση που γίνονται ταυτόχρονα πολλές μεταδόσεις μπορεί να δημιουργούνται παρεμβολές με αποτέλεσμα να μην αξιοποιείται σωστά το εύρος ζώνης και να μειώνεται η ρυθμαπόδοση.

Ο έλεγχος ισχύος είναι απαραίτητος για την εξασφάλιση της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων αλλά και για τη μη δημιουργία παρεμβολών. Με τη χρήση των κατάλληλων μηχανισμών ελέγχου ισχύος, ένας κόμβος έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ για να πραγματοποιήσει μία επιτυχημένη μετάδοση διασφαλίζοντας ότι δεν θα προκαλέσει παρεμβολές στους γειτονικούς του κόμβους, ενώ ταυτόχρονα θα εξοικονομηθεί πολύτιμη ενέργεια και εύρος ζώνης. Αντίθετα με τα κυψελωτά συστήματα όπου οι σταθμοί βάσης είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο ισχύος, στα ad hoc δίκτυα ο έλεγχος της ισχύος θα πρέπει να γίνεται με κατανεμημένο τρόπο.

Κατανεμημένος Έλεγχος Ισχύος στα Δίκτυα Ad hoc:

Εδώ παρουσιάζεται μία τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας η οποία λειτουργεί σε επίπεδο MAC. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται για τη μεταξύ δύο κόμβων επικοινωνία. Τα ad hoc δίκτυα μπορεί να αποτελούνται από κόμβους διαφορετικού τύπου, όμως, σχεδόν όλοι έχουν περιορισμένα αποθέματα ενέργειας που τις περισσότερες φορές δεν έχουν τη δυνατότητα να αναπληρώσουν. Ένας λοιπόν βασικός μηχανισμός για εξοικονόμηση ενέργειας σε επίπεδο MAC είναι και ο έλεγχος της ισχύος.

Έλεγχος Ισχύος

Στα κυψελωτά συστήματα ο σταθμός βάσης μπορεί να γνωρίζει, να ελέγχει αλλά και να ρυθμίζει την ισχύ μετάδοσης κάθε κινούμενου χρήστη αναλύοντας τις παραμέτρους του σήματος που λαμβάνει από τον καθένα.

Αντίθετα, στα ad hoc δίκτυα δεν υπάρχει σταθμός βάσης και συνεπώς δεν υπάρχει η δυνατότητα να γίνει κάτι ανάλογο. Επομένως ο έλεγχος της ισχύος σε τέτοιου είδους δίκτυα παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία και μπορεί να γίνεται μόνο με κατανεμημένο τρόπο.

- *IEEE 802.11 MAC Σύστημα Σηματοδοσίας*

Η προσθήκη ελέγχου ισχύος για πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης στα ad hoc ασύρματα δίκτυα έχει ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας η οποία μπορεί να υλοποιηθεί με τη μείωση της ισχύος μετάδοσης και την αποφυγή των παρεμβολών (οι αναμεταδόσεις κοστίζουν σε ενέργεια). Αυτό επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση του αλγόριθμου ισχύος στο IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο.

Οι προτεινόμενες τροποποιήσεις για τον έλεγχο ισχύος περιλαμβάνουν τη μεταφορά πρόσθετης πληροφορίας ελέγχου στα μηνύματα σηματοδοσίας που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο. Αυτές οι τροποποιήσεις είναι εφαρμόσιμες σε οποιοδήποτε ad hoc MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί σηματοδοσία παρόμοια με αυτή που ορίζεται στο πρότυπο του IEEE 802.11.

Το IEEE 802.11 MAC επίπεδο χρησιμοποιεί δύο βασικούς τύπους μηνυμάτων:

- Μηνύματα εκπομπής και
- Μηνύματα που προορίζονται για ένα συγκεκριμένο κόμβο ο οποίος βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια μετάδοσης.

Όταν το επίπεδο MAC ενός κόμβου παράγει ένα μήνυμα εκπομπής, που προορίζεται για όλους τους κόμβους που βρίσκονται μέσα στην εμβέλεια μετάδοσης, τότε ο κόμβος απλά μεταδίδει το μήνυμα χωρίς καμία πρόσθετη πληροφορία σηματοδοσίας.

Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να μεταδώσει κάποιο μήνυμα σε συγκεκριμένο κόμβο, τότε χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο σηματοδοσίας το οποίο περιλαμβάνει την ανταλλαγή τεσσάρων μηνυμάτων (RTS, CTS, DATA και ACK). Η ανταλλαγή των μηνυμάτων έχει ως σκοπό την ενημέρωση όλων ανεξαιρέτως των γειτονικών κόμβων ότι πρόκειται να πραγματοποιηθεί μία μετάδοση μεταξύ των δύο κόμβων και έτσι να αναβάλλουν οποιαδήποτε μετάδοση ώστε να μη δημιουργηθούν παρεμβολές.

- *Τροποποιήσεις για την Ενσωμάτωση του Ελέγχου Ισχύος*

Στο IEEE 802.11 MAC όλες οι μεταδόσεις γίνονται πάντοτε με την ίδια ισχύ. Εδώ, στον προτεινόμενο κυκλικό έλεγχο ισχύος επιτρέπεται η χρήση δέκα σταθμών (επιπέδων) ισχύος μετάδοσης. Αυτές οι στάθμες ισχύος λαμβάνουν τιμές οι οποίες ξεκινούν από την αρχική ισχύ μετάδοσης (μέγιστη) και φτάνουν μέχρι το 1/10 αυτής. Ο έλεγχος ισχύος επιλέγει κάθε φορά μία από αυτές τις δέκα τιμές για να πραγματοποιήσει τη μετάδοση.

Μία ακόμη τροποποίηση που γίνεται εδώ είναι η προσθήκη, στην επικεφαλίδα των μηνυμάτων CTS και DATA, ενός ακόμη πεδίου το οποίο περιέχει το κλάσμα της ισχύος του σήματος του τελευταίου μηνύματος που ελήφθη προς την ελάχιστη αποδεκτή ισχύ που πρέπει να έχει το σήμα που έλαβε. Όταν ο δέκτης λάβει ένα μήνυμα RTS τότε θα εισάγει στο αντίστοιχο πεδίο της επικεφαλίδας του μηνύματος CTS που θα στείλει, το κλάσμα της ισχύος του σήματος του μηνύματος RTS που έλαβε προς την ελάχιστη ισχύ του σήματος που είναι αποδεκτή από αυτόν.

Παρόμοια, όταν ο μεταδότης στείλει το μήνυμα DATA στην επικεφαλίδα του, τότε θα προσθέσει την ίδια πληροφορία όσον αφορά όμως το μήνυμα CTS που έλαβε. Με αυτόν τον τρόπο, κατά τη διάρκεια της ανταλλαγής των μηνυμάτων σηματοδοσίας (RTS-CTS-DATA-ACK), οι κόμβοι που επικοινωνούν θα ανταλλάξουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα των σημάτων που λαμβάνουν.

Το MAC επίπεδο κάθε κόμβου αποθηκεύει όλες τις παραπάνω πληροφορίες σε έναν πίνακα και για κάθε κόμβο με τον οποίο αυτός επικοινωνεί. Στον πίνακα αποθηκεύονται οι στάθμες ισχύος μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στην τρέχουσα επικοινωνία με κάθε κόμβο. Το *cf_pwr* πεδίο του πίνακα περιέχει το ιστορικό της ισχύος των λαμβανομένων σημάτων από όλους τους κόμβους. Το *dr_pwr* πεδίο περιέχει εκείνες τις τιμές του πεδίου *cf_pwr* για τις οποίες υπήρξαν απώλειες πακέτων. Επιπλέον στον πίνακα υπάρχει ένα πεδίο με ένα μετρητή για κάθε κόμβο ο οποίος φροντίζει, με σταθερό βήμα, να αυξάνει ή να μειώνει την ισχύ μετάδοσης ούτως ώστε να μην παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις.

Όταν επιθυμεί κάποιος να στείλει ένα μήνυμα σε έναν κόμβο αναζητεί το ID του κόμβου που περιέχεται στον πίνακα. Αν όμως δεν είναι καταχωρημένος, τότε δημιουργεί μία νέα εγγραφή και θέτει ως αρχική στάθμη μετάδοσης τη μέγιστη. Όταν λαμβάνεται ένα μήνυμα CTS ή DATA από ένα κόμβο τότε ενημερώνεται το *cf_pwr* πεδίο του πίνακα. Αν η τιμή στο πεδίο *cf_pwr* είναι μεγαλύτερη από το πεδίο *dr_pwr* τότε μειώνεται η ισχύς μετάδοσης κατά μία στάθμη εκτός και αν το πεδίο του μετρητή είναι μη μηδενικό. Όταν εκπνεύσει ο χρόνος μετάδοσης ενός μηνύματος CTS, DATA ή ACK τότε αυξάνεται η στάθμη μετάδοσης κατά μία μονάδα και στη συνέχεια ενημερώνεται το πεδίο *dr_pwr*. Η τιμή του μετρητή τίθεται στο 10. Αυτό διασφαλίζει ότι για τις επόμενες 10 μεταδόσεις δεν θα μειωθεί η στάθμη της ισχύος μετάδοσης.

Βασικός στόχος του εν λόγω αλγόριθμου είναι να υπολογίσει την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης για κάθε κόμβο προς κάθε γειτονικό του. Ξεκινώντας με μία αρχική στάθμη μετάδοσης, και μέσα από την ανταλλαγή μηνυμάτων, το επίπεδο MAC μπορεί να μεταβάλλει την ισχύ μετάδοσης μέχρι να βρει τη βέλτιστη δυνατή η οποία θα είναι αρκετή για να εξασφαλίσει ότι η μετάδοση θα είναι επιτυχής ενώ ταυτόχρονα θα εξοικονομείται ενέργεια.

Συμπεράσματα

Τα ασύρματα δίκτυα ad hoc θα χρησιμοποιούνται σε καταστάσεις όπου οι κόμβοι δεν θα έχουν πρόσβαση σε πηγές ενέργειας. Οι κόμβοι μπορεί να διαφέρουν σε μέγεθος αλλά οι περισσότεροι θα έχουν μικρό μέγεθος και επομένως περιορισμένη ενέργεια. Ένα σημαντικό μέρος της διαθέσιμης ενέργειας των κόμβων χρησιμοποιείται για την επικοινωνία των κόμβων. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να βρεθούν αλγόριθμοι οι οποίοι θα ελαχιστοποιούν την ενέργεια που καταναλώνεται για αυτήν τη λειτουργία. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας στα δίκτυα ad hoc. Ο έλεγχος ισχύος σε επίπεδο MAC επιλέγει την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους γειτονικών κόμβων.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν φαίνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει την κατανάλωση ενέργειας κατά ένα ποσοστό 10-20% και αυξάνει τη ρυθμικόδοση του δικτύου κατά 15% σε σχέση πάντοτε με το IEEE 802.11 χωρίς έλεγχο ισχύος.

4.3.4 Σχήματα Κορμού Coarse-Grain Μηχανισμών Ελέγχου Ισχύος

4.3.4.1 An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad-Hoc Wireless Sensor Networks (SPAN)

Το σχήμα “*SPAN: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad-hoc wireless sensor networks*” [116] είναι μία ακόμη τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας η οποία απευθύνεται στα πολλαπλών βημάτων (multihop) ad hoc ασύρματα δίκτυα. Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τη συνδεσιμότητα του δικτύου.

Το SPAN είναι ένα πολύ κοινό coarse-grain σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας το οποίο χρησιμοποιεί τον κορμό (backbone) του δικτύου για τη διευκόλυνση της δρομολόγησης. Τροποποιεί επίσης το ad hoc 802.11 πρωτόκολλο εξοικονόμησης ενέργειας και το χρησιμοποιεί προκειμένου να επιμηκύνει τη διάρκεια ύπνου (sleeping interval) ώστε να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη διάρκεια ενός πλαισίου εκπομπής MAC. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνει τη μείωση της πιθανότητας για απώλεια πακέτων και για χρονική καθυστέρηση.

Το SPAN βασίζεται κυρίως στην ακόλουθη παρατήρηση: “Όταν κάποια περιοχή ενός ασύρματου δικτύου με μοιραζόμενο κανάλι ή κοινό (shared-channel) διαθέτει μία επαρκή πυκνότητα κόμβων, μόνο ένας πολύ λίγος από αυτούς θα πρέπει να είναι ενεργοί ή σε κατάσταση λειτουργίας (ON), οποιαδήποτε χρονική στιγμή, για να προωθήσουν την κίνηση (forward traffic), εφόσον πρόκειται για ενεργές συνδέσεις”.

Το SPAN είναι ένας κατανεμημένος (distributed) πιθανοτικός (randomized) αλγόριθμος, όπου όλοι οι κόμβοι αποφασίζουν σε τοπικό επίπεδο για το αν θα κοιμηθούν, ή θα προσχωρήσουν σε κάποιο δίκτυο κορμού προώθησης μηνυμάτων (forwarding backbone) ως συντονιστές (coordinators). Κάθε κόμβος βασίζει την απόφασή του σε κάποιο υπολογισμό που κάνει προκειμένου να διαπιστώσει πόσοι από τους γείτονές του θα επωφεληθούν από την απόφασή του να παραμείνουν ξύπνιοι (awake) και πόση από την ενέργεια μπορεί να διατεθεί σε αυτόν. Με τη χρήση του SPAN, η διάρκεια ζωής του δικτύου αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος [μη ενεργός (idle)/σε κατάσταση ύπνου (sleep)] κατανάλωσης ενέργειας, και καθώς αυξάνεται η πυκνότητα του δικτύου.

Ο B. Chen *et al.* [116] απέδειξαν ότι το SPAN βελτιώνει την επικοινωνία, τη χρονική καθυστέρηση (latency), τη δυναμικότητα ή χωρητικότητα (capacity) του δικτύου, καθώς και τη διάρκεια ζωής του συστήματος όταν εκτελείται (run) σε συνεργασία με το IEEE 802.11 power-saving mode (που αναφέρεται σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας).

➤ Σύγκριση Μεταξύ SPAN και GAF

Οι στόχοι του GAF [111] είναι παρόμοιοι με αυτούς του SPAN.

Στο GAF, οι κόμβοι χρησιμοποιούν πληροφορίες σχετικές με τη γεωγραφική θέση προκειμένου να χωρίσουν τον κόσμο σε σταθερά τετραγωνικά δικτυακά πλέγματα (fixed square grids). Το μέγεθος του κάθε δικτύου παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από την πυκνότητα των κόμβων του. Οι κόμβοι μέσα σε ένα οποιοδήποτε δίκτυο έχουν τη δυνατότητα να μεταπηδούν (switch) από την κατάσταση ύπνου στην κατάσταση ακρόασης (sleeping/listening, με την εγγύηση ότι ένας τουλάχιστον κόμβος παραμένει ξύπνιος στο δίκτυο για να δρομολογεί πακέτα.

Το SPAN διαφέρει από το GAF στα εξής σημεία:

- Αντίθετα από το GAF, το SPAN δεν απαιτεί από τους κόμβους του να γνωρίζουν τη γεωγραφική τους θέση. Αντί για αυτό, χρησιμοποιεί μηνύματα εκπομπής (broadcast messages) για να ανακαλύψει και να αντιδρά σε μεταβολές της τοπολογίας του δικτύου.

- Το SPAN μπορεί να ενσωματωθεί άριστα σε ένα πλαίσιο με το IEEE 802.11 (που αναφέρεται σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας): “Οι κόμβοι που δεν είναι συντονιστές (non-coordinator nodes) μπορούν κάλλιστα να λαμβάνουν πακέτα εφόσον λειτουργούν σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας”.

➤ *Σύγκριση Μεταξύ SPAN και PAMAS*

Το πρωτόκολλο PAMAS [108] θέτει εκτός λειτουργίας τον πομποδέκτη του κόμβου όταν αντληφθεί (overhear) ότι κάποιο πακέτο δεν απευθύνεται προς αυτόν. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για πομποδέκτες στους οποίους η επεξεργασία ενός λαμβανομένου πακέτου κοστίζει πιο ακριβιά από το να ακροάζεται ένα άδειο (μη ενεργό - idle) ασύρματο μέσο μετάδοσης.

Το SPAN θέτει ως προϋπόθεση την παρουσία ενός ad hoc μηχανισμού polling, όπως αυτόν που παρέχεται από το IEEE802.11, και θα μπορούσε ενδεχομένως να συνεργαστεί με υποδείξεις εφαρμογών (application hints). Αυτές οι υποδείξεις θα είχαν εφαρμογή μόνο σε κόμβους που βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου (sleeping modes), και όχι σε κόμβους συντονιστές.

➤ *Σύγκριση Μεταξύ SPAN και AdECOR*

Στο AdECOR (*Adaptive Energy-Conserving Routing for multi-hop ad-hoc networks*) [112], ο κάθε κόμβος κρατάει αρχείο του αριθμού των κόμβων που βρίσκονται μέσα στην ασύρματη εμβέλεια και έχουν ληφθεί από την ακρόασή των εκπομπών που γίνονται στο κανάλι. Ένας κόμβος μπορεί να μεταπηδά από την κατάσταση ύπνου στην κατάσταση ακρόασης (sleeping/listening), με τυχαία επιλογή του αριθμού της χρονικής διάρκειας ύπνου, που θα είναι ανάλογος προς τον αριθμό των κοντινών κόμβων.

Το καθαρό αποτέλεσμα (net effect) είναι ότι ο αριθμός των κόμβων που βρίσκονται σε ακρόαση είναι χονδρικά σταθερός, ανεξάρτητα από την πυκνότητα των κόμβων, (μπορεί να εξοικονομηθεί περισσότερη ενέργεια καθώς αυξάνει η πυκνότητα).

Οι σταθερές (constants) του AdECOR επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σχηματισμού ενός συνδεδεμένου γραφήματος από τους υπό ακρόαση κόμβους.

Ένας κόμβος AdECOR ποτέ δεν γνωρίζει εάν απαιτείται να ακούει (listen) προκειμένου να συντηρεί τη συνδεσιμότητα του δικτύου, και ως εκ τούτου να είναι συντηρητικός. Το AdECOR έχει την τάση να υποχρεώνει τους κόμβους να ακούνε και όταν ακόμη θα μπορούσαν να βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου.

Το SPAN διαφέρει από το AdECOR στα ακόλουθα σημεία:

- Το SPAN ποτέ δεν κρατάει ξύπνιο έναν κόμβο, εκτός και αν είναι απολύτως αναγκαίο προκειμένου να συνδέσει μεταξύ τους δύο γειτονικούς κόμβους.
- Το SPAN επιχειρεί ρητά να διατηρεί την ίδια ολική δυναμικότητα στο σύστημα όπως το εν δυνάμει δίκτυο (underlying network) όπου όλοι οι κόμβοι είναι ξύπνιοι (awake), πράγμα το οποίο διασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξει αύξηση της συμφόρησης (congestion).

➤ *Σύγκριση Μεταξύ SPAN και ADPM*

Το ADPM (*Application-Driven Power Management for mobile communication*) [110] είναι ένα σύστημα στο οποίο οι κινητές μονάδες ξυπνούν περιοδικά και ερωτούν (poll) το σταθμό βάσης για νέο-αφιχθέντα (newly-arrived) πακέτα.

Το SPAN θέτει ως προϋπόθεση την παρουσία ενός ad hoc μηχανισμού polling, όπως αυτόν που παρέχεται από το IEEE802.11, και θα μπορούσε ενδεχομένως να συνεργαστεί με υποδείξεις εφαρμογών (application hints).

4.4 Σχήματα Ενεργών Μηχανισμών Ελέγχου και Διατήρησης της Ισχύος

Σε αυτή τη θεματική ενότητα επιχειρείται η μελέτη των πλέον κοινών σχημάτων ενεργών μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος (active power control mechanisms) που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η μελέτη αυτή βασίζεται στην ταξινόμηση των μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος που έχει ήδη αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου και επικεντρώνεται μόνο σε πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία είναι ενημερωμένα από την άποψη της καταναλισκομένης ισχύος.

4.4.1 Σχήματα Επιπέδου MAC

Ακολουθεί η περιγραφή των επικρατέστερων σχημάτων σε επίπεδο MAC.

4.4.1.1 Multiple-Access with Collision Avoidance (MACA)

Το πρωτόκολλο MACA ("*Multiple Access with Collision Avoidance*") [127] είναι ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα πρόσβασης στο κανάλι (channel-access protocols) και αναπτύχθηκε για χρήση στα δίκτυα ad hoc.

Προτάθηκε για να δώσει λύση στα προβλήματα του *Κρυμμένου Κόμβου* (hidden node) και του *Εκθετου Κόμβου* (exposed node) και εκτός αυτού να διασφαλίσει τη δυνατότητα εκτέλεσης ελέγχου της εκπεμπόμενης ισχύος ανά πλαίσιο.

Το MACA δε χρησιμοποιεί ανίχνευση του φέροντος (carrier sensing). Υιοθετεί μία χειραψία τριών επιπέδων, την RTS/CTS/DATA (Request To Send/Clear To Send/DATA). Βασίζεται στην ανταλλαγή RTS/CTS. Ο σταθμός αφετηρία (source station) εκπέμπει ένα πλαίσιο RTS προς το σταθμό προορισμού (destination station) με αίτημα εκπομπής (request of transmission). Εφόσον ο προορισμός λάβει σωστά το πλαίσιο RTS, τότε θα προχωρήσει στην αποδοχή της εκπομπής με το να στείλει πίσω ένα πλαίσιο CTS. Όταν ένας κινητός κόμβος ακροάζεται (overhears) κάποια πλαίσια RTS/CTS, τα οποία ανταποκρίνονται σε εκπομπές άλλων κόμβων, τότε δε χρειάζεται να παραμείνει τελείως σιωπηλός (silent). Μπορεί να επικοινωνεί με άλλους γειτονικούς κόμβους με χαμηλότερη ισχύ εκπομπής [99]. Εκτός αυτού, οι σταθμοί που ακούνε (άθελά τους) τα πλαίσια RTS ή CTS τους επιβάλλεται να φτιάξουν αργότερα ένα νέο χρονοδιάγραμμα (scheduling) με τις δικές τους εκπομπές προκειμένου να εμποδίσουν τη σύγκρουση των πλαισίων. Η επανάκτηση (recovery) των συγκρούσεων επαφίεται τώρα στο στρώμα μεταφοράς, οπότε με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (throughput) [139] και κατά συνέπεια η κατανάλωση ισχύος.

4.4.1.2 Multiple-Access with Collision Avoidance Wireless (MACAW)

Το πρωτόκολλο MACAW ("*Multiple-Access with Collision Avoidance Wireless*") [126] είναι ένα ακόμη παράγωγο του πρωτοκόλλου CSMA/CA το οποίο χρησιμοποιεί τη σηματοδότηση χειραψίας (handshake signaling) RTS/CTS/DS/DATA/ACK. Αποτελεί μία τροποποιημένη έκδοση (modified version) του πρωτοκόλλου MACA στο οποίο έχουν προστεθεί οι αναγνωρίσεις λήψης (ACKs - acknowledgements) του επιπέδου ζεύξης (link layer). Σύμφωνα με αυτό το πρωτόκολλο, ένας οποιοσδήποτε κόμβος αποστολέας (sender) έχει τη δυνατότητα να ξαναστείλει (retransmit) ένα πακέτο το οποίο δεν ελήφθη επιτυχώς από το δέκτη.

Αυτό το σχήμα, με επιβεβαίωση λήψης, βελτιώνει σημαντικά την αξιοπιστία μιας ασύρματης ζεύξης και αποφεύγει το μεγάλο κόστος ανάκτησης δεδομένων (long recovery cost) από το υπερκείμενο επίπεδο μεταφοράς (upper transport layer), οπότε με αυτόν τον τρόπο καταναλώνει λιγότερη ενέργεια για την αποστολή ενός πακέτου.

4.4.1.3 Floor Acquisition Multiple Access (FAMA)

Το πρωτόκολλο FAMA (*“Floor Acquisition Multiple Access protocol”*) [130] διαθέτει σηματοδότηση χειραψίας (handshake signaling) RTS/CTS/DATA, όπως και το MACA. Βασική του ιδέα είναι ότι θα πρέπει ο σταθμός να αποκτήσει ένα κανάλι πριν από την εκπομπή των δεδομένων. Ένας από τους τρόπους για την απόκτηση του καναλιού είναι μέσα από την ανταλλαγή των μηνυμάτων RTS/CTS.

Το πρότυπο IEEE 802.11 για τα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας (wireless LANs) περιλαμβάνει την αποφυγή των συγκρούσεων των πρωτοκόλλων MACA και MACAW. Επιπλέον, όλη η κατευθυνόμενη κίνηση (directed traffic) χρησιμοποιεί θετικές αναγνωρίσεις λήψεων (positive ACKs), όπως ακριβώς και το MACAW.

Το πρωτόκολλο PAMAS βασίστηκε στα πρωτόκολλα MACA, MACAW και FAMA για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας.

4.4.1.4 Intelligent Medium Access for Mobile Ad-Hoc Networks with Busy Tones and Power Control

Ένα από τα σημαντικότερα θέματα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές που ασχολούνται με τα κινητά ad hoc δίκτυα (MANETs) είναι η εξεύρεση ενός τρόπου για να αυξηθεί η χρήση του καναλιού μετάδοσης αποφεύγοντας ταυτόχρονα τα προβλήματα που σχετίζονται με τα κρυμμένα και τα εκτεθειμένα τερματικά (hidden and exposed terminals). Όμως, παρόλα αυτά, όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι πολύ μεγάλη τότε υπάρχει πιθανότητα 60% να χαθεί ένα πακέτο εξαιτίας της απώλειας των μηνυμάτων RTS/CTS. Αυτό το πρόβλημα είναι αρκετά σοβαρό και γίνεται ακόμη πιο σοβαρό όταν η καθυστέρηση διάδοσης και η καθυστέρησης μετάδοσης είναι μεγάλες. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται η χρήση ενός μηχανισμού ο οποίος είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του φέροντος και ονομάζεται “busy tones”. Αυτός ο μηχανισμός προσπαθεί να προστατεύσει τις τρέχουσες μεταδόσεις από κινούμενους κόμβους οι οποίοι αγνοούν τα μηνύματα RTS/CTS που έχουν ήδη ανταλλάξει. Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατόν να διπλασιαστεί η χρήση του καναλιού.

Σε αυτή τη θεματική ενότητα ο S. L. Wu *et al.* προτείνουν ένα νέο MAC πρωτόκολλο, με τίτλο *“Intelligent Medium Access (IMA) for mobile ad-hoc networks with busy tones and power control”* [140], το οποίο συνδυάζει τους μηχανισμούς ελέγχου ισχύος, ανταλλαγής μηνυμάτων RTS/CTS και busy tones. Αποτελεί το συνδυασμό του ελέγχου ισχύος με τα πρωτόκολλα που είναι βασισμένα στα RTS/CTS και στο busy tone, με σκοπό την παραπέρα αύξηση της χρήσης του καναλιού. Εδώ έχει καταβληθεί προσπάθεια ώστε να εισάγουν την ιδέα του ελέγχου ισχύος στο πρόβλημα της πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης (medium access) σε ένα MANET [128,129].

Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιηθεί η ανταλλαγή πακέτων RTS/CTS μεταξύ δύο κόμβων που επιθυμούν να επικοινωνήσουν προκειμένου να υπολογισθεί η μεταξύ τους σχετική απόσταση. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη ρύθμιση της ισχύος με την οποία ο κάθε κόμβος θα μεταδίδει τα πακέτα του. Η χρήση χαμηλότερης ισχύος μπορεί να αυξήσει την επαναχρησιμοποίηση του καναλιού (channel reuse), με συνέπεια την καλύτερη χρήση και εκμετάλλευση του καναλιού (channel utilization). Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται η πολύτιμη ενέργεια της μπαταρίας των ασύρματων κινητών ή σταθερών (mobile or immobile) αισθητήριων κόμβων και μειώνεται η ομοδιαλυκή παρεμβολή (co-channel interference) μεταξύ των γειτονικών κόμβων.

Για τον εντοπισμό της θέσης ενός κινούμενου κόμβου από έναν άλλο υπάρχουν οι εξής δύο βασικοί τρόποι:

- *Πρώτος Τρόπος*: Με χρήση του GPS που μπορεί να γίνει με σχετικά χαμηλό κόστος.
- *Δεύτερος Τρόπος*: (Είναι αυτός που χρησιμοποιείται σε αυτό το σχήμα). Είναι ο υπολογισμός της μεταξύ των κόμβων απόστασης με βάση την ισχύ των σημάτων RTS/CTS μηνυμάτων που λαμβάνει ο κάθε κόμβος.

Ακολουθεί η ανάλυση του πρωτοκόλλου RTS/CTS με χρήση busy tones.

➤ *Πρωτόκολλο RTS/CTS με Χρήση Busy Tones*

Όπως ήδη διαπιστώθηκε από τα όσα μέχρι στιγμής έχουν αναφερθεί, τα πρωτόκολλα MAC που βασίζονται στην ανταλλαγή μηνυμάτων RTS/CTS μπορούν να επιλύσουν κάλλιστα το πρόβλημα των κρυμμένων ή εκτεθειμένων τερματικών. Όμως όταν η χρονική καθυστέρηση διάδοσης και μετάδοσης είναι μεγάλη, τότε καταστρέφονται τα πακέτα CTS οπότε υπάρχει απώλεια δεδομένων.

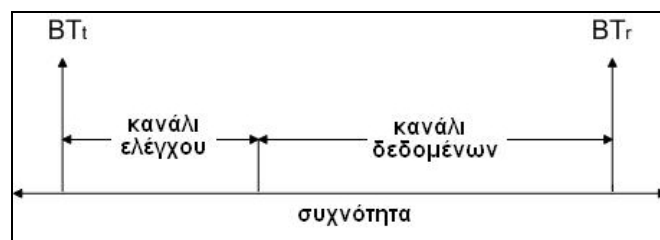
Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, αλλά και για την ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικής ενέργειας, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο DBTMA (*Dual Busy Tone Multiple Access – πολλαπλή πρόσβαση μέσω με διπλό τόνο κατειλημμένου*) [128,129]. Σύμφωνα με αυτό, το κοινό κανάλι μετάδοσης χωρίζεται σε δύο δευτερεύοντα κανάλια (sub-channels):

- Το Κανάλι Δεδομένων (data channel) και
- Το Κανάλι Ελέγχου (control channel)

Το κανάλι δεδομένων χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων, ενώ το κανάλι ελέγχου χρησιμοποιείται για τη μετάδοση διαλόγων RTS/CTS.

Η βασική ιδέα είναι να συντονιστεί η στάθμη ισχύος του κάθε μεταδότη με τον πλέον κατάλληλο τρόπο, ώστε όλα τα ζεύγη επικοινωνίας (communication pairs) να συνυπάρχουν χωρίς να παρεμβάλλεται το ένα στο άλλο. Η ισχύς ελέγχου ενσωματώνεται στο αρχικό πρωτόκολλο (original protocol) το οποίο ακολουθεί δύο βασικούς κανόνες:

- Τα πακέτα δεδομένων (data packets) και ο τόνος κατειλημμένου μετάδοσης BTt (transmission Busy Tone) εκπέμπονται με ισχύ ελέγχου η οποία βασίζεται στη στάθμη ισχύος του λαμβανομένου μηνύματος CTS.
- Τα πακέτα CTS και ο τόνος κατειλημμένου λήψης BTr (receiver Busy Tone) εκπέμπονται με τη μέγιστη στάθμη ισχύος, και το πακέτο RTS εκπέμπεται με στάθμη ισχύος που θα προσδιορισθεί με βάση το πόσο ισχυροί είναι οι τόνοι BTt γύρω από τον αιτούντα host.



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα ζωνών συχνοτήτων busy tones: BTt και BTr του DBTMA

Συνεπώς, εκτός από το κανάλι μετάδοσης και το κανάλι ελέγχου χρησιμοποιούνται ακόμη δύο στενές ζώνες συχνοτήτων busy tones, η transmit Busy Tone (BTt) και η receive Busy Tone (BTr), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-8.

Ο σκοπός των BT σημάτων είναι να δώσουν στους μεταδότες δυνατότητες παρόμοιες με αυτήν της ανίχνευσης φέροντος.

- Το σήμα BTt χρησιμοποιείται για να δείξει ότι κάποιο τερματικό πραγματοποιεί μετάδοση, ενώ
- Το σήμα BTg χρησιμοποιείται για να δείξει ότι κάποιο τερματικό λαμβάνει μία μετάδοση.

Ένας κόμβος πομπός οφείλει να στέλνει ένα σήμα BTt για όσο χρόνο μεταδίδει, ενώ ένας κόμβος δέκτης οφείλει να στέλνει ένα σήμα BTg με το που θα στείλει το μήνυμα CTS στον πομπό και για όσο χρόνο λαμβάνει δεδομένα από αυτόν.

Όταν ένας κόμβος επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα RTS θα πρέπει προηγουμένως να ελέγξει εάν κάποιος άλλος κόμβος στέλνει σήμα BTt την ίδια εκείνη χρονική στιγμή. Αντίστροφα, πριν απαντήσει ένας κόμβος στο μήνυμα RTS με ένα μήνυμα CTS, θα πρέπει πριν από όλα να ελέγξει εάν κάποιος κόμβος έχει στείλει ένα σήμα BTt.

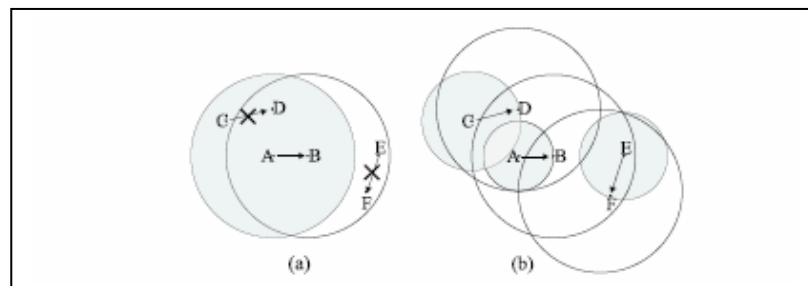
Συμπερασματικά, και πάρα πολύ συνοπτικά, το πρωτόκολλο DBTMA χρησιμοποιεί έναν απλούστατο κανόνα, τον εξής:

Ένας κόμβος δεν θα πρέπει να μεταδίδει τη στιγμή που ανιχνεύει σήμα BTt, και δεν θα πρέπει επίσης να λαμβάνει καμία μετάδοση τη στιγμή που ανιχνεύει σήμα BTt.

➤ *Ενσωμάτωση Μηχανισμού για τον Έλεγχο Ισχύος στο Πρωτόκολλο DBTMA*

Σε αυτήν εδώ την ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει ενσωμάτωση ενός μηχανισμού ελέγχου ισχύος στο πρωτόκολλο DBTMA. Η επαναχρησιμοποίηση του καναλιού μπορεί να αυξηθεί εάν χρησιμοποιηθεί μικρότερη ισχύς μετάδοσης.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4-9. (α) διακρίνεται η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων A και B. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων C και D δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα επειδή ο D ανιχνεύει το σήμα BTt του A και έτσι λαμβάνει την απόφαση να μη δεχτεί τη μετάδοση του C.



Σχήμα 4-9: Σενάρια Εκπομπής: (α) χωρίς έλεγχο ισχύος, και (β) με έλεγχο ισχύος

Σημείωση: Οι BTt απεικονίζονται με γκριζο χρώμα, ενώ οι BTg με λευκό.

Με παρόμοιο τρόπο, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων E και F δε μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα επειδή ο E ανιχνεύει το σήμα BTt του B. Όμως, παρόλα αυτά, όπως άλλωστε φαίνεται και στο Σχήμα 4.9 (β), εάν ρυθμιστεί κατάλληλα η ισχύς μετάδοσης του κάθε κόμβου τότε είναι πλέον δυνατή η ταυτόχρονη πραγματοποίηση όλων των μεταδόσεων.

Για να είναι όμως αυτό εφικτό, θα πρέπει ο κόμβος A να μεταδίδει τα δεδομένα του, καθώς και το σήμα BTt, με την ελάχιστη δυνατή ισχύ, ενώ αντίθετα, ο B θα πρέπει να μεταδίδει το σήμα BTg με τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Όταν ο C επιθυμεί να επικοινωνήσει με τον D, τότε ο C δεν ανιχνεύει κανένα σήμα BTt επομένως στέλνει ένα σήμα RTS στον D. Την ίδια ακριβώς χρονική στιγμή ο D δεν ανιχνεύει κανένα σήμα BTt επομένως στέλνει ένα μήνυμα CTS στον C. Εάν ο C ρυθμίσει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσής του, τότε η μετάδοση του C στον D δεν θα παρεμβάλλει τη μετάδοση του A στον B.

Ας δούμε τώρα και την επικοινωνία μεταξύ του E και του F. Ο E ανιχνεύει τη BTr συχνότητα του B. Ιδανικά, ο E θα όφειλε να στείλει ένα μήνυμα RTS στον F με ισχύ αρκετή για να φτάσει στον F αλλά όχι και στον B. Η βασική ιδέα είναι ότι η μετάδοση του πακέτου δεδομένων του E δεν θα πρέπει να παρεμβάλλει τον B όταν αυτός λαμβάνει δεδομένα. Ο κόμβος F θα απαντήσει με ένα μήνυμα CTS. Αυτό δε δημιουργεί κανένα πρόβλημα επειδή ο F δεν ανιχνεύει καμία συχνότητα BTr. Συνεπώς, μπορεί τώρα να ξεκινήσει η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων E και F.

Περίληπτική Ανασκόπηση των Κανόνων που Προτείνονται στο Πρωτόκολλο:

- Το πακέτο δεδομένων και το σήμα BTr μεταδίδονται με βάση την ισχύ λήψης του μηνύματος CTS.
- Το CTS και το BTr μεταδίδονται με την κανονική ισχύ.
- Το μήνυμα RTS μεταδίδεται με ισχύ η οποία εξαρτάται από το πόσο ισχυρά είναι τα σήματα BTr γύρω από τον κόμβο.

➤ *Επιλογή των Κατάλληλων Σταθμών Ισχύος*

Στην ενότητα αυτή θα δούμε με ποιο τρόπο το προτεινόμενο πρωτόκολλο επιλέγει την ισχύ με την οποία θα μεταδώσει ένα πακέτο δεδομένων ή ένα σήμα BT.

- *Ισχύς Μετάδοσης:* Κάθε κινητός κόμβος πρέπει να έχει τη δυνατότητα να επιλέγει την ισχύ με την οποία θα μεταδίδει τα πακέτα του. Η λειτουργία αυτή θα πρέπει να προσφέρεται από το φυσικό επίπεδο.
- *Ισχύς Σήματος:* Το φυσικό επίπεδο οφείλει να ενημερώνει το επίπεδο MAC για την ισχύ με την οποία λαμβάνει το κάθε πακέτο.

Ας υποθεθεί ότι ένας κόμβος πηγή (ή αφετηρία) μεταδίδει ένα πακέτο σε έναν κόμβο προορισμό. Έστω ότι P_t και P_r είναι οι στάθμες ισχύος μετάδοσης και λήψης του πακέτου από τον κόμβο πηγή και τον κόμβο προορισμό αντίστοιχα. Εδώ ισχύει η εξίσωση (4.24):

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n g_t g_r \quad (4.24)$$

Όπου: λ : το μήκος κύματος του φέροντος,

d : η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο πηγή και στον προορισμό,

n : η συνιστώσα της απώλειας διαδρομής,

g_r και g_t : οι ενισχύσεις της κεραίας στον πομπό και στο δέκτη αντίστοιχα.

Τα λ , g_r και g_t έχουν σταθερή τιμή σε κανονικές συνθήκες. Η τιμή του n είναι τυπικά ίση με 2 αλλά μπορεί να κυμαίνεται από 2 μέχρι 6, ανάλογα με τη φύση του φυσικού περιβάλλοντος (όπως, π.χ. κάθε είδους, εμπόδια, κτλ.).

Ένας σημαντικός παράγοντας στον οποίο βασίζεται το νέο πρωτόκολλο είναι ότι για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα οι τιμές d και n μπορούν να θεωρηθούν σταθερές. Αυτό κάνει εφικτή την επιλογή των κατάλληλων σταθμών ισχύος για τη μετάδοση πακέτων ακόμη και αν οι τιμές των d και n είναι άγνωστες. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος X μεταδίδει ένα πακέτο RTS με ισχύ P_t στον κόμβο Y ο οποίος το λαμβάνει με ισχύ P_r . Εάν ο Y επιθυμεί να απαντήσει στον X με ένα μήνυμα CTS και συγκεκριμένη στάθμη ισχύος P_{CTS} τέτοια ώστε η ισχύς λήψης στον X να είναι η μικρότερη δυνατή, έστω P_{MIN} , τότε:

$$P_{\min} = P_{CTS} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n g_t g_r \quad (4.25)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις (4.24) και (4.25) προκύπτει η ακόλουθη αναλογία:

$$\frac{P_{\min}}{P_r} = \frac{P_{CTS}}{P_t} \quad (4.26)$$

Έτσι το P_{CTS} μπορεί να υπολογιστεί ακόμη και αν τα d και n είναι άγνωστα.

➤ *Ενσωμάτωση του Ελέγχου Ισχύος στο Πρωτόκολλο DBTMA*

Εδώ εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η ενσωμάτωση του ελέγχου ισχύος στο πρωτόκολλο DBTMA. Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιηθεί η ανταλλαγή μηνυμάτων RTS/CTS προκειμένου να καθοριστεί η ισχύς μετάδοσης. Έστω:

- P_{MAX} : Η μέγιστη ισχύς μετάδοσης
- P_{MIN} : Η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης
- P_{NOISE} : Η στάθμη ισχύος κάτω από την οποία το λαμβανόμενο σήμα θεωρείται θόρυβος. Το P_{NOISE} θα πρέπει να είναι μικρότερο από το P_{MIN} .

Όταν ο κόμβος X επιθυμεί να στείλει ένα μήνυμα RTS στον κόμβο Y , τότε ο κόμβος X οφείλει κατ' αρχή να ανιχνεύσει εάν λαμβάνει κάποιο σήμα ΒΤr και στη συνέχεια να στείλει το μήνυμα RTS στο κανάλι ελέγχου με ισχύ P_x , οπότε εδώ διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- Εάν δεν υπάρχει κανένα σήμα ΒΤr τότε ισχύει: $X = P_{MAX}$, διαφορετικά,
- Εάν P_r είναι η στάθμη ισχύος του ισχυρότερου σήματος ΒΤr που λαμβάνεται, τότε θα πρέπει:

$$P_x = \frac{P_{\max} P_{noise}}{P_r} \quad (4.27)$$

Αυτό σημαίνει ότι το μήνυμα RTS δεν θα φτάσει μέχρι τον κοντινότερο κόμβο που εκείνη τη στιγμή βρίσκεται στη φάση λήψης δεδομένων. Το P_{max} χρησιμοποιείται στην εξίσωση (4.27) επειδή το σήμα ΒΤr μεταδίδεται πάντοτε με την ίδια ισχύ.

Ο κόμβος Y που λαμβάνει το μήνυμα RTS του X οφείλει να ανιχνεύσει εάν λαμβάνει ένα οποιοδήποτε σήμα ΒΤt. Εδώ διακρίνουμε και πάλι δύο περιπτώσεις:

- Εάν υπάρχει οποιοδήποτε σήμα ΒΤt, τότε ο κόμβος Y θα αγνοήσει το μήνυμα CTS για το λόγο ότι η αποστολή δεδομένων από τον X θα προκαλέσει συγκρούσεις, διαφορετικά,
- Ο κόμβος Y απαντά με ένα μήνυμα CTS με τη μέγιστη ισχύ P_{max} και εκπέμπει σήμα ΒΤr με τη μέγιστη ισχύ P_{max} .
- Ο κόμβος X , ο οποίος λαμβάνει το μήνυμα CTS του Y , μεταδίδει κατ' αρχήν ένα σήμα ΒΤt και στη συνέχεια μεταδίδει τα δεδομένα του με ισχύ:

$$P_x = \frac{P_{\max} P_{noise}}{P_r} \quad (4.28)$$

Όπου: P_r είναι η ισχύς με την οποία ο κόμβος X λαμβάνει το μήνυμα CTS.

Η ισχύς μετάδοσης P_x είναι η ελάχιστη που απαιτείται προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ο κόμβος Υ θα αποκωδικοποιήσει σωστά το πακέτο δεδομένων.

4.4.1.5 A Power Controlled Multiple-Access Protocol for Wireless Packet Networks

Το πρωτόκολλο PCMA (“*Power Controlled Multiple-Access for wireless packet networks*”) [141] επιτυγχάνει ασύρματη μετάδοση ελεγχόμενης ισχύος με ταυτόχρονη αποφυγή συγκρούσεων σε πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης.

Εστιάζεται σε ασύρματα δίκτυα ad hoc πολλαπλής πρόσβασης, όπου όλοι οι κόμβοι μοιράζονται το ίδιο κανάλι και δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός έλεγχος αλλά ούτε και έλεγχος ισχύος για την αύξηση της απόδοσης του καναλιού.

Ο στόχος του πρωτοκόλλου PCMA είναι η αξιολόγηση της επίδοσης των MAC πρωτοκόλλων με την επίτευξη πολλαπλής πρόσβασης ελεγχόμενης ισχύος μέσα στα πλαίσια εργασίας των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης που έχουν ως βάση το CSMA/CA. Τα στοιχεία που συνθέτουν τον αλγόριθμο PCMA είναι ένα προς ένα ανάλογα των στοιχείων εκείνων που συνθέτουν τα πρωτόκολλα των standard CSMA/CA [127].

Στον πομπό, το να παρακολουθεί κανείς (monitoring) το σήμα κατειλημμένου ισοδυναμεί με ανίχνευση του φέροντος.

Στο δέκτη, το να ανιχνεύει κανείς το σήμα κατειλημμένου ισοδυναμεί με αποστολή πακέτων CTS για την αποφυγή συγκρούσεων.

Εάν υποθεθεί ότι υπάρχει το ίδιο κέρδος και προς τις δύο κατευθύνσεις, τότε η ισχύς μετάδοσης για το πακέτο APTS (Acceptable-Power-To-Send – παραδεκτή ισχύς για αποστολή μηνυμάτων) υπολογίζεται από την εξίσωση (4.29).

$$P_{t_j} = \max\left\langle \frac{RX_Des}{G_{ij}}, \frac{SIR_Des \cdot P_n \cdot S_i}{G_{ij}} \right\rangle \quad (4.29)$$

Ο προορισμός της ισχύος θορύβου αντικαθίσταται εδώ με την ισχύ θορύβου της πηγής, η οποία εξάγεται από το πακέτο RPTS (Request-Power-To-Send).

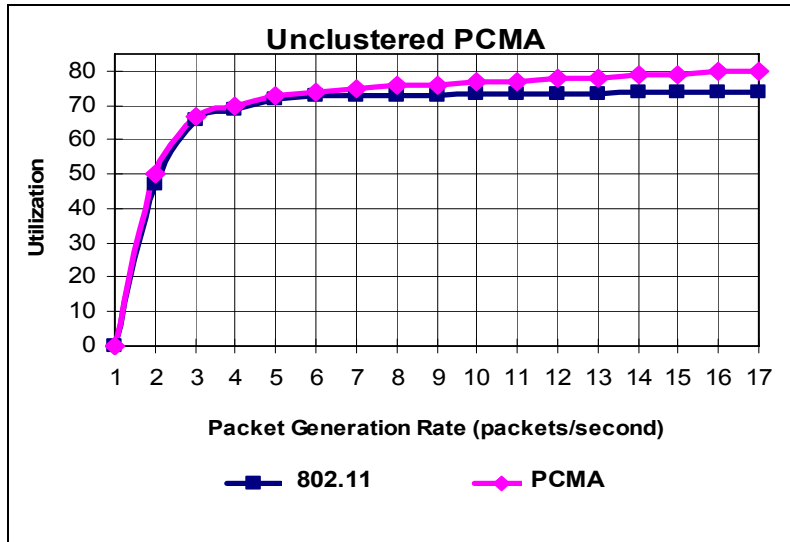
Η ρυθμαπόδοση κανονικοποιείται (normalized) από την εμβέλεια ανίχνευσης του φέροντος (π.χ. 550 m) και από το χρόνο θυρίδας (slot time) και κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο συνολικός αριθμός των αφίξεων και αναχωρήσεων να διαιρείται με ένα συντελεστή κλιμάκωσης sf (scaling factor), όπως παρακάτω (4.30):

$$sf = \frac{network_area}{carrier_range_area} \frac{1}{data_slot_size} \quad (4.30)$$

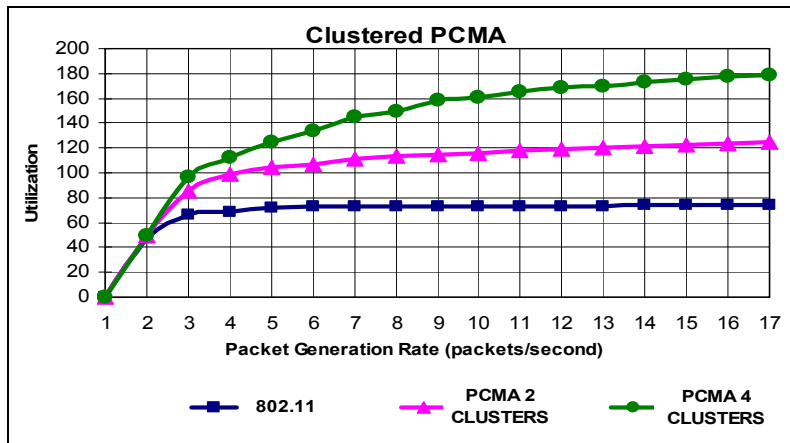
Ο J. Monks, *et al.* [141] απέδειξαν ότι η επίδοση του PCMA αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των παλμών του σήματος κατειλημμένου [100] πλησιάζοντας την επίδοση ενός ιδανικού πρωτοκόλλου ελεγχόμενης ισχύος (Ideal Power Controlled - IPC protocol).

➤ *Σύγκριση Μεταξύ PCMA Χωρίς Συστοιχίες και IEEE 802.11.*

Η επίδοση του πρωτοκόλλου PCMA είναι σημαντικά καλύτερη από αυτήν του πρωτοκόλλου IEEE 802.11. Η ταχύτητα δημιουργίας πακέτων (packet generation rate) αυξάνεται όσο το δίκτυο δημιουργεί περισσότερες συστοιχίες (becomes more clustered) και έτσι μπορούμε να έχουμε πολύ περισσότερες παράλληλες μεταδόσεις, και επιπλέον, λιγότεροι κόμβοι συναγωνίζονται μεταξύ τους μέσα στην ίδια συστοιχία.



Σχήμα 4-10: Χρήση καναλιού/ρυθμαπόδοση σε unclustered PCMA



Σχήμα 4-11: Χρήση καναλιού/ρυθμαπόδοση σε clustered PCMA

Το PCMA βελτιώνει σημαντικά τη συνολική χρήση του καναλιού (aggregate channel utilization) κατά ένα συντελεστή ίσο με το 2 συγκρινόμενο με το standard πρωτόκολλο IEEE 802.11.

Τα πακέτα ελέγχου και τα πακέτα δεδομένων πρέπει να μεταδίδονται με σταθερή ισχύ [100]. Όμως, η ρυθμιζόμενη μετάδοση των δεδομένων δεν έχει καμία επίπτωση στην αύξηση της επαναχρησιμοποίησης του καναλιού, και ισοδυναμεί με ένα «σταθερής ισχύος» πρωτόκολλο MAC.

Η σύγκριση που πραγματοποίησαν οι J. Monks, *et al.* [141] μεταξύ του IEEE 802.11 και του πρωτοκόλλου PCMA, δείχνει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 έχει την ίδια πιθανότητα να στείλει πακέτα σε προορισμούς σε οποιαδήποτε απόσταση επειδή δε λαμβάνεται υπόψη η ισχύς μετάδοσης κατά τη διάρκεια του ανταγωνισμού. Όμως, επειδή όλες οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται με σταθερό επίπεδο ισχύος, υπάρχει μικρότερη προστασία από τους θορύβους για προορισμούς που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από την πηγή με επακόλουθο την απώλεια μεγαλύτερου αριθμού πακέτων σε μεγαλύτερα φορτία του δικτύου.
- Το πρωτόκολλο PCMA, από την άλλη πλευρά, παρέχει τον ίδιο βαθμό προστασίας για προορισμούς οποιασδήποτε εμβέλειας. Η βασική ιδέα εδώ είναι η αύξηση των κατανομών

εμβέλειας με ταυτόχρονο περιορισμό των εμβελειών μετάδοσης στην ίδια απόσταση. Αυτός είναι τελικά και ο τρόπος για να αποδοθεί περισσότερη δικαιοσύνη στα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης ελεγχόμενης ισχύος.

- Σε πυκνά δίκτυα, με εκμετάλλευση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης (spatial reuse), το PCMA είναι περισσότερο αποδοτικό από το IEEE 802.11.

4.4.1.6 Power Adaptation for Starvation Avoidance to Deliver Wireless Multimedia

Εξαιτίας της απουσίας κεντρικού ελέγχου, το πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης, όπως ακριβώς χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα ad hoc, μπορεί να οδηγήσει σε μη ισορροπημένη χρήση του καναλιού μετάδοσης, όπου κάποιες ροές δεδομένων θα μονοπωλούν το κανάλι ενώ κάποιες άλλες θα το χρησιμοποιούν ελάχιστα ή καθόλου.

Ο “*Power Adaptation for Starvation Avoidance to deliver wireless multimedia*” (PASA) [142] είναι ένας αποτελεσματικός καταναμημένος μηχανισμός ελέγχου ισχύος που προσπαθεί να αντιμετωπίσει φαινόμενα αυτού του είδους και να εξασφαλίσει σε όλους τους κόμβους δίκαιη πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης. Αυτό το καταφέρνει με τη δυναμική ρύθμιση της ισχύος μετάδοσης του κάθε κόμβου ώστε κανένας κόμβος να μην υποφέρει από παρατεταμένη στέρηση πόρων. Είναι ένας απλός, αποτελεσματικός και αυτόνομος αλγόριθμος χωρίς επιβάρυνση μηνυμάτων ελέγχου (control message overhead).

Παρά τους όποιους μηχανισμούς αποφυγής συγκρούσεων που έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα στα ad hoc ασύρματα δίκτυα, το IEEE 802.11 δεν μπορεί να εξαλείψει πλήρως τις συγκρούσεις, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο κατάληψης του καναλιού (channel capture phenomenon), όπου το κοινό κανάλι μονοπωλείται από έναν ή λίγους κόμβους [143,144]. Η κατάληψη του καναλιού οδηγεί κάποιους κόμβους σε «ασιτία ή στέρηση πόρων» (starvation), μειώνοντας έτσι τη δικαιοσύνη ή την αμεροληψία (fairness) του δικτύου και τη ρυθμαπόδοση.

Το PASA προσαρμόζει δυναμικά την ισχύ μετάδοσης του κάθε κόμβου προκειμένου να σπάσει (break) την κατάληψη του καναλιού και να επιτύχει με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη χωρική επαναχρησιμοποίηση (spatial reuse), παρέχοντας έτσι σε όλους τους κόμβους δίκαιη πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης, ενώ τα περισσότερα από τα πρωτόκολλα που έχουν κατά καιρούς προταθεί εστιάζουν την προσοχή τους στη μετατροπή του MAC πρωτοκόλλου [145].

Ειδικότερα: Λόγω των υψηλών απαιτήσεων για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και της ευαίσθητης φύσης των πολυμέσων στη χρονική καθυστέρηση, η μετάδοση πολυμέσων με πρωτόκολλα μεταφοράς, όπως το TCP ή το UDP, δεν επιλύει προβλήματα σχετικά με τη ρυθμαπόδοση και τη δίκαιη κατανομή των πόρων. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το πρωτόκολλο MAC του IEEE 802.11, το DCF (Distributed Coordination Function) που χρησιμοποιείται και στα δίκτυα ad hoc, οδηγεί αρκετές φορές στην κατάληψη του καναλιού μετάδοσης από έναν ή από λίγους κόμβους. Το DCF βασίζεται στο CSMA/CA (πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή συγκρούσεων).

Για να είναι σε θέση ένας κόμβος να μεταδώσει δεδομένα, θα πρέπει πρωτίστως να πραγματοποιήσει τη λεγόμενη *τετραπλή χειραψία* (4-way handshake) η οποία περιλαμβάνει την ανταλλαγή τεσσάρων μηνυμάτων: RTS, CTS, DATA και ACK. Κατά τη διάρκεια της τετραπλής χειραψίας, ο κόμβος δεσμεύει το κανάλι και ενημερώνει ταυτόχρονα του υπόλοιπους κόμβους για τη χρονική διάρκεια που θα το χρησιμοποιήσει.

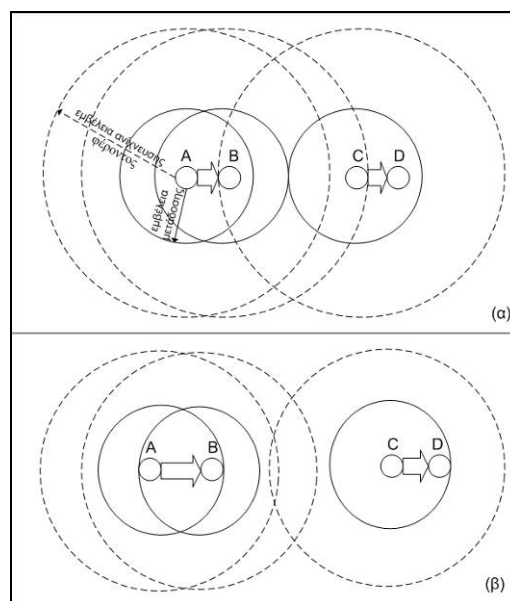
Παρά το μηχανισμό αποφυγής συγκρούσεων που ήδη αναφέρθηκε, το IEEE 802.11 δεν είναι σε θέση να διασφαλίσει ότι δεν θα υπάρξουν συγκρούσεις, πράγμα που θα μπορούσε να οδηγήσει στη δέσμευση του καναλιού μετάδοσης για μεγάλο χρονικό διάστημα και στη μονοπωλιακή χρήση του από έναν ή πολύ λίγους κόμβους. Αυτό γίνεται κυρίως στην περίπτωση που όλοι οι

κόμβοι του δικτύου μεταδίδουν με την ίδια μέγιστη ισχύ. Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική μείωση της ρυθμαπόδοσης και η άνιση κατανομή των πόρων.

Τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί μπορούν να αποδειχθούν με βάση την τοπολογία (Σχήμα 4-12α) όπου οι κόμβοι A και C στέλνουν πακέτα στους κόμβους B και D αντίστοιχα.

Η εμβέλεια του κάθε κόμβου απεικονίζεται στο σχήμα με συνεχή γραμμή, ενώ με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η εμβέλεια ανίχνευσης φέροντος, δηλαδή η απόσταση μέσα στην οποία ο κόμβος μπορεί να ελέγξει εάν το κανάλι είναι δεσμευμένο.

Σε αυτό το σενάριο, ο κόμβος C μπορεί να δεσμεύσει το κανάλι και να οδηγήσει τους κόμβους A και B σε παρατεταμένη στέρηση πόρων. Αυτό συμβαίνει για τον απλούστατο λόγο ότι ο κόμβος C βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια ανίχνευσης φέροντος του B αλλά όχι και του A. Επομένως, όταν ο κόμβος A μεταδίδει δεδομένα στον B, ο C το αγνοεί και θεωρεί ότι το κανάλι είναι ελεύθερο. Συνεπώς, εάν θα αρχίσει να μεταδίδει ο C τότε θα συγκρουστεί αναπόφευκτα με τον A ο οποίος μεταδίδει εκείνη τη στιγμή στον B. Μετά τη σύγκρουση οι κόμβοι A και B θα οπισθοχωρήσουν. Μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα ο A θα επαναλάβει τη μετάδοση. Όμως, είναι πάρα πολύ πιθανό να συγκρουστούν και πάλι για το λόγο ότι ο C εξακολουθεί να μεταδίδει στον D. Έτσι ο κόμβος A θα οπισθοχωρεί διαρκώς με αποτέλεσμα ο κόμβος C να έχει καταλάβει το κανάλι μετάδοσης, ενώ οι A και B θα οδηγούνται σε παρατεταμένη στέρηση πόρων. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι η ιδανική περίπτωση θα ήταν οι κόμβοι A και C να μεταδίδουν παράλληλα και εφόσον αυτό δεν είναι εφικτό, να έχουν τουλάχιστον τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν και οι δύο εναλλάξ το κανάλι μετάδοσης.

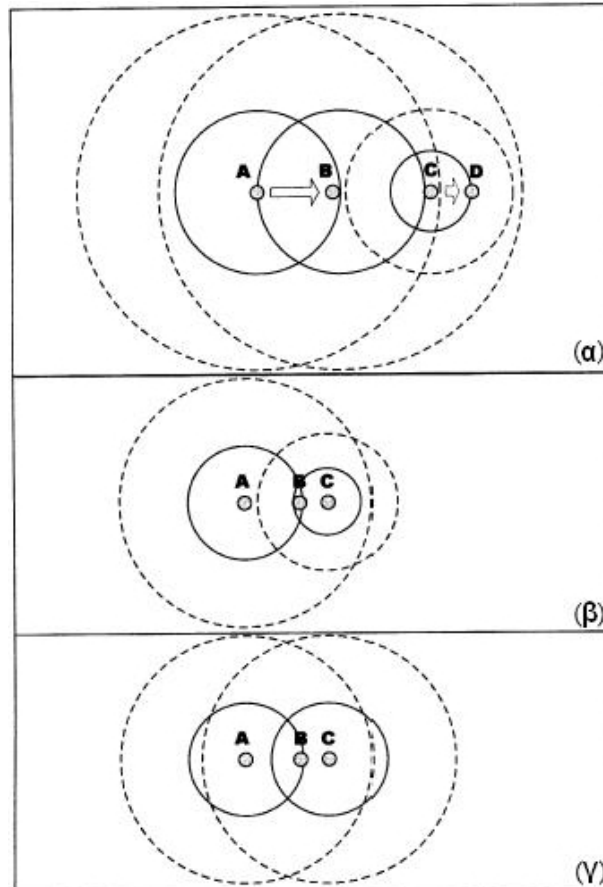


Σχήμα 4-12: Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 εισηγείται τη δέσμευση του καναλιού

Ερμηνεία του Σχήματος: (α) Τοπολογία δέσμευσης δέκτη και (β) Ο έλεγχος της ισχύος επιλύει το πρόβλημα της δέσμευσης του καναλιού.

Το πρόβλημα της δέσμευσης του καναλιού μετάδοσης από έναν κόμβο οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς μετάδοσης παραμένει συνεχώς σταθερή με αποτέλεσμα κάποιοι από τους κόμβους (π.χ. ο C) να μη μπορούν να ανιχνεύσουν τα πακέτα RTS που στέλνονται από άλλους κόμβους (π.χ. ο A στον B), ενώ κάποιοι άλλοι κόμβοι (π.χ. ο B) παραμένουν σιωπηλοί για το λόγο ότι θα ανιχνεύουν πάντοτε το φέρον σήμα αναμένοντας για δεδομένα. Εδώ θα πρέπει να παρατηρήσει κανείς ότι αν, για παράδειγμα, οι κόμβοι που μονοπωλούν το κανάλι μετάδοσης (δηλαδή ο C) ελάττωναν την ισχύ μετάδοσής τους, τότε και οι υπόλοιποι κόμβοι θα χρησιμοποιούσαν το

κανάλι μετάδοσης και έτσι θα υπήρχε μία δίκαιη κατανομή των πόρων στους κόμβους. Αυτό μπορεί να το διακρίνει κανείς στο Σχήμα 4-12β όπου υπάρχουν παράλληλα δύο μεταδόσεις πράγμα το οποίο συμβαίνει επειδή οι κόμβοι μεταδίδουν με την ελάχιστη δυνατή ισχύ που απαιτείται και η οποία καθορίζεται από τη μεταξύ τους απόσταση. Με αυτόν τον τρόπο διπλασιάζεται η ρυθμαπόδοση του συστήματος.



Σχήμα 4-13: Σενάρια κατάληψης του καναλιού σε διαφορετικές τοπολογίες

Ερμηνεία το Σχήματος: (α) Τοπολογία κατάληψης της πηγής., (β) Κατάληψη πηγής σε τοπολογία κρυμμένου τερματικού, και (γ) Κατάληψη ισχύος σε τοπολογία κρυμμένου τερματικού.

Ο αλγόριθμος PASA που προτείνεται για την επίλυση όλων των παραπάνω προβλημάτων έχει τις εξής ιδιότητες:

- *Είναι Απλός και Αποδοτικός.* Είναι ένας μηχανισμός ελέγχου ο οποίος λειτουργεί χωρίς επιβάρυνση με μηνύματα ελέγχου. Δεν απαιτεί παρέμβαση στο MAC ή σε άλλα επίπεδα.
- *Είναι Κατανεμημένος και Πλήρως Αυτόνομος.* Κάθε κόμβος στο δίκτυο έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει από μόνος του τη δική του ισχύ μετάδοσης.
- *Είναι Ενέλικτος.* Ο PASA μπορεί να επιλύσει προβλήματα παρατεταμένης στέρησης πόρων (starvation) σε πολλά σενάρια όπου υπάρχει δέσμευση (ή κατάληψη) του καναλιού και μπορεί να λειτουργήσει πάνω σε όλα τα πρωτόκολλα MAC. Μπορεί να εφαρμοστεί επίσης σε ασύρματα συστήματα NLOS (NonLine-Of-Sight) που έχουν σταθερές κεραίες ή σταθερούς σταθμούς βάσης.
- *Είναι Δίκαιος.* Ο PASA με δίκαιο τρόπο διανέμει το κανάλι μετάδοσης στους κόμβους που το διεκδικούν.

Στη συνέχεια θα διερευνηθεί για ποιους λόγους η χρήση στατικής ισχύος μετάδοσης οδηγεί στην κατάληψη του καναλιού και πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος PASA μπορεί να ξεπεράσει αυτά τα προβλήματα.

➤ *Έλεγχος της Στατικής Ισχύος και της Κατάληψης του Καναλιού*

Το πρόβλημα της κατάληψης του καναλιού που εμφανίζεται στην τοπολογία του Σχήματος 4-12 (α) μπορεί να ξεπεραστεί αν ελαττωθεί η ισχύς μετάδοσης και ως εκ τούτου η εμβέλεια ανίχνευσης του φέροντος. Παρόλα αυτά, αν χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη απαιτούμενη στατική ισχύς μετάδοσης από όλους τους κόμβους, μπορεί να έχουμε και πάλι κατάληψη του καναλιού μετάδοσης από λίγους κόμβους. Ένα τέτοιο σενάριο εξετάζεται στη συνέχεια.

Στο Σχήμα 4-13 (α) απεικονίζεται ένα δίκτυο ad hoc όπου ο κόμβος A μεταδίδει στον κόμβο B και ο κόμβος C μεταδίδει στον κόμβο D με την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ. Ο κόμβος C βρίσκεται στην εμβέλεια ανίχνευσης του φέροντος του A, αλλά όμως δεν ισχύει το αντίστροφο. Έτσι λοιπόν ο A μπορεί να εξακολουθεί να μεταδίδει στον B, του οποίου όμως οι αποκρίσεις πίσω στον A συγκρούονται με τον C ο οποίος δε γνωρίζει πότε μεταδίδει ο B με αποτέλεσμα ο C να υποχωρεί συνεχώς. Κατά συνέπεια ο C θα υποφέρει από παρατεταμένη στέρηση πόρων.

Κατάληψη καναλιού μπορούμε να έχουμε επίσης στην περίπτωση κρυμμένου τερματικού, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-13 (β), όπου οι κόμβοι A και C ανταγωνίζονται για μετάδοση στον B. Η απόσταση μεταξύ των A και B είναι μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των B και C. Εάν όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν την ελάχιστη σταθερή απαιτούμενη ισχύ, τότε ο C θα βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια ανίχνευσης φέροντος του A, αλλά όμως δεν ισχύει και το αντίστροφο. Επομένως, ο κόμβος C αγνοεί την ύπαρξη του A οπότε δε θα γνωρίζει πότε ακριβώς μεταδίδει ο A στον B με αποτέλεσμα να προκαλούνται συγκρούσεις και ο κόμβος C να υποχωρεί διαρκώς και να οδηγείται έτσι σε παρατεταμένη στέρηση πόρων.

Εδώ πρέπει να παρατηρήσει κανείς ότι εάν όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο χρησιμοποιούν το ίδιο επίπεδο ισχύος για μετάδοση, π.χ. το μέγιστο, έτσι ώστε οι κόμβοι A και C να γνωρίζουν ο ένας την ύπαρξη του άλλου, τότε λύνεται το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού.

Όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρήση της μέγιστης δυνατής ισχύος είναι πιθανόν να οδηγήσει στην κατάληψη του καναλιού από έναν ή πολύ λίγους κόμβους.

Ο κόμβος C (Σχήμα 4-13 (γ)) είναι αυτός που τελικά καταλαμβάνει το κανάλι επειδή η πηγή C βρίσκεται πλησιέστερα στον κόμβο B.

Από τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν συνάγεται το συμπέρασμα ότι η κατάληψη του καναλιού οφείλεται στο γεγονός ότι η ισχύς μετάδοσης διατηρείται σταθερή.

Όμως, για να αποφευχθεί ένα τέτοιου είδους πρόβλημα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα δυναμικό σχήμα ελέγχου ισχύος το οποίο όχι μόνο θα διανέμει το κανάλι στους κόμβους με δίκαιο τρόπο, αλλά θα επιτυγχάνει ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας.

➤ *PASA: Προσαρμογή της Ισχύος για Παρατεταμένη Στέρηση Πόρων*

Η βασική ιδέα του μηχανισμού PASA είναι η με δυναμικό τρόπο ρύθμιση της ισχύος μετάδοσης του κάθε κόμβου ανάλογα με την κατάσταση του έτσι ώστε όλοι οι κινούμενοι κόμβοι στο δίκτυο να μοιράζονται το κανάλι μετάδοσης όσο γίνεται πιο αποδοτικά.

Σε αυτόν τον αλγόριθμο η ισχύς χωρίζεται σε L επίπεδα, από το 1 μέχρι το L , ενώ η ισχύς επιπέδου I ονομάζεται P_i , όπου $P_i \in R^+$ και $P_1 < P_2 \dots < P_L$. Θεωρούμε ότι η ισχύς μετάδοσης οποιουδήποτε κινουμένου κόμβου έχει άνω όριο το P_{MAX} , όπου $P_{MAX} = P_L$ και κάτω όριο το P_{MIN} (το P_{MAX} θεωρείται ίδιο σε όλους τους κόμβους για λόγους απλούστευσης). Το P_{MIN} εγγυάται τις συνδέσεις επικοινωνίας και μπορεί να είναι διαφορετικό για κάθε κόμβο.

Ο αλγόριθμος 1 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο PASA σε κάθε κόμβο. Στον αλγόριθμο υπάρχουν δύο μετρητές, ο *TransCounter* και ο *RetryCounter* οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μετρούν τον αριθμό των συνεχόμενων επιτυχών και μη επιτυχών μεταδόσεων αντίστοιχα. Κάθε μετρητής έχει ένα άνω όριο για κάθε επίπεδο ενέργειας. Τα όρια αυτά θα πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά μιας και καθορίζουν μετά από πόσες επιτυχίες μεταδόσεις θα μειωθεί το επίπεδο ισχύος μετάδοσης ή μετά από πόσες μη επιτυχίες προσπάθειες θα αυξηθεί το ίδιο επίπεδο.

Υπάρχουν τρεις δυνατές καταστάσεις στον αλγόριθμο: *Σταθερή*, *Αύξηση* και *Μείωση*. Το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων απεικονίζεται στο Σχήμα 4-14.

Όταν δεν υπάρχουν αποτυχίες στη μετάδοση, τότε ο κόμβος παραμένει στη *Σταθερή Κατάσταση* και χρησιμοποιεί το ελάχιστο δυνατό επίπεδο ενέργειας προκειμένου να μεταδώσει δεδομένα.

Πίνακας 4-7: PASA: Ο αλγόριθμος 1

```

Algorithm 1: PASA—the Dynamic Power
Adaptation Algorithm
begin
   $P_{Cur} \leftarrow P_{Min}$ ;
   $RetryCounter \leftarrow 0$ ;
   $TransCounter \leftarrow 0$ ;
  CON:
    Transmit a frame;
    if succeed then goto CON;
  INC:
    Transmit a frame;
    if succeed then
       $TransCounter++$ ;
       $RetryCounter \leftarrow 0$ ;
      if  $TransCounter > \alpha(P_{Cur} - P_{Min} + 1)$  then
         $TransCounter \leftarrow 0$ ;
    else
      goto DEC;
  else
     $TransCounter \leftarrow 0$ ;
     $RetryCounter++$ ;
    if  $RetryCounter > \beta(P_{Max} - P_{Cur} + 1)$  then
      if  $P_{Cur} = P_{Max}$  then
        Reroute or reject;
        Increase power level  $P_{Cur}$ ;
         $RetryCounter \leftarrow 0$ ;
        goto INC;
      else
        Transmit a frame;
        if succeed then
           $TransCounter++$ ;
           $RetryCounter \leftarrow 0$ ;
          if  $TransCounter > \alpha(P_{Cur} - P_{Min} + 1)$  then
             $TransCounter \leftarrow 0$ ;
            Decrease power level  $P_{Cur}$ ;
            if  $P_{Cur} = P_{Min}$  then
              goto CON;
            else goto DEC;
          else
             $TransCounter \leftarrow 0$ ;
             $RetryCounter++$ ;
            if  $RetryCounter > \beta(P_{Max} - P_{Cur} + 1)$  then
               $RetryCounter \leftarrow 0$ ;
              goto INC;
            else
              goto DEC;
          end;
end;

```

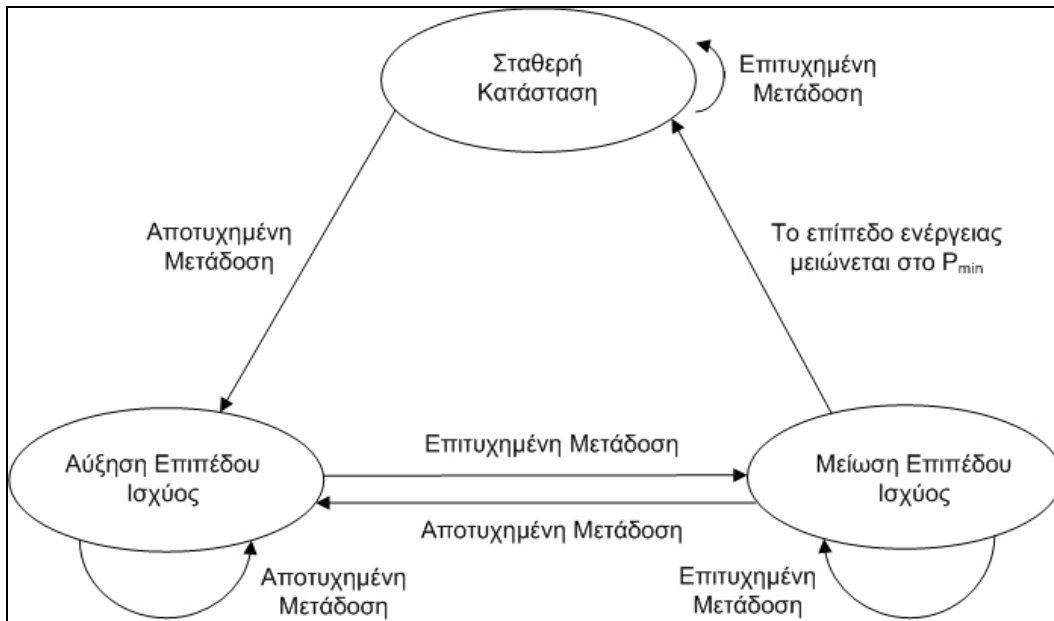
Ερμηνεία του Πίνακα: Ο αλγόριθμος 1 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο PASA σε κάθε κόμβο.

Εάν υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός συνεχόμενων μη επιτυχών μεταδόσεων, τότε ο κόμβος εισέρχεται στην *Κατάσταση «Αύξησης»* όπου αυξάνεται το επίπεδο ισχύος του οπότε μεταδίδει και πάλι.

Μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επιτυχών μεταδόσεων ο κόμβος εισέρχεται στην *Κατάσταση «Μείωσης»* οπότε μειώνει την ισχύ μετάδοσής του. Ειδικότερα:

- *Σταθερή Κατάσταση (CON):* Όταν κάποιος κόμβος βρεθεί σε σταθερή κατάσταση εξακολουθεί να χρησιμοποιεί την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ P_{MIN} ως προσωρινή ισχύ P_{CUR} για να μεταδίδει πλαίσια. Το P_{MIN} καθορίζεται από τις εκάστοτε απαιτήσεις της μετάδοσης. Αφού στείλει ένα πλαίσιο RTS και εφόσον έχει λάβει επιτυχώς το πλαίσιο CTS, τότε στέλνει τα δεδομένα DATA κάνοντας χρήση του επιπέδου ισχύος P_{CUR} . Στην

περίπτωση που δε λάβει κάποιο πλαίσιο RTS τότε μεταβαίνει στην Κατάσταση «Αύξησης» και ξαναπροσπαθεί.



Σχήμα 4-14: Διάγραμμα μεταβατικών καταστάσεων του αλγόριθμου PASA

- Κατάσταση Αύξησης (INC):** Σε αυτήν την κατάσταση ένας οποιοσδήποτε κόμβος χρησιμοποιεί αρχικά το P_{CUR} για να μεταδώσει ένα πλαίσιο RTS. Εάν υπάρξει επιτυχής μετάδοση του πλαισίου, τότε ακολουθεί ένα πλαίσιο DATA. Ο μετρητής TransCounter αυξάνεται κατά μία μονάδα ενώ ο RetryCounter μηδενίζεται. Εάν τώρα αποτύχει η μετάδοση, τότε ο μετρητής RetryCounter αυξάνεται κατά μία μονάδα και μηδενίζεται ο μετρητής TransCounter. Όταν ο μετρητής RetryCounter υπερβεί το άνω όριο, το οποίο αντιστοιχεί στο επίπεδο ισχύος που χρησιμοποιεί για μετάδοση, τότε αυξάνεται η ισχύς του και παραμένει στην Κατάσταση «Αύξησης». Εάν τώρα το επίπεδο ισχύος που χρησιμοποιούσε βρίσκεται ήδη στο άνω όριο, τότε αναβάλλεται η μετάδοση. Από την άλλη πλευρά όμως, όταν ο μετρητής TransCounter υπερβεί το άνω του όριο τότε ο κόμβος μεταβαίνει στην Κατάσταση «Μείωσης».
- Κατάσταση Μείωσης (DEC):** Οι λειτουργίες στην Κατάσταση «Μείωσης» είναι παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Μόλις κάποιος κόμβος μεταδώσει ένα πλαίσιο, ενημερώνει αμέσως τους μετρητές του. Εάν ο μετρητής TransCounter υπερβεί το άνω του όριο, τότε ο κόμβος μειώνει το επίπεδο ισχύος του και παραμένει στην Κατάσταση «Μείωσης». Εάν μεταδίδει με το κατώτατο επίπεδο ισχύος του, τότε ο κόμβος μεταβαίνει στη σταθερή κατάσταση. Από την άλλη πλευρά, όταν ο μετρητής RetryCounter υπερβεί το άνω του όριο, τότε ο κόμβος μεταβαίνει στην Κατάσταση «Μείωσης».

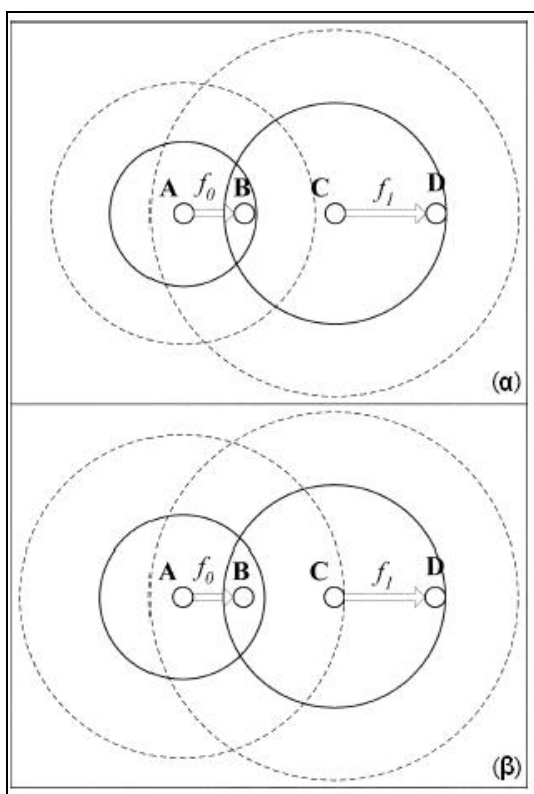
Στο Σχήμα 4-15 απεικονίζεται μία τοπολογία η οποία παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο ο έλεγχος ισχύος επιλύει το πρόβλημα της παρατεταμένης στέρησης πόρων. Δύο επίμονες ροές δεδομένων αποστέλλονται από τον κόμβο A στον κόμβο B και από τον κόμβο C στον κόμβο D αντίστοιχα. Όταν όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν την ελάχιστη ισχύ μετάδοσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15 (α), τότε ο κόμβος C καταλαμβάνει το κανάλι (δηλαδή ο A υποφέρει από παρατεταμένη στέρηση πόρων). Με τη λήξη ενός πλαισίου RTS ο κόμβος A αυξάνει το επίπεδο ισχύος μετάδοσής του και ξαναπροσπαθεί. Όταν τώρα η εμβέλεια παρεμβολής του A καλύπτει και τον κόμβο C, τότε η επιθυμία μετάδοσης του A γνωστοποιείται στον κόμβο C, όπως φαίνεται

στο Σχήμα 4-15 (β). Ο C τότε υποχωρεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορέσει ο A να μεταδώσει τα δεδομένα του. Με αυτόν τον τρόπο επιλύεται το πρόβλημα της παρατεταμένης στέρησης πόρων του A.

➤ *Θέματα Υλοποίησης του Μηχανισμού:*

Στον προτεινόμενο μηχανισμό ελέγχου ισχύος υπάρχει σωρεία θεμάτων που αφορούν την υλοποίησή του και τα οποία θα πρέπει να αναφερθούν. Ειδικότερα, πρέπει να αναφερθεί:

- ο τρόπος με τον οποίο θα διατηρείται το ελάχιστο επίπεδο ισχύος μετάδοσης που απαιτείται για κάθε κόμβο,
- ο τρόπος που θα ρυθμίζεται η ισχύς μετάδοσης σε κάθε κόμβο, καθώς και
- ο τρόπος που θα αποφασίζεται το άνω όριο των μετρητών που έχουν ήδη αναφερθεί.



Σχήμα 4-15: PASA: Τρόποι διακοπής της στέρησης πόρων

Ερμηνεία το Σχήματος: Ο PASA διακόπτει τη στέρηση πόρων: (α) αφού ο A μειώσει την ισχύ του, και (β) αφού ο A αυξήσει την ισχύ του.

Πίνακας Ισχύος των Γειτονικών Κόμβων: Σε ένα δίκτυο ad hoc ένας κόμβος έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί απευθείας με όλους τους γειτονικούς του κόμβους που βρίσκονται μέσα στη δική του εμβέλεια μετάδοσης. Σε αυτό εδώ το σημείο πρέπει να γίνει η υπενθύμιση, ότι η εμβέλεια μετάδοσης εξαρτάται από το εκάστοτε επίπεδο ισχύος που επιλέγεται. Ο κάθε κόμβος θα επιλέγει την κατάλληλη ισχύ μετάδοσης για επικοινωνία με τους γειτονικούς του κόμβους, αντί να επιλέγεται το ίδιο σταθερό επίπεδο για όλους τους κόμβους στο δίκτυο. Οι παράμετροι ισχύος που χρησιμοποιεί ο κόμβος αποθηκεύονται σε έναν πίνακα. Κάθε κόμβος διαθέτει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό (ID) στο δίκτυο και σε κάθε μία γραμμή του πίνακα αποθηκεύονται πληροφορίες, όπως:

- η απόσταση (Distance) σε μέτρα ανάμεσα σε αυτόν και στους γειτονικούς του κόμβους,

- η ελάχιστη ισχύς (Min-Power) που απαιτείται για τη διατήρηση της σύνδεσης, καθώς επίσης και
- η ισχύς που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πλαισίων RTS και CTS.

Η ελάχιστη ισχύς που απαιτείται για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας του δικτύου υπολογίζεται με βάση τη μεταξύ των κόμβων απόσταση, ενώ η ισχύς που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πλαισίων RTS και CTS ενδέχεται να είναι διαφορετική, και αυτό συμβαίνει διότι η ισχύς μετάδοσης επιλέγεται ξεχωριστά από κάθε κόμβο.

Όταν ένας κόμβος έχει να στείλει ένα πακέτο σε ένα γειτονικό του κόμβο, η πρώτη του ενέργεια είναι να ψάξει να βρει το ID του στον πίνακα που διαθέτει. Εάν το ID δεν υπάρχει στον πίνακα, τότε δημιουργεί μία καινούργια καταχώρηση και θέτει ως επίπεδο ισχύος το ελάχιστο δυνατό. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιεί το RTS επίπεδο ισχύος το οποίο είναι κατάλληλο για μετάδοση πλαισίων RTS και DATA. Εάν ο κόμβος επιθυμεί να μεταδώσει ένα πλαίσιο ACK ή CTS τότε χρησιμοποιεί το επίπεδο ισχύος CTS. Εάν αποτύχει η μετάδοση τότε ο κόμβος αυξάνει το επίπεδο ισχύος του και κάνει μία νέα προσπάθεια, ενώ ταυτόχρονα ενημερώνει τον πίνακά του. Το κόστος διατήρησης ενός τέτοιου πίνακα είναι ελάχιστο επειδή η χωρητικότητά του είναι μικρή, δεδομένου ότι ένας κόμβος συνήθως επικοινωνεί απευθείας μόνο με λίγους κόμβους.

Πίνακας 4-8: Πίνακας ισχύος των γειτονικών κόμβων

Node ID	Distance	Min-Power	RTS Power	CTS Power
2	80	3	5	3
4	170	7	7	7
.
.
.

Αύξηση και Μείωση της Ισχύος. Ένας κόμβος του δικτύου ρυθμίζει διαρκώς την ισχύ του προκειμένου να μεταδίδει απρόσκοπτα, χωρίς προβλήματα αλλά και με ισχύ ποτέ παραπάνω από αυτήν που πραγματικά χρειάζεται. Κατά τη σχεδίαση του αλγόριθμου ρύθμισης της ισχύος λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Το επίπεδο ισχύος θα πρέπει να αυξάνεται αρκετά γρήγορα έτσι ώστε να είναι επιτυχής η μετάδοση, πριν ακόμη υπερκεραστεί το όριο επαναλήψεων μετάδοσης που έχει αρχικά τεθεί.
- Το επίπεδο ισχύος δε θα πρέπει να αυξομειώνεται ούτε πολύ γρήγορα ούτε πολύ απότομα.
- Οι κόμβοι οφείλουν να μοιράζονται το κανάλι μετάδοσης με δίκαιο τρόπο.

Με βάση τους παραπάνω στόχους επιλέγεται η *Διαδική Μέθοδος Αύξησης της Ισχύος*, όπου:

$$P_{CUR} \leftarrow \left[\frac{P_{CUR} + P_{MAX}}{2} \right] \quad (4.31)$$

Και η *Γραμμική Μέθοδος Μείωσης της Ισχύος*, όπου:

$$P_{CUR} \leftarrow [P_{CUR} - 1] \quad (4.32)$$

Εάν χρησιμοποιηθεί η αυξητική μέθοδος απαιτούνται το πολύ $\log_2 P_{max}$ αυξήσεις της ισχύος για να επιτευχθεί το μέγιστο επίπεδο ισχύος.

Ελάχιστη Ισχύς και Κινητικότητα. Εάν χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη δυνατή ισχύς στην πράξη τότε η μετάδοση θα είναι επιτυχής και ιδιαίτερα όταν κινούνται οι κόμβοι. Φυσικά, όταν δεν χρησιμοποιείται η ελάχιστη δυνατή ισχύς και κάποιος κόμβος κινείται έξω από την εμβέλεια ενός άλλου, τότε η μετάδοση δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι επιτυχής. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, η ελάχιστη ισχύς με την οποία μεταδίδει ένας κόμβος οφείλει να είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του κάτω ορίου.

Η ισχύς μετάδοσης μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται ανάλογα με το χρόνο εξαιτίας της αλλαγής των συνθηκών στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση εκείνη που οι κόμβοι αρχίσουν να κινούνται ή στην περίπτωση που εμφανίζονται νέοι κόμβοι στο δίκτυο. Συνεπώς, το πεδίο στο οποίο αποθηκεύεται η ισχύς μετάδοσης του κάθε κόμβου οφείλει να ενημερώνεται διαρκώς με βάση πάντοτε τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.

Μετρητής Επαναλήψεων Μετάδοσης και Μετρητής Επιτυχών Μεταδόσεων. Εάν το άνω όριο του μετρητή επαναλήψεων είναι πολύ μικρό, τότε η ισχύς θα παίρνει πολλές διαφορετικές τιμές σε μικρό χρονικό διάστημα και ειδικότερα όταν υπάρχουν ανεπιτυχείς μεταδόσεις. Όμως, όταν το όριο αυτό είναι πολύ μεγάλο, τότε ο κόμβος θα πραγματοποιήσει πολλές αναμεταδόσεις πριν αυξήσει το επίπεδο ισχύος που χρησιμοποιεί με αποτέλεσμα να περάσει πολύς χρόνος. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο και το άνω όριο του μετρητή επιτυχών μεταδόσεων θα πρέπει να επιλέγεται πολύ προσεκτικά για να υπάρχει καλύτερη απόδοση.

Συμπέρασμα

Στα ασύρματα δίκτυα ad hoc είναι αρκετά συχνή η εμφάνιση του προβλήματος της κατάληψης του καναλιού από έναν ή πολύ λίγους κόμβους και τούτο οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους: α) η απουσία κεντρικού ελέγχου και β) το πρόβλημα των κρυμμένων κόμβων. Η κατάληψη του καναλιού οδηγεί σε παρατεταμένη στέρση πόρων για ορισμένους κόμβους με αποτέλεσμα τη σημαντική υποβάθμιση της ρυθμαπόδοσης και της μη δίκαιης χρήσης του καναλιού μετάδοσης. Η χρήση της στατικής ισχύος μετάδοσης, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου, οδηγεί πολλές φορές στην κατάληψη του καναλιού μετάδοσης οπότε έτσι είναι απαραίτητη η χρήση ενός δυναμικού αλγόριθμου για τον έλεγχο της ισχύος.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος PASA έχει τη δυνατότητα της δυναμικής ρύθμισης των επιπέδων ισχύος σε κάθε κόμβο ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στο δίκτυο. Αυτός ο αλγόριθμος είναι απλός, αυτόνομος, αποδοτικός και δεν επιβαρύνει το δίκτυο με την αποστολή και λήψη μηνυμάτων ελέγχου. Η εξομοίωση που έγινε από τον J. Chen *et al.* [142] με UDP και TCP ροές δεδομένων, έδειξε ότι ο PASA είναι σε θέση να αντιμετωπίσει πράγματι το πρόβλημα της κατάληψης του καναλιού, διανέμοντας τους πόρους του καναλιού δίκαια και χωρίς να μειώνεται η ρυθμαπόδοση. Τέλος, το πιο σημαντικό είναι ότι επιτυγχάνεται αρκετή εξοικονόμηση ενέργειας, σε σχέση πάντοτε με τους στατικούς αλγόριθμους ελέγχου ισχύος.

4.4.1.7 A Power Control MAC Protocol for Ad hoc Networks (PCM)

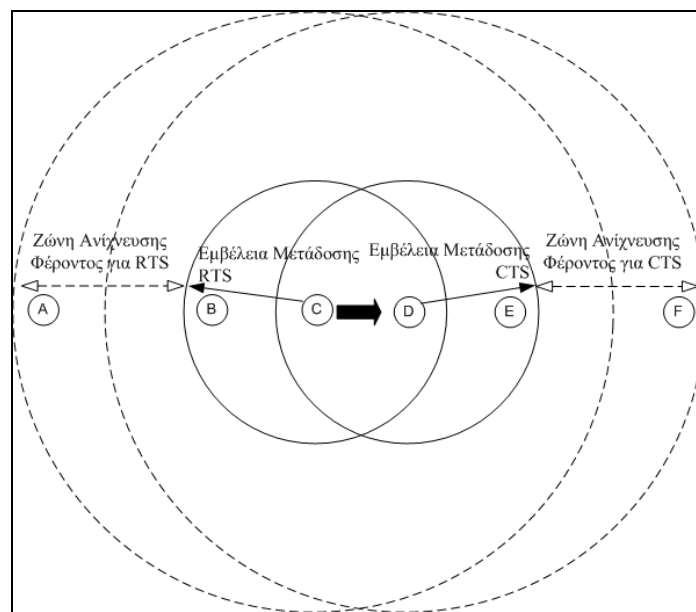
Οι E.-S. Jung και N. H. Vaidya παρουσιάζουν στο [143] ένα MAC πρωτόκολλο ελέγχου ισχύος για ad hoc δίκτυα με τίτλο “A power control MAC protocol for ad hoc networks” (PCM). Αυτό το πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα στους κόμβους να επιλέγουν την ισχύ μετάδοσης για κάθε πακέτο που μεταδίδουν.

Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει κατά καιρούς διάφορες τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτό ο έλεγχος της ισχύος.

Η βασική ιδέα αυτών των μηχανισμών ελέγχου ισχύος είναι να μεταδίδονται τα πακέτα RTS-CTS με διαφορετική ισχύ από ότι τα πακέτα DATA-ACK. Συγκεκριμένα τα πακέτα RTS-CTS θα μεταδίδονται με τη μέγιστη δυνατή ισχύ, ενώ τα πακέτα DATA-ACK θα μεταδίδονται με την ελάχιστη δυνατή απαιτούμενη ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο θα εξοικονομείται σημαντική ενέργεια. Παρόλα τα πλεονεκτήματα, όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, θα δειχθεί ότι τελικά μηχανισμοί αυτού του είδους υποβαθμίζουν τη ρυθμαπόδοση του δικτύου και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια από ότι το πρωτόκολλο IEEE 802.11 χωρίς έλεγχο ισχύος.

Εισαγωγικές Έννοιες

Οι ασύρματοι κόμβοι τροφοδοτούνται συνήθως με ενέργεια που παρέχεται από μπαταρίες των οποίων η διάρκεια ζωής είναι πολύ μικρή. Για αυτόν ακριβώς το λόγο απαιτείται να βρεθούν τεχνικές που θα μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και θα αυξάνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Ένας τρόπος για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας είναι να χρησιμοποιηθούν μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτοί οι μηχανισμοί εξοικονομούν ενέργεια με το να θέτουν εκτός λειτουργίας εκείνους τους κόμβους που δε χρησιμοποιούνται. Μία άλλη εναλλακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση μηχανισμών ελέγχου ισχύος οι οποίοι μεταβάλλουν την ισχύ μετάδοσης του κάθε κόμβου δυναμικά με σκοπό τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας, όσο και την αποδοτικότερη αξιοποίηση του ασύρματου μέσου μετάδοσης. Εδώ παρουσιάζεται ένας τέτοιος μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας.



Σχήμα 4-16: Μηχανισμός εξοικονόμησης ενέργειας για το πρωτόκολλο PCM

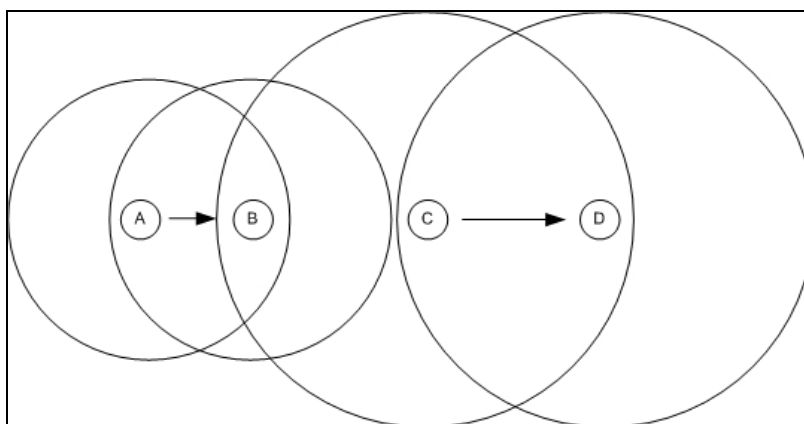
Βασικό Πρωτόκολλο Ελέγχου Ισχύος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο έλεγχος ισχύος μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας υποχρεώνοντας κάθε κόμβο να χρησιμοποιεί διαφορετικές στάθμες ισχύος σε κάθε μετάδοση. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται ασύμμετρες καταστάσεις όπου ο κόμβος A μπορεί να μεταδώσει στον κόμβο B, όμως, το ίδιο δεν ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή ο B δεν μπορεί να μεταδώσει στον A. Η χρήση διαφορετικών επιπέδων ισχύος μετάδοσης από κάθε κόμβο μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερες συγκρούσεις εκτός και αν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

Ας υποθεθεί ότι οι κόμβοι A και B (Σχήμα 4-17) χρησιμοποιούν χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης από ότι οι κόμβοι C και D. Όταν ο κόμβος A μεταδίδει ένα πλαίσιο στον κόμβο B, τότε αυτή η μετάδοση μπορεί να μην ανιχνεύεται από τους κόμβους C και D. Έτσι, όταν οι κόμβοι C και D

μεταδίδουν ο ένας στον άλλο χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης, οι μεταδόσεις τους είναι πολύ πιθανόν να δημιουργήσουν παρεμβολές στην τρέχουσα μετάδοση του A στον B.

Ερμηνεία του Σχήματος: Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 δε είναι σε θέση να εμποδίσει τελείως τις συγκρούσεις. Μετά τη χειραγία των RTS-CTS, όταν ο κόμβος C μεταδώσει ένα πακέτο DATA στον κόμβο D, ο F δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσει τη μετάδοση δεδομένων επειδή βρίσκεται μέσα στη ζώνη ανίχνευσης φέροντος του D αλλά όχι όμως και του C. Ως εκ τούτου, όταν ο F αρχίσει να εκπέμπει μπορεί να προκαλέσει σύγκρουση με τη λήψη του πακέτου DATA στον κόμβο D.



Σχήμα 4-17: Αύξηση συγκρούσεων από διαφορές στην ισχύ μετάδοσης

Μία απλή λύση σε αυτήν την περίπτωση (δηλαδή μία μικρή τροποποίηση του πρωτοκόλλου IEEE 802.11) είναι να γίνει η μετάδοση των μηνυμάτων RTS και CTS με τη μεγαλύτερη δυνατή ισχύ, αλλά η μετάδοση των DATA και ACK να γίνει με την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ. Στο Σχήμα 4-18 οι κόμβοι A και B μεταδίδουν τα μηνύματα RTS και CTS με τη μέγιστη δυνατή ισχύ αντίστοιχα, έτσι ώστε ο κόμβος C να λάβει το μήνυμα CTS και να αναβάλλει πιθανές μεταδόσεις του. Οι κόμβοι μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια αν μεταδώσουν τα μηνύματα DATA και ACK με την ελάχιστη δυνατή ισχύ.

Στο βασικό πρωτόκολλο ελέγχου ισχύος η ανταλλαγή των μηνυμάτων RTS-CTS χρησιμοποιείται προκειμένου να ορίσει την ισχύ μετάδοσης που θα χρησιμοποιηθεί για τα πλαίσια DATA και ACK. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Έστω P_{max} το μέγιστο δυνατό επίπεδο ισχύος:

- Ας υποθεθεί ότι ο κόμβος A επιθυμεί να στείλει ένα πλαίσιο στον κόμβο B. Ο κόμβος A μεταδίδει το πλαίσιο RTS με ισχύ P_{max} . Όταν ο κόμβος B λάβει το πλαίσιο RTS από τον A με ισχύ P_r , τότε μπορεί να υπολογίσει την ελάχιστη δυνατή επιθυμητή ισχύ $P_{desired}$ προκειμένου να μεταδώσει το πλαίσιο DATA (με βάση την ισχύ λήψης P_r , την ισχύ μετάδοσης P_{max} και το επίπεδο θορύβου) στον κόμβο B. Στη συνέχεια, ο κόμβος B αναγράφει στην επικεφαλίδα του CTS μηνύματος που θα στείλει στον κόμβο A την ελάχιστη επιθυμητή ισχύ $P_{desired}$. Επειδή λαμβάνεται υπόψη το SNR στον κόμβο B, αυτή η μέθοδος μπορεί να υπολογίσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ για τη μετάδοση του πακέτου DATA.
- Εναλλακτικά, όταν ο κόμβος προορισμού λάβει ένα μήνυμα RTS απαντά στέλνοντας ένα μήνυμα CTS (με τη μέγιστη δυνατή ισχύ). Όταν ο κόμβος πηγή λάβει το μήνυμα CTS υπολογίζει την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ $P_{desired}$ με βάση την ισχύ λήψης P_r και την ισχύ μετάδοσης P_{max} , με την εξίσωση 4.33:

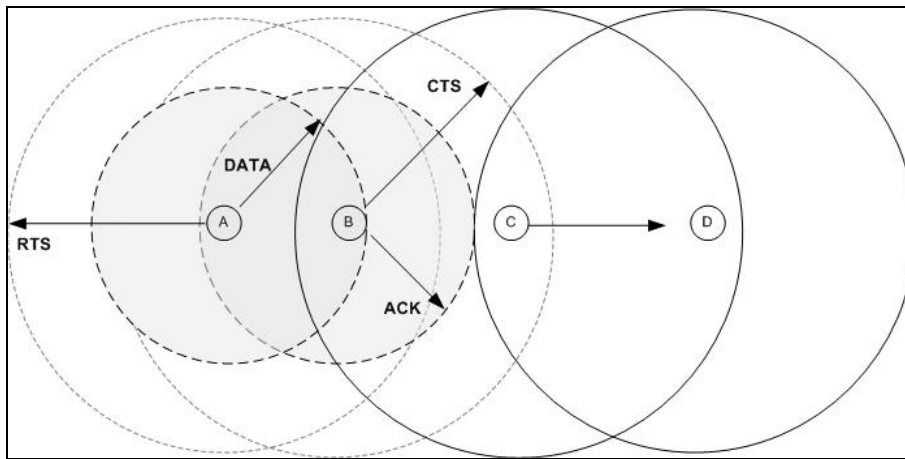
$$P_{desired} = \frac{P_{max}}{P_r} \times R_{x-threshold} \times c \quad (4.33)$$

Όπου: $R_{x-threshold}$ είναι η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης και c είναι μία σταθερά. Στη συνέχεια ο κόμβος πηγή μεταδίδει το πλαίσιο DATA με ισχύ η οποία είναι ίση με την ισχύ $P_{desired}$. Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η ισχύς για τη μετάδοση του μηνύματος ACK όταν λαμβάνεται το πακέτο RTS.

Αυτή η μέθοδος κάνει τις εξής δύο υποθέσεις:

- Η εξασθένιση του σήματος είναι η ίδια για τη μετάδοση και προς τις δύο κατευθύνσεις.
- Το επίπεδο θορύβου στο δέκτη είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι.

Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε μη αξιόπιστη επικοινωνία όταν οι παραπάνω υποθέσεις είναι λανθασμένες. Παρόλα αυτά, η πιθανότητα να είναι πραγματικά αξιόπιστη είναι πολύ μεγάλη.



Σχήμα 4-18: Βασικό σχήμα μετάδοσης μηνυμάτων RTS και CTS

Σημείωση: Τα μηνύματα RTS και CTS μεταδίδονται στη μέγιστη δυνατή στάθμη ισχύος.

Μειονεκτήματα του Βασικού Πρωτόκολλου Ελέγχου Ισχύος

Στο βασικό μηχανισμό τα μηνύματα RTS και CTS αποστέλλονται με ισχύ μετάδοσης P_{max} , ενώ τα μηνύματα DATA και ACK μεταδίδονται με την ελάχιστη δυνατή απαιτούμενη ισχύ.

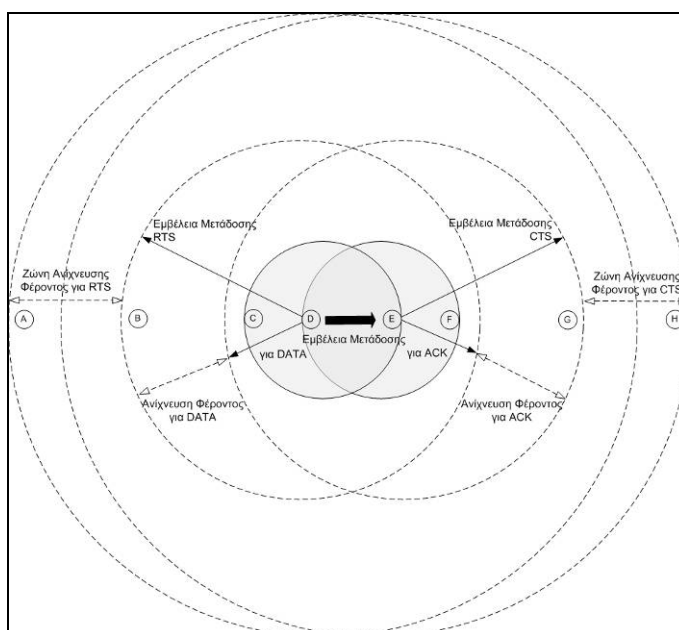
Όταν οι γειτονικοί κόμβοι λάβουν ένα μήνυμα CTS ή RTS ορίζουν ως χρόνο αναμονής στον πίνακα NAV τη διάρκεια μετάδοσης των μηνυμάτων DATA-ACK. Για παράδειγμα στο Σχήμα 4-19 ας υποθεθεί ότι ο κόμβος D επιθυμεί να μεταδώσει ένα πακέτο στον κόμβο E. Όταν οι κόμβοι D και E μεταδώσουν τα μηνύματα RTS και CTS αντίστοιχα, οι κόμβοι B και C λαμβάνουν τα μηνύματα RTS ενώ οι κόμβοι F και G λαμβάνουν τα μηνύματα CTS και αναβάλλουν τις μεταδόσεις τους για όσο χρόνο διαρκεί η μετάδοση του D προς τον E.

Ο κόμβος A βρίσκεται μέσα στη ζώνη ανίχνευσης του D (τη στιγμή που ο D μεταδίδει με P_{max}) επομένως θα ανιχνεύσει τη μετάδοση αλλά δεν θα μπορεί να αποκωδικοποιήσει με ορθό τρόπο τα πλαίσια που λαμβάνει. Ο κόμβος A θα θέσει στον πίνακα NAV EIFS μία τιμή αφού όμως θα έχει προηγουμένως ανιχνεύσει τη μετάδοση του μηνύματος RTS από τον D. Με παρόμοιο τρόπο, ο κόμβος H θα θέσει την ίδια τιμή αφού λάβει το μήνυμα CTS από τον κόμβο E.

Όταν δεν χρησιμοποιείται έλεγχος ισχύος, η ζώνη ανίχνευσης του φέροντος είναι η ίδια για όλα τα μηνύματα επειδή αυτά μεταδίδονται με την ίδια ισχύ. Όμως, παρόλα αυτά, όταν οι κόμβοι

πηγής και προορισμού στο βασικό πρωτόκολλο παίρνουν την απόφαση να μειώσουν την ισχύ μετάδοσης για τα μηνύματα DATA-ACK, η εμβέλεια μετάδοσης τους θα είναι μικρότερη από ότι για τα μηνύματα RTS-CTS. Με παρόμοιο τρόπο, και η ζώνη ανίχνευσης του φέροντος για τα μηνύματα DATA-ACK θα είναι επίσης μικρότερη από αυτή για τα μηνύματα RTS-CTS.

Όταν οι κόμβοι D και E (Σχήμα 4-19) μειώσουν την ισχύ μετάδοσής τους για να στείλουν τα μηνύματα DATA και ACK αντίστοιχα, τότε γίνονται μικρότερες τόσο η εμβέλεια μετάδοσης όσο και η ζώνη ανίχνευσης φέροντος. Από αυτό βγαίνει το συμπέρασμα ότι μόνο οι κόμβοι C και F μπορούν να λάβουν σωστά τα μηνύματα DATA και ACK αντίστοιχα. Επιπλέον, καθώς οι κόμβοι A και H δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσουν τις μεταδόσεις, θεωρούν ότι το κανάλι είναι αδρανές. Όταν τώρα ένας από αυτούς τους κόμβους (A ή H) αρχίσει να μεταδίδει με τη μέγιστη δυνατή ισχύ P_{max} τότε αυτή η μετάδοση έρχεται σε σύγκρουση με το μήνυμα ACK στον κόμβο D και με το μήνυμα DATA στον κόμβο E. Το γεγονός αυτό οδηγεί αναπόφευκτα στη μείωση της ρυθμιαπόδοσης (throughput) αλλά και στην κατανάλωση περισσότερης ενέργειας, λόγω των συνεχών αναμεταδόσεων.



Σχήμα 4-19: Βασικό σχήμα εμφάνισης μειονεκτημάτων του βασικού πρωτοκόλλου

Ερμηνεία του Σχήματος: Ας υποθεθεί ότι ο κόμβος D μεταδίδει ένα πακέτο στον κόμβο E. Επειδή τα μηνύματα DATA και ACK μεταδίδονται κάνοντας χρήση της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος μετάδοσης, οι κόμβοι στη ζώνη ανίχνευσης φέροντος (όπως είναι η A και η H) κατά τη διάρκεια της εκπομπής των μηνυμάτων RTS-CTS είναι πολύ πιθανόν να μην ανιχνεύσουν κανένα απολύτως σήμα κατά τη διάρκεια των μηνυμάτων DATA-ACK. Όταν αυτοί οι κόμβοι ξεκινούν μία νέα μετάδοση με το να στέλνουν ένα μήνυμα RTS στη μέγιστη δυνατή στάθμη ισχύος P_{max} , τότε μπορεί να συμβεί σύγκρουση στους κόμβους D και E. Οι συγκρούσεις προκαλούν αναμεταδόσεις, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

Όπως έχει δείχθει παραπάνω, το IEEE 802.11 δεν αποτρέπει τις συγκρούσεις που προκαλούνται από τους κόμβους (οι οποίοι βρίσκονται μέσα στη ζώνη ανίχνευσης του φέροντος) στα DATA μηνύματα στον κόμβο προορισμού. Και όχι μόνον αυτό, το βασικό πρωτόκολλο χειροτερεύει ακόμη περισσότερο την κατάσταση εξαιτίας των παρεμβολών που εισάγει κατά τη λήψη του μηνύματος ACK από τον κόμβο πηγή. Εάν χρησιμοποιηθεί το βασικό πρωτόκολλο τότε ο κόμβος A (Σχήμα 4-19) δεν θα μπορέσει να ανιχνεύσει τη μετάδοση του μηνύματος DATA από τον

κόμβο D εφόσον χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη ισχύς μετάδοσης και έτσι τυχόν μεταδόσεις από τον κόμβο A θα παρεμβληθούν στη λήψη του μηνύματος ACK από τον D.

Προτεινόμενο Πρωτόκολλο Ελέγχου Ισχύος Επιπέδου MAC

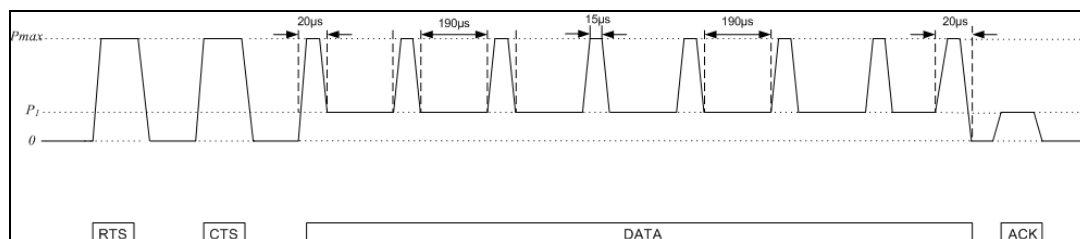
Το προτεινόμενο πρωτόκολλο ελέγχου ισχύος σε επίπεδο MAC PCM (Proposed Power Control MAC) είναι παρόμοιο με το βασικό πρωτόκολλο στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί ισχύ μετάδοσης P_{max} για τη μετάδοση των μηνυμάτων RTS-CTS και την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ για τη μετάδοση των μηνυμάτων DATA-ACK.

Η διαδικασία που χρησιμοποιείται στο PCM είναι η εξής:

- Οι κόμβοι πηγής και προορισμού μεταδίδουν τα μηνύματα RTS και CTS με ισχύ P_{max} . Οι κόμβοι που βρίσκονται στη ζώνη ανίχνευσης φέροντος ενημερώνουν τον πίνακα NAV με την τιμή EIFS όταν ανιχνεύουν μία μετάδοση αλλά δεν μπορούν να την αποκωδικοποιήσουν.
- Ο κόμβος πηγή μπορεί να μεταδώσει ένα μήνυμα DATA με ελάχιστη ισχύ όπως γίνεται και στο βασικό πρωτόκολλο.
- Προκειμένου να αποφευχθεί μία πιθανή σύγκρουση με το μήνυμα ACK, ο κόμβος πηγή μεταδίδει περιοδικά ένα μήνυμα DATA με ισχύ P_{max} για όσο χρόνο απαιτείται ώστε οι κόμβοι που βρίσκονται στη ζώνη ανίχνευσης του φέροντος να μπορέσουν να το αποκωδικοποιήσουν.
- Ο κόμβος προορισμού μεταδίδει ένα μήνυμα ACK με την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ στον κόμβο πηγή, όπως ακριβώς και στο βασικό πρωτόκολλο.

Στο Σχήμα 4-19 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ισχύς μετάδοσης κατά τη διάρκεια μετάδοσης των μηνυμάτων RTS-CTS-DATA-ACK. Μετά τη μετάδοση των μηνυμάτων RTS-CTS με ισχύ P_{max} , υποθέτουμε ότι οι κόμβοι πηγής και προορισμού αποφασίζουν να χρησιμοποιήσουν ισχύ μετάδοσης p_l για τα μηνύματα DATA και ACK.

Στη συνέχεια ο κόμβος πηγή θα μεταδώσει το μήνυμα DATA με ισχύ p_l και θα χρησιμοποιεί περιοδικά ισχύ μετάδοσης P_{max} . Ο κόμβος προορισμού θα χρησιμοποιεί ισχύ μετάδοσης p_l για τη μετάδοση του μηνύματος ACK.



Σχήμα 4-20: Μεταβολή ισχύος κατά τη μετάδοση των RTS-CTS-DATA-ACK

Ερμηνεία του Σχήματος. Το PCM αυξάνει περιοδικά την ισχύ μετάδοσης κατά τη διάρκεια εκπομπής των δεδομένων (DATA) προκειμένου να ενημερώσει τους κόμβους που βρίσκονται μέσα στη ζώνη ανίχνευσης του φέροντος για την εκπομπή του.

➤ Σύγκριση Μεταξύ του PCM και Βασικού Πρωτοκόλλου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η βασική διαφορά μεταξύ PCM και βασικού πρωτοκόλλου είναι ότι το PCM αυξάνει περιοδικά την ισχύ μετάδοσης σε P_{max} κατά τη μετάδοση του μηνύματος DATA. Με αυτήν την αλλαγή οι κόμβοι (που είναι πιθανό να προκαλέσουν παρεμβολές κατά τη λήψη του μηνύματος ACK από το δέκτη) θα βλέπουν ότι το κανάλι είναι περιοδικά κατειλημμένο οπότε θα αναβάλλουν και τις δικές τους μεταδόσεις. Καθώς οι κόμβοι (που ενώ μπορούν να

ανιχνεύουν μία μετάδοση αλλά δεν μπορούν να την αποκωδικοποιήσουν) αναβάλλουν τις μεταδόσεις τους για χρονικό διάστημα EIFS η ισχύς μετάδοσης του μηνύματος DATA θα αυξάνεται περιοδικά ανά χρονικό διάστημα EIFS. Επίσης, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο γίνεται η μετάδοση του μηνύματος DATA με ισχύ μετάδοσης P_{max} θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση του φέροντος.

Με αυτήν την απλή τροποποίηση, το PCM μπορεί να ξεπεράσει τα προβλήματα του βασικού πρωτοκόλλου και μπορεί να επιτύχει ρυθμαπόδοση συγκρίσιμη με αυτή του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 αλλά με μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Όμως, ούτε και το PCM είναι σε θέση να αποτρέψει πλήρως τις συγκρούσεις. Άρα, το βασικότερό του πλεονέκτημα είναι ότι καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από αυτήν που καταναλώνει το πρωτόκολλο IEEE 802.11.

Συμπέρασμα

Παλαιότερα είχαν προταθεί ως μηχανισμοί για εξοικονόμηση ενέργειας εκείνα τα πρωτόκολλα MAC που χρησιμοποιούσαν τη μέγιστη δυνατή ισχύ για τη μετάδοση των μηνυμάτων RTS-CTS και την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ για τη μετάδοση των μηνυμάτων DATA-ACK. Μηχανισμοί τέτοιου είδους αναφέρονται ως «*Βασικά Πρωτόκολλα*». Παρ' όλα αυτά αποδείχτηκε ότι το *Βασικό Πρωτόκολλο* αυξάνει τις συγκρούσεις και τις αναμεταδόσεις των μηνυμάτων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην κατανάλωση περισσότερης ενέργειας και στη μείωση της ρυθμαπόδοσης.

Στο πρωτόκολλο IEEE 802.11 η εμβέλεια ανίχνευσης του φέροντος για τα μηνύματα RTS-CTS είναι η ίδια με αυτή των μηνυμάτων DATA-ACK, επειδή δε μεταβάλλεται η ισχύς μετάδοσης. Παρόλα αυτά, η εμβέλεια ανίχνευσης του φέροντος στο *Βασικό Πρωτόκολλο* για τα μηνύματα RTS-CTS DATA-ACK μπορεί να διαφέρει, για το λόγο ότι η ισχύς μετάδοσης για αυτά τα μηνύματα είναι διαφορετική. Επομένως, όταν γίνεται χρήση του *Βασικού Πρωτοκόλλου* οι κόμβοι στη ζώνη ανίχνευσης του φέροντος είναι πολύ πιθανόν να προκαλέσουν συγκρούσεις με τις μεταδόσεις των μηνυμάτων DATA-ACK επειδή αυτοί οι κόμβοι μπορεί να μην ανιχνεύσουν τη μετάδοση των μηνυμάτων DATA (τα οποία μπορεί να μεταδίδονται με λιγότερη ισχύ). Τέτοιου είδους συγκρούσεις απαιτούν αναμεταδόσεις και κατά συνέπεια κατανάλωση περισσότερης ενέργειας. Εξ' αιτίας αυτού και μόνο του γεγονότος το *Βασικό Πρωτόκολλο* συμπεριφέρεται χειρότερα από ότι το πρωτόκολλο IEEE 802.11 χωρίς έλεγχο ισχύος, τουλάχιστον σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Το PCM που προτείνεται εδώ αυξάνει περιοδικά την ισχύ μετάδοσης κατά τη μετάδοση των μηνυμάτων DATA. Η προσομοίωση, που έχει γίνει από τους συγγραφείς δείχνει ότι το PCM εξοικονομεί ενέργεια χωρίς αυτό να αποβαίνει εις βάρος της ρυθμαπόδοσης.

Ένα πιθανό πρόβλημα με το PCM είναι ότι απαιτεί συχνή αύξηση και μείωση της ισχύος μετάδοσης με αποτέλεσμα η υλοποίηση να είναι πραγματικά δύσκολη.

Μία εναλλακτική προσέγγιση σε αυτό είναι να αντικατασταθεί η μεγαλύτερη ισχύς μετάδοσης με σήμα της ίδιας ισχύος που θα δείχνει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο και το σήμα αυτό θα μεταδίδεται σε ξεχωριστό κανάλι.

Παρά το γεγονός ότι το PCM εξοικονομεί ενέργεια δε χρησιμοποιεί αποδοτικότερα το μέσο μετάδοσης από ότι το πρωτόκολλο IEEE 802.11.

Ο στόχος των μελλοντικών μηχανισμών ελέγχου και διατήρησης της ισχύος θα πρέπει να είναι, όχι μόνο η εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και η αποδοτικότερη χρήση του μέσου μετάδοσης.

4.4.2 Επίπεδο Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης με Ενημέρωση Ισχύος

Οι πέντε βασικές μετρικές (metrics) με ενημέρωση ισχύος (power-aware) για τον προσδιορισμό των διαδρομών στα ad hoc ασύρματα δίκτυα, βασίζονται στην κατανάλωση ενέργειας της μπαταρίας του αισθητήριου κόμβου [146] και είναι τα εξής:

- *Ελαχιστοποίηση της Ενέργειας που Καταναλώνεται ανά Πακέτο.* Ο σκοπός αυτής της μετρικής είναι η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται ανά πακέτο. Όμως, το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι μερικοί αισθητήριοι κόμβοι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά το ποσό της ενέργειας που καταναλώνουν με αποτέλεσμα το γρήγορο θάνατο ορισμένων κόμβων.
- *Μεγιστοποίηση του Χρόνου για την Κατανομή του Δικτύου.* Αυτή είναι πάρα πολύ χρήσιμη σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως είναι λόγω χάρη τα δίκτυα αισθητήρων στο πεδίο της μάχης. Όμως, το βασικό της μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να παρέχει ταυτόχρονα μικρή χρονική καθυστέρηση και μεγάλη ρυθμαπόδοση.
- *Ελαχιστοποίηση της Απόκλισης στις Στάθμες Ισχύος των Αισθητήριων Κόμβων.* Η βασική ιδέα αυτής της μετρικής είναι ότι όλοι οι αισθητήριοι κόμβοι του δικτύου είναι της ίδιας σπουδαιότητας. Αυτή η μετρική διασφαλίζει ότι όλοι ανεξαιρέτως οι κόμβοι του δικτύου παραμένουν «ζωντανοί» και λειτουργούν μαζί για όσο γίνεται περισσότερο χρόνο.
- *Ελαχιστοποίηση του Κόστους ανά Πακέτο.* Ο στόχος εδώ είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ανά πακέτο. Τα επιλεγμένα μονοπάτια (paths) θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε οι αισθητήριοι κόμβοι που έχουν ξεμείνει από ενέργεια να μη βρίσκονται σε πολλά διαφορετικά μονοπάτια.
- *Ελαχιστοποίηση του Μέγιστου Κόστους του Αισθητήριου Κόμβου.* Η ελαχιστοποίηση του μέγιστου κόστους ανά αισθητήριο κόμβο αναμφίβολα μειώνει το ολικό κόστος του δικτύου.

Αυτές οι νέες μετρικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα περισσότερα παραδοσιακά πρωτόκολλα δρομολόγησης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

4.4.2.1 Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro-Sensor Networks

Το “*Energy-efficient communication protocol for wireless micro-sensor networks*” ή αλλιώς “*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol*” (LEACH) [61] είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο επικεντρώνεται στα πρωτόκολλα επικοινωνίας τα οποία είναι πιθανόν να ασκούν σημαντική επιρροή στην ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οργανώνει τους κόμβους σε συστοιχίες και μειώνει στο ελάχιστο την ενέργεια που καταναλώνεται σε αυτά τα δίκτυα.

Ο σκοπός του LEACH είναι η τυχαία επιλογή κάποιων κόμβων οι οποίοι θα διαδραματίσουν το ρόλο των επικεφαλής των συστοιχιών και θα είναι υπεύθυνοι για τη διασφάλιση της επικοινωνίας με το σταθμό βάσης. Η τυχαία επιλογή γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η συνεχής χρησιμοποίηση των ίδιων κόμβων ως επικεφαλής των συστοιχιών, και έτσι να μην εξαντλείται η ενέργειά τους ταχύτερα από την ενέργεια των υπόλοιπων κόμβων του δικτύου.

Η λειτουργία του LEACH χωρίζεται σε δύο φάσεις (rounds):

- τη *Φάση Εγκατάστασης* (set-up phase) και
- τη *Φάση Μόνιμης Κατάστασης Λειτουργίας* (steady-state phase).

Η *Φάση Μόνιμης Κατάστασης Λειτουργίας* έχει μεγαλύτερη διάρκεια από τη *Φάση Εγκατάστασης*.

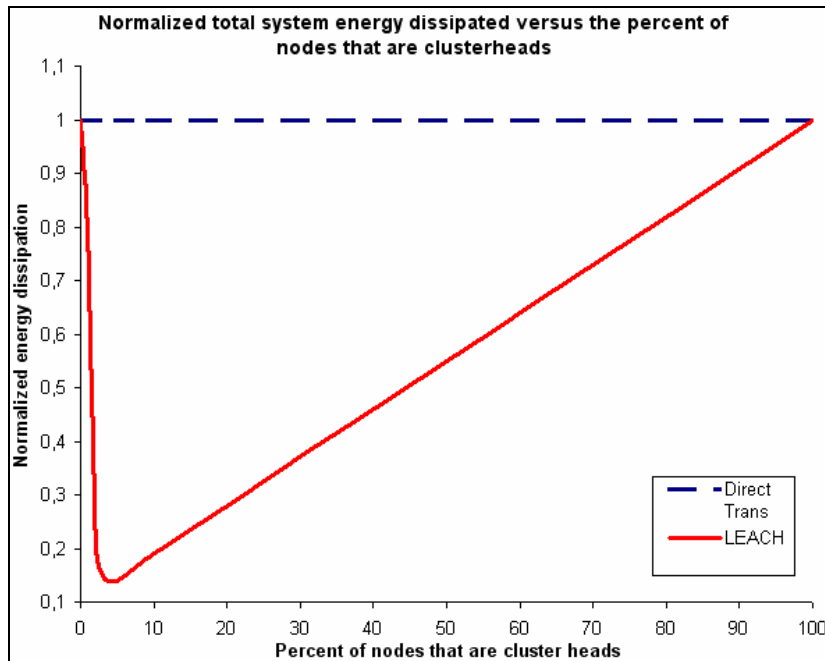
Φάση Εγκατάστασης

Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης ένας από τους αισθητήριους κόμβους επιλέγει τυχαία έναν αριθμό από το 0 μέχρι το 1. Εάν αυτός ο αριθμός που επιλέχθηκε τυχαία είναι μικρότερος από την τιμή κατωφλίου $T(n)$, τότε ο αισθητήριος κόμβος τίθεται αυτόματα ως επικεφαλής της συστοιχίας.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P^* \left[r \bmod \left(\frac{i}{P} \right) \right]} & n \in G \\ 0 & n \notin G \end{cases} \quad (4.34)$$

* Όπου:

- P είναι το ποσοστό επιθυμίας του αισθητήριου κόμβου να τεθεί ως επικεφαλής της συστοιχίας,
- r είναι ο αριθμός του γύρου επιλογής, και
- G είναι το σύνολο των κόμβων οι οποίοι δεν έχουν επιλεγεί ως επικεφαλής της συστοιχίας στους τελευταίους $1/P$ γύρους.



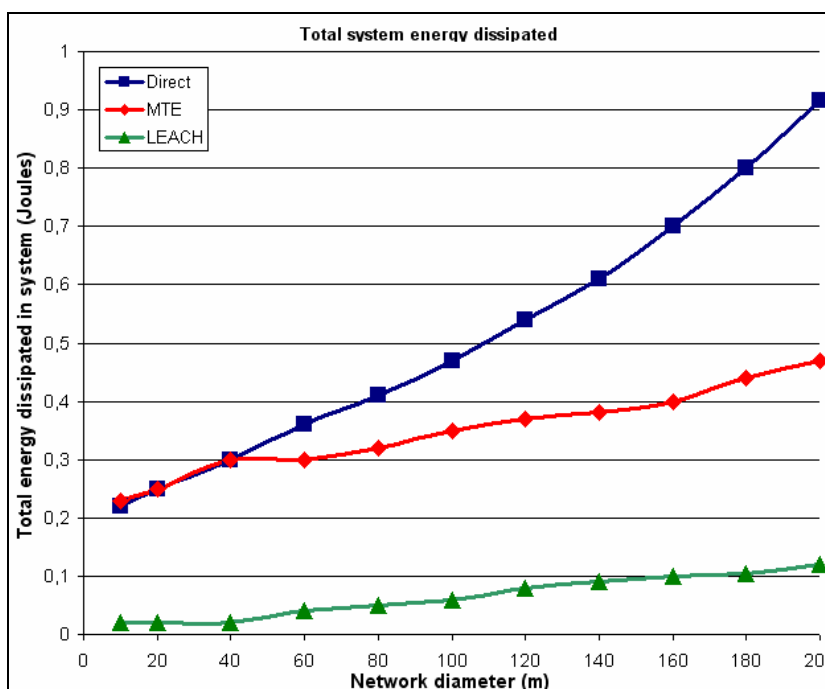
Σχήμα 4-21: Κανονικοποιημένη απώλεια ενέργειας / % αναλογία των clusterheads

Το $T(n)$ υπολογίζεται με βάση την παραπάνω εξίσωση. Το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων λαμβάνει γνώση του συμβάντος αμέσως μετά την επιλογή των επικεφαλής των συστοιχιών. Μόλις οι υπόλοιποι κόμβοι πληροφορηθούν για την ταυτότητα των κόμβων που έχουν τεθεί ως επικεφαλής της συστοιχίας, αποφασίζουν σε ποιον κόμβο επιθυμούν να ανήκουν, με βάση πάντοτε την ισχύ του σήματος που λαμβάνουν από τους νέους επικεφαλής των συστοιχιών. Αμέσως μετά ενημερώνουν τους επικεφαλής ότι ανήκουν πλέον στη δική τους συστοιχία, και στη συνέχεια οι επικεφαλής τους παραχωρούν μία χρονοσχιμή μέσω της οποίας θα μπορούν να μεταδίδουν τα δεδομένα τους.

Το σύστημα είναι σε θέση να προσδιορίσει εκ των προτέρων το βέλτιστο αριθμό των επικεφαλής των συστοιχιών στο σύστημα. Αυτό θα εξαρτηθεί από αρκετές παραμέτρους, όπως , για παράδειγμα, από την τοπολογία του δικτύου, καθώς και από τα σχετικά κόστη επεξεργασίας/επικοινωνίας δεδομένων. Έχει υπολογισθεί ότι υπάρχει μία βέλτιστη επί τοις εκατό αναλογία κόμβων \hat{N} που θα πρέπει να είναι επικεφαλής της συστοιχίας. Σε ένα απλό μοντέλο, όπου ο πομποδέκτης καταναλώνει $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ προκειμένου να λειτουργήσει σε ένα τυχαίο ασύρματο δίκτυο με 100 αισθητήριους κόμβους, τότε θα πρέπει να ισχύει $\hat{N} = 5\%$ (Σχήμα 4-21).

Φάση Μόνιμης Κατάστασης Λειτουργίας

Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν πλέον να πραγματοποιούν μετρήσεις, συλλέγοντας πληροφορίες από το περιβάλλον τους, και να αποστέλλουν τα δεδομένα τους στον επικεφαλής της συστοιχίας στην οποία ανήκουν. Στη συνέχεια οι επικεφαλής συγκεντρώνουν τα δεδομένα από όλους τους αισθητήριους κόμβους της συστοιχίας τους, και τα αποστέλλουν προς το σταθμό βάσης. Μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα παραμονής στη φάση λειτουργίας, αρχίζει εκ νέου η φάση εγκατάστασης, κ.ο.κ.



Σχήμα 4-22: Κατανάλωση ενέργειας/διάμετρος του δικτύου

Το LEACH μπορεί να επιτύχει σημαντική μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται από το δίκτυο, η οποία μπορεί να είναι μέχρι και 8 φορές χαμηλότερη από αυτήν που θα μπορούσε να επιτευχθεί με την απευθείας επικοινωνία (Direct Communication) και από 4 μέχρι 8 φορές χαμηλότερη από αυτήν που θα μπορούσε να επιτευχθεί με την ελάχιστη ενέργεια εκπομπής (MTE – Minimum Transmission Energy) Σχήμα 4.21 [61].

4.4.2.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks (PAR)

Το πρωτόκολλο με τίτλο “Power-Aware Routing (PAR) in mobile ad hoc networks ” [146] χρησιμοποιεί τις πέντε βασικές μετρικές (4.4.2), που αφορούν την εξοικονόμηση ενέργειας, για τον προσδιορισμό των διαδρομών (routes) στα ad hoc ασύρματα δίκτυα.

Ο τελικός στόχος είναι να αναπτύσσονται τέτοιες στρατηγικές που να ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας του υποσυστήματος επικοινωνίας και να αυξάνεται έτσι η διάρκεια ζωής των αισθητήριων κόμβων.

Το παρόν σχήμα εστιάζεται στη σχεδίαση πρωτοκόλλων τα οποία αυξάνουν τη διάρκεια ζωής όχι μόνο των κόμβων αλλά και ολόκληρου του δικτύου. Το κάθε επίπεδο (MAC, Δικτύου και Μεταφοράς) εξετάζεται μεμονωμένα.

Ο Suresh Singh *et al.* [146] απέδειξαν ότι το *Παρόν Πρωτόκολλο σε Επίπεδο MAC*, το οποίο χρησιμοποιείται στα ad hoc ασύρματα δίκτυα, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας από 40% μέχρι 70% για διαφορετικές συνθήκες φορτίου και δικτύου.

Όσον αφορά το *Πρωτόκολλο σε Επίπεδο Δικτύου*, η καλύτερη λύση είναι να δρομολογούνται τα πακέτα μέσα από κόμβους που έχουν ακόμη αρκετή ενέργεια (από το να δρομολογούνται μέσα από κόμβους που έχουν λίγη ή ελάχιστη ενέργεια).

Παρομοίως, η δρομολόγηση πακέτων μέσα από κόμβους με ελαφρά φορτία εξοικονομεί ενέργεια διότι ελαχιστοποιείται η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τον ανταγωνισμό.

Συμπερασματικά, με την ενημερωμένη από άποψη ισχύος δρομολόγηση (που βρίσκεται πάνω από το πρωτόκολλο MAC) μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια στο δίκτυο, και να αυξηθεί ταυτόχρονα η διάρκεια ζωής της μπαταρίας όλων των αισθητήριων κόμβων.

4.4.2.3 Energy Aware Routing for Low Energy Ad hoc Sensor Networks

Ένα ακόμη πρωτόκολλο δρομολόγησης το οποίο συμβάλλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι το “*Energy Aware Routing (EAR) for low energy ad hoc sensor networks*” [147]. Οι Shah και Rabaey [147] πρότειναν την περιστασιακή χρήση ενός συνόλου υποβέλτιστων μονοπατιών (sub-optimal paths) με σκοπό την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Αυτά τα μονοπάτια επιλέγονται με τη βοήθεια μιας συνάρτησης πιθανοτήτων (probability function) η οποία εξαρτάται από την ενέργεια που καταναλώνει το κάθε μονοπάτι. Η ικανότητα επιβίωσης του δικτύου είναι το κύριο μέλημα αυτής εδώ της προσέγγισης. Η προσέγγιση διαφωνεί με την επιχειρηματολογία που λέει ότι όταν κάποιος χρησιμοποιεί συνεχώς το μονοπάτι ελάχιστης ενέργειας θα εξαντλήσει την ενέργεια των κόμβων του μονοπατιού. Αντί για αυτό χρησιμοποιείται ένα από τα πολλά μονοπάτια με σίγουρη την πιθανότητα ότι έτσι θα αυξηθεί η διάρκεια ζωής του δικτύου. Το πρωτόκολλο υποθέτει ότι η πρόσβαση στη διεύθυνση του κάθε κόμβου είναι εφικτή μέσα από μία διευθυνσιοδότηση που έχει ως βάση την τάξη (class-based addressing) και η οποία περιλαμβάνει τη θέση και τον τύπο των κόμβων.

Σε αυτό το πρωτόκολλο διακρίνονται τρεις φάσεις:

Φάση Εγκατάστασης (Setup phase)

Σε αυτή τη φάση δημιουργείται τοπική πλημμύρα ή υπερχειλίση για την εύρεση των διαδρομών και τη δημιουργία πινάκων δρομολόγησης (routing tables). Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας υπολογίζεται το ολικό κόστος ενέργειας σε κάθε αισθητήριο κόμβο. Για παράδειγμα, εάν η αίτηση (request) αποστέλλεται από τον κόμβο N_i στον κόμβο N_j , τότε ο κόμβος N_j υπολογίζει το κόστος ανά μονοπάτι σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{N_j, N_i} = Cost(N_i) + Metric(N_j, N_i) \quad (4.35)$$

Εδώ, η μετρική ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε συλλαμβάνει τα κόστη εκπομπής και λήψης μαζί με την υπόλοιπη ενέργεια των αισθητήριων κόμβων. Μονοπάτια με πολύ μεγάλο ενεργειακό κόστος απορρίπτονται. Η επιλογή των αισθητήριων κόμβων γίνεται σύμφωνα με το πόσο κοντά

είναι ο προορισμός. Ο αισθητήριος κόμβος εκχωρεί (assigns) μία πιθανότητα σε κάθε έναν από τους γειτονικούς του κόμβους που εμπλέκονται στη δρομολόγηση (ή στον FT-Forwarding Table - Πίνακα Προώθησης), κατά αντιστοιχία με τα μονοπάτια που έχουν σχηματισθεί. Η πιθανότητα αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του κόστους, και δίνεται από την εξίσωση (4.36):

$$P_{N_j, N_i} = \frac{1/C_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/C_{N_j, N_k}} \quad (4.36)$$

Στη συνέχεια ο N_j υπολογίζει το μέσο κόστος που απαιτείται για να φθάσει στον προορισμό κάνοντας χρήση των γειτονικών κόμβων του Πίνακα Προώθησης (FT_j) και με βάση την εξίσωση (4.36):

$$Cost(N_j) = \sum_{i \in FT_j} P_{N_j, N_i} C_{N_j, N_i} \quad (4.37)$$

Το μέσο κόστος για τον N_j καταχωρείται στο πεδίο κόστους της αίτησης (request) και προωθείται περαιτέρω (forwarded).

Φάση Επικοινωνίας Δεδομένων (Data Communication phase)

Κάθε ένας από τους αισθητήριους κόμβους προωθεί τα πακέτα επιλέγοντας τυχαία έναν κόμβο από το δικό του Πίνακα Προώθησης (FT) κάνοντας χρήση των πιθανοτήτων.

Φάση Διατήρησης της Βάσης (Root Maintenance phase)

Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται τοπική υπερχειλίση από καιρού εις καιρό προκειμένου να διατηρηθούν «ζωντανά» όλα τα μονοπάτια.

Η προσέγγιση αυτή που μόλις περιγράψαμε είναι παρόμοια με τη μέθοδο της κατευθυνόμενης διάχυσης (Directed Diffusion - DD) όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο ανακαλύπτονται τα μονοπάτια από τις πηγές (sources) μέχρι τον αποδέκτη (sink).

Στη μέθοδο της Κατευθυνόμενης Διάχυσης (Directed Diffusion), τα δεδομένα αποστέλλονται μέσα από πολλαπλές διαδρομές, μία από τις οποίες εξαναγκάζεται να μεταδίδει δεδομένα σε υψηλότερες ταχύτητες (rates).

Στο εν λόγω σχήμα, οι R. Shah *et al* [147] επιλέγουν τυχαία ένα μόνο μονοπάτι από τις πολλές εναλλακτικές λύσεις που έχουν προκειμένου να εξοικονομηθεί ενέργεια. Ως εκ τούτου, από τη σύγκριση αυτού του σχήματος με το σχήμα της κατευθυνόμενης διάχυσης, προκύπτει ότι το εν λόγω σχήμα παρέχει μία συνολική βελτίωση της εξοικονομούμενης ενέργειας κατά 21.5% και κατά 44% αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου αισθητήρων.

Όμως, η χρήση ενός και μόνο μονοπατιού δυσκολεύει την ικανότητα του δικτύου να ανακάμψει μετά την απώλεια ενός κόμβου ή ενός μονοπατιού, αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στην κατευθυνόμενη διάχυση.

Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση απαιτεί την περισυλλογή τοπικών πληροφοριών και τη δημιουργία ενός μηχανισμού διευθυνσιοδότησης για τους αισθητήριους κόμβους, πράγμα το οποίο κάνει περισσότερο περίπλοκη τη δημιουργία ή εγκατάσταση διαδρομών (route setup) σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στη μέθοδο του directed diffusion.

4.4.2.4 Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad Hoc Networks

Το σχήμα με τίτλο “Power Management for Throughput Enhancement (PMTE) in wireless ad hoc networks” [148] επιχειρεί να βελτιώσει:

- την από άκρο σε άκρο ρυθμαπόδοση του δικτύου και
- τη μέση κατανάλωση ισχύος.

Ειδικότερα: Καθώς αυξάνεται η ισχύς και η εμβέλεια συνδεσιμότητας, ο κάθε κόμβος θα μπορούσε να φθάσει σχεδόν όλους τους άλλους κόμβους με ένα και μόνο βήμα (single hop). Όμως, επειδή η μεγαλύτερη ισχύς συνεπάγεται υψηλότερο επίπεδο παρενοχλήσεων (interference), συμβαίνουν περισσότερες συγκρούσεις, με συνέπεια την απαίτηση για δημιουργία περισσότερων προσπαθειών αναμεταδόσεων. Με την ελάττωση των επιπέδων της ισχύος μετάδοσης σε κάθε αισθητήριο κόμβο, η οποία όμως θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί ο κόμβος να συνδεθεί απευθείας με μόνο ένα μικρό υποσύνολο κόμβων του δικτύου, μειώνονται αισθητά οι ζώνες παρενοχλήσεων. Όμως, με αυτήν την πρόταση, το κάθε πακέτο θα πρέπει να διέρχεται μέσα από πολλούς ενδιάμεσους κόμβους (αναμεταδότες) προκειμένου να φθάσει στον προορισμό του. Επειδή υπάρχουν πολλές αναμεταδόσεις, η ρυθμαπόδοση μπορεί και πάλι να μειώνεται εξαιτίας της αύξησης των παρεμβολών.

Το παρόν σχήμα [148] εισάγει την έννοια της διαχείρισης ισχύος μέσα στα πλαίσια των ad hoc ασύρματων δικτύων. Εδώ διερευνώνται τα αποτελέσματα της χρήσης διαφορετικών επιπέδων ισχύος στη μέση κατανάλωση ενέργειας καθώς και η από άκρο σε άκρο ρυθμαπόδοση του δικτύου σε ένα ασύρματο ad hoc περιβάλλον. Αυτή η μεθόδευση της διαχείρισης ισχύος βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος και κατά συνέπεια συμβάλλει στην επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των κινούμενων κόμβων. Επιπλέον, βελτιώνει την από άκρο σε άκρο ρυθμαπόδοση του δικτύου συγκρινόμενη με άλλα ad hoc δίκτυα όπου όλοι οι κόμβοι τους χρησιμοποιούν την ίδια ισχύ μετάδοσης.

Η βελτίωση οφείλεται κυρίως στους εξής λόγους:

- Στην επίτευξη μιας εξισορρόπησης κατά την ελαχιστοποίηση των διαφόρων εμβελειών παρενόχλησης.
- Στη μείωση του μέσου αριθμού βημάτων (hops) μέχρι τον προορισμό.
- Στην πιθανότητα να υπάρξουν απομονωμένες συστοιχίες (clusters), και
- Στο μέσο αριθμό μεταδόσεων (συμπεριλαμβανομένων και των αναμεταδόσεων που οφείλονται σε συγκρούσεις).

Ο κύριος σκοπός αυτού του σχήματος είναι η διερεύνηση της επίδρασης που ασκεί ο χειρισμός της εμβέλειας συνδεσιμότητας N (Connectivity Range N), για διαφορετικά φορτία δικτύου, α) στην από άκρο σε άκρο ρυθμαπόδοση του δικτύου και β) στη μέση κατανάλωση ισχύος. Εδώ δεν λαμβάνονται υπόψη:

- «Καμία ρύθμιση της ισχύος μέσα σε συστοιχία», και
- «Ρύθμιση της ισχύος μέσα σε συστοιχία»

Αποδεικνύεται ότι η μέση ρυθμαπόδοση των κόμβων μειώνεται καθώς αυξάνεται η εμβέλεια συνδεσιμότητας N . Όσο αυξάνεται το N , τόσο πιο πολλοί κόμβοι συναγωνίζονται για να μεταδώσουν στην ίδια χρονοθυρίδα (timeslot), οπότε είναι πιο πιθανή η εμφάνιση συγκρούσεων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέσης ρυθμαπόδοσης των αισθητήριων κόμβων.

Έτσι, εάν $N > 10$, τότε η μέση ρυθμαπόδοση των αισθητήριων κόμβων είναι περίπου 0.3 (εφόσον δεν υπάρχει καμία ρύθμιση μέσα στη συστοιχία) ή 0.48 (εφόσον υπάρχει ρύθμιση μέσα στη συστοιχία).

Η μέση κατανάλωση ισχύος αυξάνεται συγχρόνως με την αύξηση της εμβέλειας συνδεσιμότητας N . Ως εκ τούτου, εάν $N=15$, τότε η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι 100% (εφόσον δεν υπάρχει καμία ρύθμιση μέσα στη συστοιχία) ή 35 (εφόσον υπάρχει ρύθμιση μέσα στη συστοιχία).

Συμπερασματικά, χρησιμοποιείται η δρομολόγηση ελάχιστης ισχύος για την ακόμη πιο αποδοτική λειτουργία του κυκλώματος.

4.4.2.5 A Distributed Transmission Power Control Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

Ο A. Muqattash *et al.* προτείνουν το πρωτόκολλο “*Distributed Transmission Power Control (DTPC) protocol for mobile ad hoc networks*” [149] το οποίο βασίζεται σε τεχνικές του φυσικού επιπέδου προκειμένου να μετριασθεί η επίδραση που ασκεί η επιλογή της πολλαπλής διαδρομής, και αυτό έχει απήχηση σε κανάλια μέτριας εξασθένησης.

Πρωταρχικός στόχος αυτού του σχήματος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσα από τη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών διαδρομών και η δόμηση μιας επίσης ενεργειακά αποδοτικής τοπολογίας δικτύου.

Ο αλγόριθμος αυτού του πρωτοκόλλου στοχεύει στην από άκρο σε άκρο δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών διαδρομών, ενώ ταυτόχρονα φροντίζει τόσο για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας του δικτύου όσο και για την εισαγωγή της λιγότερης δυνατής επιβάρυνσης.

Κατά τη σχεδίαση και μελέτη αυτού του πρωτοκόλλου ελήφθησαν υπόψη οι παρακάτω υποθέσεις:

- Η ενίσχυση του καναλιού παραμένει στάσιμη (stationary) κατά τη διάρκεια του ελέγχου και κατά τη διάρκεια των περιόδων μετάδοσης των πακέτων δεδομένων.
- Η ενίσχυση μεταξύ δύο κόμβων είναι η ίδια και προς τις δύο κατευθύνσεις, και τα πακέτα δεδομένων και ελέγχου, μεταξύ ενός ζεύγους αισθητήριων κόμβων, παρουσιάζουν παρόμοιες ενισχύσεις καναλιού.
- Εκτός από τις δύο παραπάνω υποθέσεις, έχει επίσης υποθεθεί ότι η διεπαφή ασύρματης επικοινωνίας (radio interface) μπορεί να τροφοδοτήσει το επίπεδο MAC με τη μέση ισχύ του λαμβανομένου σήματος ελέγχου καθώς και με τη μέση ισχύ παρεμβολών.

Σε αυτό το σχήμα μπορούν να αποφευχθούν οι συγκρούσεις εάν οι αισθητήριοι κόμβοι μεταδίδουν τα πακέτα ελέγχου (RTS/CTS) με σταθερή στάθμη ισχύος (P_{max}), και τα πακέτα δεδομένων με μεταβλητή (χαμηλότερη) στάθμη ισχύος. Αυτό το τελευταίο είναι και το κλειδί αυτής της πρότασης. Ως εκ τούτου, απαιτούνται διαφορετικά κανάλια για τη μετάδοση των πακέτων ελέγχου και δεδομένων προκειμένου να καταστεί δυνατή η δυναμική ρύθμιση της ισχύος για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων.

Τα πακέτα ελέγχου μεταδίδονται με μία στάθμη ισχύος P_{max} και λαμβάνονται ενδεχομένως από όλους τους ενδιάμεσους κόμβους, όπως συμβαίνει και στο πρωτόκολλο IEEE 802.11. Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο IEEE 802.11, οι παρεμβαλλόμενοι (interfering) κόμβοι είναι πολύ πιθανόν να τους επιτρέπεται να μεταδίδουν παράλληλα, και αυτό εξαρτάται κυρίως από κάποια κριτήρια.

Σε αντίθεση πάλι προς το IEEE 802.11 και άλλα σχήματα που έχουν κατά καιρούς προταθεί στο παρελθόν, αυτό το σχήμα [149] δε χρησιμοποιεί τα πακέτα RTS/CTS για να επιβάλλει τη σιωπή στους γειτονικούς κόμβους. Αντί αυτής της μεθόδου, χρησιμοποιεί την ακόλουθη τεχνική: Η

πληροφορία που αφορά την αποφυγή συγκρούσεων εισάγεται στα πακέτα CTS και μεταδίδεται σε ένα εκτός ζώνης κανάλι ελέγχου. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να επιβάλλει δυναμικά ένα όριο στην ισχύ μετάδοσης των παρεμβαλλομένων, ενδεχομένως, αισθητήριων κόμβων που βρίσκονται στην περιοχή του δέκτη. Με κατάλληλους υπολογισμούς της απαιτούμενης ισχύος μετάδοσης μπορεί να επιτραπεί η ταυτόχρονη περιορισμένης παρενόχλησης μετάδοση στην περιοχή ενός αισθητήριου κόμβου δέκτη.

Μόλις ο προτεινόμενος κόμβος, έστω ο I , λάβει το πακέτο RTS χρησιμοποιεί τη γνωστή τιμή P_{max} και την ισχύ του ληφθέντος σήματος $P_{received}^{ij}$ για να υπολογίσει την ισχύ του καναλιού μεταξύ των κόμβων i και j εκείνη τη χρονική στιγμή με βάση την (4.38).

$$G_{ji} = \frac{P_{received}^{(ji)}}{P_{max}} \quad (4.38)$$

Με ανάλογο τρόπο, ο κόμβος i θα μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά το πακέτο δεδομένων εφόσον αυτό μεταδόθηκε με ισχύ $P_{min}^{(ji)}$ η οποία προσδιορίζεται από την εξίσωση (4.39).

$$P_{min}^{(ji)} = \frac{SNR_{th} (P_{thermal} + P_{MAI-current}^i)}{G_{ji}} = \frac{SNR_{th} n^i}{G_{ji}} \quad (4.39)$$

Όπου:

SNR_{th} είναι ο ελάχιστος λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτείται για την επίτευξη του σκοπούμενου λόγου σφάλματος δυαδικού ψηφίου,

$P_{thermal}$ είναι η ισχύς του θερμικού θορύβου,

$P_{MAI-current}^{(i)}$ είναι η τρέχουσα παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference - MAI).

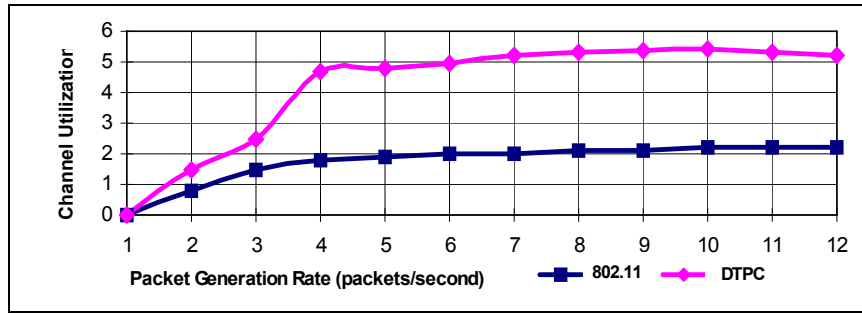
Ο τρέχων λόγος σήματος προς θόρυβο $SNR_{(j)}$ δίνεται από την εξίσωση (4.40).

$$SNR^{(i)} = \frac{P_j^{(i)}}{P_{thermal} + P_{MAI-current}^i + P_{MAI-future}^{(i)}} \quad (4.40)$$

Όπου: $P_{MAI-future}^i$ είναι η πρόσθετη παρεμβολή που μπορεί να αντέξει ο κόμβος i από μελλοντικές ακούσιες μεταδόσεις.

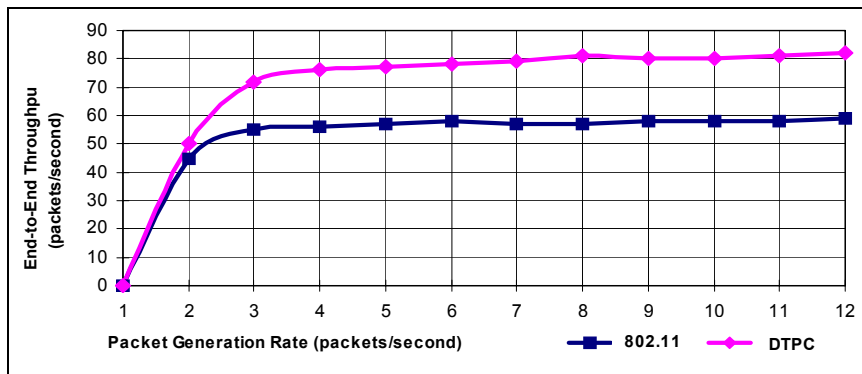
Καθώς ο προσδιορισμός του κατωφλίου για τη μετάδοση του αισθητήριου κόμβου είναι θέμα που αφορά το επίπεδο MAC, ο έλεγχος ισχύος παρουσιάζεται από την οπτική γωνία και των δύο επιπέδων. Αποδεικνύεται ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση του δικτύου με τη μετάδοση πακέτων στον πλησιέστερο γειτονικό κόμβο στις κατευθύνσεις ορθής φοράς.

Ο υποδιπλασιασμός (halving) της εμβέλειας μετάδοσης [149,150], διπλασιάζει τον αριθμό των βημάτων (hops) αλλά μειώνει την περιοχή του εφεδρικού (reserved) κατωφλίου στο $\frac{1}{4}$ της αρχικής του τιμής, επιτρέποντας έτσι περισσότερες μεταδόσεις στη γειτονική περιοχή. Εκτός από τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, η μείωση της εμβέλειας μετάδοσης συνεπάγεται και τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται [96], [151].

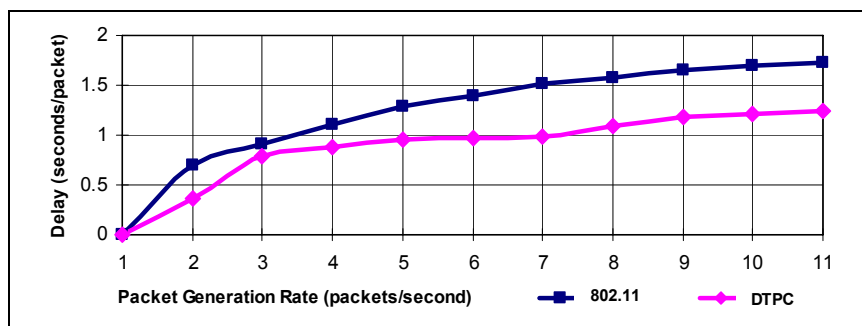


Σχήμα 4-23: Χρήση καναλιού μεταξύ IEEE 802.11 και DTPC

Συγκρίνοντας τη λειτουργία του σχήματος DTPC με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου IEEE 802.11 standard [149], προκύπτει ότι το σχήμα DTPC μπορεί να βελτιώσει τη χρήση του καναλιού μέχρι 50% (Σχήμα 4-22), και την από άκρο σε άκρο ρυθμαπόδοση πάνω από 45% (για τυχαίες τοπολογίες δικτύου) (Σχήμα 4-23).



Σχήμα 4-24: Ρυθμαπόδοση μεταξύ IEEE 802.11 και DTPC



Σχήμα 4-25: Χρονική καθυστέρηση μεταξύ IEEE 802.11 και DTPC

Συγχρόνως, το DTPC [149] παρέχει περισσότερο από 76% μείωση στην ενέργεια που καταναλώνεται προκειμένου να μεταδοθεί επιτυχώς ένα πακέτο από την πηγή στον προορισμό.

Το DTPC μειώνει επίσης την από άκρο σε άκρο χρονική καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων. Σύμφωνα με όσα είναι γνωστά στους συγγραφείς, αυτό είναι το πρώτο πρωτόκολλο που μπορεί να προσφέρει μία κατανοητή και αποδοτική λύση στο πρόβλημα του ελέγχου ισχύος στα κινητά δίκτυα ad hoc (MANETs) [96].

4.4.3 Επίπεδο Δικτύου – Πρωτόκολλα Δρομολόγησης για Μέγιστη Διάρκεια Ζωής

4.4.3.1 Routing in Ad Hoc Networks using Minimum Connected Dominating Sets

Το σχήμα με τίτλο “*Routing in Ad Hoc Networks using Minimum Connected Dominating Sets*” (RAN-MCDS) [118] χρησιμοποιεί εικονική δομή κορμού (virtual backbone structure) για να υποστηρίξει δρομολογήσεις διαφορετικών τύπων, όπως, απλής ή πολλαπλής εκπομπής (unicast, multicast) καθώς και δρομολογήσεις ανεκτικών σε σφάλματα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Αυτός ο εικονικός ή κορμός δικτύου διαφέρει από τον ενσύρματο κορμό των κυβελωτών δικτύων σε δύο σημεία:

- Είναι πιθανόν να τροποποιηθεί η δομή του κορμού καθώς μετακινούνται οι κόμβοι, και
- Δε χρησιμοποιείται κυρίως για δρομολόγηση πακέτων ή ροών, παρά μόνο για την εκτέλεση υπολογισμών και ενημέρωση διαδρομών (updating routes).

Οι κύριες διαδρομές πακέτων ή ροών υπολογίζονται ακόμη με υπολογισμό του συντομότερου μονοπατιού (shortest-path computation). Ο εικονικός κορμός δικτύου μπορεί, εφόσον κριθεί αναγκαίο, να διασφαλίσει εφεδρικές διαδρομές (backup routes) για τη διαχείριση προσωρινών αποτυχιών.

Εξαιτίας της δυναμικής φύσης του εικονικού κορμού, η παρούσα προσέγγιση διαχωρίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης σε δύο επίπεδα:

- Βρίσκει και ενημερώνει τον εικονικό κορμό δικτύου (καταρχήν), και
- Βρίσκει και ενημερώνει τις διαδρομές (στη συνέχεια).

Η βασική συνεισφορά αυτού του σχήματος είναι ότι περιγράφει αρκετές εναλλακτικές λύσεις που αφορούν το πρώτο επίπεδο, δηλαδή την εύρεση και την ενημέρωση του εικονικού κορμού.

Εδώ χρησιμοποιείται η προσέγγιση “*Minimum Connected Dominating Set*” (MCDS) στην ad-hoc τοπολογία του δικτύου προκειμένου να διατηρηθεί ο εικονικός κορμός δικτύου στο ελάχιστο δυνατό μέγεθος.

Ως εκ τούτου, αυτός ο MCDS αλγόριθμος δρομολόγησης διασφαλίζει τα πιο σύντομα μονοπάτια των διαδρομών και επιπλέον ενημερώνει γρήγορα τις διαδρομές μετά τη μετακίνηση των κόμβων. Οι παραλλαγές του αλγόριθμου προσέγγισης MCDS, υλοποιούν ειδικές περιπτώσεις γραφικών παραστάσεων περιορισμένου βαθμού.

4.4.3.2 Energy Efficient Broadcast Routing in Static Ad hoc Wireless Networks

Το σχήμα με τίτλο “*Energy Efficient Broadcast Routing (EEBR) in static ad hoc wireless networks*” [152] αντιμετωπίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης εκπομπής (broadcast routing) στα ad hoc ασύρματα δίκτυα και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ισχύος με ταυτόχρονη επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των κόμβων.

Στο EEBR, το ενεργειακό κόστος (energy cost) μιας εκπομπής ορίζεται ως το άθροισμα του ενεργειακού κόστους όλων των κόμβων που εκπέμπουν το προς δημοσιοποίηση μήνυμα (broadcast message) στο δέντρο εκπομπής (broadcast tree).

Το πρόβλημα εδώ, το οποίο είναι παρόμοιο με τα προβλήματα που αναφέρονται στα [153] και [154], ονομάζεται MEB (Minimum Energy Broadcast – εκπομπή ελάχιστης ενέργειας) και έχει ως εξής: «Έχοντας ως δεδομένο ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο, να βρεθεί ένα δέντρο εκπομπής

τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται το ενεργειακό κόστος. Κάθε κόμβος στο δίκτυο υποτίθεται ότι έχει ένα αμετάβλητο επίπεδο ισχύος μετάδοσης.»

Το δίκτυο μοντελοποιείται από ένα κατευθυνόμενο γράφο (directed graph), $G = (V, A)$, όπου, το V αντιπροσωπεύει το σύνολο των ασύρματων κόμβων και το A αντιπροσωπεύει το σύνολο των τροχιών στο δίκτυο.

Για κάθε έναν κόμβο $u \in V$, υπάρχει ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος εκπομπής $p(u)$.

Για κάθε δύο κόμβους u_1 και u_2 , εάν u_2 βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια της ισχύος εκπομπής του u_1 [δηλαδή $d^a(u_1, u_2) \leq p(u_1)$], ενώ $d(u_1, u_2)$ είναι η απόσταση μεταξύ των κόμβων u_1 και u_2 , και a είναι μία τιμή μεταξύ 2 και 4), τότε υπάρχει μία τροχιά (arc) $(u_1, u_2) \in A$ (π.χ., μία κατευθυνόμενη ζεύξη (directed link) από τον κόμβο u_1 στον κόμβο u_2).

Υποτίθεται ότι T είναι ένα δέντρο κατευθυνόμενο από την εκπομπή (broadcast directed tree) και έχει ως αρχή (sourced) το s .

Στο δέντρο T υπάρχουν δύο ειδών κόμβοι:

- Κόμβοι που είναι υποχρεωμένοι να μεταδίδουν/αναμεταδίδουν (transmit/relay) μηνύματα δημοσιοποίησης (broadcast messages) για το s , και
- Κόμβοι που μόνο λαμβάνουν μηνύματα δημοσιοποίησης από το s .

Υποθέτουμε ότι ένας κόμβος έχει ενεργειακό κόστος μόνο όταν εκτελεί μεταδόσεις. Έστω ότι $NL(T)$ υποδηλώνει το σύνολο των κόμβων χωρίς φύλλα (non-leaf nodes) του T .

Το συνολικό ενεργειακό κόστος $C(T)$ του T έχει τη μορφή της εξίσωσης (4.41):

$$C(T) = \sum_{u \in NL(T)} p(u) \quad (4.41)$$

Υποτίθεται ότι ένας κόμβος κοστίζει σε ενέργεια μόνο όταν εκπέμπει. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τρεις heuristic αλγόριθμοι [152].

Πρώτος Heuristic Αλγόριθμος (Μετασχηματίζοντας το MEB σε Πρόβλημα Directed Steiner Tree)

Στα δίκτυα ad-hoc, το πρόβλημα MEB είναι να βρεθεί ένα δέντρο εκπομπής (broadcast tree) τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό ενεργειακό κόστος αυτών των κόμβων που εκπέμπουν.

Σε αυτό εδώ το μοντέλο δικτύου η ισχύς εκπομπής ενός κόμβου προσδιορίζεται από το βάρος του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε heuristic του προβλήματος *directed Steiner tree* [155] προκειμένου να δοθεί λύση στο πρόβλημα.

Στην προσομοίωση, χρησιμοποιείται ο heuristic που έχει ως βάση το δέντρο με το πιο σύντομο μονοπάτι (shortest path tree-based heuristic) προκειμένου να υπολογισθεί το πρόβλημα του directed Steiner tree στο G' (ένα νέο γράφο που αποτελούσε το βάρος στις τροχιές) για να δώσει ένα δέντρο εκπομπής στο G (γράφο του δικτύου).

Δεύτερος Heuristic Αλγόριθμος (Sound ή Greedy Heuristic Αλγόριθμος)

Εδώ παρουσιάζονται δύο σύνολα (sets):

- Το *cover-set*, το οποίο περιέχει τους κόμβους που μεταδίδουν/αναμεταδίδουν (transmit/relay) τα μηνύματα, και
- Το *covered set*, το οποίο περιέχει τους κόμβους οι οποίοι είναι οι εξερχόμενοι (outgoing) γείτονες των κόμβων του *cover-set*.

Για να επιλεγούν οι κόμβοι στο *cover-set* με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ενεργειακό κόστος του δέντρου εκπομπής, προτείνεται η συνάρτηση (4.42).

$$|V_i \cap U| / p^{(u_i)} \quad (4.42)$$

Όπου, V_i είναι το σύνολο (set) των εξερχομένων γειτονικών κόμβων του κόμβου u_i και U το σύνολο εκείνων των κόμβων που δεν έχουν καλυφθεί μέχρι στιγμής.

Η συνάρτηση (4.42) αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κόμβων που μπορεί να καλύψει ένας κόμβος ανά μονάδα ενέργειας. Κάθε φορά θα επιλέγεται στο *cover-set* εκείνος ο κόμβος που θα έχει τη μέγιστη τιμή αυτής της συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα το ενεργειακό κόστος του δέντρου εκπομπής.

Τρίτος Heuristic Αλγόριθμος (A Node-Weighted Steiner Tree-based Αλγόριθμος)

Αυτός ο heuristic αλγόριθμος κάνει μία καθολική προσέγγιση (global approach), αρχίζοντας από οποιονδήποτε κόμβο στο δίκτυο, προκειμένου να δομήσει ένα δέντρο εκπομπής με επαρκές ενεργειακό κόστος. Η βασική του ιδέα μιμείται τη στρατηγική που έχει χρησιμοποιηθεί στο πρόβλημα του “node weighted Steiner tree” [155].

Η προσομοίωση των τριών αλγορίθμων, συγκεκριμένα: του Shortest-Path Tree-based heuristic (SPT-h), του Greedy heuristic (Greedy-h), και του Node-Weighted Steiner Tree-based heuristic (NST-h) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται το συνολικό ενεργειακό κόστος όταν μεταβληθεί ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο (N) καθώς και η μέση τιμή της ακτίνας (R) σε μία μεγάλη περιοχή. Σύμφωνα με τα γραφήματα του “συνολικού ενεργειακού κόστους” σε συνάρτηση με τον “αριθμό των κόμβων”, έχουν γίνει οι εξής παρατηρήσεις:

- Ο αλγόριθμος *Greedy-h* λειτουργεί συνεχώς.
- Οι αλγόριθμοι *Greedy-h* και *NST-h* έχουν και οι δύο τους καλλίτερη επίδοση από ότι ο *SPT-h*.

Τα αποτελέσματα των *Greedy-h* και *NST-h* είναι πολύ κοντά μεταξύ τους όταν το R (η μέση τιμή της ακτίνας) είναι πολύ μικρή (μικρότερη από 0.4) ή μεγάλη (μεγαλύτερη από 0.7).

Σύμφωνα με τα γραφήματα του “συνολικού ενεργειακού κόστους” σε συνάρτηση με τη “μέση τιμή της ακτίνας (R)”, παρατηρήθηκε ότι το συνολικό ενεργειακό κόστος αυξάνεται όσο μειώνεται η μέση τιμή της ακτίνας R . Όταν η ακτίνα R είναι πολύ μεγάλη, τότε όλοι οι αλγόριθμοι είναι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο διότι ο πηγαίος κόμβος (source node) μπορεί σχεδόν απευθείας να φτάσει όλους τους υπόλοιπους κόμβους χωρίς να χρειαστεί να χρησιμοποιήσει κόμβους αναμετάδοσης (relaying nodes).

Σε όλες τις παραπάνω προσομοιώσεις που αναφέρθηκαν, οι κόμβοι έχουν διαφορετική ισχύ μετάδοσης (π.χ. με διαφορετικές ακτίνες εκπομπής). Εάν όλοι οι κόμβοι έχουν την ίδια ακτίνα εκπομπής, τότε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν απόλυτα με την περίπτωση εκείνη όπου οι κόμβοι έχουν διαφορετικές ισχύεις μετάδοσης.

Επιπλέον, οι προτεινόμενοι heuristics συμπεριφέρονται πολύ καλά στην περίπτωση της ομοιόμορφης ισχύος μετάδοσης.

Συμπέρασμα

- Το κόστος λήψης παραμένει σταθερό άσχετα με την απόσταση που χωρίζει την πηγή παραγωγής του σήματος από το δέκτη, και
- Το συνολικό κόστος λήψης (reception cost) οποιουδήποτε δέντρου εκπομπής παραμένει σταθερό άσχετα με το ποιο είναι το δέντρο.

Μελλοντική Εργασία

Η μελλοντική εργασία θα μπορούσε να επικεντρωθεί:

- Στο εάν και κατά πόσο το κόστος λήψης είναι επίσης *ευαίσθητο στην απόσταση* (distance-sensitive), με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πολύ περισσότερο περίπλοκης δομής του δέντρου εκπομπής, και
- Στην ανάπτυξη κατανεμημένων αλγορίθμων για ενεργειακά αποδοτική εκπομπή η οποία θα λαμβάνει υπόψη και την κινητικότητα των κόμβων.

4.4.4 Σχήματα Επιπέδου Μεταφοράς

4.4.4.1 Application-Driven Power Management for Mobile Communication (ADPM)

Το σχήμα "*Application-Driven Power Management (ADPM) for mobile communication*" [110] είναι ένα καινοτομικό πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς (transport level protocol) το οποίο μπορεί, μέσα από μηχανισμούς, να διαχειριστεί και να μειώσει σημαντικά την ενέργεια που καταναλώνει η συσκευή επικοινωνίας.

Επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας με την επιλογή μικρών χρονικών διαστημάτων εντός των οποίων αναστέλλεται η επικοινωνία με την απενεργοποίηση του πομποδέκτη. Διαχειρίζεται το σημαντικότερο έργο της τοποθέτησης των δεδομένων στην ουρά αναμονής (queuing data) για μελλοντική παράδοση κατά τη διάρκεια των περιόδων όπου η επικοινωνία βρίσκεται σε αναστολή, και αποφασίζει για το πότε θα ξαναρχίσει η επικοινωνία. Εδώ πραγματοποιείται επίσης και η εξισορρόπηση (trade-off) ανάμεσα στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος και στη μείωση της χρονικής καθυστέρησης για τα εισερχόμενα δεδομένα.

Οι R. Kravets και P. Krishnam κατάφεραν να επιτύχουν μέχρι και 83% εξοικονόμηση της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας. Η χρονική καθυστέρηση που προέκυψε είναι μικρή, από 0.4s μέχρι 3.1s, και εξαρτάται από το επίπεδο διαχείρισης της ισχύος.

4.4.4.2 An Experimental Study of TCP's Energy Consumption over a Wireless Link

Πολύ λίγο έργο έχει δημοσιευθεί σε θέματα που αφορούν το πρόβλημα της κατανάλωσης ενέργειας στο επίπεδο μεταφοράς.

Στην παρούσα επιστημονική εργασία με τίτλο "*An Experimental Study of TCP's Energy Consumption over a Wireless Link*" [121] εξετάζεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας του TCP διατηρώντας συγχρόνως τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τα standards. Πρόκειται για μία πειραματική μελέτη η οποία έχει ως στόχο τη βελτίωση της επίδοσης του TCP μέσα από την αποδοτική χρησιμοποίηση της ενέργειας των αισθητήριων κόμβων. Ως εκ τούτου, εδώ:

- εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρεται το TCP σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας σε ασύρματες ζεύξεις, και
- προτείνονται τρόποι βελτίωσης οι οποίοι έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι διάφορες τροποποιήσεις καθώς και οι λεπτές ρυθμίσεις του κώδικα TCP που προτείνονται σε αυτό το σχήμα έχουν ως στόχο τη διατήρηση της ισχύος της μπαταρίας του κάθε κόμβου στο δίκτυο εξοικονομώντας από τη μείωση της επιβάρυνσης του λογισμικού καθώς και από τη μείωση της επεξεργασίας του ίδιου του πρωτοκόλλου.

Γενικές Παρατηρήσεις

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν ένα σχετικά μικρό εύρος ζώνης (11 Mbits/s για τις νέες κάρτες WaveLAN) και η χρονική καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) του μέσου (medium) είναι επίσης μικρή (επειδή οι αποστάσεις μεταξύ της πηγής και του προορισμού δεν είναι γενικά πολύ μεγάλες).

Οι συνέπειες αυτής της διαπίστωσης είναι ότι το προϊόν της ευρυζωνικής χρονικής καθυστέρησης (delay bandwidth product) για τα ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι κατά πολύ μικρότερο από αυτό των δικτύων Long Fat Networks (LFNs) και κατά συνέπεια πολλές από τις υλοποιημένες επιλογές για την υποστήριξη των δικτύων LFNs δεν θα ταίριαζαν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι διάφορες επιλογές, που έχουν συμπεριληφθεί στις τρέχουσες υλοποιήσεις του TCP, είναι κατάλληλες μόνο για τα δίκτυα LFNs και απαιτούν τροποποιήσεις όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε βραδυκίνητα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Αυτή η μελέτη περιγράφει τον τρόπο που δουλεύει η κάθε μία από αυτές τις επιλογές και εξηγεί τους λόγους για τους οποίους θα πρέπει αυτές να τίθενται εκτός λειτουργίας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Οι S. Agrawal και S. Singh απέδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση κατά 25% στην απόδοση του TCP για το ίδιο ποσό της καταναλισκόμενης ισχύος.

4.4.4.3 Reliable and Energy Efficient Transport layer for Sensor Networks

Τα διάφορα παραδοσιακά από άκρο-σε-άκρο πρωτόκολλα που αναφέρονται στο επίπεδο μεταφοράς, και που έχουν προταθεί μέχρι στιγμής, δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων επειδή βασίζονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους στην από άκρο-σε-άκρο και στη βήμα-προς-βήμα αναμετάδοση για αξιόπιστη διανομή μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων. Οι από άκρο-σε-άκρο αναμεταδόσεις δεν μπορούν να κάνουν επεκτάσιμο το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για το λόγο ότι ο αριθμός των κόμβων από το οποίο αποτελείται είναι πάρα πολύ μεγάλος και μπορεί να είναι πολύ δύσκολο έως απίθανο για τον κόμβο αποδέκτη (sink) να εντοπίζει χιλιάδες συνδέσεις από εκείνους τους κόμβους που συλλέγουν τα διάφορα δεδομένα. Επιπλέον, οι από βήμα-σε-βήμα αναμεταδόσεις είναι ενεργειακά αποδοτικές (μικρή εκπομπή ισχύος) επειδή η από άκρο-σε-άκρο ασύρματη εκπομπή είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας στους αισθητήριους κόμβους.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, οι Djukic and Valaee στο [156] πρότειναν το “Diversity Coded Directed Diffusion” (DCDD), ένα αξιόπιστο και ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο στο επίπεδο μεταφοράς πάνω από το directed diffusion για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Στο DCDD, ο κόμβος αποδέκτης (sink) χρησιμοποιεί έναν αριθμό κόμβων λήψης δεδομένων που ονομάζονται “prongs”. Τα prongs συνδέονται στο DCDD με αξιόπιστες ζεύξεις.

Το DCDD χρησιμοποιεί πολλαπλές διαδρομές δικτύου καθώς και έναν κώδικα διαγραφής (FEC - Forward Erasure Code) με σκοπό την αύξηση της αξιοπιστίας και τη βελτίωση της απόδοσης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Οι αισθητήριοι κόμβοι διασπούν τις παρατηρήσεις σε πολλά κομμάτια με τη βοήθεια ενός κώδικα διαγραφής και στη συνέχεια δημιουργούν κομμάτια ισότητας με έναν αλγόριθμο FEC. Ακολούθως, αυτά τα νέα κομμάτια διανέμονται στις διαδρομές επικοινωνίας και ταυτόχρονα στέλνονται στον κόμβο αποδέκτη (sink). Αυτός ο κόμβος έχει τη δυνατότητα να ανασυνθέτει τα πακέτα (δηλ. τις παρατηρήσεις) εφόσον λάβει ένα τμήμα του κομματιού (fragment) το οποίο (τμήμα) έχει το ίδιο μέγεθος με τις αρχικές παρατηρήσεις. Με τη βοήθεια του προσομοιωτή NS-2, εξέτασαν την ικανότητα της δικής τους προσέγγισης DCDD για να αυξήσουν την από άκρο-σε-άκρο αξιοπιστία και να ελαττώσουν την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις τους έδειξαν ότι το δίκτυο που

χρησιμοποιεί το DCDD υπερτερεί εκείνου του δικτύου του οποίου οι κόμβοι χρησιμοποιούν μόνο αναμεταδόσεις MAC προκειμένου να αυξήσουν την αξιοπιστία. Συμπερασματικά, το DCDD αυξάνει όχι μόνο την αποδοτικότητα αλλά επίσης και την από άκρο-σε-άκρο αξιοπιστία, και μειώνει τη χρονική καθυστέρηση στο δίκτυο.

4.4.4.4 STPC: A Generic transport Layer Protocol for Wireless Sensor Networks

Ο Y.G. Iyer, *et al.* [157] πρότειναν το STCP (Sensor Transmission Control Protocol), ένα γενικό, αξιόπιστο, επεκτάσιμο, και ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο στο επίπεδο μεταφοράς ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπου οι περισσότερες λειτουργίες έχουν ενσωματωθεί στο σταθμό βάσης. Το STCP προσφέρει ανίχνευση και αποφυγή συμφόρησης (συνωστισμού), ελεγχόμενη μεταβλητή αξιοπιστία, και υποστηρίζει πολλές διαφορετικές εφαρμογές στο ίδιο το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Η αξιολόγηση αυτού του πρωτοκόλλου, με διαφορετικά σενάρια και χαρακτηριστικά δικτύου, απέδειξε ότι το STCP υπερτερεί κατά πολύ άλλων σχετικών πρωτοκόλλων στο επίπεδο μεταφοράς.

4.5 Ανακεφαλαίωση

Επειδή τα σχήματα ελέγχου και διαχείρισης της ισχύος σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσελκύουν όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών κατά τα τελευταία έτη, ένα πολύ μεγάλο μέρος της έρευνας ασχολείται με τα θέματα που σχετίζονται με αυτά.

Ο έλεγχος και η διαχείριση της ισχύος είναι από τους βασικότερους παράγοντες που συντελούν στην καλή λειτουργία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, συνεπώς, η έρευνα που σχετίζεται με αυτούς αποτελεί πάντοτε τον απώτερο στόχο.

Οι διάφοροι τύποι των σχημάτων ελέγχου και διαχείρισης της ισχύος μπορεί να έχουν διαφορετικούς στόχους και σκοπούς. Όμως, το κόστος διαχείρισης της ισχύος πρέπει να λαμβάνεται πάντοτε σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός σχήματος ελέγχου ισχύος, διότι αυτό αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση του σχήματος, άσχετα με τους όποιους ειδικούς σκοπούς αυτό εξυπηρετεί.

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μία εκτενής αναφορά των θεμελιωδών εννοιών γύρω από τα θέματα διαχείρισης της ισχύος, τα οποία συμπεριλαμβάνουν την ανάγκη επιβολής της στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τις παρενέργειές της, καθώς επίσης και το κόστος αυτής της διαχείρισης.

Ειδικότερα, οι *Μηχανισμοί Ελέγχου και Διαχείρισης της Ισχύος* διαιρέθηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση τους κύριους σκοπούς που αυτοί εξυπηρετούν: στους *Παθητικούς* και στους *Ενεργούς Μηχανισμούς Ελέγχου και Διαχείρισης της Ισχύος*. Στη συνέχεια, οι *Παθητικοί Μηχανισμοί Ελέγχου και Διαχείρισης της Ισχύος* διαιρέθηκαν σε τρεις υποκατηγορίες: στους *Μηχανισμούς Ελέγχου και Διαχείρισης της Ισχύος στο Φυσικό Επίπεδο*, στους *Fine-Grain* και στους *Coarse-Grain Μηχανισμούς Ελέγχου και Διαχείρισης της Ισχύος*. Για την υλοποίηση των *Coarse-Grain Μηχανισμών* προτάθηκαν δύο βασικές προσεγγίσεις: η προσέγγιση των *Κατανεμημένων Μηχανισμών* και η προσέγγιση των *Μηχανισμών που έχουν ως Βάση τη Ραχοκοκαλιά*. Η ταξινόμηση των *Ενεργών Μηχανισμών Ελέγχου και Διαχείρισης της Ισχύος* έγινε με βάση το επίπεδο πρωτοκόλλου (MAC, Δικτύου και Μεταφοράς) στο οποίο λειτουργούν.

Για κάθε κατηγορία/υποκατηγορία της ταξινόμησης παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν διάφοροι αλγόριθμοι, πρωτόκολλα και σχήματα. Κάθε ένα από τα σχήματα ελέγχου και διατήρησης της ισχύος εξετάστηκε σε σχέση με τον αντικειμενικό του σκοπό, το είδος του μηχανισμού που αυτό χρησιμοποιεί, τη λειτουργία του, το σενάριο εφαρμογής του, και τις ομοιότητες ή διαφορές που παρουσιάζει συγκρινόμενο με άλλα σχήματα της ίδιας κατηγορίας. Έτσι, η αξιολόγηση των

επιδόσεων των σχημάτων, με βάση τη συγκριτική μελέτη, έδειξε τη μεγάλη σπουδαιότητα της εφαρμογής μεθόδων εξοικονόμησης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Με αυτή τη μελέτη, ο αναγνώστης μπορεί να έχει μία περισσότερο πολυσήμαντη αντίληψη γύρω από τα θέματα εξοικονόμησης ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, και ιδιαίτερα γύρω από τα σχήματα που αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Μολονότι, το κάθε σχήμα είναι πολύ καλά προσαρμοσμένο σε κάποιο συγκεκριμένο σενάριο, όμως, αυτό δεν εγγυάται ότι θα ήταν και το καλύτερο για χρήση σε οποιαδήποτε περίπτωση. Ελπίζουμε ότι αυτή η μελέτη μπορεί να διευκολύνει τους ερευνητές στο να προσφέρουν περισσότερο αποδοτικά και αποτελεσματικά σχήματα ελέγχου ισχύος σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Μολονότι είναι πολύ ελπιδοφόρα η επίδοση των σχημάτων ελέγχου και διαχείρισης της ισχύος, θα ήταν αναγκαία η περαιτέρω έρευνα που θα είχε ως αντικείμενο τα θέματα ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στους εικονικούς αισθητήρες και στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η ποιότητα υπηρεσιών με ενημέρωση ισχύος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θα διασφάλιζε βεβαίως όχι μόνο ένα εγγυημένο εύρος ζώνης, ή χρονική καθυστέρηση, καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης, αλλά θα παρείχε τη χρήση ενός περισσότερο ενεργειακά αποδοτικού μονοπατιού. Επί του παρόντος, διεξάγεται πολύ μικρής κλίμακας έρευνα γύρω από θέματα που έχουν σχέση με το χειρισμό της ποιότητας υπηρεσιών σε ένα εξαιρετικά περιορισμένο περιβάλλον από άποψη ενέργειας όπως είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Μία ακόμη πιθανή μελλοντική έρευνα γύρω από τα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα συμπεριλαμβάνει την ενοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με το Internet. Ειδικότερα, οι περισσότερες από τις εφαρμογές παρακολούθησης του περιβάλλοντος απαιτούν να αποστέλλονται τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες σε κάποιον εξυπηρετητή (σταθμό βάσης), για περαιτέρω επεξεργασία. Εξάλλου, οι αιτήσεις από τη μεριά του χρήστη προς το σταθμό βάσης πρέπει να γίνονται μέσα από το Internet. Επειδή οι απαιτήσεις ενεργειακά αποδοτικών δρομολογήσεων σε κάθε περιβάλλον είναι πολύ διαφορετικές, απαιτείται περαιτέρω έρευνα προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτό το είδος των καταστάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή της παρούσας διατριβής, η ενέργεια αποτελεί το πλέον ανεκτίμητο αγαθό σε όλα γενικώς τα ασύρματα δίκτυα εξαιτίας της περιορισμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας των συσκευών που τα αποτελούν. Όμως, το πρόβλημα της ενέργειας που καταναλώνεται γίνεται περισσότερο πολύπλοκο στα ad hoc ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, εξαιτίας των πολλών και ποικίλων περιορισμών που παρουσιάζονται στους κόμβους και που οφείλονται κατά κύριο λόγο:

- στα πολύ περιορισμένα ενεργειακά τους αποθέματα,
- στη φθινή τους κατασκευή,
- στο περιορισμένο μέγεθός τους,
- στο βάρος τους καθώς και
- στην ad hoc μέθοδο ανάπτυξή τους στο υπό παρακολούθηση πεδίο.

Προκειμένου να διασφαλιστεί όχι μόνο η δυνατότητα επιβίωσης αλλά και η παράταση της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων παρά τους ανωτέρω περιορισμούς, έχουν προταθεί διάφορα σχήματα στη σύγχρονη βιβλιογραφία στόχος των οποίων είναι ο έλεγχος και ο περιορισμός της ενέργειας που καταναλώνεται από τους κόμβους, ώστε να εξοικονομείται περισσότερη ενέργεια και να διασφαλίζεται έτσι η μακροβιότητα του δικτύου.

Τα διάφορα σχήματα αφύπνισης (Wakeup schemes), τα οποία θέτουν εκτός λειτουργίας τους πομποδέκτες των αισθητήριων κόμβων όταν δεν υπάρχει ανάγκη επικοινωνίας, συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι περισσότερες τεχνικές εκμεταλλεύονται την περίπτωση εκείνη όπου τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να βρίσκονται στην *Ανενεργό ή Αδρανή Κατάσταση* (idle mode) για μία μακρά χρονική περίοδο, και να μεταδίδουν τα δεδομένα που έχουν συλλέξει, με αποδοτικό τρόπο, μόνο όταν αυτό τους ζητηθεί. Όμως, ακόμη και στην περίπτωση που δεν υπάρχει καμία μετάδοση δεδομένων, οι αισθητήρες είναι υποχρεωμένοι να ακροάζονται συνεχώς το ανενεργό κανάλι (idle channel) προκειμένου να προλάβουν το διαμελισμό (partitioning) του δικτύου.

Έχει παρατηρηθεί ότι η ενέργεια που καταναλώνει ένας ασύρματος πομποδέκτης όταν ακροάζεται το ανενεργό κανάλι ισούται με την ενέργεια που ο ίδιος καταναλώνει όταν εκπέμπει ή λαμβάνει. Αυτή η ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που καταναλώνει ο κόμβος όταν βρίσκεται στην κατάσταση ύπνου (sleep mode) [5].

Άλλες πάλι τεχνικές, που έχουν κατά καιρούς προταθεί, δεν ασχολούνται μόνο με το πως θα εξοικονομηθεί ενέργεια στο επίπεδο MAC (MAC Layer), αλλά και στο επίπεδο Δικτύου (Network Layer).

Η ανάπτυξη μιας στρατηγικής η οποία θα συμβάλει στη βέλτιστη επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής για τη μετάδοση δεδομένων από τον πομπό στο δέκτη μπορεί να έχει άμεση επίδραση στην επέκταση της διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας με τη σχεδίαση των πλέον κατάλληλων σχημάτων, όπως:

➤ *Σχήματα Συγχρονισμού και Χρονοπρογραμματισμού:*

Επιτρέπουν στους πομποδέκτες των κόμβων να παραμένουν στην κατάσταση ύπνου για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο, διατηρώντας ταυτόχρονα τη συνδεσιμότητα (connectivity) του δικτύου. Όμως, τα σχήματα που ασχολούνται με το συγχρονισμό της κατάστασης ύπνου (sleep-mode synchronization schemes), όπως είναι για παράδειγμα το πρωτόκολλο S-MAC [109], παρουσιάζουν αναπόφευκτα μία μεγάλη χρονική καθυστέρηση που σχετίζεται άμεσα με αυτήν (την κατάσταση ύπνου) και η οποία αυξάνεται συγχρόνως με την αύξηση της εξοικονομούμενης ενέργειας [109].

Τα διάφορα σχήματα που έχουν κατά καιρούς προταθεί έχουν ασχοληθεί ελάχιστα με το θέμα της ελαχιστοποίησης της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης του πακέτου (end-to-end packet delay) και της ταυτόχρονης διατήρησης της ενέργειας στο δίκτυο.

Επειδή, μία μεγάλη χρονική καθυστέρηση μπορεί να αποβεί λίαν επιζήμια τόσο στα μεγάλα όσο και στα μικρά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το ένα από τα τρία σχήματα που προτείνει αυτή η διατριβή είναι ένα σχήμα χρονοπρογραμματισμού των διαλειμμάτων αφύπνισης το οποίο βασίζεται στο TDMA (TDMA-based wakeup intervals scheduling scheme) και το οποίο μπορεί να χειρίζεται άνετα τα θέματα που έχουν σχέση με την εξισορρόπηση μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης σε δίκτυα αισθητήρων [1].

Η βασική ιδέα αυτού του σχήματος είναι να μπορεί κανείς να επωφεληθεί από τους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού TDMA προκειμένου να κατασκευάσει το πλέον κατάλληλο σχήμα χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης το οποίο θα επιτυγχάνει υψηλά επίπεδα εξοικονόμησης ενέργειας ενώ θα μειώνει παράλληλα το χρόνο μετάδοσης των πακέτων δεδομένων από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο, θα μειώνει δηλαδή, την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, η οποία προκαλείται κατά τη μετάβαση στην κατάσταση ύπνου (sleep mode operation). Αυτό, όπως άλλωστε θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο χρονοπρογραμματισμό των διαλειμμάτων αφύπνισης (Wakeup intervals) ώστε να επιτρέπεται στα πακέτα δεδομένων, τα οποία έχουν ως βάση το TDMA, και τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διάδοση (propagation) των μηνυμάτων *WakeUP*, πριν από τη μετάδοση δεδομένων, να καθυστερούν κατά ένα και μόνο διάστημα ύπνου για τη μετάδοσή τους, από τους αισθητήρες προς το σταθμό βάσης (gateway). Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται και η συνδεσιμότητα του δικτύου.

Το προτεινόμενο σχήμα παρουσιάζει μία σημαντική βελτίωση, όσον αφορά τον περιορισμό της *Κατανάλωση Ενέργειας* και την ταυτόχρονη μείωση της *Χρονικής Καθυστέρησης*, συγκρινόμενο με άλλα παρόμοια σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας.

Σε αυτήν τη διατριβή μοντελοποιούνται οι καταναλώσεις ενέργειας σε τέσσερα σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας (συμπεριλαμβανομένου και του προτεινόμενου σχήματος).

Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για την επιλογή του πλέον βέλτιστου μηχανισμού εξοικονόμησης ενέργειας ο οποίος ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα και την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, κάτω από διάφορες συνθήκες δικτύου και διακίνησης πληροφοριών.

Η αξιολόγηση της επίδοσης (performance evaluation) αποκαλύπτει το πλεονέκτημα του προτεινόμενου σχήματος όταν είναι ταυτόχρονα επιθυμητή όχι μόνο η σε μεγάλο βαθμό εξοικονόμηση ενέργειας αλλά και η ελαχιστοποίηση της χρονικής καθυστέρησης για την αποστολή και λήψη των δεδομένων από την πηγή προς τον τελικό προορισμό σε ένα στατικό δίκτυο το οποίο παράγει περιορισμένα φορτία κίνησης, μία κατάσταση, δηλαδή, η οποία εκδηλώνεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που έχουν ως προορισμό τον εντοπισμό μεγάλων καταστροφών, και όπου αναμένουμε τα εν λόγω δίκτυα να διασφαλίζουν την ικανότητα ανίχνευσης ενός σπάνιου γεγονότος για μακρά χρονική περίοδο.

➤ *Σχήματα Επιλογής της Καταλληλότερης Διαδρομής με Βάση τη Μεγαλύτερη Διάρκεια Ζωής που της Έχει Απομείνει [2]*

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσει την ενέργεια που καταναλώνει κάθε κόμβος σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, είναι η πολιτική που ακολουθείται προκειμένου να επιλεγεί η πλέον κατάλληλη διαδρομή ανάμεσα σε δύο κόμβους. Δύο είναι οι βασικοί λόγοι που μας ωθούν να υιοθετήσουμε τη μία ή την άλλη πολιτική:

- Η ενέργεια που καταναλώνεται για κάθε μία μετάδοση πακέτου διαφέρει ανάλογα με την επιλογή του μονοπατιού δρομολόγησης.

Ως εκ τούτου, το πακέτο εκείνο που θα πρέπει να αποσταλεί πολλές φορές προκειμένου να φθάσει κάποτε στον προορισμό του, θα καταναλώσει πολύ περισσότερη ενέργεια από εκείνο το πακέτο που θα αποσταλεί λιγότερες φορές.

- Εάν η στρατηγική που ακολουθείται για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής χρησιμοποιεί συνεχώς τους ίδιους κόμβους, δηλαδή τους χρησιμοποιεί πολύ περισσότερο από κάποιους άλλους κόμβους στο δίκτυο, τότε η ενέργεια που διαθέτουν αυτοί οι κόμβοι θα καταναλωθεί γρηγορότερα, με αποτέλεσμα να τεθούν σύντομα εκτός λειτουργίας. Εάν κάποιος κρίσιμος αριθμός κόμβων στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στερείται ενεργειακών πόρων, τότε θα επέλθει ο διαμελισμός του εν λόγω δικτύου, με άμεσο αποτέλεσμα τη μη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων.

Για να μπορεί να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, απαιτείται η χρήση μηχανισμών οι οποίοι θα είναι σε θέση να επιλέγουν κάθε φορά την πλέον κατάλληλη διαδρομή ώστε να επιτυγχάνεται η κατανάλωση της ελάχιστης δυνατής ενέργειας.

➤ *Σχήματα Επιλογής της Καταλληλότερης Διαδρομής με Βάση μία Εκθετική Συνάρτηση*

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της επανειλημμένης χρησιμοποίησης των ίδιων κόμβων σε μία διαδρομή του δικτύου είναι αναγκαία η χρήση μηχανισμών για την επιλογή ενεργειακά αποδοτικών διαδρομών. Αυτοί οι μηχανισμοί μπορούν να προσδιορίσουν μία συνάρτηση κόστους η οποία εξαρτάται από την ενέργεια που έχει απομείνει σε κάθε κόμβο χωριστά. Για την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής υπάρχουν δύο δυνατότητες: είτε να προστεθούν τα παραγόμενα κόστη, είτε να χρησιμοποιηθεί μία πολιτική max-min.

Σε αυτήν την ενότητα της διατριβής προτείνεται ένα σχήμα το οποίο είναι σε θέση να υποδεικνύει την καλύτερη στρατηγική για την επιλογή της καταλληλότερης διαδρομής ώστε να παρατείνεται η διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Η καινοτομία που εισάγει αυτό το σχήμα είναι ότι προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου μέσα από τον ορισμό μιας εκθετικής συνάρτησης. Αυτή η συνάρτηση εξισορροπεί την ανάγκη για διατήρηση της ενέργειας στους συχνότερα χρησιμοποιούμενους αισθητήριους κόμβους, με την ανάγκη για διατήρηση σε χαμηλά επίπεδα της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε μία διαδρομή, προσδιορίζοντας κάθε φορά τον καταλληλότερο εκθέτη [3].

Καθώς οι ασύρματοι αισθητήριοι κόμβοι χάνουν σταδιακά την ενέργειά τους, το δίκτυο καθίσταται όλο και λιγότερο πυκνό, με τελική κατάληξη το διαμελισμό του. Η συνδεσιμότητα του δικτύου προσδιορίζεται, κατά μέσον όρο, από την επί τοις εκατό ποσοστιαία αναλογία των κόμβων στους οποίους μπορεί να έχει πρόσβαση ο κάθε κόμβος μέσα από μία διαδρομή πολλών βημάτων (multi-hop route). Ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής του δικτύου μπορεί να προσδιοριστεί από τον αριθμό των συνδέσεων που μπορούν να δρομολογηθούν επιτυχώς μέσα από το δίκτυο, μέχρις ότου η συνδεσιμότητα φθάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή.

Οι ενότητες που ακολουθούν, ήτοι: η (5.2), η (5.3) και η (5.4), ασχολούνται κυρίως με τις πιο εξειδικευμένες αναφορές που έχουν σχέση με τα τρία προτεινόμενα σχήματα της παρούσας διατριβής.

5.2 Σχετικές Αναφορές για το Πρώτο Σχήμα TDMA Scheduling

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα κρίσιμα δεδομένα που λαμβάνονται από τις διάφορες μετρήσεις θα πρέπει να φθάνουν στο σταθμό βάσης, όσο γίνεται γρηγορότερα. Η αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αλλά και των αντίστοιχων σχημάτων εξοικονόμησης ενέργειας θα πρέπει να διασφαλίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου (με την ελάχιστη δυνατή χρονική καθυστέρηση καθώς και τον ελάχιστο δυνατό αριθμό συγκρούσεων) με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Στις περισσότερες εφαρμογές, η αναπλήρωση των περιορισμένων ενεργειακών πόρων (συνήθως μικρότερων από 0.5 Ah, 1.2 V) πιθανόν να είναι ανεπαρκής ή ακόμη και αδύνατη. Ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του [4]. Επειδή σε ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων ο κάθε κόμβος μπορεί να είναι ταυτόχρονα όχι μόνο η πηγή αλλά και ο δρομολογητής (router) δεδομένων, ο έλεγχος και η διατήρηση της ισχύος αποκτούν πρόσθετη σπουδαιότητα και οδηγούν στην εισήγηση πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που ασχολούνται με τα θέματα εξοικονόμησης ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας καθώς και η ταξινόμηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει μελετηθεί και παρουσιαστεί εκτενέστατα στα προηγούμενα κεφάλαια, και φυσικά σε όλη τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία. Στις ενότητες που ακολουθούν θα γίνει μία σύντομη αναφορά τις πιο εξειδικευμένες σχετικές αναφορές σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ταξινομώντας αυτές σε τέσσερις ενότητες που έχουν ως βάση τους μηχανισμούς:

- Διατήρησης της ισχύος σε κόμβους που εκμεταλλεύονται την κατάσταση ύπνου,
- Χρονοπρογραμματισμού TDMA,
- Διατήρησης της ισχύος σε κόμβους που βρίσκονται σε λανθάνουσα κατάσταση
- Διατήρησης της ισχύος με ελαχιστοποίηση της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης.

5.2.1 Μηχανισμοί Διατήρησης της Ισχύος στην Κατάσταση Ύπνου

Η απόλυτη λύση για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται από έναν αισθητήρα είναι να τίθεται εκτός λειτουργίας ο πομποδέκτης του εφόσον αυτός δεν δραστηριοποιείται για την εκπομπή/λήψη δεδομένων [158]. Οι σύγχρονες κάρτες ασύρματων αισθητήρων είναι εφοδιασμένες με κυκλώματα τα οποία μπορούν να τους θέσουν σε κατάσταση ύπνου καταναλώνοντας έτσι πολύ χαμηλότερη ενέργεια. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να θέτουν τους εαυτούς τους σε μία κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (κατάσταση ύπνου) για μία εκ των προτέρων γνωστή χρονική διάρκεια, όπως για παράδειγμα, μέχρις ότου εξαντληθούν τα αποθέματα ενέργειας που διαθέτουν οπότε πρέπει να επαναφορτισθούν κάνοντας χρήση της περιβαλλοντικής ενέργειας, όπως είναι π.χ. το φως.

Η αφύπνιση των αισθητήρων (επαναφορά τους στην κατάσταση εγρήγορσης) μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικούς τρόπους:

- είτε με τη χρήση χρονοδιακοπών,
- είτε με τη χρήση πακέτων αφύπνισης (*wakeup packets*).

Εάν είναι επιθυμητή η διακοπή λειτουργίας του δομικού στοιχείου επικοινωνίας (κάρτα πομποδέκτη), τότε υπάρχουν οι εξής δύο δυνατοί τρόποι ελέγχου:

- Στον πρώτο τρόπο ελέγχου, το επίπεδο MAC είναι αυτό που θα πάρει την απόφαση για το πότε θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας ο πομποδέκτης. Στα περισσότερα σχήματα, εάν δεν υπάρχει καμία μετάδοση που να απευθύνεται στον κόμβο, ο αισθητήρας θέτει τον πομποδέκτη του εκτός λειτουργίας για ένα και μόνο πλαίσιο μετάδοσης. Αυτό το είδος λήψης απόφασης από το επίπεδο MAC ονομάζεται *Fine-Grain power conservation* και τυπικό παράδειγμα αναφοράς είναι το πρωτόκολλο PAMAS (Power-Aware Multi-Access with Signaling) [107] το οποίο έχει προταθεί από τους *S. Singh*, και *C. Raghavendra* και έχει αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.
- Στο δεύτερο τρόπο ελέγχου, που ονομάζεται *Coarse-Grain power conservation*, τα ανώτερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων είναι αυτά που ασκούν έλεγχο στο κατώτερο επίπεδο MAC και είναι αυτά που θα αποφασίσουν για το πότε θα τεθεί εκτός λειτουργίας ο πομποδέκτης [98]. Τυπικό παράδειγμα αναφοράς είναι το πρωτόκολλο S-MAC [109] το οποίο έχει προταθεί από τους *W. Ye*, *J. Heidemann*, και *D. Estrin* και έχει αναλυθεί επίσης λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.

5.2.2 Σχήματα Χρονοπρογραμματισμού TDMA για Απόδοση Ενέργειας σε WSNs

Η *Trigoni et al.* [159], προτείνουν μία μεθοδολογία η οποία έχει ως στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το χρόνο απόκρισης (latency), δηλαδή, το χρόνο που μεσολαβεί από τη στιγμή του ερεθίσματος μέχρι τη στιγμή απόκρισης, σε συστήματα βάσης δεδομένων αισθητήρων. Ειδικότερα, προτείνουν ένα νέο πρωτόκολλο το οποίο χρονοπρογραμματίζει πολύ προσεκτικά τις μεταδόσεις μηνυμάτων και κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις στο επίπεδο MAC. Οι πομποδέκτες των αισθητήρων μπορούν να βρίσκονται τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση εκτός λειτουργίας, και να αφυπνίζονται (wake up) μόνο κατά τη διάρκεια πολύ καλά προσδιορισμένων χρονικών διαστημάτων. Επίσης, οι εν λόγω ερευνητές έχουν δείξει τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να βελτιστοποιηθούν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ώστε να αλληλεπιδρούν, κατά ένα συμβιωτικό τρόπο, με τις όποιες αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού, με αποτέλεσμα τη σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, όμως, με κόστος τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια απόκρισης (latency).

Ο *Agumugam et al.* [160], εστιάζουν κυρίως στο πρόβλημα του ενεργειακά αποδοτικού *Προτύπου Σύγκλισης* (converge cast) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Δείχνουν το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά η τεχνική του TDMA ώστε να παρέχει ένα ενεργειακά αποδοτικό *Πρότυπο Σύγκλισης*. Η λύση που προτείνουν επιτρέπει στους κόμβους να εξοικονομούν ενέργεια όταν το δίκτυο βρίσκεται στην ανενεργό κατάσταση (idle) και να μεταπίπτουν στην ενεργό κατάσταση (active mode) οποτεδήποτε το δίκτυο ανιχνεύσει κάποιο γεγονός. Το σχήμα που προτείνουν, για μία τυπική εφαρμογή όπου η πιθανότητα εμφάνισης κάποιου γεγονότος είναι μικρότερη από 10-15%, βελτιώνει τη διάρκεια ζωής του δικτύου κατά περίπου τρεις φορές.

Ο *Ergen et al.* [161] προτείνουν έναν αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού TDMA για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προκειμένου να προσδιορίσουν το μικρότερο μήκος εκχώρησης θυρίδων που να είναι απαλλαγμένες από αντιπαλότητες (conflict-free slots), και κατά τη διάρκεια των οποίων τα διάφορα πακέτα, που δημιουργούνται σε κάθε κόμβο, να φθάνουν στον προορισμό τους. Ειδικότερα, απέδειξαν ότι είναι πάντοτε δυνατόν να βρεθεί ο χρονοπρογραμματισμός με την ελάχιστη δυνατή χρονική καθυστέρηση κάνοντας χρήση ενός απλού αλγορίθμου για σχήματα δρομολόγησης ο οποίος βασίζεται στο TDMA όταν το δίκτυο δεν περιέχει βρόχους (loop-free) και διαθέτει μόνο έναν κόμβο αποδέκτη (sink node - σταθμός βάσης).

Ο Yu *et al.* [162] μελέτησαν το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού των μεταδόσεων των πακέτων για περισυλλογή δεδομένων (data gathering) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Παρουσίασαν αλγόριθμους προκειμένου να μειώσουν τη συνολική κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων στο δέντρο συναθροίσης (aggregation tree), με τον όρο του περιορισμού της χρονικής καθυστέρησης (latency). Προτείνουν επίσης έναν αριθμητικό αλγόριθμο για τη βέλτιστη λύση, καθώς και έναν *Προσεγγιστικό Αλγόριθμο Ψευδοπολυωνυμικού Χρόνου* (pseudo-polynomial time approximation algorithm) ο οποίος βασίζεται στο δυναμικό προγραμματισμό. Συζητούν επίσης τεχνικές για το χειρισμό των παρεμβολών μεταξύ των αισθητηρίων κόμβων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που έκαναν, δείχνουν ότι, με διαφορετικές ρυθμίσεις μερικών βασικών παραμέτρων, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 20% και 90%, συγκρινόμενη πάντοτε με τις κλασικές τεχνικές διακοπής λειτουργίας (shutdown techniques) των αισθητήρων κόμβων. Όμως, εκτός από αυτό μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 15% και 90% με χρήση του πρωτοκόλλου on-line. Τέλος, έδειξαν επίσης, κάνοντας χρήση αρκετών σεναρίων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων, ότι το πρωτόκολλο μπορεί να προσαρμόζεται στις όποιες μεταβολές του μεγέθους του κάθε πακέτου καθώς και στους περιορισμούς που θέτει η λανθάνουσα κατάσταση.

Ο Cui *et al.* [163] προτείνουν έναν *Αλγόριθμο Χρονοπρογραμματισμού Απλής Ζεύξης* (simple link scheduling algorithm) για να βρουν το χρονοδιάγραμμα εκείνο με την ελάχιστη χρονική καθυστέρηση το οποίο παρέχει τα μήκη θυρίδων για όλες τις ζεύξεις. Το επόμενο βήμα τους είναι να συνδυάσουν τα αποτελέσματα που απέκομισαν με την προηγούμενη τους εργασία, η οποία αφορούσε σε ένα ενεργειακά βέλτιστο διαστρωματικό σχέδιο εκτέλεσης έργου (energy-optimal cross-layer design), προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη χρονική καθυστέρηση κατά τη μεταφορά ενός σταθερού αριθμού bits από τους πηγαίους κόμβους προς τον αποδέκτη και μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας.

Ο Gandham *et al.* [164] μελετούν το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού ζεύξης σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το οποίο χρησιμοποιεί ένα TDMA MAC πρωτόκολλο. Ο *Αλγόριθμος Χρονοπρογραμματισμού Ζεύξης* που χρησιμοποιούν αποτελείται από δύο φάσεις:

- Στην πρώτη φάση, εκχωρείται ένα χρώμα σε κάθε παρυφή του ασύρματου δικτύου αισθητήρων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν δύο παρυφές, (που βρέθηκαν στον ίδιο αισθητήριο κόμβο), που να τους έχει εκχωρηθεί το ίδιο χρώμα. Πρότειναν ένα χρωματικό αλγόριθμο κατανεμημένης παρυφής ο οποίος χρειάζεται το μέγιστο $(\delta+1)$ χρώματα, όπου δ είναι ο μέγιστος βαθμός του γράφου (graph).
- Στη δεύτερη φάση, χαρτογραφούν το κάθε χρώμα σε μία μοναδική χρονοθυρίδα επιχειρώντας να προσδιορίσουν μία κατεύθυνση μετάδοσης κατά μήκος κάθε παρυφής προκειμένου να αποφύγουν το *πρόβλημα του εκτιθέμενου τερματικού* (exposed terminal problem). Στη συνέχεια, έχοντας υπόψη τοπολογίες στις οποίες δεν υπάρχει μία εφικτή λύση, λαμβάνουν μία κατεύθυνση μετάδοσης για κάθε παρυφή χρησιμοποιώντας πρόσθετες χρονοθυρίδες. Τελικά, δείχνουν ότι η αντιστροφή της κατεύθυνσης μετάδοσης κατά μήκος κάθε παρυφής οδηγεί σε μία ακόμη εφικτή κατεύθυνσης μετάδοσης. Με τη χρήση και των δύο εκχωρήσεων μετάδοσης, λαμβάνουν ένα χρονοδιάγραμμα TDMA MAC το οποίο καθιστά δυνατή την επικοινωνία μεταξύ του κάθε ζεύγους γειτονικών κόμβων. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης που έλαβαν δείχνουν ότι, για σποραδικούς γράφους με κύκλους, ο αριθμός των εκχωρημένων χρονοθυρίδων είναι πολύ κοντά στο $2(\delta+1)$.

Ο Arumugam *et al.* [160], και ο Kulkarni *et al.* [165] θεωρούν ότι το TDMA είναι επιθυμητό στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για εξοικονόμηση ενέργειας, για το λόγο ότι απλά επιτρέπει στον κόμβο να ελαχιστοποιεί την *παθητική ακρόαση* (idle listening). Επιπλέον δε, το TDMA έχει αποδειχθεί ότι είναι εφαρμόσιμο στις περιπτώσεις μετατροπής των ήδη υπαρχόντων

καταναμημένων αλγορίθμων σε κάποιο μοντέλο το οποίο είναι συμβατό με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Έτσι, το TDMA απαιτείται να σταθεροποιείται από μόνο του (self-stabilizing), διότι στην περίπτωση που εκφυλιστούν οι εκχωρημένες χρονοθυρίδες και διολισθήσει το ρολόι, τότε να έχει τη δυνατότητα να επανέρχεται στις καταστάσεις εκείνες στις οποίες είναι συμβατές οι χρονοθυρίδες TDMA. Προτείνουν λοιπόν, έναν αυτόματα σταθεροποιούμενο, νομοτελειακό αλγόριθμο για TDMA στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου ο κάθε κόμβος αναγνωρίζει μόνο τους γείτονές του. Αυτός ο αλγόριθμος απορρέει από μία συστηματική επαναχρησιμοποίηση ενός αλγόριθμου διάσχισης γράφου (graph traversal algorithm). Συζητούν επίσης τις βελτιστοποιήσεις που πρέπει να γίνουν προκειμένου να βελτιώσουν τη χρήση του εύρους ζώνης και την ανάκτηση από τις εκφυλισμένες χρονοθυρίδες.

5.2.3 Χρονική Διάρκεια Απόκρισης των Μηχανισμών Εξοικονόμησης Ενέργειας

Ακόμη και εάν χρησιμοποιούνται οι ενεργοί μηχανισμοί ελέγχου και διατήρησης της ισχύος, η παράλληλη χρήση και των παθητικών μηχανισμών μπορεί να περιορίσει ακόμη περισσότερο την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, η χρήση μιας προσέγγισης που βασίζεται στον κορμό (backbone-based), και η οποία αποκλείει μερικούς από τους κόμβους από τις ευθύνες δρομολόγησης, μπορεί επίσης να ωφεληθεί από ένα σχήμα *coarse-grain*.

Επειδή τα *coarse-grain* σχήματα ελέγχου και διατήρησης της ισχύος περιλαμβάνουν περιόδους ύπνου, για όλους τους κόμβους στο δίκτυο, μπορούν να παρέχουν το μέγιστο επίπεδο εξοικονόμησης ενέργειας. Όμως, αυτά τα σχήματα αναπόφευκτα αυξάνουν την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση.

Όπως παρατηρεί ο Ye *et al.* [109] (S-MAC), το περιοδικό “*listen-and-sleep*” αυξάνει την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση σε μονοπάτια επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων (multi-hop communication paths). Αυτό συμβαίνει διότι, ο κάθε κόμβος-αναμεταδότης (forwarder), μόλις λάβει ένα πακέτο, οφείλει να περιμένει μέχρι τον επόμενο προγραμματισμένο χρόνο αφύπνισης (scheduled wakeup time) και μετά να το στείλει διότι είναι πολύ πιθανόν ο επόμενος κόμβος να βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου (sleep mode), οπότε και δεν θα παραλάβει το πακέτο.

Από όλα αυτά προκύπτει ότι η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, η οποία προκαλείται από την κατάσταση ύπνου, είναι ανάλογη του αριθμού των ενδιάμεσων κόμβων.

Το *Adaptive listening* [109] αποτελεί επέκταση του πρωτοκόλλου S-MAC και προσπαθεί να ελαττώσει την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση η οποία προκαλείται από το περιοδικό “*listen-and-sleep*”.

Βασική ιδέα είναι ότι ο κόμβος, ο οποίος υπερακροάζεται (overhears) τις μεταδόσεις των γειτόνων του (σε ιδανικές περιπτώσεις, μόνο τα RTS or CTS), θα ξυπνήσει για λίγο μετά τη μετάδοση, επιτρέποντας έτσι στο γειτονικό του κόμβο να μεταδώσει αμέσως το πακέτο, χωρίς να είναι υποχρεωμένος να περιμένει μέχρι τον επόμενο προγραμματισμένο χρόνο μετάδοσης. Εφόσον υποθέσουμε ότι ο κόμβος του επόμενου βήματος θα ακροάζεται συνήθως το πακέτο CTS, η τεχνική του *Adaptive listening* μπορεί να μειώσει τη χρονική καθυστέρηση που σχετίζεται με την κατάσταση ύπνου κατά ένα συντελεστή ίσο με το δύο.

Το σχήμα που προτείνεται στην παρούσα Διατριβή με γενικό τίτλο “*Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks using Sleep Mode TDMA Scheduling*” (Χρονοπρογραμματισμός TDMA για μία ενεργειακά αποδοτική μείωση της χρονικής καθυστέρησης σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων) [1], και το οποίο αναλύεται λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα, μειώνει ακόμη περισσότερο την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση αλλά και την κατανάλωση ενέργειας, συγκρινόμενο με τα σχήματα S-MAC και *Adaptive listening*.

5.2.4 Ελαχιστοποίηση της End-to-End Delay σε Μηχανισμούς Διατήρησης Ισχύος

Ο Yang X. *et al.* [166,167] πρότειναν την ιδέα χρησιμοποίησης σημάτων αφύπνισης μέσα από το άμεσο κανάλι πληροφόρησης (pipelined wakeup signals) προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση. Τα ήδη υπάρχοντα σχήματα αφύπνισης μπορούν να αντιμετωπίσουν το κρίσιμο θέμα της εξεύρεσης της βέλτιστης λύσης (tradeoffs) μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και της καθυστέρησης αφύπνισης (wakeup latency). Όμως, πολύ μικρή βαρύτητα έχει δοθεί στο θέμα της ελαχιστοποίησης της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης και της ταυτόχρονης διατήρησης της ενέργειας. Πολλοί είναι εκείνοι που αμφισβητούν το γεγονός ότι μία μεγάλη χρονική καθυστέρηση μπορεί να αποβεί επιζήμια σε μεγάλα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ο Yang X. *et al.* [166] προτείνουν ένα σχήμα αφύπνισης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων το οποίο προσπαθεί να φέρει τη βέλτιστη εξισορρόπηση ανάμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο από αυτούς σχήμα, με τη γενική ονομασία “*Pipelined Tone Wakeup (PTW)*”, χρησιμοποιεί ένα κανάλι τόνου αφύπνισης (wakeup tone channel) επιπλέον του κανονικού καναλιού δεδομένων. Στο PTW, ο πομποδέκτης αφύπνισης (wakeup radio) του κάθε κόμβου θα παραμένει ξύπνιος για μία χρονική διάρκεια ίση με $T_{d\text{tone}}$ και θα παραμένει σε κατάσταση ύπνου για μία χρονική διάρκεια ίση με T_{sleep} , περιοδικά. Όπου: $T_{d\text{tone}} + T_{\text{sleep}} = T$. Άπαξ και κάποιος κόμβος ανιχνεύσει τον τόνο αφύπνισης κατά τη διάρκεια του δικού του χρόνου δέσμευσης (duty time), π.χ. $T_{d\text{tone}}$, τότε αυτός ο κόμβος θα παραμείνει ενεργός στο κανάλι δεδομένων. Η βελτίωση που εισηγείται αυτό το σχήμα, σε σχέση με τα υπόλοιπα συναφή υπάρχοντα σχήματα, μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ σημαντική, όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας και την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, και ιδιαίτερα σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δυαδικών ψηφίων μέσα στο κανάλι (low channel bit rate) (εφόσον ο χρόνος που έχει διανυθεί στην “κατάσταση παρακολούθησης” [“monitoring state”] έχει διάρκεια μεγαλύτερη από λίγα λεπτά). Το εν λόγω σχήμα [166,167] έχει πολλές ομοιότητες με το σχήμα που προτείνεται σε αυτήν τη διατριβή, διότι και τα δύο σχήματα καταβάλλουν προσπάθειες, όχι μόνο να περιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας στο ελάχιστο δυνατό, αλλά και να ελαχιστοποιήσουν παράλληλα την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση.

Ο Dhanaraj M. *et al.* [168] προτείνουν ένα καινοτόμο σχήμα δέσμευσης του επόμενου βήματος (hop-ahead reservation scheme) σε πομποδέκτη διπλής συχνότητας με την ονομασία: “*Latency minimized Energy Efficient MAC (LEEM) protocol*”, προκειμένου να επιτύχουν την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης απόκρισης (latency) κατά τη μετάδοση δεδομένων στο μονοπάτι πολλαπλών βημάτων (multi-hop path) μέσα από την εκ των προτέρων διασφάλιση του καναλιού του επομένου βήματος. Ως εκ τούτου, σύμφωνα με αυτό το πρωτόκολλο, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων, ένα πακέτο μπορεί να προωθηθεί στο επόμενο βήμα (hop), αμέσως μόλις ληφθεί από κάποιον αισθητήριο κόμβο, πράγμα το οποίο συμβάλλει στην εξουδετέρωση της χρονικής καθυστέρησης η οποία εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια δημιουργίας του μονοπατιού. Ο Dhanaraj M. *et al.* [168] απέδειξαν ότι το LEEM δεν καταναλώνει μόνο λιγότερη ενέργεια, αλλά μειώνει ταυτόχρονα και την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση κατά περίπου 50% σε σχέση με άλλα συναφή σχήματα [107].

5.3 Σχετικές Αναφορές για το Δεύτερο Προτεινόμενο Σχήμα LCMMR

Το δεύτερο σχήμα [2] που προτείνει αυτή η διατριβή έχει σαν βάση τη στρατηγική που ακολουθείται για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής η οποία θα διασφαλίζει τη μακροβιότητα του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Σε αυτό το σχήμα έχει δοθεί η ονομασία LCMMER (Low Cost Min-Max Energy Routing) [2]. Η καινοτομία που εισάγει αυτό το σχήμα

είναι ότι λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τα αποθέματα ενέργειας που έχουν απομείνει στον κάθε κόμβο χωριστά, αλλά και το κόστος μετάδοσης για τη συγκεκριμένη διαδρομή. Με άλλα λόγια, ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσπαθεί να αποφύγει τους κόμβους εκείνους που διαθέτουν ελάχιστα ενεργειακά αποθέματα, ενώ, ταυτόχρονα, προσπαθεί να διατηρήσει σε πολύ χαμηλό επίπεδο το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε μετάδοση δεδομένων.

Όπως, άλλωστε, θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διάφορες μετρήσεις, κατά την προσομοίωση του συστήματος, επιβεβαιώνουν την υπεροχή της προτεινόμενης στρατηγικής, σε ότι αφορά τη διάρκεια ζωής των κόμβων και τη συνδεσιμότητα του δικτύου, σε σύγκριση με τις στρατηγικές που εφαρμόζουν οι δύο αλγόριθμοι: “*Minimum total Transmission Power Routing*” (MTPR) και “*Min-Max Battery Cost Routing*” (MMBCR) για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής.

5.3.1 Τεχνικές Δρομολόγησης και Πρωτόκολλα σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Μερικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία είχαν αρχικά αναπτυχθεί για χρήση στα ad hoc ασύρματα δίκτυα, είναι επίσης εφαρμόσιμα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, εξαιτίας των πολλών κοινών τους χαρακτηριστικών. Αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

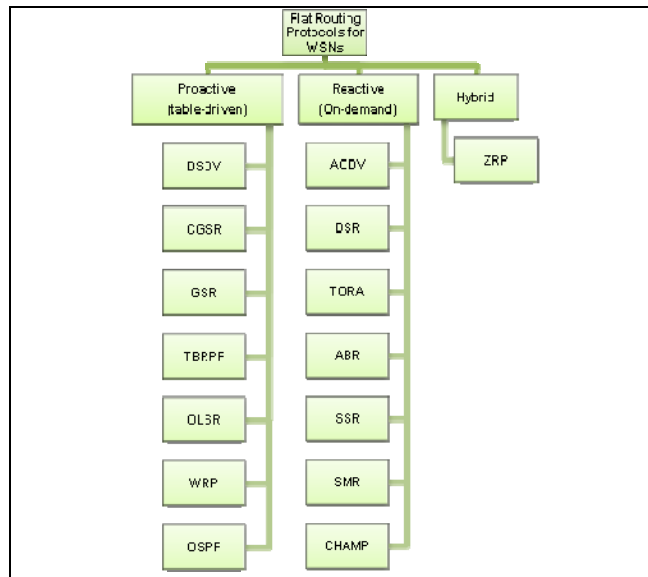
- Πρωτόκολλα Δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στην *Ομοιομορφία (Flat-based routing protocols)*,
- Πρωτόκολλα Δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στην *Ιεραρχία (Hierarchical-based routing protocols)*, και
- Πρωτόκολλα Δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στη *Θέση (Location-based routing protocols)* [90].

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται μόνο σε εκείνα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία βασίζονται στην *Ομοιομορφία (Flat-based routing protocols)* και που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να ταξινομηθούν ακόμη, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη στρατηγική, σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Πρωτόκολλα *Pro-active* (ή *Table-driven*) – Ενεργούν εκ των προτέρων.
- Πρωτόκολλα *Re-active* (ή *Demand-driven* ή *Source-initiated*), – Ενεργούν εκ των υστέρων, και
- Υβριδικά Πρωτόκολλα (*Hybrid protocols*), (Σχήμα 5-1) [169].

Τα *Pro-active* (ή *table-driven*) πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως είναι π.χ. το *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing Protocol (DSDV)* [87], το *Optimized Link State Routing (OLSR) Protocol* [91], και το *Open Shortest Path First (OSPF) Protocol* [170], συλλέγουν εκ των προτέρων πληροφορίες ώστε να μπορούν να τις χρησιμοποιήσουν όταν παραστεί ανάγκη. Ως εκ τούτου, ο κάθε κόμβος ενημερώνει πλήρως και διαρκώς τον πίνακα δρομολόγησης με όλους τους προορισμούς ώστε να υπάρχει πλήρης ενημέρωση ανά πάσα στιγμή.

Τα *Re-active* (ή *Demand-driven* ή *Source-initiated*) πρωτόκολλα δρομολόγησης, ενεργούν με τελείως διαφορετικό τρόπο από ότι τα *Pro-active* πρωτόκολλα δρομολόγησης. Ψάχνουν για πληροφορίες μόνο όταν τις χρειαστούν. Για παράδειγμα, όταν κάποιος κόμβος επιθυμεί να επικοινωνήσει με κάποιον άλλο κόμβο στο δίκτυο, τότε δημιουργεί διαδρομές με δυναμικό τρόπο. Μερικά πολύ γνωστά *Re-active* πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι το *Dynamic Source Routing (DSR) Protocol* [86], το *Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)* [93], και το *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV)* [88].



Σχήμα 5-1: Ταξινόμηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης flat-based

Τα *Υβριδικά* πρωτόκολλα (*Hybrid protocols*), όπως είναι το *Zone Routing Protocol (ZRP)* [171] συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο πρωτοκόλλων δρομολόγησης, *pro-active* και *reactive*. Μερικοί κόμβοι του δικτύου μπορεί να χρησιμοποιούν ένα *pro-active* πρωτόκολλο δρομολόγησης, ενώ κάποιοι άλλοι κόμβοι στο ίδιο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιούν ένα *re-active* πρωτόκολλο δρομολόγησης.

5.3.2 Τακτικές Επιλογής Ενεργειακά Αποδοτικών Διαδρομών

Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος δρομολόγησης στα ad hoc ασύρματα δίκτυα είναι να δρομολογούνται πακέτα από την πηγή (source) στον προορισμό (destination) μέσα από ένα μονοπάτι ελάχιστου κόστους (minimum-cost path). Το δέντρο των συντομότερων μονοπατιών ελάχιστου κόστους (minimum-cost shortest path tree), που αφορά στη δρομολόγηση πακέτων από την πηγή προς το σταθμό βάσης, και το οποίο συνδέει όλους τους κόμβους στο δίκτυο, μπορεί να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσδιορίζει τα μονοπάτια ελάχιστου κόστους από οποιονδήποτε κόμβο προς το σταθμό βάσης.

Η δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων προς το σταθμό βάσης, μέσω αυτών των μονοπατιών ελάχιστου κόστους, μπορεί να είναι αποδοτική, μόνον εφόσον ο ρυθμός των παραγομένων πληροφοριών είναι χαμηλός, ή όταν το εύρος του καναλιού είναι αρκετά μεγάλο. Επιπλέον, εάν οι κόμβοι εξακολουθούν να παράγουν δεδομένα με σταθερό ρυθμό και το εύρος του καναλιού είναι περιορισμένο, τότε τα δρομολογούμενα δεδομένα, μέσω των μονοπατιών ελάχιστου κόστους, μπορεί να υπερφορτώσουν τις ασύρματες ζεύξεις που βρίσκονται πολύ κοντά στο σταθμό βάσης [172].

Ως εκ τούτου, όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς που θέτει το εύρος του ασύρματου καναλιού, διότι, σε διαφορετική περίπτωση, τα πακέτα δεδομένων θα δρομολογούνται σε μονοπάτια και ζεύξεις όπου παρατηρείται πάρα πολύ μεγάλη συμφόρηση. Αυτό το γεγονός θα συμβάλει στην περαιτέρω αύξηση της συμφόρησης, στην αύξηση της χρονικής καθυστέρησης, αλλά και στην αύξηση απωλειών πακέτων, με άμεσο επακόλουθο την εκ νέου αποστολή πακέτων, και κατά συνέπεια στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας [172].

Επειδή, όπως έχει επανειλημμένως τονιστεί, η απόδοση ενέργειας είναι ένα από τα σοβαρότερα θέματα που αντιμετωπίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα ήδη υπάρχοντα ad hoc πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι πολύ πιθανόν να μην είναι τα πλέον κατάλληλα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ο Singh *et al.* [146] έχουν προτείνει αρκετές μετρικές, οι οποίες αφορούν θέματα εξοικονόμησης ενέργειας (power-aware metrics), προκειμένου να προσδιορίσουν τις πλέον ενδεδειγμένες διαδρομές σε ad hoc ασύρματα δίκτυα. Ειδικότερα απέδειξαν ότι, αντί να χρησιμοποιούν, ως μετρικές, την καταμέτρηση των βημάτων (hop-count) από κόμβο σε κόμβο, καθώς και τη χρονική καθυστέρηση, προκειμένου να επιλεγεί η πλέον κατάλληλη διαδρομή για μία ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, είναι πολύ προτιμότερο να υπολογίζουν και να χρησιμοποιούν το κόστος ανά πακέτο (cost/packet) καθώς και το μέγιστο κόστος του κόμβου (τα οποία συναρτώνται άμεσα με τα υπολειπόμενα ενεργειακά αποθέματα της μπαταρίας).

Στη βιβλιογραφία, μπορεί κανείς να εντοπίσει αρκετούς αλγόριθμους που έχουν ως αντικείμενο την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής. Αυτοί οι αλγόριθμοι, προκειμένου να επιλέξουν το βέλτιστο μονοπάτι, χρησιμοποιούν ως μετρικές: είτε την ισχύ που έχει απομείνει σε κάθε κόμβο για τη μετάδοση των πακέτων, είτε την απόσταση ζεύξης.

Σε αυτήν την ενότητα προτείνεται μία σειρά από σχήματα που προσπαθούν να επιτύχουν αυτούς τους σκοπούς με το να επιλέγουν την πλέον κατάλληλη διαδρομή για την αποστολή των πακέτων.

5.3.2.1 Ο Αλγόριθμος MTPR

Ο Αλγόριθμος MTPR (The Minimum total Transmission Power Routing algorithm – *Αλγόριθμος Δρομολόγησης με την Ελάχιστη Ολική Ισχύ Μετάδοσης*) [173], επιλέγει μόνο εκείνη τη διαδρομή η οποία καταναλώνει τη λιγότερη ενέργεια για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Ειδικότερα, με βάση το συγκεκριμένο αλγόριθμο, για κάθε διαδρομή l , η ολική ενέργεια P_l που καταναλώνεται υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_l = \sum_{i=0}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (5.1)$$

Όπου, n_0 , και n_d είναι οι κόμβοι πηγής και προορισμού, αντίστοιχα, ενώ, το $P(n_i, n_j)$ δηλώνει το μέγεθος της ισχύος μετάδοσης μεταξύ δύο κόμβων.

Η επιλεγείσα διαδρομή P_k είναι αυτή που ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$P_k = \min\{P_l : l \in A\} \quad (5.2)$$

Όπου, A είναι το σύνολο όλων των δυνατών διαδρομών.

Ο αλγόριθμος MTPR μπορεί να επιτύχει την ελαχιστοποίηση της ολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε ολόκληρο το δίκτυο. Όμως, επειδή δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη τα ενεργειακά αποθέματα που έχουν απομείνει σε κάθε κόμβο χωριστά, δεν καταφέρνει να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής τους [174].

5.3.2.2 Ο Αλγόριθμος MBCR

Ο Αλγόριθμος MBCR (The Minimum Battery Cost Routing algorithm – *Αλγόριθμος Δρομολόγησης με το Ελάχιστο Κόστος Μπαταρίας*) [146], επιλέγει μόνο εκείνη τη διαδρομή η οποία ελαχιστοποιεί το λειτουργικό κόστος της μπαταρίας (battery cost function). Ειδικότερα, για

κάθε κόμβο προσδιορίζει ένα λειτουργικό κόστος της μπαταρίας του το οποίο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f(n_i) = \frac{1}{c(n_i)} \quad (5.3)$$

Όπου, το $c(n_i)$ υποδηλώνει την ενέργεια που έχει απομείνει στον κόμβο n_i .

Ως εκ τούτου, η ολική ενέργεια P_l που καταναλώνεται στη διαδρομή l , δίνεται από τη σχέση (5.4):

$$P_l = \sum_{i=0}^{D-1} f(n_i) \quad (5.4)$$

Η επιλεγείσα διαδρομή P_k είναι αυτή που ικανοποιεί την παρακάτω ιδιότητα:

$$P_k = \min\{P_l : l \in A\} \quad (5.5)$$

Όπου, A είναι το σύνολο όλων των δυνατών διαδρομών.

Το κυριότερο μειονέκτημα του αλγορίθμου MBCR είναι ότι η επιλογή της διαδρομής βασίζεται μόνο στο λειτουργικό κόστος της μπαταρίας του κόμβου, πράγμα το οποίο οδηγεί σε αυξημένη δικαιοσύνη ή αμεροληψία (fairness) μεταξύ των κόμβων, επειδή κάποιος κόμβος μπορεί να χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο από κάποιους άλλους κόμβους στο δίκτυο [175].

5.3.2.3 Ο Αλγόριθμος MMBCR

Ο Αλγόριθμος MMBCR (The Min-Max Battery Cost Routing algorithm – *Αλγόριθμος Δρομολόγησης με το Ελάχιστο-Μέγιστο Κόστος Μπαταρίας*) [146] επιλέγει μόνο εκείνη τη διαδρομή η οποία παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές στα ελάχιστα εναπομείναντα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων.

Ως εκ τούτου, η εξίσωση (5.4) τροποποιείται και παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$P_l = \max_{i \in \text{route } l} f(n_i) \quad (5.6)$$

Η επιλεγείσα διαδρομή P_k είναι αυτή η οποία ικανοποιεί την παρακάτω ιδιότητα:

$$P_k = \min\{P_l : l \in A\} \quad (5.7)$$

Όπου: A είναι το σύνολο όλων των πιθανών διαδρομών.

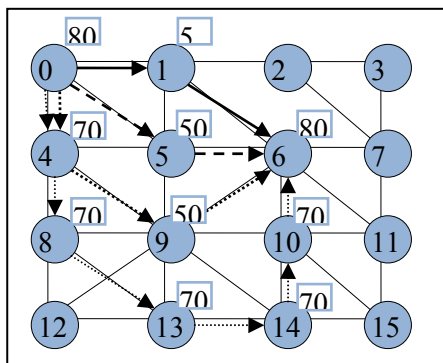
Το κύριο μειονέκτημα του αλγορίθμου MMBCR είναι ότι αδυνατεί να εγγυηθεί ότι η συνολική ισχύς μετάδοσης ανά πακέτο θα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί για μία συγκεκριμένη διαδρομή [174]. Επιπλέον, το γεγονός ότι η στρατηγική MMBCR εμποδίζει τους κόμβους με τη χαμηλότερη ενέργεια να προωθούν πακέτα συντελώντας έτσι στη μη περαιτέρω μείωση της ενέργειά τους, παρουσιάζει το βασικό μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνει υπόψη της το κόστος του μονοπατιού που χρησιμοποιεί όταν στέλνει την πληροφορία. Ως εκ τούτου, αυτή η στρατηγική

είναι πάρα πολύ πιθανό να οδηγήσει σε εξαιρετικά μεγάλα μονοπάτια, όπου θα καταναλώνονται τεράστια ποσά ενέργειας.

5.3.2.4 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος LCMMER

Παρά το γεγονός ότι η προηγουμένως αναφερθείσα στρατηγική MMBCR προσπαθεί να εμποδίσει τους κόμβους, που διαθέτουν χαμηλά ενεργειακά αποθέματα, να προωθήσουν πακέτα δεδομένων, ώστε να μπορούν έτσι να αποφύγουν την παραπέρα μείωση της ενέργειάς τους, παρουσιάζει το εξής βασικό μειονέκτημα: Δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη της το κόστος της χρησιμοποιούμενης διαδρομής κατά τη μετάδοση της πληροφορίας. Αυτή η στρατηγική είναι πάρα πολύ πιθανό να οδηγήσει σε εξαιρετικά μεγάλα μονοπάτια, τα οποία βεβαίως θα καταναλώνουν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια.

Ο Αλγόριθμος LCMMER (Low Cost Min-Max Energy Routing algorithm – *Αλγόριθμος Δρομολόγησης Χαμηλού Κόστους με την Ελάχιστη-Μέγιστη Ενέργεια*) [2], που προτείνεται σε αυτήν τη διατριβή, ως δεύτερος τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας, προσπαθεί, με κάθε τρόπο, όχι μόνο να αποφύγει όλους εκείνους τους κόμβους που τους έχουν απομείνει ελάχιστα ενεργειακά αποθέματα, αλλά και να διατηρεί ταυτόχρονα σε πολύ χαμηλά επίπεδα την ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε μετάδοση. Αυτό πραγματοποιείται με την εφαρμογή του αλγορίθμου MMBCR σε όλα τα μονοπάτια που έχουν το ελάχιστο κόστος. Με άλλα λόγια, από όλα τα επιτρεπτά μονοπάτια, ο προτεινόμενος αλγόριθμος LCMMER φιλτράρει όλα εκείνα τα μονοπάτια που παρουσιάζουν μία χρονική καθυστέρηση η οποία είναι μεγαλύτερη από ένα εκ των προτέρων προσδιορισμένο ελάχιστο, και έτσι κρατάει μόνο εκείνα τα μονοπάτια που έχουν το ελάχιστο δυνατό κόστος. Στη συνέχεια, από αυτά και μόνο τα μονοπάτια, επιλέγεται το μονοπάτι εκείνο το οποίο περιλαμβάνει τους κόμβους με τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα, από τα ελάχιστα που τους έχουν απομείνει. Έτσι, ο προτεινόμενος αλγόριθμος LCMMER αποφεύγει όλους εκείνους τους κόμβους που τους έχουν απομείνει ελάχιστα ενεργειακά αποθέματα, ενώ, παράλληλα διατηρεί το κόστος του μονοπατιού σε χαμηλά επίπεδα, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο περιορισμένη κατανάλωση ισχύος σε κάθε μετάδοση δεδομένων.



Σχήμα 5-2: LCMMER: Παράδειγμα επιλογής της καταλληλότερης διαδρομής.

Οι αριθμοί που εμφανίζονται στα λευκά παραλληλόγραμμα πλαίσια, π.χ. 70, 50, 80, κτλ., αντιπροσωπεύουν το ποσό της ενέργειας που έχει απομείνει σε κάθε κόμβο. Τα βέλη αντιπροσωπεύουν τα πιθανά μονοπάτια από τον κόμβο 0 μέχρι τον κόμβο 6 (εδώ παραλείπονται τα πλεονάζοντα μονοπάτια).

Ο αλγόριθμος MTPR θα επέλεγε το μονοπάτι $\{0, 1, 6\}$, προκαλώντας πιθανόν το άδειασμα (από ενέργεια) του κόμβου 1 (διότι το ποσό της ενέργειας που έχει απομείνει σε αυτόν τον κόμβο είναι ελάχιστο, δηλ. 5).

Ο αλγόριθμος MMBCR θα επέλεγε το μονοπάτι $\{0, 4, 8, 13, 14, 10, 6\}$, που παρουσιάζεται στο σχήμα με την κατάστικτη γραμμή, προκαλώντας έτσι δραματικές απώλειες ενέργειας.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος LCMMER θα επέλεγε το μονοπάτι $\{0, 5, 6\}$, (διακεκομμένη γραμμή), το οποίο είναι και σύντομο (γρήγορη μετάβαση των δεδομένων από την πηγή στον αποδέκτη), και καταναλώνει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα συντηρεί τη συνδεσιμότητα (connectivity) του δικτύου.

5.4 Σχετικές Αναφορές για το Τρίτο Σχήμα (MBCR2 και MREPSum2)

Εκτός από τα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης που έχουν μέχρι στιγμής αναφερθεί, υπάρχουν πολλά ακόμη τα οποία χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ταιριάζουν περισσότερο στις δικές μας εφαρμογές. Ακολουθεί μία λίστα από τα πλέον γνωστά σχήματα:

Ο Hossain *et al.* [176] πρότειναν μία μέθοδο η οποία διασφαλίζει έναν ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ των δύο αντικρουόμενων παραγόντων: κόστος δρομολόγησης και θέματα διάρκειας ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για την καλύτερη δυνατή επιλογή της διαδρομής. Η εργασία τους βασίστηκε στην εξής παρατήρηση: Μολονότι, τα περισσότερα από τα προτεινόμενα ενεργειακά-αποδοτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης καταφέρνουν να διατηρούν τη συνδεσιμότητα και τη σταθερότητα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, δεν είναι και τόσο αποτελεσματικά σε θέματα κόστους όπως θα έπρεπε να είναι.

Ο Xing, G. *et al.* [177] πρότειναν την προσέγγιση “*Minimum Power Configuration (MPC)*” η οποία ενοποιεί (integrates) τον έλεγχο τοπολογίας, την ενημερωμένη από άποψη ισχύος δρομολόγηση, καθώς και τη διαχείριση των καταστάσεων ύπνου των αισθητήρων σε ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο στόχος του MPC είναι η με δυναμικό τρόπο αναδιάρθρωση του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατό η κατανάλωση ισχύος η οποία βασίζεται σε ρυθμούς τρεχόντων δεδομένων (current data rates).

Ο Hui Kang και ο Xiaolin Li [178] πρότειναν μία ενεργειακά αποδοτική μέθοδο προκειμένου να επιλέξουν τους κόμβους εκείνους που συμμετέχουν στη συνεργαζόμενη επεξεργασία πληροφοριών η οποία πραγματοποιείται ως συσσώρευση δεδομένων (data aggregation).

Ο Intanagonwiwat *et al.* [6] πρότειναν επίσης, ένα πρωτόκολλο συσσώρευσης δεδομένων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, με την ονομασία “*Directed Diffusion*” [6] το οποίο είναι δεδομενοκεντρικό (data centric), που σημαίνει ότι όλη η επικοινωνία αφορά καθορισμένα δεδομένα (named data) και οι αισθητήρες είναι ενημερωμένοι όσον αφορά την εφαρμογή.

Ο Heinzelman *et al.* [60], [63] πρότειναν μία οικογένεια προσαρμόσιμων πρωτοκόλλων (adaptive protocols) με την ονομασία “*Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)*”. Τα πρωτόκολλα SPIN είναι κατά τέτοιο τρόπο σχεδιασμένα ώστε να διαχέουν (disseminate) όλες τις πληροφορίες ενός εκάστου κόμβου σε κάθε άλλο κόμβο στο δίκτυο, υποθέτοντας ότι όλοι αυτοί οι κόμβοι είναι εν δυνάμει σταθμοί βάσης (potential base-stations). Αυτό το γεγονός παρέχει τη δυνατότητα σε κάποιο χρήστη να υποβάλει ερώτηση σε οποιονδήποτε κόμβο και να πάρει άμεσα την απαιτούμενη πληροφορία.

Ο Shah *et al.* [147] πρότειναν την περιστασιακή χρήση ενός συνόλου υπο-βέλτιστων μονοπατιών (sub-optimal paths) προκειμένου να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτά τα μονοπάτια επιλέγονται με τη χρήση μιας συνάρτησης πιθανοτήτων (probability function), η οποία εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας του κάθε μονοπατιού. Η ικανότητα επιβίωσης (survivability) του δικτύου αποτελεί την κύρια μετρική της προσέγγισης. Η προσέγγιση διαφωνεί με εκείνο το επιχείρημα το οποίο υποστηρίζει ότι το να χρησιμοποιεί κανείς συνεχώς το μονοπάτι με την

ελάχιστη ενέργεια θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας των κόμβων του εν λόγω μονοπατιού. Αντί για αυτό, χρησιμοποιείται ένα από τα μονοπάτια με βέβαιη πιθανότητα, έτσι ώστε να αυξάνεται η διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου.

Το πρωτόκολλο υποθέτει ότι ο κάθε αισθητήριος κόμβος μπορεί να έχει διεύθυνση (addressable) μέσα από μία διευθυνσιοδότηση που έχει ως βάση την τάξη, και η οποία συμπεριλαμβάνει τη θέση και τους τύπους των αισθητήριων κόμβων.

Το “*Geographical Adaptive Fidelity (GAF)*” [111] είχε αρχικά σχεδιαστεί σαν ένας ενημερωμένος από άποψη ισχύος αλγόριθμος δρομολόγησης βασισμένος στη θέση για κινητά δίκτυα ad hoc. Όμως, απεδείχθη τελικά ότι μπορεί να είναι εφαρμόσιμος και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Ο GAF μπορεί να διατηρεί την ενέργεια με το να θέτει εκτός λειτουργίας όλους εκείνους τους κόμβους που δεν είναι απαραίτητοι στο δίκτυο, χωρίς να επηρεάζεται και πολύ το επίπεδο της πιστότητας δρομολόγησης.

Ο “*Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA)*” [65] αξιοποιεί το γεγονός που λέει ότι η κατεύθυνση δρομολόγησης προς το σταθερό εξωτερικό σταθμό βάσης του ασύρματου δικτύου αισθητήρων μεγάλης κλίμακας είναι πάντοτε γνωστή. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται από τους κόμβους, ούτε να έχουν μία μοναδική ID, αλλά ούτε και να συντηρούν κάποιο πίνακα δρομολόγησης. Αντί να γίνεται αυτό, ο κάθε κόμβος του δικτύου συντηρεί την “*εκτίμηση ελάχιστου κόστους*” (*least cost estimate*) από τη θέση που βρίσκεται μέχρι το σταθμό βάσης.

Ο D. Braginsky *et al.*, [64] εισηγήθηκαν τον αλγόριθμο “*Rumor Routing Algorithm*” για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ο οποίος είναι μία παραλλαγή του αλγόριθμου “*Directed Diffusion algorithm*”.

Η βασική ιδέα αυτού του αλγόριθμου είναι να δρομολογούνται οι ερωτήσεις μόνο προς εκείνους τους κόμβους που έχουν παρατηρήσει κάποιο ιδιαίτερο γεγονός, και όχι να πλημμυρίζουν ολόκληρο το δίκτυο για να ανακτήσουν πληροφορίες για τα διάφορα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα. Ο αλγόριθμος “*Rumor Routing*” χρησιμοποιεί πακέτα με μεγάλη διάρκεια ζωής, τα οποία ονομάζονται *agents*, προκειμένου να πλημμυρίσουν το δίκτυο με συμβάντα. Οποτεδήποτε ένας κόμβος ανιχνεύσει κάποιο γεγονός, το προσθέτει αμέσως στο δικό του τοπικό πίνακα, ο οποίος ονομάζεται *πίνακας συμβάντων (events table)*, και στη συνέχεια παράγει έναν *agent*. Οι *agents* ταξιδεύουν σε ολόκληρο το δίκτυο για να ενημερώσουν τους απομακρυσμένους κόμβους για τα τοπικά συμβάντα. Όταν ένας κόμβος παράγει μία ερώτηση για κάποιο συμβάν, οι κόμβοι, που συμβαίνει να γνωρίζουν τη διαδρομή, είναι πολύ πιθανόν να απαντήσουν στην ερώτηση με το να ελέγξουν το δικό τους πίνακα συμβάντων. Έτσι, δεν είναι απαραίτητο να πλημμυρίσει ολόκληρο το δίκτυο, οπότε αυτή η ενέργεια ελαττώνει κατά πολύ το κόστος επικοινωνίας.

Ο L. Subramanian *et al.*, [75] εισηγήθηκαν ένα αυτόματα καταρτιζόμενο (self-organizing) πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσουν τις κατάλληλες αρχιτεκτονικές για την υποστήριξη μη-ομογενών (non-homogeneous) κινητών ή σταθερών αισθητήριων κόμβων. Μερικοί από αυτούς τους κόμβους ανιχνεύουν το περιβάλλον τους και προωθούν τις πληροφορίες που λαμβάνουν προς ένα προκαθορισμένο σύνολο κόμβων οι οποίοι συμπεριφέρονται ως δρομολογητές (routers).

Οι κόμβοι δρομολόγησης είναι σταθεροί και σχηματίζουν τον κορμό για την επικοινωνία του δικτύου. Οι πληροφορίες που έχουν ήδη ληφθεί δρομολογούνται, μέσω των δρομολογητών, προς τους ισχυρότερους κόμβους-σταθμούς βάσης.

Ο V. Ponduru *et al.*, [179] μελέτησαν το πρόβλημα διαφύλαξης της κάλυψης του δικτύου (network coverage preservation) και εισηγήθηκαν τους δύο παρακάτω καταναμημένους αλγόριθμους χαμηλής επιβάρυνσης (low-overhead, distributed algorithms) προκειμένου να διαφυλάξουν την κάλυψη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων:

- Min-max Active Node Routing algorithm (MANR) και
- Min-max Active Node Routing algorithm with Max-min energy extension (MANR-Max).

Ο αλγόριθμος *MANR* χρησιμοποιεί εκείνη τη διαδρομή η οποία περιλαμβάνει τον ενεργό κόμβο δρομολόγησης ελαχίστου-μεγίστου (*min-max active routing node*), και διασφαλίζει τα εξής: Εάν ο πηγαίος κόμβος (source node) διαθέτει περισσότερες από μία διαδρομές (και μοιράζεται έναν κόμβο δρομολόγησης με κάποιον άλλο πηγαίο κόμβο που διαθέτει μόνο μία διαδρομή), τότε, ο πρώτος κόμβος χρησιμοποιεί πολύ σπάνια τη μοιραζόμενη διαδρομή.

Εξ' άλλου, ο αλγόριθμος *MANR-Max* διασφαλίζει ότι οποιαδήποτε κίνηση (traffic) μηνυμάτων, προερχόμενη από όλες τις πηγές, αντισταθμίζεται μεταξύ όλων των διαθέσιμων διαδρομών. Αυτό το γεγονός μειώνει τη διαφορά των χρόνων διαμελισμού της πηγής και με αυτόν τον τρόπο βελτιώνει την κάλυψη δικτύου της τοπολογίας. Επιπλέον, εισηγήθηκαν μία μετρική (Standard Deviation of Source Partition times) προκειμένου να μπορούν να πάρουν μετρήσεις σχετικές με την κάλυψη του δικτύου.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών τους μετρήσεων έδειξαν ότι οι αλγόριθμοι που πρότειναν συμπεριφέρονται καλύτερα από τους αλγόριθμους “*Minimum total Transmission Power Routing (MTPR)*” και “*Min-max Battery Capacity Routing (MMBCR)*” [152], όσον αφορά την κάλυψη του δικτύου.

Ο Misra, *et al.*, [180] πρότειναν έναν αλγόριθμο επιλογής διαδρομής με βάση την ισχύ που φέρει την ονομασία “*Maximum Residual Packet Capacity (MRPC)*” για ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση η οποία έχει τη δυνατότητα να αυξάνει τη λειτουργική διάρκεια ζωής των ασύρματων δικτύων αισθητήρων πολλαπλών βημάτων (multi-hop WSNs).

Ο αλγόριθμος *MRPC* μπορεί πολύ εύκολα να ενσωματωθεί σε μία ποικιλία ad hoc πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Επιπλέον, είναι βασικά παρόμοιος με τον αλγόριθμο *MMBCR* [136]. Μέσα από τη χρήση της διατύπωσης (formulation) *max-min*, ο αλγόριθμος *MRPC* προσπαθεί να επιλέγει, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, τη διαδρομή που μεγιστοποιεί την υπολειπόμενη ισχύ (residual capacity) διαθέσιμη επί του παρόντος σε εκείνο τον κόμβο που έχει τη λιγότερη υπολειπόμενη ισχύ. Ο *MRPC* μπορεί να αναγνωρίζει την ισχύ που διαθέτει ένας αισθητήριος κόμβος, όχι μόνο από την υπόλοιπη διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας του, αλλά και μέσα από την ενέργεια που αναμένεται να καταναλωθεί κατά τη διάρκεια προώθησης ενός πακέτου σε προκαθορισμένη ζεύξη με τον πλέον αξιόπιστο τρόπο.

Επιπλέον, παρουσίασαν τον αλγόριθμο *CMRPC*, μία κάτω από ορισμένες συνθήκες παραλλαγή του *MRPC*, που έχει τη δυνατότητα να μεταβαίνει από τη δρομολόγηση ελάχιστης ενέργειας στο *MRPC* μόνο όταν η ικανότητα προώθησης των πακέτων των κόμβων πέφτει κάτω από ένα καλά προσδιορισμένο κατώφλι. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι οι αλγόριθμοι *MRPC* και *CMRPC*, υπερέρχουν του *MMBCR*. Ειδικότερα, ο *MRPC* μπορεί να παρατείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, και εκτός από αυτό, έχει τη δυνατότητα να μεταδίδει ένα σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό πακέτων με χαμηλότερους ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας, και ως εκ τούτου, με μικρότερο αξιόπιστο κόστος μετάδοσης ανά πακέτο.

Ο Ledvich, *et al.*, [181], θεωρούν ότι τα δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια – διάρκεια ζωής και ρυθμαπόδοση (*lifetime and throughput*), πολύ συχνά δεν είναι σε θέση να παρέχουν επαρκείς πληροφορίες για την αξιολόγηση της επίδοσης των πρωτοκόλλων με ενημέρωση ισχύος (power-aware protocols). Ως εκ τούτου, προτείνουν ένα νέο κριτήριο, το “*Threshold-Related Throughput*”, το οποίο παρέχει ένα πολύ καλύτερο κριτήριο για την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου. Εκτός τούτου, εξακολουθούν να ερευνούν επισταμένα ένα πολύ μεγάλο αριθμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης καθώς επίσης και μετρικές κόστους δρομολόγησης, που ενεργοποιούνται μέσω διαφορετικών τοπολογιών ασύρματων δικτύων αισθητήρων και αρχικών

σηματισμών ενέργειας (initial energy configurations). Μελετούν την απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και τα συγκρίνουν με χρήση του νέου κριτηρίου.

Ο R.C.M. Gomes *et al.*, [182] εισηγούνται μία οικογένεια πρωτοκόλλων δρομολόγησης για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που ονομάζεται “*On-Demand Power-Efficient Routing Protocol (OPER)*”. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο, το οποίο έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές που χρησιμοποιούν ένα reactive σχήμα εποπτείας (reactive monitoring scheme), βασίστηκε πρώτον στο πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV για τη δημιουργία διαδρομών κατ’ απαίτηση (on-demand routes), και δεύτερον στο πρωτόκολλο δρομολόγησης DSDV για την άσκηση ελέγχου στα εισερχόμενα του πίνακα δρομολόγησης (route table entries). Το πρωτόκολλο OPER εφαρμόζει μία σειρά από μηχανισμούς προκειμένου να ελέγχει την επιλογή της διαδρομής χρησιμοποιώντας πληροφορίες σχετικές με τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων και με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

5.4.1 Πολιτικές Επιλογής Ενεργειακά Αποδοτικών Διαδρομών

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε μία ακόμη σειρά από σχήματα, για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής για την αποστολή πακέτων από τον πηγαίο κόμβο προς το σταθμό βάσης. Αυτά τα σχήματα αποτελούν βελτιωμένες προτάσεις των σχημάτων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.3.2.

5.4.1.1 Ο Αλγόριθμος LCMMER

Ο αλγόριθμος LCMMER (Low Cost Min-Max Energy Routing) [2], όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.3.2.4, προσπαθεί να αποφύγει τους κόμβους με τη χαμηλότερη διαθέσιμη ενέργεια, ενώ διατηρεί ταυτόχρονα σε χαμηλά επίπεδα την ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε εκπομπή πακέτων. Ειδικότερα, βασίζόμενοι στον αλγόριθμο MTPR, η ενέργεια P_l που καταναλώνεται στη διαδρομή l υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_l = \sum_{i=0}^{D-1} Energy(n_i, n_{i+1}) \quad (5.8)$$

Όπου: n_0 , και n_D είναι οι κόμβοι πηγής και προορισμού, αντίστοιχα, ενώ η σχέση $Energy(n_0, n_D)$ δηλώνει την ενέργεια που καταναλώνεται ανάμεσα σε αυτούς τους δύο κόμβους.

Στη συνέχεια, η στρατηγική LCMMER, που εφαρμόζεται για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διαδρομής, φιλτράρει όλα εκείνα τα μονοπάτια όπου η ενέργεια που αυτά καταναλώνουν είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη δυνατή γ , και διατηρεί μόνο εκείνα τα μονοπάτια που έχουν το ελάχιστο δυνατό κόστος. Έτσι, το P_k είναι αυτό που ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$P_k = \min\{P_l > \gamma : l \in A\} \quad (5.9)$$

Όπου: A είναι το σύνολο όλων των δυνατών διαδρομών.

Από αυτά τα μονοπάτια, επιλέγεται εκείνο το μονοπάτι, που όχι μόνο διαθέτει τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα αλλά και που ταυτόχρονα περιλαμβάνει τον κόμβο με τη χαμηλότερη ενέργεια.

Όλα αυτά πραγματοποιούνται με εφαρμογή της στρατηγικής MMBCR σε όλα τα μονοπάτια που έχουν το ελάχιστο κόστος. Έτσι, αυτό το σχήμα επιλογής διαδρομής αποφεύγει τους κόμβους με

τη χαμηλότερη ενέργεια, ενώ διατηρεί ταυτόχρονα το κόστος του μονοπατιού σε χαμηλά επίπεδα, εξασφαλίζοντας περιορισμένη κατανάλωση ισχύος σε κάθε εκπομπή πακέτων.

5.4.1.2 Ο Αλγόριθμος MREPSum

Ο αλγόριθμος MREPSum (Sum Maximum Residual Energy Path) [82], επιλέγει τα μονοπάτια με τη μεγαλύτερη παραμένουσα ενέργεια, έτσι ώστε η κατανάλωση ενέργειας να εξισορροπείται ανάμεσα σε όλους τους κόμβους.

Ειδικότερα, οι συγγραφείς θεωρούν μία συνάρτηση κόστους η οποία αντιπροσωπεύει το αντίστροφο (reciprocal) της ενέργειας που έχει απομείνει στον κόμβο i αφότου η διαδρομή θα έχει χρησιμοποιηθεί από το πακέτο, και δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$f(c_{ij}) = \frac{1}{Er_i - e_{ij}} \quad (5.10)$$

Όπου: Er_i είναι η ενέργεια που έχει απομείνει στον κόμβο i και e_{ij} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται (energy expenditure) για κάθε εκπεμπόμενο μπιτ σε όλο το μήκος της ζεύξης (i,j), και δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$e_{ij} = \left\{ \max \left(0.01, \frac{d_{ij}}{E_i} \right) \right\} \quad (5.11)$$

Όπου: E_i είναι η αρχική ενέργεια του κόμβου i .

Κατά συνέπεια, το συντομότερο μονοπάτι διασφαλίζεται με χρήση της συμβατικής εξίσωσης Bellman-Ford η οποία δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$D_i^{n+1} = \min \left\{ \min_{j \in S_i} (f(c_{ij}) + D_j^{(n)}), D_i^{(n)} \right\} \quad (5.12)$$

5.4.1.3 Ο Αλγόριθμος MREPCapsum

Ο αλγόριθμος MREPCapsum (Capsum Maximum Residual Energy Path) [82], αποτελεί τροποποίηση του αλγόριθμου MREPCap και χρησιμοποιεί μία νέα συνάρτηση κόστους η οποία αντανακλά την ενέργεια που έχει απομείνει στον κόμβο, και δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$f(c_{ij}) = \frac{e_{ij}}{Er_i} \quad (5.13)$$

Όπου: Er_i είναι η ενέργεια που έχει απομείνει στον κόμβο i , και e_{ij} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται (energy expenditure) για κάθε εκπεμπόμενο δυαδικό ψηφίο σε όλο το μήκος της ζεύξης (i,j), και δίδεται από τη σχέση (5.11).

Συνεπώς, το συντομότερο μονοπάτι διασφαλίζεται με χρήση της συμβατικής εξίσωσης Bellman-Ford η οποία δίδεται από τη σχέση (5.12), όπως ακριβώς και στην περίπτωση του αλγόριθμου MREPSum.

5.4.1.4 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος MBCR2

Το τρίτο σχήμα σε αυτή τη διατριβή προτείνει δύο αλγορίθμους:

- τον MBCR2 και
- τον MREPSum2.

Ο MBCR2 βασίζεται στη στρατηγική MBCR, και προσπαθεί να βελτιώσει τη συνάρτηση κόστους της μπαταρίας. Για να το επιτύχει αυτό, δεν κάνει πλέον χρήση της εξίσωσης (5.3) αλλά μιας νέας η οποία δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$f(n_i) = \left(\frac{1}{c(n_i)} \right)^p \quad (5.14)$$

Όπου, p είναι μία σταθερά παράμετρος.

Η απόδοση αυτού του σχήματος εξαρτάται από την τιμή της σταθεράς p .

- Για $p = 1$, ο αλγόριθμος MBCR2 γίνεται ισοδύναμος με τον αλγόριθμο MBCR.
- Για $p = 0$, ο αλγόριθμος MBCR2 γίνεται ισοδύναμος με το σχήμα του μικρότερου μονοπατιού (shortest path scheme), και
- Για $p \rightarrow \infty$, γίνεται ισοδύναμος με τον αλγόριθμο MMBCR.
- Όμως, εάν η τιμή του p βρίσκεται μέσα στην περιοχή των τιμών περίπου μεταξύ 3 και 30, τότε η απόδοση αυτού του προτεινόμενου σχήματος φαίνεται να είναι και η βέλτιστη δυνατή.

5.4.1.5 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος MREPSum2

Ο αλγόριθμος MREPSum2 βασίζεται στον αλγόριθμο MREPSum, αλλά χρησιμοποιεί επίσης και μία εκθετική παράμετρο προκειμένου να υπολογίσει το κόστος. Έτσι,

$$f(c_{ij}) = \left(\frac{1}{Er_i - e_{ij}} \right)^p \quad (5.15)$$

Το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη σχεδίαση και τη μοντελοποίηση των τριών προτεινόμενων σχημάτων, “*TDMA Scheduling Algorithm for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks*” [1], “*Enhanced Route Selection for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks*” [2] και “*Energy-Efficient Route Selection Strategies for Wireless Sensor Networks*” [3] για τον έλεγχο ισχύος και την εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ενώ το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει την αξιολόγησή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

6.1 Σχεδίαση και Μοντελοποίηση του Αλγόριθμου TDMA Scheduling

6.1.1 Βασικές Έννοιες

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο διεξάγεται μία πάρα πολύ σημαντική έρευνα γύρω από τους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού (time-scheduling algorithms) στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η οποία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ελαχιστοποίηση της σχετικής χρονικής καθυστέρησης κατά τη διάρκεια της μετάβασης από και προς την κατάσταση ύπνου. Στην παρούσα διατριβή, και ειδικότερα στο πρώτο εκ των τριών προτεινόμενων σχημάτων, η έρευνα οδηγείται ένα βήμα παραπέρα προτείνοντας τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMA scheduling algorithm) ο οποίος μειώνει την ενέργεια που καταναλώνεται στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με το να μειώνει την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση στην κατάσταση ύπνου [1].

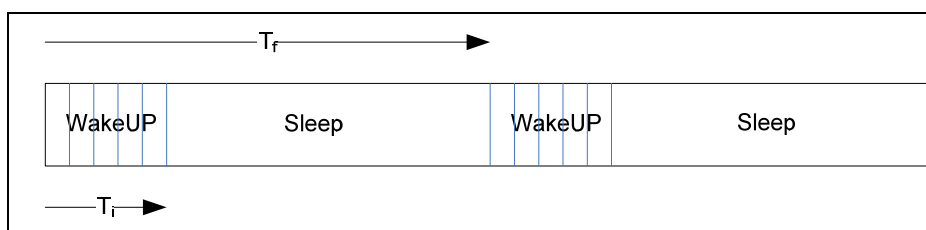
Παρά το γεγονός ότι οι κατακεντρωμένοι αλγόριθμοι (distributed algorithms) είναι οι πλέον κατάλληλοι για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η τρέχουσα έκδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου είναι συγκεντρωτική (centralized). Αυτό πιθανόν να απαιτούσε περισσότερη σηματοδότηση (signaling) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αρχικοποίησης (initialization process), και δεν θα μπορούσε να χειριστεί με τον καλύτερο τρόπο συχνές μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου, με άμεσο αποτέλεσμα την πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας. Όμως, θα μπορούσαν να υποστηριχθούν αποτελεσματικά κάποια σενάρια τα οποία δεν θα απαιτούσαν κινητικότητα [135].

Στη *Συγκεντρωτική Προσέγγιση* (centralized approach), ο σταθμός βάσης ή πύλη (gateway) συλλέγει τις πληροφορίες συνδεσιμότητας (connectivity information) από όλους τους αισθητήρες του δικτύου ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί τους ήδη υπάρχοντες και ενεργειακά αποδοτικούς αλγόριθμους δρομολόγησης προκειμένου να υπολογίσει το κόστος του κάθε μονοπατιού από οποιονδήποτε κόμβο προς το σταθμό βάσης. Στη συνέχεια, ο σταθμός βάσης δημιουργεί ένα πλαίσιο TDMA το οποίο θα διασφαλίζει την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των αποστέλλομενων πακέτων. Αυτό το πλαίσιο χρονοδιαγράμματος εκπέμπεται πίσω προς τους κόμβους με τη μέθοδο της υπερχειλίσης (flooding), προκειμένου να τους πληροφορήσει για την ακριβή χρονική στιγμή που θα μπορούν να στείλουν ή να λάβουν πακέτα.

Αντίθετα, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ένα *Κατακεντρωμένο* σχήμα χρονοπρογραμματισμού TDMA, τότε, το πλαίσιο TDMA κατασκευάζεται τοπικά και με βάση τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ των γειτονικών κόμβων.

Κάθε κόμβος του δικτύου χρησιμοποιεί όλες τις πληροφορίες του πλαισίου TDMA, τις οποίες έλαβε από το σταθμό βάσης, προκειμένου να υπολογίσει την ακριβή χρονική στιγμή που θα μπορεί να στείλει ή να λάβει κάποιο πακέτο. Όλοι οι κόμβοι βρίσκονται τον περισσότερο χρόνο στην κατάσταση ύπνου. Ξυπνούν σύμφωνα με το πλαίσιο TDMA. Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος έχει να στείλει δεδομένα προς το σταθμό βάσης, τότε χρησιμοποιεί την επόμενη του ευκαιρία μετάδοσης προκειμένου να στείλει ένα μήνυμα αφύπνισης - WakeUp (WU). Αυτό το μήνυμα προωθείται από τον κόμβο προς όλους τους κόμβους που βρίσκονται στο μονοπάτι μέχρι το σταθμό βάσης, και οι οποίοι ξυπνούν ακριβώς τη στιγμή που θα λάβουν την πληροφορία κατά τη διάρκεια της περιόδου ύπνου. Η διαχείριση του ανταγωνισμού (contention) κατά τη διάρκεια των περιόδων αφύπνισης (WakeUp) πραγματοποιείται με τη χρήση του αλγόριθμου CSMA/CA.

Μετά τη μετάδοση της πληροφορίας, όλοι οι κόμβοι επιστρέφουν και πάλι στην κατάσταση ύπνου (sleep mode) και ξυπνούν περιοδικά, σύμφωνα με το πλαίσιο TDMA. Το διάστημα (interval) που μεσολαβεί μεταξύ των περιοδικών αφύπνισων TDMA οριοθετείται, ή αλλιώς, περιορίζεται, από τη μέγιστη χρονική καθυστέρηση πρόσβασης. Εξάλλου, ο χρόνος παράδοσης (delivery time) της πληροφορίας δεν εξαρτάται από αυτό το διάστημα, επιτρέποντας έτσι ένα μικρότερο κύκλο δέσμευσης (duty cycle) από ότι άλλα σχήματα συγχρονισμού. Επιπλέον, η ίδια η φύση του TDMA διασφαλίζει τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας σηματοδοσίας [1].



Σχήμα 6-1: WakeUP βασισμένο στο TDMA

Η τεχνική χρονοπρογραμματισμού TDMA οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος συγκρινόμενη με την τεχνική *Always-on*. (όπου οι κόμβοι είναι πάντα ξύπνιοι) Αυτή η κατανάλωση ισχύος μπορεί να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο, εφόσον οι κόμβοι δεν προσπαθούν να ακούσουν τα μηνύματα αφύπνισης WU καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου WakeUP, παρά μόνο για μία συγκεκριμένη θυρίδα (slot), όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 6-1. Όπου:

- T_f : η διάρκεια (ή το μήκος) ολόκληρης της περιόδου,
- T_i : η διάρκεια του πλαισίου WakeUP, και
- $(T_f - T_i)$: ο χρόνος ύπνου ο οποίος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για τη μετάδοση δεδομένων.

Ο κατάλληλος χρονοπρογραμματισμός TDMA (TDMA scheduling) προσδιορίζει τη χρονική διάρκεια της περιόδου ακρόασης, η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ενώ παράλληλα διασφαλίζει την αποφυγή των συγκρούσεων των πακέτων αφύπνισης (WU).

6.1.2 Ο Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Στόχος του προτεινόμενου αλγόριθμου είναι να μειώσει τη χρονική καθυστέρηση της κατάστασης ύπνου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Για να μπορεί ο αλγόριθμος να επιτύχει αυτόν το στόχο, κατασκευάζει το χρονοδιάγραμμα (schedule) χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που έχει συλλέξει και οι οποίες αποτελούνται από:

- το συνολικό αριθμό των κόμβων,
- τον αριθμό των βημάτων από τον οποιονδήποτε κόμβο μέχρι το σταθμό βάσης,
- τους μονοβηματικούς γείτονες (one-hop neighbors) του κόμβου, και
- το επόμενο βήμα του κάθε κόμβου.

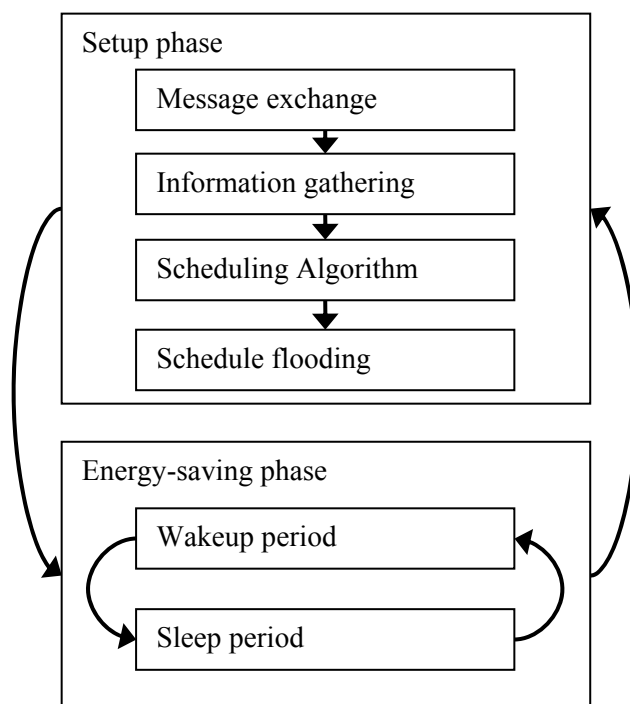
Αυτό το χρονοδιάγραμμα εκχωρεί έναν αριθμό θυρίδων (slots) εκπομπής/λήψης σε κάθε κόμβο. Η διαδικασία της εκχώρησης των θυρίδων γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η εκπομπή από οποιονδήποτε κόμβο να μπορεί να προωθηθεί μέχρι το σταθμό βάσης (gateway) ενός και μόνο πλαισίου.

Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται:

- με την απενεργοποίηση (κλείσιμο) των πομποδεκτών όλων των κόμβων του δικτύου κατά τη διάρκεια της αδρανούς λειτουργίας (idle operation), και
- με μόνο με την περιοδική είσοδο στις περιόδους αφύπνισης (wake up periods).

Κατά τη διάρκεια των περιόδων αφύπνισης, οι αισθητήριοι κόμβοι αφυπνίζονται σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ανάγκη για επικοινωνία δεν ανταλλάσσονται πακέτα και για όσο χρόνο διαρκεί αυτή η φάση. Αντίθετα, εάν κάποιος κόμβος θέλει να μεταδώσει πληροφορίες προς το σταθμό βάσης, τότε χρησιμοποιεί τη δική του ευκαιρία μετάδοσης κατά τη φάση αφύπνισης (WU phase) και μεταδίδει ένα μήνυμα αφύπνισης (WU message). Αυτό το μήνυμα μεταδίδεται επανειλημμένα μέχρις ότου φθάσει στο σταθμό βάσης. Οι κόμβοι του μονοπατιού, που έχουν λάβει και έχουν προωθήσει τα μηνύματα αφύπνισης, δεν απενεργοποιούν (turn off) τους πομποδέκτες τους κατά τη διάρκεια της επόμενης περιόδου ύπνου, παρά μόνον εφόσον έχει ολοκληρωθεί η ανταλλαγή των πληροφοριών.

Αυτή η διαδικασία διατηρεί σε χαμηλά επίπεδα το χρόνο παθητικής ακρόασης (idle listening time), ενώ περιορίζει ταυτόχρονα τον από άκρο-σε-άκρο χρόνο παράδοσης (end-to-end delivery time).



Σχήμα 6-2: Οι φάσεις του προτεινόμενου αλγόριθμου

Για την πληρέστερη κατανόηση των όσων μέχρι στιγμής ανεφέρθησαν, παραθέτουμε το Σχήμα 6.2 το οποίο απεικονίζει όλες τις φάσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου και έχει ως εξής:

Αρχικά λαμβάνει χώρα η *Φάση Εγκατάστασης* (setup phase), κατά τη διάρκεια της οποίας κατασκευάζεται το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης (transmission schedule) των πακέτων, και στη συνέχεια ακολουθεί η *Φάση Εξοικονόμησης Ενέργειας* (energy-saving phase).

Κατά τη διάρκεια της *Φάσης Εγκατάστασης*, οι αισθητήρες δεν καταφέρνουν να επιτύχουν τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργεια, διότι πολύ απλά οι ασύρματοι πομποδέκτες τους δεν βρίσκονται στην κατάσταση ύπνου.

Η *Φάση Εγκατάστασης* αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Ανταλλαγή μηνυμάτων *HELLO* και δρομολόγησης μεταξύ των κόμβων,
- Μετάδοση της σχηματισθείσας πληροφορίας προς το σταθμό βάσης,
- Υπολογισμός και κατάρτιση του χρονοδιαγράμματος (schedule calculation), και
- Πλημμύρα (flooding) του χρονοδιαγράμματος πίσω προς τους κόμβους.

Μέσα από την ανταλλαγή μηνυμάτων *HELLO*, ο κάθε κόμβος ενημερώνεται για:

- τους υπόλοιπους κόμβους (τους γείτονές του) που βρίσκονται μέσα στη δική του εμβέλεια επικοινωνίας, καθώς και
- για τον επόμενο κόμβο που βρίσκεται στο δρόμο του προς το σταθμό βάσης.

Στη συνέχεια, οι πληροφορίες που προέρχονται από τους κόμβους του δικτύου εκπέμπονται προς το σταθμό βάσης, ο οποίος τώρα χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο που θα αναφερθεί παρακάτω, προκειμένου να υπολογίσει και να κατασκευάσει το πλέον κατάλληλο χρονοδιάγραμμα TDMA.

Τελικά, το χρονοδιάγραμμα TDMA που προέκυψε από αυτήν τη διαδικασία, διοχετεύεται με τη μέθοδο της πλημμύρας προς τους αισθητήρες, οι οποίοι το χρησιμοποιούν κατά τη διάρκεια της *Φάσης Εξοικονόμησης Ενέργειας* προκειμένου να προσδιορίσουν επακριβώς τις περιόδους ύπνου και αφύπνισης (sleep and wake-up periods).

Ακολουθεί αναλυτικότερη περιγραφή των όσων μέχρι στιγμής ανεφέρθησαν.

6.1.2.1 Φάση Εγκατάστασης (Setup Phase)

Η φάση εγκατάστασης είναι απαραίτητη για τη δημιουργία του χρονοδιαγράμματος το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των περιόδων αφύπνισης στη *Φάση Εξοικονόμησης Ενέργειας*. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται όταν:

- αρχικοποιείται (initialized) το δίκτυο, και
- οποτεδήποτε αναμένονται αστοχίες κόμβων (sensor failures).

Αποτελείται από τα εξής βήματα:

6.1.2.1.1 Ανταλλαγή Μηνυμάτων

Στο αρχικό βήμα του αλγορίθμου, ο κάθε κόμβος του δικτύου οφείλει να προσδιορίσει την παρουσία γειτονικών κόμβων που βρίσκονται μέσα στην περιοχή του. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκπομπή μηνυμάτων *HELLO* και τις απαντήσεις που λαμβάνουν οι κόμβοι.

Μέσα από αυτή την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των γειτονικών κόμβων, δημιουργούνται οι πίνακες που θα αποσταλούν από τον κάθε κόμβο προς το σταθμό βάσης.

6.1.2.1.2 Συλλογή Πληροφοριών

Από τη στιγμή που σε κάθε κόμβο προκύψουν πληροφορίες, σχετικές με τους γειτονικούς κόμβους και τη δρομολόγηση, τότε αυτές αποστέλλονται στο σταθμό βάσης (gateway). Κάθε κόμβος είναι υποχρεωμένος να παρέχει στο σταθμό βάσης τα εξής:

- Τον αριθμό των βημάτων από τον κόμβο μέχρι το σταθμό βάσης.
- Τους μονοβηματικούς γείτονες του κόμβου.
- Το επόμενο βήμα του κάθε κόμβου.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές συσσώρευσης (aggregation techniques) προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μηνυμάτων που απαιτούνται για τη μετάδοση των πληροφοριών.

6.1.2.1.3 Ο Αλγόριθμος Χρονοπρογραμματισμού (The scheduling algorithm)

Το ερώτημα που τίθεται ευθύς αμέσως είναι ποια θυρίδα θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ο κάθε κόμβος προκειμένου να μεταδώσει τα δικά του μηνύματα αφύπνισης (WU messages) – είτε αυτά που δημιουργεί είτε αυτά που προωθεί – και ποιες θυρίδες θα πρέπει να ακροάζεται ο κάθε κόμβος. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος της αφύπνισης μονοπατιού (Path WakeUP) απαιτεί από τους πρώτους κόμβους του μονοπατιού να εκχωρούν πρώτοι τις πρώτες χρονοθυρίδες και στη συνέχεια να εκχωρούν οι κόμβοι που έπονται. Εξ' άλλου, οι συγκρούσεις μπορούν να αποφευχθούν εφόσον οι κόμβοι, που λαμβάνουν πακέτα ταυτόχρονα, δεν είναι μονοβηματικοί γείτονες (one-hop neighbors). (Το TDMA δεν πάσχει από την κατάσταση του εκτιθέμενου τερματικού (exposed terminal situation)). Επιπλέον, πιθανές μεταδόσεις προς τον ίδιο προορισμό, θα πρέπει να εκχωρούνται σε διαφορετικές χρονοθυρίδες. Σε ιδανικές περιπτώσεις, οι κόμβοι, που δεν είναι μονοβηματικοί γείτονες, θα πρέπει να λαμβάνουν πακέτα ταυτόχρονα προκειμένου να επιτύχουν την ελάττωση του ολικού μήκους πλαισίου στο ελάχιστο δυνατό [115].

Ψευδοκώδικας

```
do {
    slot = new Slot();
    send_collision_set = null;
    rcv_collision_set = null;
    foreach node in nodelist {
        if (node->rcv==0 &&
            (node not in send_collision_set) &&
            (node->dest not in rcv_collision_set)) {
            slot[node] = "SEND";
            slot[node->dest] = "RCV";
            send_collision_set.add(node->dest->neighbors)
            send_collision_set.add(node->dest)
            rcv_collision_set.add(node->neighbors)
            node->dest->rcv--;
            nodelist.remove(node);
        }
    }
    frame.add(slot);
} while (slot.length > 0)
```

Ως εκ τούτου, ο προγραμματισμός των χρονοθυρίδων (timeslots scheduling) θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα μονοπάτια δρομολόγησης καθώς και όλες τις πληροφορίες από τους γειτονικούς κόμβους. Όμως, αυτοί οι περιορισμοί καθιστούν ανεπαρκή τα σχήματα χρονοπρογραμματισμού TDMA, επειδή δεν λαμβάνουν υπόψη τους την επιθυμητή σειρά

μεταδόσεων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει αυτήν την ατέλεια δημιουργώντας ένα χρονοδιάγραμμα TDMA (TDMA schedule) το οποίο θα είναι κατάλληλο για μεταδόσεις μηνυμάτων αφύπνισης (WU) σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMA scheduling algorithm) εκχωρεί μία θυρίδα εκπομπής σε κάθε κόμβο του δικτύου, καθώς και έναν αριθμό θυρίδων λήψης σε κάθε κόμβο αναμετάδοσης, μία για κάθε αντίστοιχο κόμβο που εκπέμπει προς αυτόν. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που έχει συλλέξει προκειμένου να υπολογίσει το χρονοδιάγραμμα TDMA. Με βάση την παραπάνω πληροφόρηση, υπολογίζεται ο αριθμός των θυρίδων που πρέπει να λάβει ο κάθε κόμβος πριν αρχίσει να μεταδίδει.

Το τμήμα του παραπάνω ψευδοκώδικα (pseudo-code) περιγράφει τη λειτουργία του αλγορίθμου. Η λίστα των κόμβων (*nodelist*) θεωρείται ότι είναι ταξινομημένη σε φθίνοντα βήματα προς το σταθμό βάσης. Επίσης το *node* \rightarrow *dest* είναι το επόμενο βήμα (hop) του κόμβου, και το *node* \rightarrow *recv* αντιπροσωπεύει τις υπόλοιπες λήψεις που θα πρέπει να κάνει ο κόμβος πριν αρχίσει να μεταδίδει [1].

6.1.2.1.4 Πλημμύρα Χρονοδιαγράμματος (Schedule flooding)

Το χρονοδιάγραμμα (schedule) θα πρέπει να είναι διαθέσιμο στους αισθητήρες από την πρώτη στιγμή που θα δημιουργηθεί ώστε να μπορούν να το χρησιμοποιήσουν. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν αποτελεσματικό τρόπο κάνοντας χρήση τεχνικών πλημμύρας (flooding techniques).

6.1.2.2 Φάση Εξοικονόμησης Ενέργειας (Energy-saving Phase)

Σε αυτήν τη φάση, οι περίοδοι ύπνου/αφύπνισης προσδιορίζονται με τη χρήση του χρονοδιαγράμματος (schedule) της *Φάσης Εγκατάστασης* (setup phase).

Κατά τη διάρκεια της *Φάσης Εξοικονόμησης Ενέργειας* χρησιμοποιείται η τεχνική αφύπνισης μονοπατιού (Path WakeUP), αντί των τεχνικών αφύπνισης κόμβου (Node WakeUp) και συσσώρευσης μηνυμάτων αφύπνισης μονοπατιού (Path WU Message Aggregation), όχι μόνο για να εξοικονομηθεί πολύτιμη ενέργεια, αλλά και για να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση.

Επειδή απαιτείται η μείωση της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης, χρησιμοποιείται η τεχνική αφύπνισης μονοπατιού (Path WU) και όχι η τεχνική αφύπνισης κόμβου (Node WakeUp). Η τεχνική αφύπνισης κόμβου (Node WakeUp) έχει μεγαλύτερη από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση από ότι η τεχνική αφύπνισης μονοπατιού (Path WU), επειδή τα μηνύματα αφύπνισης δεν μπορούν να φθάσουν στο σταθμό βάσης μέσα σε ένα και μόνο απλό πλαίσιο. Επίσης, η εφαρμογή της τεχνικής συσσώρευσης μηνυμάτων αφύπνισης μονοπατιού (Path WU Message Aggregation) είναι σημαντική διότι, επειδή απαιτεί μόνο μία χρονοθυρίδα εκπομπής για κάθε κόμβο, ελαττώνει τον αριθμό των θυρίδων που απαιτούνται για τη λήψη μηνυμάτων, και ως εκ τούτου, μειώνει την ενέργεια που καταναλώνεται κατά την παθητική ακρόαση (idle listening).

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της *Φάσης Εξοικονόμησης Ενέργειας*, χρησιμοποιείται μία επιπλέον χρονοθυρίδα για την επικοινωνία, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο *S-MAC* [114]. Αυτή η χρονοθυρίδα χρησιμοποιείται όταν κάποιο μήνυμα δεν πρέπει να διοχετευτεί προς το σταθμό βάσης αλλά κάπου αλλού. Όμως, αυτή η μετάδοση του μηνύματος δεν έχει υποστεί την επεξεργασία βελτιστοποίησης για την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, και ως εκ τούτου, η προκύπτουσα χρονική καθυστέρηση είναι πολύ μεγάλη.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, αυτό το σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας έχει σχεδιαστεί ακριβώς για *στατική* ανάπτυξη αισθητήρων, όπου το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης κατευθύνεται προς το σταθμό βάσης.

Η *Συγκεντρωτική* (centralized) φύση αυτού του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, τον καθιστά κατάλληλο για *στατικές* αναπτύξεις με ανύπαρκτες ή πολύ σπάνιες τοπολογικές μεταβολές. Όμως, ακόμη και σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση συχνών τοπολογικών μεταβολών, οι οποίες οφείλονται κατά βάση στις αστοχίες των κόμβων εξαιτίας της περιορισμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας τους. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να ξεπεραστεί εύκολα εφόσον αφεθούν οι κόμβοι να δηλώσουν από μόνοι τους το κρίσιμο φορτίο της μπαταρίας τους προς το σταθμό βάσης, προκειμένου να εξαιρεθούν από τα μελλοντικά χρονοδιαγράμματα τα οποία θα δημιουργηθούν μετά την επόμενη φάση εγκατάστασης.

Οι λειτουργίες της συλλογής των απαιτούμενων πληροφοριών από τους αισθητήρες και της διανομής του χρονοδιαγράμματος, απαιτούν κάποια πρόσθετη επιβάρυνση επικοινωνίας. Εκτός τούτου, επειδή σε κάθε αισθητήρα του δικτύου είναι απαραίτητο ένα μήνυμα το οποίο θα παρέχει πληροφορίες για τους γειτονικούς του κόμβους και για το επόμενο βήμα (next-hop), αυτό συνεπάγεται μία πρόσθετη επιβάρυνση επικοινωνίας η οποία είναι ανάλογη του αριθμού των κόμβων που εμπεριέχονται στο δίκτυο. Επίσης, η διανομή του χρονοδιαγράμματος απαιτεί πολύ μικρότερο αριθμό μηνυμάτων επικοινωνίας, από ότι η περισυλλογή πληροφοριών (information gathering), διότι η διανομή μπορεί να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικούς αλγόριθμους υπερχειλίσσης (flooding algorithms) και εκπομπής (broadcasting). Επιπλέον, οι αισθητήρες δεν είναι απαραίτητο να διαθέτουν περίπλοκες υπολογιστικές δυνατότητες, για το λόγο ότι η εκτέλεση του αλγορίθμου του χρονοδιαγράμματος επιτελείται στο σταθμό βάσης, ο οποίος θεωρείται ότι έχει πολύ μεγαλύτερη ισχύ από τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου βρίσκεται ότι είναι ένα πολυώνυμο του αριθμού των κόμβων, και έτσι, μπορεί να ολοκληρωθεί πολύ γρήγορα.

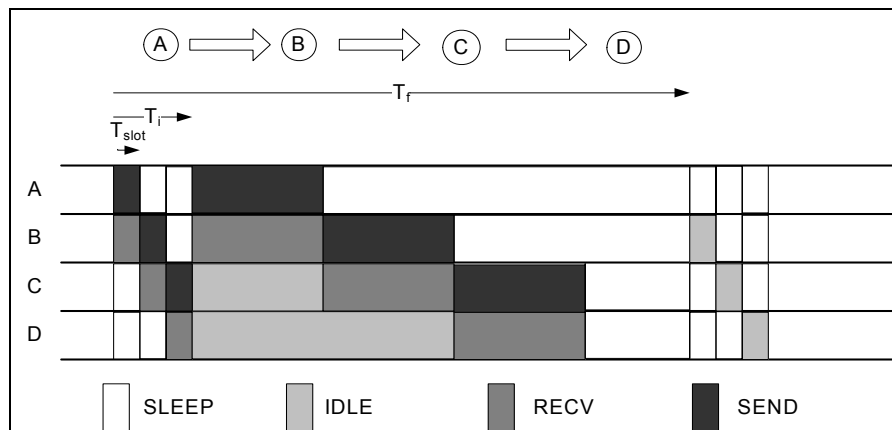
6.1.2.2.1 Αφύπνιση Κόμβου σε Σχέση με την Αφύπνιση Μονοπατιού (Node WakeUP vs. Path WakeUP)

Τα περισσότερα από τα σχήματα *Υπνου/Αφύπνισης* (Sleep/WakeUP schemes) λειτουργούν στη βάση της ανά βήμα (per-hop basis) μετάδοσης δεδομένων. Έτσι, ο κόμβος που μεταδίδει θα πρέπει να περιμένει την άφιξη του κατάλληλου χρόνου αφύπνισης (wake-up time), ο οποίος θα προσδιορίζει τον προορισμό του επόμενου βήματος (next-hop destination), πριν αρχίσει να μεταδίδει τα δεδομένα. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας αναμετάδοσης (forwarding sensor node) θα πρέπει να περιμένει την άφιξη του χρόνου αφύπνισης (wake-up time) του επόμενου αισθητήρα που βρίσκεται στο μονοπάτι, προτού αρχίσει να μεταδίδει τα δεδομένα, κ.ο.κ, και μέχρι ότου φθάσει το μήνυμα στον κόμβο ο οποίος αντιπροσωπεύει το σταθμό βάσης. Αυτή η στρατηγική οδηγεί σε μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις για μετάδοση δεδομένων από τη μία άκρη του δικτύου στην άλλη και οι οποίες είναι ίσες με το γινόμενο του αριθμού των ενδιάμεσων κόμβων (forwarders), επί το χρονικό διάστημα αφύπνισης (wake-up interval) [1].

Εάν ο πηγαίος αισθητήριος κόμβος (source sensor node) μεταδίδει ένα μικρής χρονικής διάρκειας πακέτο αφύπνισης (WU packet) στο επόμενο βήμα του μονοπατιού μετάδοσης, και αυτό το πακέτο αφύπνισης προωθείται συνεχώς μέχρι να φθάσει στον τελικό του προορισμό, τότε, όλοι οι εμπλεκόμενοι κόμβοι θα βρίσκονται στην *ENEPTO* κατάσταση (*ACTIVE* mode), προσδοκώντας τη λήψη της πληροφορίας. Έτσι, οι ενδιάμεσοι κόμβοι θα μπορούν να μεταδίδουν το μήνυμα άμεσα. Με αυτήν την τεχνική, η στρατηγική *Αφύπνισης Μονοπατιού* (Path WakeUP strategy) μπορεί να επιτρέπει μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα αφύπνισης στους προωθώντας κόμβους, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση.

Για να μπορέσουμε να επωφεληθούμε από το μηχανισμό *Αφύπνισης Μονοπατιού* (Path WakeUP mechanism), θα πρέπει ο χρονοπρογραμματισμός TDMA (TDMA scheduling) να επιτελείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζει ότι η *Μεταδίδουσα Ενεργός Χρονοθυρίδα* (transmitting Active timeslot) του κάθε ενδιαμέσου κόμβου θα πρέπει να προγραμματίζεται πριν από τις *Μεταδίδουσες Ενεργές Χρονοθυρίδες* του επόμενου ενδιαμέσου κόμβου που βρίσκεται σε αυτό το μονοπάτι.

Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει τις μεταβάσεις των καταστάσεων ισχύος (power mode transitions) της *Αφύπνισης Μονοπατιού* (Path WakeUP) σε ένα απλό δίκτυο τριών βημάτων (3-hop network).



Σχήμα 6-3: Η Αφύπνιση Μονοπατιού (Path WakeUP)

Στο Σχήμα 6-3, τα σύμβολα A, B, και C αντιπροσωπεύουν τους κόμβους σε ένα απλό δίκτυο τριών βημάτων (3-hop network), ενώ ο κόμβος D αντιπροσωπεύει το σταθμό βάσης. Το μήκος της ολικής περιόδου είναι T_f , η διάρκεια του πλαισίου αφύπνισης είναι T_i , και το μήκος της θυρίδας είναι T_{slot} . Ο κόμβος A σκοπεύει να μεταδώσει ένα μήνυμα στο σταθμό βάσης D. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αφύπνισης (Wakeup period) T_i , προωθείται ένα μήνυμα WU προς το σταθμό βάσης D. Κατόπιν, όλοι οι συμμετέχοντες κόμβοι του μονοπατιού παραμένουν στην κατάσταση αδράνειας (idle mode) μέχρις ότου ο κάθε ένας από αυτούς λάβει το μήνυμα και το προωθήσει. Στη συνέχεια επανέρχονται στην κατάσταση ύπνου. Στην επόμενη περίοδο αφύπνισης, δεν απαιτείται καμία μετάδοση μηνύματος, οπότε, δεν παράγονται και δεν προωθούνται μηνύματα WU, όμως, θα πρέπει οι κόμβοι να μεταπηδήσουν στην κατάσταση αδράνειας για πολύ σύντομο χρόνο προκειμένου να ανιχνεύσουν το κανάλι για πιθανή μετάδοση μηνύματος αφύπνισης (WU).

6.1.2.2.2 Συσσώρευση Μηνυμάτων Αφύπνισης Μονοπατιού (Path WU Message Aggregation)

Στα περισσότερα σενάρια ασύρματων δικτύων αισθητήρων, τα μονοπάτια μετάδοσης (transmission paths), τα οποία συγκροτούνται από πολυάριθμους αισθητήριους κόμβους, προωθούν τα δεδομένα μέσα από τους ίδιους ενδιαμέσους κόμβους forwarders). Εκτός αυτού, επειδή όλα τα δεδομένα έχουν ως προορισμό το σταθμό βάσης, τα ξεχωριστά μονοπάτια δρομολόγησης, που συγχωνεύονται, δεν διασπώνται (split-up) ξανά. Αυτό σημαίνει ότι, εάν υπάρξουν μεταδόσεις σε περισσότερα από ένα μονοπάτια που συγχωνεύονται ταυτόχρονα, τότε, τα μηνύματα αφύπνισης μονοπατιού (Path WU messages) λαμβάνονται δύο φορές από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό κόμβων. Με τη συσσώρευση μηνυμάτων αφύπνισης μονοπατιού (Path WU message aggregation), ο κάθε κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα αφύπνισης μόνο μία φορά σε κάθε επανάληψη (iteration). Με αυτόν τον τρόπο, οι χρονοθυρίδες που απαιτούνται για την

προώθηση των μηνυμάτων αφύπνιση μειώνονται σημαντικά, επειδή ένας κόμβος ο οποίος ακροάζεται πολλά μηνύματα αφύπνιση (WU messages), απαιτεί μόνο μία χρονοθυρίδα μετάδοσης, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα βραχύτερους χρόνους ανενεργούς ακρόασης (idle listening times), και σε μικρότερα μήκη πλαισίων TDMA [1].

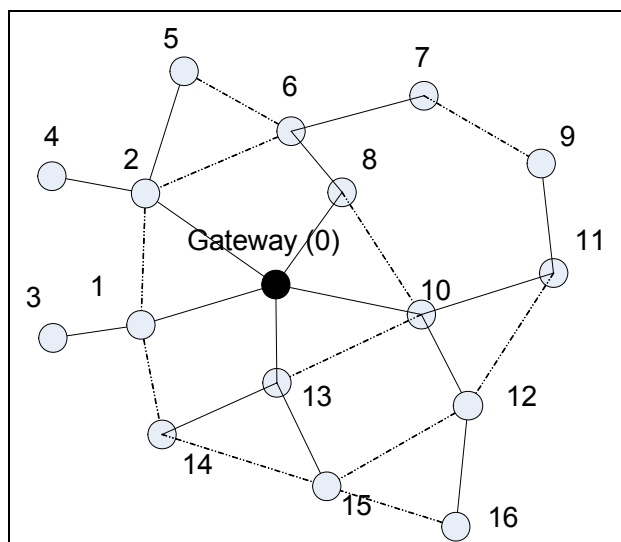
6.1.3 Ένα Παράδειγμα

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε τη λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMA scheduling algorithm) με ένα παράδειγμα [1].

Ας θεωρήσουμε το δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4 και το οποίο αποτελείται από 16 ασύρματους αισθητήριους κόμβους και από ένα σταθμό βάσης (Κόμβος 0). Τα ενδεικνύμενα μονοπάτια δρομολόγησης έχουν δημιουργηθεί με βάση τις διαδικασίες που αναφέρονται στη φάση εγκατάστασης (setup phase). Οι διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν τους κόμβους που βρίσκονται ο ένας μέσα στην εμβέλεια του άλλου, ενώ, οι συνεχείς γραμμές υποδηλώνουν τα μονοπάτια δρομολόγησης από τους κόμβους προς το σταθμό βάσης (gateway). Για αυτήν την τοπολογία δημιουργήθηκε μία λίστα κόμβων (“nodelist”) (βλ. ενότητα 6.1.2.1.3) οι τιμές της οποίας συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 6-1.

Για το σκοπό του αλγορίθμου ορίσαμε τις εξής έννοιες:

- *Γείτονες* (Neighbors): Μία λίστα η οποία περιέχει όλους τους μονοβηματικούς γείτονες του κόμβου.
- *Dest*: Ο γείτονας του επόμενου βήματος (next-hop neighbor) για μετάδοση προς το σταθμό βάσης (gateway), σύμφωνα με το πρωτόκολλο δρομολόγησης.
- *Hops*: Ο αριθμός των αναμεταδόσεων (retransmissions) που απαιτούνται για να φθάσει το μήνυμα στο σταθμό βάσης (gateway).
- *Recv*: Ο αριθμός των θυρίδων που απαιτούνται για την ακρόαση (listening). Η ιδιότητα της λήψης χρησιμοποιείται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα μηνύματα αφύπνιση (WakeUP messages) θα φθάσουν στον τελικό τους προορισμό μέσα σε ένα πλαίσιο TDMA.



Σχήμα 6-4: Το υπό εξέταση δίκτυο

Ο Πίνακας 6-1 περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό του χρονοδιαγράμματος TDMA (TDMA schedule).

Αυτές οι πληροφορίες συμπεριλαμβάνουν:

- τους γείτονες του κάθε κόμβου,
- τον προορισμό του επόμενου βήματος του κάθε κόμβου,
- τον αριθμό των βημάτων (hops) μέχρι το σταθμό βάσης, και
- τον αριθμό των θυρίδων λήψης που απαιτούνται πριν από τη μετάδοση.

Πίνακας 6-1: Πληροφορίες Συνδεσιμότητας για το υπό εξέταση Δίκτυο TDMA

Node	Neighbors	Dest	Hops	Recv
1	0,2,3,14	0	1	1
2	0,1,4,5,6	0	1	2
3	1	1	2	0
4	2	2	2	0
5	2,6	2	2	0
6	2,5,7,8	8	2	1
7	6,9	6	3	0
8	0,6,10	0	1	1
9	7,11	11	3	0
10	0,8,11,12,13	0	1	2
11	9,10,12	10	2	1
12	10,11,15,16	10	2	1
13	0,10,14,15	0	1	2
14	1,13,15	13	2	0
15	12,13,14,16	13	2	0
16	12,15	12	3	0

Ο Πίνακας 6-2 απεικονίζει το χρονοδιάγραμμα TDMA (TDMA schedule) που προκύπτει από τον Πίνακα 6.1. Το *S* υποδηλώνει ότι ο κόμβος θα στείλει πληροφορίες στην προκαθορισμένη χρονοθυρίδα, ενώ το *R* υποδηλώνει ότι ο κόμβος θα λάβει στη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα.

Πίνακας 6-2: Το χρονοδιάγραμμα TDMA που προκύπτει από τη διαδικασία

Node\Slot	1	2	3	4	5	6	7
1	R		S				
2	R	R		S			
3	S						
4	S						
5		S					
6	R		S				
7	S						
8			R		S		
9	S						
10		R	R			S	
11	R	S					
12	R		S				
13		R	R				S
14		S					
15			S				
16	S						

Αναλυτικότερα: Το R υποδηλώνει τον αριθμό δεικτοδότησης (index number) ο οποίος αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη χρονοθυρίδα με την οποία ο αισθητήριος κόμβος θα θέσει σε λειτουργία (switch ON) το δέκτη του, δηλαδή, αντιστοιχεί σε μία θυρίδα λήψης, ενώ το S υποδηλώνει τη θυρίδα εκπομπής (sending slot) για κάθε κόμβο στο δίκτυο.

Οι παράγραφοι που ακολουθούν δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο δημιουργήθηκε ο Πίνακας 6-2 από τον Πίνακα 6-1, με την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Δημιουργείται αρχικά η λίστα των κόμβων (*nodelist*), η οποία περιλαμβάνει όλους εκείνους τους κόμβους στο δίκτυο στους οποίους δεν έχει εκχωρηθεί καμία θυρίδα για να μεταδώσουν. Στη συνέχεια, ταξινομείται η λίστα των κόμβων (*nodelist*) προκειμένου να αυξηθεί η ολική απόδοση (overall performance). Ειδικότερα, οι κόμβοι που έχουν τη μεγαλύτερη τιμή της ιδιότητας των κόμβων (hops property), τοποθετούνται στην κορυφή, παραχωρώντας τους υψηλότερη προτεραιότητα (higher priority) προκειμένου να μεταδώσουν στις πρώτες θυρίδες και έτσι, να μειώσουν το ολικό μήκος του πλαισίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ολικό μήκος πλαισίου θα είναι τουλάχιστον τόσο μεγάλο όσο ο αριθμός δεικτοδότησης της τρέχουσας χρονοθυρίδας, συν (+) τον αριθμό των κόμβων (“Hops” property), του προστιθέμενου κόμβου. Επίσης, οι κόμβοι που έχουν πολλούς γείτονες τοποθετούνται πριν από τους κόμβους που έχουν λιγότερους γείτονες, για τον απλούστατο λόγο ότι αυτοί οι κόμβοι έχουν περισσότερες πιθανότητες να ενταχθούν σε μία μελλοντική λίστα σερ συγκρούσεων (collision set list).

Το *Σετ Συγκρούσεων* (Collision Set) είναι μία λίστα από κόμβους, οι οποίοι, εάν μεταδίδουν στην ίδια χρονοθυρίδα πιθανόν να συγκρουστούν με τους κόμβους που βρίσκονται στη χρονοθυρίδα. Έτσι για την τοπολογία του δικτύου που απεικονίζεται στο Σχήμα 6-3, δημιουργείται η παρακάτω λίστα κόμβων (*nodelist*):

$$nodelist = \{7, 9, 16, 6, 12, 15, 11, 14, 5, 3, 4, 2, 10, 1, 13, 8\}$$

Η αρχική τιμή του σετ συγκρούσεων είναι μηδενική.

Αρχίζοντας από τον κόμβο 7, μπορούμε να διακρίνουμε στον Πίνακα 6-1, ότι η ιδιότητα “*recv*” (“*recv*” property) (στην έκφραση του ψευδικώδικα: $node7 \rightarrow recv$) είναι μηδενική. Έτσι, ο πρώτος κόμβος που θα πρέπει να προστεθεί στην πρώτη χρονοθυρίδα είναι ο κόμβος 7, οπότε το κελί (7,1) του Πίνακα 6-2 συμπληρώνεται με το γράμμα “*S*”. Επίσης, ο γείτονας του επόμενου βήματος που πρόκειται να μεταδώσει προς το σταθμό βάσης ($node7 \rightarrow dest$) είναι ο κόμβος 6, οπότε το κελί (6,1) του Πίνακα 6-2 συμπληρώνεται με το γράμμα “*R*”. Το “*collision_set*” συμπληρώνεται τώρα με τον κόμβο 6 και τους γείτονές του, οπότε γίνεται {2, 5, 6, 7, 8}. Η αξία του “ $Node6 \rightarrow recv$ ” μειώνεται κατά ένα, και γίνεται μηδέν. Στη συνέχεια, ο κόμβος 7 αφαιρείται από τη *nodelist*. Ο επόμενος κόμβος που θεωρούμε, είναι ο κόμβος 9. Επειδή το “ $Node9 \rightarrow recv$ ” είναι μηδέν, και ο κόμβος 9 (Node 9) δεν συμπεριλαμβάνεται στο “*collision_set*”, προστίθεται στη θυρίδα. Με παρόμοιο τρόπο, το κελί (9,1) του Πίνακα 6-2 συμπληρώνεται με το γράμμα “*S*”, ενώ το κελί (11,1) του Πίνακα 6-2 συμπληρώνεται με το γράμμα “*R*”. Ο κόμβος 11 και οι γείτονές του προστίθενται στο “*collision_set*”, το οποίο γίνεται τώρα {2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12}. Επίσης, ο κόμβος 9 αφαιρείται από τη *nodelist*, και το “ $node11 \rightarrow recv$ ” μειώνεται στο μηδέν.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι κόμβοι της *nodelist*. Σε αυτό εδώ το σημείο, έχει ολοκληρωθεί η δημιουργία της “*slot 1*”. Οι κόμβοι που θα μεταδώσουν στο “*slot 1*” είναι οι {3, 4, 7, 9, 14, 16}, ενώ οι κόμβοι που θα λαμβάνουν στο “*slot 1*” είναι οι {1, 2, 6, 11, 12, 13}. Οπότε, τώρα το “*collision_set*” αρχικοποιείται και πάλι, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία της επόμενης χρονοθυρίδας, π.χ. της “*slot 2*”, και μέχρι να αδειάσει τελείως η *nodelist*.

Οι θυρίδες που προκύπτουν από αυτήν τη διαδικασία φαίνονται στον Πίνακα 6-2.

6.2 Σχεδίαση και Μοντελοποίηση του Αλγόριθμου LCMMR

6.2.1 Μοντέλο Δικτύου

Το υπό μελέτη μοντέλο δικτύου αποτελείται από ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο αισθητήρων N το οποίο συμπεριλαμβάνει έναν αριθμό κόμβων $n_i \in N$. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου χρησιμοποιούν ένα απλό ασύρματο κανάλι. Οι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από την εμβέλεια μετάδοσης, θεωρούνται γείτονες, που απλά σημαίνει ότι μπορούν να ανταλλάσσουν απευθείας πληροφορίες [2].

Όταν ένας κόμβος έχει να μεταδώσει πληροφορίες σε κάποιον άλλο κόμβο του δικτύου, τότε δημιουργείται μία *Σύνδεση* (connection) ή *Ροή* (flow). Μόλις συμβεί αυτό, τότε τα σχήματα δρομολόγησης προσπαθούν να βρουν ένα μονοπάτι προκειμένου να συνδέσουν τον πηγαίο κόμβο (source node) με τον κόμβο προορισμού (destination node), μέσα από έναν περιορισμένο αριθμό ενδιάμεσων κόμβων αναμετάδοσης (forwarding nodes). Εφόσον υπάρξουν *αποδεκτά μονοπάτια*, τότε χρησιμοποιείται μία στρατηγική επιλογής διαδρομής (route selection strategy), η οποία θα επιλέξει το πλέον κατάλληλο μονοπάτι για τη μετάδοση των πληροφοριών.

Ένα *αποδεκτό μονοπάτι* δεν θα βρεθεί, εφόσον ισχύει τουλάχιστον ένα από τα παρακάτω:

- Είτε ο πηγαίος κόμβος είτε ο κόμβος προορισμού, είτε ακόμη και οι δύο μαζί έχουν απολέσει όλα τα αποθέματα ενέργειας που διαθέτουν.
- Δεν υφίσταται κανένα μονοπάτι εξαιτίας του διαμελισμού του δικτύου.
- Τα μόνα μονοπάτια που υπάρχουν δεν είναι αποδεκτά εξαιτίας των υπερβολικών χρονικών καθυστερήσεων.

Όταν δεν βρεθούν αποδεκτά μονοπάτια, τότε η σύνδεση απορρίπτεται.

Όταν βρεθούν αποδεκτά μονοπάτια, τότε υπολογίζεται και πάλι η ενέργεια που έχει απομείνει σε κάθε κόμβο ο οποίος συμμετέχει στο νέο μονοπάτι.

6.2.1.1 Το Μοντέλο Κατανάλωσης Ισχύος

Επειδή στο δεύτερο μέρος της παρούσας διατριβής μελετάται ο τρόπος με τον οποίο οι διάφορες στρατηγικές επιλογής της πλέον κατάλληλης διαδρομής επιδρούν στη διάρκεια ζωής του δικτύου, μοντελοποιείται μόνο η ισχύς η οποία καταναλώνεται κατά τη μετάδοση και λήψη των δρομολογούμενων πληροφοριών. Συνεπώς, θεωρούμε ότι οι κόμβοι που καταναλώνουν ενέργεια είναι αυτοί που μεταδίδουν και λαμβάνουν πληροφορίες.

Δευτερεύοντα φαινόμενα, όπως είναι π.χ. η παθητική ακρόαση (idle listening), οι συγκρούσεις (collisions), η αλλαγή καταστάσεων (changing states), κτλ. δεν έχουν ληφθεί καθόλου υπόψη επειδή δεν θεωρούνται ότι έχουν κάποια σχέση με τη συγκεκριμένη στρατηγική.

Επίσης, όλες οι μεταδόσεις πακέτων πραγματοποιούνται με το ίδιο επίπεδο ισχύος, ανεξάρτητα από την απόσταση που μεσολαβεί ανάμεσα στον αποστολέα (sender) και στον παραλήπτη (receiver) [2].

Για τον κόμβο $n_i \in N$, το P_i^t αντιπροσωπεύει την ισχύ που καταναλώνεται στη φάση της εκπομπής (transmitting power consumption), ενώ το P_i^r αντιπροσωπεύει την ισχύ που καταναλώνεται κατά τη λήψη (receiving power consumption).

Υποθέτοντας ένα σταθερό ρυθμό μετάδοσης (constant transmission rate) R , ένα μήνυμα το οποίο περιέχει B bits, θα υποχρέωνε την πηγή του μηνύματος n_s να μειώσει την ενέργεια που του έχει απομείνει (remaining energy) κατά $\Delta E_s = \frac{P_s' B}{R}$.

Επομένως, η λήψη των B bits από τον κόμβο προορισμού (destination node) n_d θα μείωνε την ενέργειά του κατά $\Delta E_d = \frac{P_d' B}{R}$.

Ένας ενδιάμεσος κόμβος αναμετάδοσης (intermediate forwarding node) n_f πρέπει να λάβει πρώτα το μήνυμα και μετά να το μεταδώσει. Συνεπώς, $\Delta E_f = \frac{P_f' B}{R} + \frac{P_f' B}{R}$.

Θεωρούμε ότι όλοι οι κόμβοι συμμετέχουν στο δίκτυο με τα ίδια ποσά ενέργειας.

6.2.1.2 Το Μοντέλο Δημιουργίας Συνδέσεων

Στην παρούσα διατριβή έχει χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο παραγωγής τυχαίων συνδέσεων (random connection generation model) για τη δημιουργία της επιθυμητής πληροφορίας. Κάθε μία σύνδεση αποτελείται από ένα διατεταγμένο ζεύγος (directed pair) $c_i = [s_i, d_i]$, όπου $s_i, d_i \in N$ έχουν επιλεγεί τυχαία, ακολουθώντας μία ομοιόμορφη κατανομή (uniform distribution) για όλους τους κόμβους του δικτύου. Η γεννήτρια παραγωγής συνδέσεων (connection generator) παράγει μία ακολουθία $c_i = 1, \dots, c_{\max}$, όπου c_{\max} είναι μία τιμή η οποία έχει επιλεγεί ώστε να είναι αρκετά μεγάλη, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο δεν θα μείνει χωρίς ενέργεια με οποιονδήποτε αλγόριθμο επιλογής διαδρομής [2].

6.2.1.3 Μετρικές Επίδοσης

Οι βασικές μετρικές επίδοσης (performance metrics) που έχουν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο προσομοίωσης (simulation model) αποτελούνται από:

- τον αριθμό των επιχειρούμενων συνδέσεων,
- τον αριθμό των επιτυχών συνδέσεων,
- τον αριθμό των ενεργών (living ή non-depleted) κόμβων στο δίκτυο, καθώς και
- το συντελεστή συνδεσιμότητας (connectivity factor) του δικτύου.

Αναλυτικότερα:

Επιχειρούμενες Συνδέσεις (Attempted Connections): Καθώς εξελίσσεται ο κάθε κύκλος προσομοίωσης, νέες συνδέσεις έρχονται σταδιακά να προστεθούν στο δίκτυο. Αυτή η μετρική μετρά τον αριθμό όλων ανεξαιρέτως των επιχειρούμενων συνδέσεων, επιτυχών και ανεπιτυχών.

Επιτυχείς Συνδέσεις (Successful Connections): Αυτή η μετρική μετρά μόνο εκείνες τις συνδέσεις που έχουν γίνει αποδεκτές, και όχι τις ανεπιτυχείς. Στην αρχή της προσομοίωσης, ο αριθμός των επιτυχών συνδέσεων ισούται με τον αριθμό όλων των επιχειρούμενων συνδέσεων, για το λόγο ότι δεν έχουν υπάρξει ακόμη αποτυχίες. Όμως, καθώς εξελίσσεται η προσομοίωση, οι κόμβοι αρχίζουν να χάνουν την ενέργεια που διέθεταν και τελικά να “πεθαίνουν” (να χάνουν όλα τα ενεργειακά τους αποθέματα), οπότε επέρχεται ο διαμελισμός (partitioning) του δικτύου, για το λόγο ότι απέτυχε ένα διαρκώς αυξανόμενο ποσοστό των επιχειρούμενων συνδέσεων.

Συνεπώς, η μετρική των επιτυχών συνδέσεων παραμένει σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτά των επιχειρούμενων συνδέσεων.

Ο Αριθμός των Ενεργών Κόμβων (Living or Non-Depleted Nodes): Αυτή η μετρική, υποδηλώνει τον αριθμό των ενεργών (ή ζωντανών – με αρκετά ενεργειακά αποθέματα) κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο, και η οποία ισούται αρχικά με το 15. Μόλις κάποιοι κόμβοι απωλέσουν τα ενεργειακά τους αποθέματα, τότε αυτός ο αριθμός (15) αρχίζει να μειώνεται. Επιθυμία μας είναι, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, ο αριθμός των ζωντανών κόμβων που θα παραμένει στο δίκτυο, να είναι όσο γίνεται ο μεγαλύτερος δυνατός.

Η Συνδεσιμότητα του Δικτύου (The Connectivity of the Network): Αυτή η μετρική θεωρείται ως η πλέον σημαντική διότι σχετίζεται άμεσα με τη διάρκεια ζωής του δικτύου.

Ο *Συντελεστής Συνδεσιμότητας* (connectivity factor) προσδιορίζεται ως το επί τοις εκατό ποσοστό των επιχειρούμενων συνδέσεων που είναι επιτυχείς. Λόγω του ομοιόμορφα κατανομημένου μοντέλου παραγωγής συνδέσεων, αυτός ο συντελεστής έχει στενότερη σχέση με τη συνδεσιμότητα του δικτύου.

6.2.1.4 Περιορισμοί Μοντέλου

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την ερευνητική εργασία, δεν έχει ληφθεί καθόλου υπόψη η κινητικότητα των κόμβων (node mobility). Επιπλέον δε, το πραγματικό πρωτόκολλο επικοινωνίας (actual communication protocol), το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της τοπολογίας (topology), καθώς και για τη διάδοση (propagation) της ανταλλαγής των πληροφοριών δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, είναι έξω από τα πλαίσια αυτής της εργασίας, οπότε και δεν μελετάται η επικοινωνιακή επιβάρυνση (communication overhead).

6.3 Σχεδίαση και Μοντελοποίηση των Αλγορίθμων MBCR2 και MREPSum2

Η μοντελοποίηση των δύο προτεινόμενων αλγορίθμων MBCR2 και MREPSum2 αποτελεί τη συνέχεια του ήδη προταθέντος αλγορίθμου LCMMR. Δηλαδή, και εδώ, το μοντέλο δικτύου που έχει ληφθεί υπόψη, αποτελείται από ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο N το οποίο περιλαμβάνει έναν αριθμό κόμβων $n_i \in N$ και όλοι οι κόμβοι χρησιμοποιούν ένα απλό ασύρματο κανάλι. Οι κόμβοι που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη της μέγιστης εμβέλειας θεωρούνται γείτονες, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να ανταλλάσσουν απευθείας πληροφορίες. Όταν ένας κόμβος πρέπει να μεταδώσει πληροφορίες προς κάποιον άλλο κόμβο, τότε δημιουργείται μία σύνδεση ή ροή. Όταν συμβεί αυτό, τότε τα σχήματα δρομολόγησης προσπαθούν να εντοπίσουν κάποιο μονοπάτι προκειμένου να επιτύχουν τη σύνδεση μεταξύ του πηγαιού κόμβου και του κόμβου προορισμού, μέσω ενός περιορισμένου αριθμού ενδιάμεσων κόμβων προώθησης πακέτων. Εάν υπάρξουν κάποια αποδεκτά μονοπάτια, τότε χρησιμοποιείται η προτεινόμενη στρατηγική η οποία θα επιλέξει το καταλληλότερο μονοπάτι για τη μετάδοση των πληροφοριών. Ο αλγόριθμος του *Συντομότερου Μονοπατιού* του Dijkstra χρησιμοποιεί την κατάλληλη συνάρτηση κόστους για κάθε σχήμα δρομολόγησης.

6.3.1 Μοντέλο Κατανάλωσης Ισχύος

Το μοντέλο κατανάλωσης ισχύος είναι το ίδιο με αυτό που αναλύθηκε στην περίπτωση του αλγορίθμου LCMMR. Πιο συγκεκριμένα:

- ο Μοντελοποιείται μόνο η ισχύς που καταναλώνεται στις φάσεις μετάδοσης και λήψης των δρομολογούμενων πληροφοριών.

- οι κόμβοι θεωρούνται ότι καταναλώνουν ενέργεια μόνο κατά την εκπομπή και λήψη πληροφοριών.
- Δευτερεύοντα φαινόμενα, όπως είναι η παθητική ακρόαση (idle listening), οι συγκρούσεις, οι μεταβολές καταστάσεων, κτλ. δεν έχουν ληφθεί καθόλου υπόψη, διότι δεν θεωρούνται σχετικές με τη συγκεκριμένη στρατηγική επιλογής διαδρομής.
- Επίσης, όλες οι εκπομπές πακέτων γίνονται με το ίδιο επίπεδο ισχύος, άσχετα με την απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ του πομπού και του δέκτη.
- Επιπλέον, δεν έχει μελετηθεί καθόλου η επίδραση που ασκεί η συμφόρηση (congestion) στην κατανάλωση ισχύος για τους παρακάτω λόγους:
 - Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων απαιτεί τυπικά μία μακρά διάρκεια ζωής, ως εκ τούτου, περιορίζεται κατά πολύ το μέγεθος της κίνησης (traffic) που διαδίδεται (propagated) σε ολόκληρο το δίκτυο. Επίσης,
 - Ο ακριβής τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά ο ανταγωνισμός (contention) με τη διατήρηση της ισχύος σχετίζεται άμεσα με το συγκεκριμένο χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο MAC, και είναι εκτός του σκοπού αυτής της διατριβής.

Για τον κόμβο $n_i \in N$, το P_i^t αντιπροσωπεύει την ισχύ που καταναλώνεται κατά την εκπομπή, ενώ το P_i^r αντιπροσωπεύει την ισχύ που καταναλώνεται κατά τη λήψη. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε μία σταθερή ταχύτητα (rate) εκπομπής R , τότε η μετάδοση ενός σήματος το οποίο περιέχει B bits, θα υποχρέωνε τον πηγαίο κόμβο n_s να ελαττώσει την ενέργεια που του έχει απομείνει

κατά $\Delta E_s = \frac{P_s^t B}{R}$. Επομένως, η λήψη των B bits από τον κόμβο προορισμού n_d θα μείωνε την

ενέργειά του κατά $\Delta E_d = \frac{P_d^r B}{R}$. Ένας ενδιάμεσος κόμβος n_f προώθησης πακέτων θα πρέπει

πρώτα να λαμβάνει και μετά να αναμεταδίδει το μήνυμα. Έτσι, $\Delta E_f = \frac{P_f^t B}{R} + \frac{P_f^r B}{R}$.

Όλοι οι κόμβοι θεωρείται ότι έχουν αρχικά τα ίδια επίπεδα ενέργειας.

6.3.2 Μοντέλο Παραγωγής Συνδέσεων

Το μοντέλο παραγωγής συνδέσεων είναι το ίδιο με αυτό που αναλύθηκε στην περίπτωση του αλγορίθμου LCMMR. Πιο συγκεκριμένα:

Για τη δημιουργία της επιθυμητής παραγωγής πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο παραγωγής τυχαίων συνδέσεων. Η κάθε μία σύνδεση αποτελείται από ένα κατευθυνόμενο ζεύγος (directed pair) $c_i = [s_i, d_i]$, όπου τα $s_i, d_i \in N$ επιλέγονται με τυχαίο τρόπο, ακολουθώντας μία ομοιόμορφη κατανομή (uniform distribution) για όλους τους κόμβους του δικτύου. Η γεννήτρια παραγωγής συνδέσεων παράγει μία ακολουθία $c_i = 1, \dots, c_{\max}$, όπου η c_{\max} έχει επιλεγεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχει μία αρκετά μεγάλη τιμή, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το δίκτυο δεν θα μείνει χωρίς ενέργεια με οποιονδήποτε αλγόριθμο επιλογής διαδρομής.

6.3.3 Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Στην παρούσα μελέτη παραλείπουμε δεδομενοκεντρικά σχήματα δρομολόγησης, εξαιτίας του υψηλού επιπέδου εξάρτησής τους από τις εκάστοτε εφαρμογές. Θεωρούμε μόνο τις προσανατολισμένες στο δίκτυο (network oriented) point-to-point επικοινωνίες. Επίσης, οι

διάφορες υποθέσεις μοντελοποίησης δικτύων συνέβαλαν στο να φαίνονται κάποια σχήματα ότι είναι ισοδύναμα. Ειδικότερα, επειδή όλες οι μεταδόσεις απαιτούν το ίδιο ποσό ενέργειας, ο αλγόριθμος MTPR είναι ισοδύναμος με τον αλγόριθμο του συντομότερου μονοπατιού (shortest path scheme), οπότε παραλείπεται.

Επίσης, εξαιτίας του γεγονότος ότι η ενέργεια που καταναλώνεται ανά bit είναι ίδια για κάθε μετάδοση, ο MREPCapsum γίνεται ισοδύναμος με το σχήμα MBCR, και επίσης παραλείπεται.

Συνεπώς, οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που υλοποιούνται είναι οι εξής: the shortest path (το συντομότερο μονοπάτι), MBCR, MMBCR, LCMMER, MREPSum, MBCR2 και MREPSum2.

6.3.4 Μετρικές Απόδοσης

Και σε αυτήν εδώ την περίπτωση, όπως οι βασικές μετρικές απόδοσης που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης αποτελούνται από:

- Τον αριθμό των επιχειρούμενων προσπαθειών σύνδεσης,
- Τον αριθμό των επιτυχών συνδέσεων,
- Τον αριθμό των “ζωντανών” κόμβων (που δεν έχουν εξαντλήσει όλα τους τα ενεργειακά αποθέματα) στο δίκτυο, και από
- Το συντελεστή συνδεσιμότητας του δικτύου.

Επιχειρούμενες Προσπάθειες Σύνδεσης: Αυτή η μετρική απαριθμεί τον αριθμό των επιχειρούμενων συνδέσεων, επιτυχών και ανεπιτυχών.

Επιτυχείς Συνδέσεις: Αυτή μετρική απαριθμεί μόνο τις επιτυχείς συνδέσεις που έχουν γίνει αποδεκτές από το δίκτυο και όχι τις ανεπιτυχείς.

Ο Αριθμός των Ζωντανών Κόμβων: Αυτή η μετρική είναι αρχικά ίση με τον αριθμό των κόμβων που υπάρχουν στο δίκτυο. Μόλις, όμως, κάποιοι κόμβοι χάσουν τα ενεργειακά τους αποθέματα, τότε αυτός ο αριθμός (μετρική) ελαττώνεται. Σε κάθε περίπτωση, είναι επιθυμητός ένας μεγάλος αριθμός ζωντανών κόμβων στο δίκτυο.

Ο Λόγος της Απώλειας Πακέτων: Αυτή η μετρική υπολογίζει το ποσοστό των συνδέσεων που έχουν επιχειρηθεί και είναι επιτυχείς.

Η Συνδεσιμότητα του Δικτύου: Η συνδεσιμότητα του δικτύου προσδιορίζεται από το μέσο ποσοστό των κόμβων με τους οποίους θα μπορούσε να επικοινωνήσει οποιοσδήποτε άλλος κόμβος του δικτύου. Η συνδεσιμότητα ενός μη-διαμελισμένου δικτύου ισούται με 1, ενώ η συνδεσιμότητα ενός πλήρως διαμελισμένου δικτύου, (όπου κανένας κόμβος δεν έχει γειτονικούς κόμβους), ισούται με 0.

Τυπικά, εάν προσδιορίσουμε έναν $n \times n$ πίνακα A , όπου $a_{ij} = 1$ και $i \neq j$, και εάν υπάρχει κάποιο μονοπάτι δρομολόγησης που θα συνδέει τον κόμβο n_i με τον κόμβο n_j μέσα από έναν οποιονδήποτε αριθμό άλλων κόμβων, και διαφορετικά $a_{ij} = 0$, τότε η συνδεσιμότητα θα δίδεται από την εξής σχέση:

$$C = \frac{\sum_{n_i \in N} a_{ij}}{n^2 - n} \quad (6.1)$$

6.3.5 Μοντέλο Τοπολογίας

Οι τοπολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις παρήχθησαν αυτόματα από το εργαλείο προσομοίωσης. Η γεννήτρια τοπολογιών διαθέτει τρεις παραμέτρους σχηματισμών (configuration parameters):

- Αριθμό κόμβων,
- Διαστάσεις (τετραγωνικής) τοπολογίας, και
- Εμβέλεια επικοινωνίας.

Οι συντεταγμένες X και Y παράγονται για κάθε κόμβο, χρησιμοποιώντας μία ομοιόμορφη κατανομή. Η αρχική τοπολογία θεωρείται ότι είναι πλήρως συνδεδεμένη ($C=1$). Εάν η συνδεσιμότητα βρεθεί να έχει τιμή μικρότερη της μονάδος, τότε η τοπολογία απορρίπτεται και παράγεται μία καινούργια.

6.3.6 Παράμετροι Μοντέλου

Οι παράμετροι συνδεσμολογίας που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός και εάν προσδιορίζονται διαφορετικά, είναι οι ακόλουθες:

- Αριθμός κόμβων: 500 ή 1000
- Διατάσεις τοπολογίας: 1000
- Εμβέλεια μετάδοσης: 100
- Αρχική ενέργεια: 50
- Διάρκεια μηνύματος B/R: 1
- P_i^t :1
- P_i^r :1

6.3.7 Περιορισμοί Μοντέλου

Τελικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι και σε αυτήν την ερευνητική εργασία, όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου LCMMER, δεν έχει ληφθεί καθόλου υπόψη η κινητικότητα των κόμβων (node mobility). Επιπλέον, το πραγματικό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της τοπολογίας και για τη διάδοση της ανταλλαγής των πληροφοριών δρομολόγησης σε κάθε κόμβο, είναι εκτός του σκοπού της παρούσας διατριβής, και δεν έχει επίσης μελετηθεί η επιβάρυνση επικοινωνίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

7.1 Αξιολόγηση της Επίδοσης του Αλγόριθμου TDMA Scheduling

Η απόδοση των πρωτοκόλλων MAC με ενημέρωση ισχύος εξαρτάται από ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών παραμέτρων, όπως είναι, για παράδειγμα, ο ρυθμός άφιξης της κίνησης (traffic arrival rate), η συμφόρηση του καναλιού, η τοπολογία του δικτύου αισθητήρων, καθώς και οι αλγόριθμοι δρομολόγησης. Σε αυτήν την ενότητα, υπολογίζουμε το ποσό της εξοικονομούμενης ισχύος που επιτυγχάνεται με τη χρήση του προτεινόμενου πρωτοκόλλου, κάτω από διαφορετικές συνθήκες δικτύου και κίνησης, και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται συγκρίνονται με τα αποτελέσματα άλλων συναφών σχημάτων εξοικονόμησης ενέργειας που έχουν κατά καιρούς προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Για να επιτύχουμε την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου, για να συγκρίνουμε το δικό μας σχήμα με άλλα συναφή σχήματα, αλλά και για να αναλύσουμε κάτω από ποιες δικτυακές διαμορφώσεις (network configurations) υπερτερεί το κάθε σχήμα, εφαρμόστηκε η παρακάτω μεθοδολογία:

Κατ' αρχήν υπολογίστηκε, για κάθε σχήμα, το ποσοστό του χρόνου που παραμένει ο εκάστοτε κόμβος σε μια επικοινωνιακή κατάσταση ισχύος (εκπομπής, λήψης, αδράνειας και ύπνου) σε συνάρτηση με τις παραμέτρους κίνησης (κίνηση η οποία δημιουργείται στον κόμβο, κίνηση άφιξης – arriving through traffic – και το μέγεθος του πακέτου)

Η πιθανότητα εμφάνισης της κάθε μιας κατάστασης, συνδυαζόμενη με τις λειτουργικές παραμέτρους κατανάλωσης ισχύος (*Ισχύς Εκπομπής*, *Ισχύς Λήψης*, και *Ισχύς σε Κατάσταση Ύπνου* – *Transmit Power*, *Receive Power and Sleep Power*), μπορεί να μας δώσει μία εκτίμηση για το ποσό της εξοικονομούμενης ισχύος σε συνάρτηση με τις πιο πάνω παραμέτρους.

Οι παράμετροι κίνησης (traffic parameters) διαφέρουν από κόμβο σε κόμβο. Αυτό συμβαίνει διότι η αρχική κίνηση (originating traffic) δεν είναι πάντοτε η ίδια σε κάθε κόμβο, αλλά εξαρτάται από τον αριθμό των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα κοντά σε αυτόν. Επιπλέον, το μέγεθος της εξωγενούς κίνησης (through traffic), της κίνησης δηλαδή που δέχεται ο κάθε κόμβος κατά τη μετάδοση του πακέτου από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο, αναμένεται να είναι μεγάλο σε περιοχές οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στον κόμβο που αντιπροσωπεύει το σταθμό βάσης ή πύλη (sensor gateway), αλλά και σε καταστάσεις όπου υπάρχουν ελάχιστα ή καθόλου εναλλακτικά μονοπάτια δρομολόγησης. Συνεπώς, υπολογίσαμε την κατανάλωση ισχύος καθώς και την αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση για διαφορετικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων.

Επιπλέον, οι παράμετροι του δικτύου, όπως είναι ο αριθμός των γειτονικών κόμβων που προωθούν την κίνηση προς ένα συγκεκριμένο κόμβο, το μήκος πλαισίου του σχήματος TDMA, καθώς και ο ολικός αριθμός των μεταδόσεων που απαιτούνται για μία επικοινωνία από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση ισχύος και την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση του σχήματος εξοικονόμησης ενέργειας. Σε αυτήν τη διατριβή, δεν επιχειρήθηκε ο αναλυτικός υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων, επειδή όλες αυτές (οι παράμετροι) εξαρτώνται από την τοπολογία του δικτύου καθώς και από το συγκεκριμένο αλγόριθμο προγραμματισμού TDMA που έχει χρησιμοποιηθεί. Αρχικά, οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων επελέγησαν με τυχαίο τρόπο, και στη συνέχεια υπολογίστηκαν με προσομοιώσεις τυχαίων τοπολογιών.

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι λήφθηκε υπόψη η περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων τα οποία είτε έχουν μία σταθερή τοπολογία, είτε υφίστανται σπάνιες τοπολογικές μεταβολές. Αυτές οι θεωρήσεις περιορίζουν τα σενάρια ανάπτυξης των κόμβων, αλλά ωστόσο, αυτή η δόμηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη σε ένα πλήθος σεναρίων, όπως είναι τα μεγάλης διάρκειας ζωής περιβαλλοντικά δίκτυα αισθητήρων (π.χ. προστασία δασών από πυρκαγιές, ανίχνευση σεισμών, κτλ.). Στις προσομοιώσεις μας, μοντελοποιήθηκε αρχικά ένα απλό σύστημα, αλλά στη συνέχεια, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις που είχαν ως βάση τυχαίες τοπολογίες. Ανεπτύχθη ένα εργαλείο προσομοίωσης, το οποίο επέτρεψε τον ακριβή υπολογισμό των μεταβλητών των αισθητήρων, το οποίο με τη σειρά του συνετέλεσε στον υπολογισμό των τιμών σε όλο το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις προσομοιώσεων σε τυχαία δίκτυα παρήγαγαν τις μέσες τιμές και τα απαιτούμενα διαστήματα εμπιστοσύνης.

7.1.1 Κατανάλωση Ισχύος των Πρωτοκόλλων Επιπέδου MAC

Η ισχύς P που καταναλώνει ένας κόμβος δίκτυο αισθητήρων μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από την παρακάτω εξίσωση:

$$P = \text{Prob}\{SEND\}P_{send} + \text{Prob}\{RECV\}P_{recv} + \text{Prob}\{IDLE\}P_{idle} + \text{Prob}\{SLEEP\}P_{sleep} \quad (7.1)$$

όπου: $\text{Prob}\{SEND\}$, $\text{Prob}\{RECV\}$, $\text{Prob}\{IDLE\}$, και $\text{Prob}\{SLEEP\}$ είναι οι πιθανότητες που έχει ο πομπός του κόμβου να είναι στις καταστάσεις $SEND$, $RECV$, $IDLE$ και $SLEEP$ αντίστοιχα, και P_{send} , P_{recv} , P_{idle} , και P_{sleep} είναι τα ποσά της ισχύος που καταναλώνονται όταν ο κόμβος βρίσκεται στις αντίστοιχες καταστάσεις.

Στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας, το P_{sleep} θεωρείται ότι είναι πάρα πολύ μικρό, σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις καταστάσεις, οπότε παραλείπεται. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι στους περισσότερους αισθητήρες, η ισχύς που καταναλώνεται στην κατάσταση ύπνου είναι δύο φορές μικρότερη από ότι στις άλλες τρεις καταστάσεις [106].

Με τη χρήση του παραπάνω μοντέλου υπολογίζονται οι πιθανότητες κάθε κατάστασης για τα παρακάτω σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας:

Το σχήμα *Always On*, για το οποίο δε χρησιμοποιείται ποτέ η κατάσταση ύπνου, οδηγεί σε μέγιστη κατανάλωση ενέργειας και ελάχιστη χρονική καθυστέρηση. Το σχήμα *Always On*, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς μετρήσεων (benchmark).

Το δεύτερο σχήμα που μοντελοποιούμε είναι το S-MAC το οποίο είναι ένας από τους πλέον δημοφιλείς μηχανισμούς coarse-grain εξοικονόμησης ενέργειας, και χρησιμοποιείται συχνά σε άλλες ερευνητικές προσπάθειες ως μέσο σύγκρισης των επιτευχθέντων αποτελεσμάτων. Για το σχήμα S-MAC μοντελοποιείται επίσης η τεχνική του *adaptive listening*, η οποία έχει την ίδια κατανάλωση ενέργειας αλλά μικρότερη χρονική καθυστέρηση.

Το προτεινόμενο σχήμα TDMA. Με την εξέταση της λειτουργίας του κάθε σχήματος, μπορούν να βρεθούν οι πιθανότητες της κάθε κατάστασης, οι οποίες οδηγούν σε μία εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνει ο κάθε κόμβος.

7.1.1.1 Always On

Εάν κάποιος κόμβος του δικτύου παράγει πακέτα μέσου μεγέθους L (σε μονάδες χρόνου εκπομπής) με ταχύτητα λ_0 , και τα προωθεί δια μέσου του δικτύου με ταχύτητα λ_T , τότε οι πιθανότητες που έχει αυτός ο κόμβος να παραμένει στις καταστάσεις $SEND$ και $RECV$ δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$P_{rob}\{SEND\} = (\lambda_o + \lambda_T)L \quad (7.2)$$

$$P_{rob}\{RECV\} = \lambda_T L \quad (7.3)$$

Πρέπει να σημειώσουμε ότι το μοντέλο είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας σε συνθήκες χαμηλής κίνησης, οπότε δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψη οι αναμεταδόσεις και οι συγκρούσεις πακέτων. Το επίπεδο χαμηλής κίνησης καθιστά τις τιμές των εξισώσεων (7.2) και (7.3) επίσης μικρότερες της μονάδας, πράγμα που σημαίνει ότι το δίκτυο δεν χρησιμοποιείται ποτέ πλήρως. Επίσης, δεν λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα εκπομπής και η επιβάρυνση του πρωτοκόλλου. Στην περίπτωση του *Always On*, ο κόμβος βρίσκεται στην ανενεργό (*idle*) κατάσταση εφόσον δεν κάνει εκπομπή ή λήψη. Ως εκ τούτου:

$$\text{Prob}\{IDLE\} = 1 - \lambda_o L - 2\lambda_T L \quad (7.4)$$

Οι παραπάνω αναφερθείσες πιθανότητες υπολογίζονται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανές αναμεταδόσεις και πακέτα ελέγχου, όπως τα ACKs, RTSs (Request To Send), CTSs (Clear To Send) κτλ. Εκτός τούτου, είναι ακριβείς μόνο όταν δεν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, π.χ. $\lambda_o L + 2\lambda_T L \ll 1$, καθιστώντας την $\text{Prob}\{IDLE\} < 1$.

Στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας εξετάζεται η απόδοση της ισχύος σε δίκτυα αισθητήρων τα οποία εμφανίζουν μικρή κίνηση σε κανονικές συνθήκες και έτσι οι παραπάνω καταναλώσεις ισχύος προσεγγίζουν πάρα πολύ τις πραγματικές. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι μηχανισμοί εξοικονόμησης ισχύος, οι οποίοι βασίζονται στην κατάσταση ύπνου είναι πολύ πιο αποτελεσματικοί σε μικρά φορτία. Σε μεγάλα φορτία, άλλοι τύποι μηχανισμών εξοικονόμησης ισχύος (π.χ. συσσώρευση μηνυμάτων), θα μπορούσαν να είναι περισσότερο αποτελεσματικοί διότι σε αυτήν την περίπτωση, η μετάδοση μηνυμάτων υπερτερεί της κατανάλωσης ενέργειας.

Η ισχύς που καταναλώνεται στον αισθητήριο κόμβο, εφόσον αυτός δεν περάσει ποτέ στη κατάσταση ύπνου (*SLEEP*), δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{ALWAYS_ON} = (\lambda_o + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + (1 - \lambda_o L - 2\lambda_T L)P_{idle} \quad (7.5)$$

7.1.1.2 S-MAC

Στο πρωτόκολλο *S-MAC* [104], οι κόμβοι βρίσκονται στην κατάσταση ύπνου όταν είναι ανενεργοί (*idle*). Εάν επιθυμούν να λαμβάνουν πακέτα, πρέπει να ξυπνούν περιοδικά με περίοδο T_f . Υποθέτοντας ένα χαμηλό ρυθμό άφιξης πακέτων, ο χρόνος που παραμένουν στην κατάσταση *IDLE* (ανενεργό) έχει μία τιμή T_i , η οποία προσδιορίζεται από τους χρόνους μετάβασης (από τη μία κατάσταση στην άλλη) και από το χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση του μέσου για πιθανή μετάδοση. Η κατανάλωση ισχύος του πρωτοκόλλου *S-MAC* δίνεται από την εξής σχέση:

$$P_{S-MAC} = (\lambda_o + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + (T_i / T_f)(1 - \lambda_o L - 2\lambda_T L)P_{idle} \quad (7.6)$$

7.1.1.3 TDMA με Αφύπνιση Μονοπατιού (WakeUp)

Ο χρόνος που ξοδεύει ένας αισθητήριο κόμβος για τις περιοδικές αφύπνισεις του (*wakeups*) ισούται με $n(T_{slot}/T_f)$, όπου n είναι ο αριθμός των χρονοθυρίδων που μπορεί να ακροάζεται ο αισθητήριο κόμβος, T_f είναι το μήκος της ολικής περιόδου, και T_{slot} είναι το μήκος της κάθε

χρονοθυρίδας *TDMA*. Η εκπομπή και η λήψη των μηνυμάτων WU (WakeUp), που λαμβάνουν χώρα πριν από τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων, υποτίθεται ότι απαιτούν πολύ λιγότερη ενέργεια από την εκπομπή και λήψη δεδομένων, οπότε δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψη. Από τη στιγμή που κάποιος κόμβος λάβει ένα μήνυμα WU θα πρέπει να παραμείνει ξύπνιος μέχρι τη λήψη του πακέτου δεδομένων. Η μέση τιμή αυτού του χρόνου αναμονής δηλώνεται ως L_{wait} . Στην περίπτωση που ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι χαμηλός, συγκρινόμενος με το μεσοδιάστημα ύπνου-αφύπνισης (sleep-wakeup interval), τότε, ο ρυθμός άφιξης των μηνυμάτων WU ισούται με την ταχύτητα παραγωγής των πακέτων δεδομένων λ_0 .

Με βάση τα όσα αναφέραμε παραπάνω, η κατανάλωση ισχύος του αλγορίθμου *TDMA* δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{TDMA} = (\lambda_0 + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + n(T_{slot} / T_f)P_{idle} + L_{wi}L_{wait}P_{idle} \quad (7.7)$$

7.1.2 Χρονική Καθυστέρηση των Ενεργειακά Αποδοτικών Πρωτοκόλλων MAC

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα MAC επιδρούν αρνητικά στη χρονική καθυστέρηση του εκάστοτε σχήματος. Ο λόγος αυτής της αρνητικής επίδρασης οφείλεται στο γεγονός ότι οι κόμβοι που εκπέμπουν, περιμένουν τους κόμβους που λαμβάνουν να ανοίξουν (switch-on) τον πομποδέκτη τους, πριν αρχίσουν να τους μεταδίδουν τις πληροφορίες τους.

Η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση (end-to-end delay), σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ορίζεται ως το άθροισμα:

- της χρονικής καθυστέρησης μετάδοσης (transmission delay),
- της χρονικής καθυστέρησης πρόσβασης (access delay),
- της χρονικής καθυστέρησης αναμονής στην ουρά (queuing delay) (η οποία εξαρτάται από το ρυθμό άφιξης των πακέτων), και
- της χρονικής καθυστέρησης διάδοσης (propagation delay) (εξαρτάται από την απόσταση).

Όταν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων είναι σχετικά χαμηλός, τότε η χρονική καθυστέρηση αναμονής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα και να παραλειφθεί, αλλά και η μικρή απόσταση μεταξύ των ασύρματων αισθητήριων κόμβων καθιστά τη χρονική καθυστέρηση διάδοσης επίσης μικρή. Σε μία εκπομπή πολλαπλών βημάτων (multi-hop transmission) με $(N-1)$ ενδιάμεσους μεταδότες (forwarders), η μέση χρονική καθυστέρηση μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$E\{D(N)\} = N(t_{cs} + t_{tx}) \quad (7.8)$$

Όπου, t_{cs} είναι ο χρόνος πρόσβασης, και t_{tx} είναι η χρονική καθυστέρηση μετάδοσης. Η χρονική καθυστέρηση είναι ανάλογη του αριθμού των βημάτων.

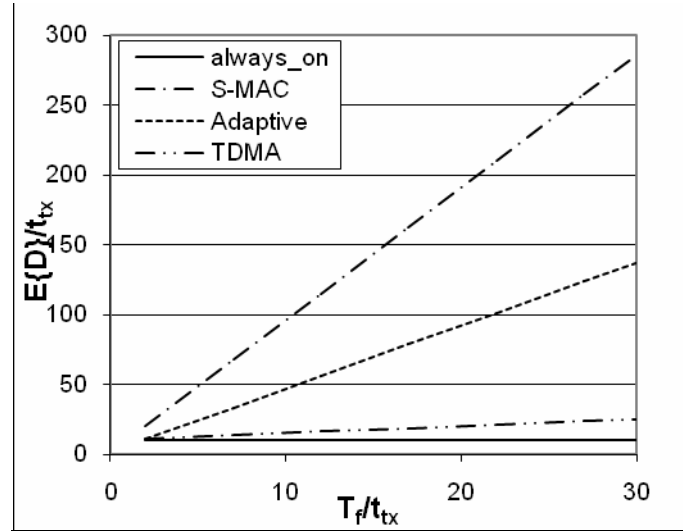
Η χρονική καθυστέρηση του πρωτοκόλλου *S-MAC* υπολογίζεται στο [7] από την εξής έκφραση:

$$E\{D_{S-MAC}(N)\} = NT_f - T_f / 2 + t_{cs} + t_{tx} \quad (7.9)$$

Η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση για το πρωτόκολλο *S-MAC* υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (7.10) όταν χρησιμοποιείται η τεχνική της “Προσαρμοσίμης Ακρόασης” (*Adaptive Listening*):

$$E\{D_{adaptive}(N)\} = NT_f/2 + 2t_{cs} + 2t_{tx} - T_f/2 \quad (7.10)$$

Και στις δύο περιπτώσεις, η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση επηρεάζεται από έναν όρο ο οποίος είναι ανάλογος του αριθμού των βημάτων επί την περίοδο T_f . Αυτό συμβαίνει διότι η μετάδοση σε κάθε βήμα καθυστερεί μέχρι να ξυπνήσει ο επόμενος κόμβος λήπτης. Η τεχνική “*Adaptive Listening*” μειώνει την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, αλλά μόνο κατά ένα συντελεστή που είναι ίσος με 2.



Σχήμα 7-1: Αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση 10 βημάτων σε συνάρτηση με το T_f

Η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση του προτεινόμενου αλγόριθμου TDMA με αφύπνιση μονοπατιού (Path WakeUp), ισούται με την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση της περίπτωσης “*Always-On*” συν τη χρονική καθυστέρηση που σχετίζεται με την κατάσταση ύπνου (sleep-mode). Όταν δημιουργηθεί ένα καινούργιο πακέτο, τότε ο κόμβος θα πρέπει να περιμένει μέχρι να λάβει το επόμενο πλαίσιο TDMA. Τότε, εκπέμπει το μήνυμα *Path-WU* για να ξυπνήσει όλους τους κόμβους που βρίσκονται στο μονοπάτι του, μέχρι το σταθμό βάσης. Επειδή το πακέτο παράγεται με τυχαίο τρόπο, τότε ο μέσος χρόνος που μεσολαβεί μέχρι την άφιξη του επόμενου πλαισίου θα είναι $T_f/2$. Έτσι, η χρονική καθυστέρηση δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

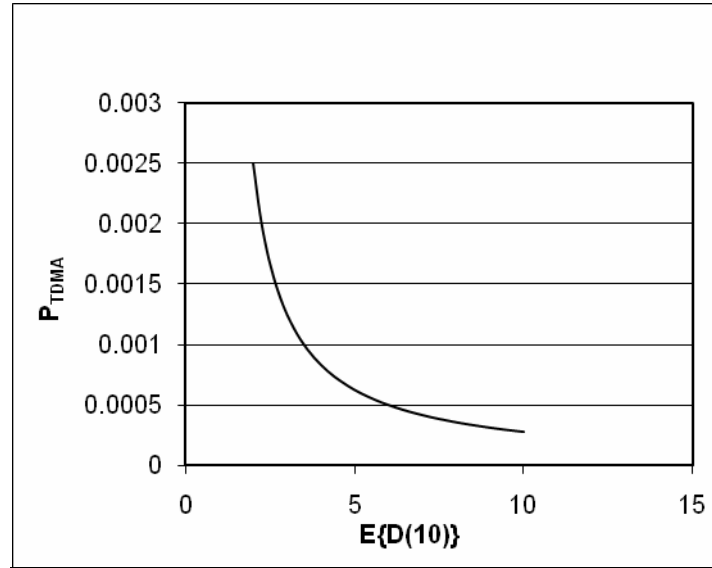
$$E\{D_{TDMA}(N)\} = N(t_{cs} + t_{tx}) + T_f/2 \quad (7.11)$$

Το Σχήμα 7-1 απεικονίζει την αναμενόμενη μέση χρονική καθυστέρηση σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων 10 βημάτων. Παρατηρούμε ότι η από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση αυξάνεται όσο αυξάνεται η περίοδος T_f . Ο προτεινόμενος αλγόριθμος *TDMA scheduling* επιτυγχάνει πολύ μικρότερη χρονική καθυστέρηση για την ίδια τιμή της T_f .

7.1.3 Ισχύς σε Συνάρτηση με τη Χρονική Καθυστέρηση

Όπως δείξαμε στην προηγούμενη ενότητα, η αύξηση της περιόδου T_f επηρεάζει τη μέση τιμή της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης, επειδή η μετάδοση θα πρέπει να περιμένει μέχρι τον επόμενο χρόνο αφύπνισης (wake up time). Όμως, στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή μειωθεί η περίοδος T_f θα παρατηρηθεί μία περισσότερο αυξημένη κατανάλωση ισχύος διότι οι κόμβοι θα πρέπει να δραστηριοποιούνται πιο συχνά. Ειδικότερα, αντικαθιστώντας την T_f από την εξίσωση (7.11) στην εξίσωση (7.7), θα προκύψει η κατανάλωση ισχύος η οποία θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (7.12):

$$P_{TDMA} = (\lambda_o + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + n(T_{slot} / 2(E\{D(N)\} - N(t_{cs} + t_{tx})))P_{idle} + L_{wait}L_{wait}P_{idle} \quad (7.12)$$



Σχήμα 7-2: Αλγόριθμος TDMA: Καταναλισκόμενη ισχύς/χρονική καθυστέρηση

Στο Σχήμα 7-2 απεικονίζεται το μέγεθος της ισχύος που καταναλώνεται από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού TDMA για διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις σε ένα δίκτυο 10 βημάτων, όπου δεν λαμβάνεται υπόψη η κίνηση (traffic).

7.1.4 Η Επίδραση του Ρυθμού Άφιξης των Πακέτων

Για να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ των δύο υπό μελέτη σχημάτων, ήτοι, του *S-MAC* και του *TDMA*, παρουσιάζουμε:

- την ισχύ P σε συνάρτηση με το ρυθμό άφιξης των πακέτων στο δίκτυο, με την ίδια χρονική καθυστέρηση, και
- τη χρονική καθυστέρηση σε συνάρτηση με το ρυθμό άφιξης των πακέτων στο δίκτυο, με την ίδια κατανάλωση ισχύος.

Οι ελάχιστες τιμές των περιόδων T_i και T_{slot} περιορίζονται από το διαθέσιμο υλικό μέρος (hardware) καθώς και από το χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση της λήξης. Ως εκ τούτου, θεωρούμε ότι $T_i = T_{slot}$. Επίσης, οι τιμές για τα P_{send} , P_{recv} , P_{idle} , λ_o , λ_T , και L , οι οποίες δεν εξαρτώνται από το συγκεκριμένο σχήμα κατάστασης ύπνου, ρυθμίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ίσες, οπότε είναι εφικτή μία απευθείας σύγκριση. Αντίθετα, η τιμή της περιόδου T_f επηρεάζεται από την end-to-end delay.

- Για το *TDMA* ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

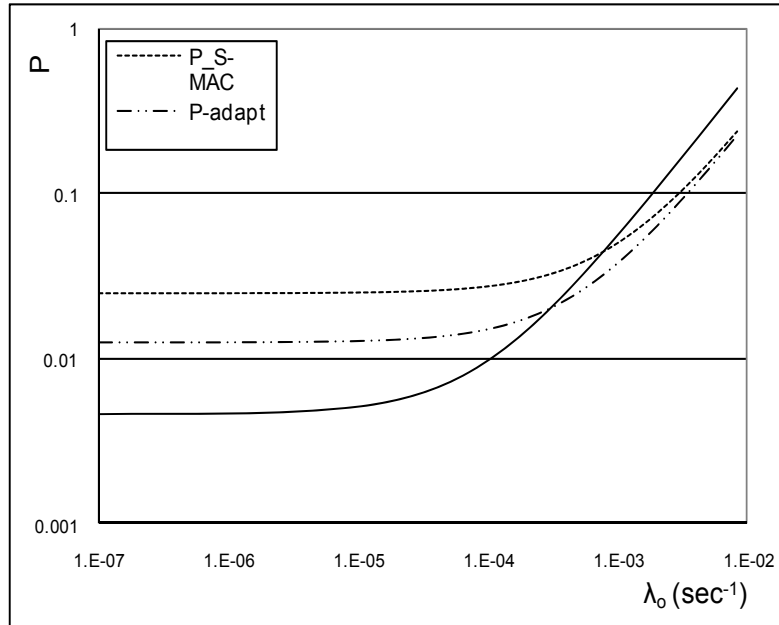
$$T_f = 2(E\{D(N)\} - N(t_{cs} + t_{tx})) \quad (7.13)$$

- Για το *S-MAC* ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$T_f = (E\{D(N)\} - t_{cs} - t_{tx}) / (N - 0.5) \quad (7.14)$$

- Για το *Adaptive Listening* ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$T_f = 2(E\{D(N)\} - 2t_{cs} - 2t_{tx})/(N - 1) \quad (7.15)$$



Σχήμα 7-3: Κατανάλωση ισχύος P σε συνάρτηση με το ρυθμό άφιξης των πακέτων

Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα τρία σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας: S-MAC (P_S-MAC), Adaptive Listening (P-adapt), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (P_TDMA) με την ίδια χρονική καθυστέρηση.

Ως εκ τούτου,

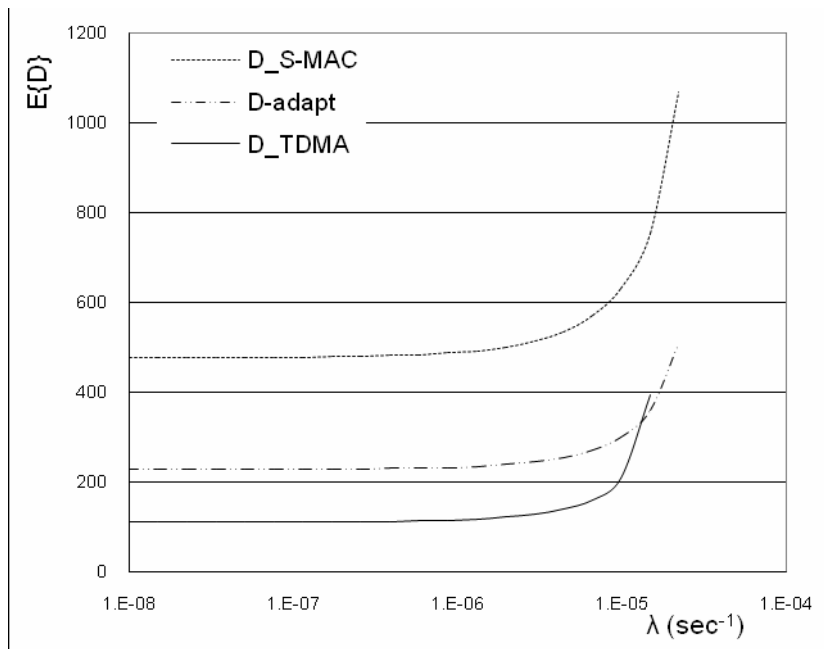
$$P_{S-MAC} = (\lambda_o + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + (T_i / T_f)(1 - \lambda_o L - 2\lambda_T L)P_{idle} \quad (7.16)$$

$$P_{adaptive} = (\lambda_o + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + (T_i / T_f)(1 - \lambda_o L - 2\lambda_T L)P_{idle} \quad (7.17)$$

$$P_{TDMA} = (\lambda_o + \lambda_T)LP_{send} + \lambda_T LP_{recv} + n(T_{slot} / T_f)P_{idle} + L_{Wi}L_{wait}P_{idle} \quad (7.18)$$

Τα Σχήματα 7-3 και 7-4 συγκρίνουν τον προτεινόμενο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού TDMA με τα σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας, S-MAC, και Adaptive Listening. Οι παράμετροι υπολογίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν την ίδια χρονική καθυστέρηση D σε ένα δίκτυο αισθητήρων 10 βημάτων. Ειδικότερα:

Το Σχήμα 7-3 προήλθε από τη μοντελοποίηση ενός αισθητήρα ο οποίος λαμβάνει πακέτα αφύπνισης WU από 2 αισθητήρες. Οι περίοδοι T_f και T_i θεωρούνται ότι είναι κατά περίπου 20 φορές μικρότερες από το χρόνο μετάδοσης των πακέτων, για τον εξής λόγο: Ο αισθητήρας οφείλει να περιμένει για μία χρονική περίοδο ίση με το χρόνο μετάδοσης 5 πακέτων, αφού του λάβει ένα μήνυμα αφύπνισης WU, οπότε η αναμενόμενη χρονική καθυστέρηση θα είναι κατά 20 φορές μεγαλύτερη από το χρόνο μετάδοσης του πακέτου. Επιπλέον, η κίνηση από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο (through traffic), θα είναι κατά 5 φορές μεγαλύτερη από την αρχική κίνηση (originating traffic), οπότε ο ρυθμός άφιξης των πακέτων κανονικοποιείται στο χρόνο μετάδοσης του πακέτου. Η μετάδοση από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο απαιτεί 10 βήματα.



Σχήμα 7-4: Χρονική καθυστέρηση/ρυθμός άφιξης πακέτων με σταθερή ισχύ

Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας: S-MAC (D_S-MAC), Adaptive Listening (D-adapt), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (D_TDMA). Οι άξονες κανονικοποιούνται με το χρόνο μετάδοσης των πακέτων.

Το Σχήμα 7-4 συγκρίνει τη χρονική καθυστέρηση D και των τριών σχημάτων, όταν έχουν κατασκευαστεί για να καταναλώνουν το ίδιο ποσό ενέργειας. Η από-άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση του σχήματος TDMA είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των δύο άλλων σχημάτων, εφόσον η κίνηση είναι πολύ αραιή.

Οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 7-2 και 7-3 δείχνουν ότι:

- Όταν οι χρονικές καθυστερήσεις (για τη μετάδοση πακέτων από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο) και των τριών σχημάτων είναι ίδιες, τότε το προτεινόμενο σχήμα TDMA καταναλώνει πολύ λιγότερη ισχύ από ότι τα άλλα δύο σχήματα, σε χαμηλούς ρυθμούς κίνησης, ενώ καταναλώνει λίγο περισσότερη ισχύ σε αυξημένους ρυθμούς κίνησης (Σχήμα 7-3).
- Όταν οι καταναλώσεις ισχύος και των τριών σχημάτων είναι ίσες, τότε το προτεινόμενο σχήμα TDMA επιτυγχάνει μικρότερες από άκρο-σε-άκρο χρονικές καθυστερήσεις από ότι τα άλλα δύο σχήματα, όπως άλλωστε είναι και αναμενόμενο (Σχήμα 7-4).
- Όταν η κίνηση στο δίκτυο είναι πάρα πολύ μικρή, τότε η ενέργεια που δαπανάται για την παθητική ακρόαση (idle listening) αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα περιορισμού της διάρκειας ζωής του δικτύου. Επειδή το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να παρέχει μεγαλύτερα μεσοδιαστήματα ύπνου (sleeping intervals) για την ίδια από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της εξοικονομούμενης ενέργειας.
- Όταν αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο, τότε το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται για την αποστολή και λήψη δεδομένων. Σε αυτήν την περίπτωση, τα πρόσθετα πακέτα αφύπνισης (WakeUp) που μεταδίδονται στο καινούργιο σχήμα γίνονται η αιτία για μία ελαφρά αύξηση της κατανάλωσης ισχύος.

Ως εκ τούτου, το προτεινόμενο σχήμα TDMA με αφύπνιση μονοπατιού (Path WakeUP), είναι η καταλληλότερη επιλογή για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία παρακολουθούν σπανίως

εμφανιζόμενα γεγονότα ενώ παράλληλα απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρές χρονικές καθυστερήσεις μετάδοσης.

7.1.5 Η Επίδραση της Τοπολογίας

Η τοπολογία του δικτύου (αριθμός και θέση των κόμβων) αποτελεί μία πολύ σπουδαία μετρική διότι μπορεί να εκτιμήσει την αποτελεσματικότητα του σχήματος εξοικονόμησης ενέργειας, και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της φάσης χρονοπρογραμματισμού TDMA (η οποία επηρεάζεται περισσότερο από την τοπολογία). Αυτή η ενότητα δίνει ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο που επιδρά η τοπολογία στους μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, όσον αφορά στην από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση αλλά και στη μέση κατανάλωση ισχύος.

Σε ένα απλό σενάριο, παρατηρώντας τις εξισώσεις (7.6), (7.7), (7.9) και (7.11), διαπιστώνουμε ότι οι μεταβλητές οι οποίες είναι διαφορετικές από τον έναν κόμβο στον άλλο, είναι οι εξής:

- Ο ρυθμός προώθησης των πακέτων από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο (through traffic (λ_T)),
- Ο αριθμός των χρονοθυρίδων TDMA (n) που ακούει ο κάθε κόμβος,
- Ο μέσος χρόνος παθητικής ακρόασης (Idle Listening) του κάθε κόμβου.
- Ο μέσος αριθμός ο οποίος αντιπροσωπεύει τις φορές που αναμεταδίδονται τα πακέτα του κάθε κόμβου, μέχρι να φθάσουν στην πύλη (\bar{N}).

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ακριβής συμπεριφορά του κάθε σχήματος εξοικονόμησης ενέργειας, επιβάλλεται να εξεταστούν διάφοροι τύποι τοπολογιών δικτύου. Για αυτόν το σκοπό έχει δημιουργηθεί ένας αντικειμενοστρεφής προσομοιωτής (object-oriented simulator), ο οποίος προσομοιώνει μία γεννήτρια τυχαίας τοπολογίας, ένα χρονοπρογραμματιστή (scheduler) και ένα δομικό στοιχείο ανάλυσης ίχνους (trace analysis module). Για κάθε δημιουργούμενη τοπολογία από τον προσομοιωτή, οι παραπάνω μεταβλητές υπολογίζονται για κάθε κόμβο από τα αποτελέσματα προσομοίωσης. Στη συνέχεια, αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται προκειμένου να υπολογιστούν: η μέση τιμή της χρονικής καθυστέρησης για μετάδοση πακέτων από κάθε αισθητήρα προς το σταθμό βάσης (gateway), και η μέση κατανάλωση ισχύος του δικτύου, αμφότερες στη θέση αναμονής (standby) και κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες κίνησης (traffic), σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{P}_{S-MAC} = (\lambda_o + \bar{\lambda}_T)LP_{send} + \bar{\lambda}_T LP_{recv} + (T_i / T_f)(1 - \lambda_o L - 2\bar{\lambda}_T L)P_{idle} \quad (7.19)$$

$$\bar{P}_{adaptive} = (\lambda_o + \bar{\lambda}_T)LP_{send} + \bar{\lambda}_T LP_{recv} + (T_i / T_f)(1 - \lambda_o L - 2\bar{\lambda}_T L)P_{idle} \quad (7.20)$$

$$\bar{P}_{TDMA} = (\lambda_o + \bar{\lambda}_T)LP_{send} + \bar{\lambda}_T LP_{recv} + \bar{n}(T_{slot} / T_f)P_{idle} + \overline{L_{Wt}L_{Wait}}P_{idle} \quad (7.21)$$

$$E\{D_{S-MAC}(N)\} = \bar{N}T_f - T_f / 2 + t_{cs} + t_{tx} \quad (7.22)$$

$$E\{D_{adaptive}(N)\} = \bar{N}T_f / 2 + 2t_{cs} + 2t_{tx} - T_f / 2 \quad (7.23)$$

$$E\{D_{TDMA}(N)\} = \bar{N}(t_{cs} + t_{tx}) + T_f / 2 \quad (7.24)$$

Παρατηρήσεις:

- Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν από το δομικό στοιχείο ανάλυσης του προσομοιωτή.
- Όλες οι παράμετροι ρυθμίστηκαν ώστε να έχουν τις ίδιες τιμές, προκειμένου να υπάρξει μία ακριβής σύγκριση της λειτουργίας των σχημάτων SMAC και TDMA. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περίοδος T_f η οποία χρησιμοποιείται για τον κατάλληλο συντονισμό των τιμών χρονικής καθυστέρησης/κατανάλωσης ισχύος.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7.9), η τιμή της περιόδου T_f για το σχήμα SMAC μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$T_{f_SMAC} = N \cdot (D - t_{tx} - t_{cs}) / \sum (n_i - 0.5) \quad (7.25)$$

$$T_{f_adaptive} = 2N \cdot (D - 2t_{tx} - 2t_{cs}) / \sum (n_i - 1) \quad (7.26)$$

Όπου: D είναι η επιθυμητή χρονική καθυστέρηση, και n_i είναι ο αριθμός των αναμεταδόσεων των πακέτων του κόμβου i που απαιτούνται για να φθάσουν (τα πακέτα) στο σταθμό βάσης.

Για τις υπόλοιπες παραμέτρους χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές:

- $P_{send} = 1.5$, $P_{recv} = 1.3$, $P_{idle} = 1$, $\lambda = 0.0000$ (ή εάν υποδηλώνεται με διαφορετικό τρόπο),
- $T_{cs} = 0.001$, $T_{tx} = 0.5$, $T_f = 10$ (ή εάν αυτό υποδηλώνεται με διαφορετικό τρόπο), και
- $T_i = 0.001$

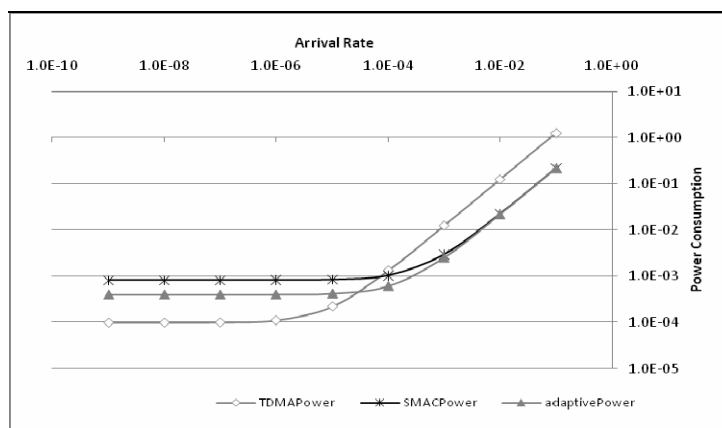
7.1.5.1 Τοπολογία 1000 Κόμβων

Με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων και με τη βοήθεια του προσομοιωτή δημιουργήσαμε ένα ασύρματο δίκτυο 1000 κόμβων. Για το εν λόγω δίκτυο μεταβάλλαμε την ταχύτητα λ_0 παραγωγής πακέτων στον κόμβο, από 10^{-9} πακέτα/δευτερόλεπτο/κόμβο, στο 1 πακέτο/δευτερόλεπτο/κόμβο. Το Σχήμα 7.5 απεικονίζει τη μέση κατανάλωση ισχύος για κάθε ένα σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας σε μία απλή τοπολογία 1000 κόμβων. Παρατηρούμε ότι το σχήμα εξοικονόμησης ενέργειας TDMA παρουσιάζει μία μικρότερη κατανάλωση ισχύος στην ανενεργό κατάσταση, αλλά, όμως, όταν αυξάνεται η κίνηση στο δίκτυο, τότε το SMAC υπερτερεί (γίνεται καλύτερο). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο σχήμα TDMA όλοι οι κόμβοι που προωθούν μηνύματα πρέπει να ξυπνήσουν ακριβώς τη στιγμή που το πακέτο θα αποσταλεί από τον κόμβο που το παρήγε (originating node), με άμεσο επακόλουθο την αύξηση του χρόνου παθητικής ακρόασης (idle listening time), όταν αυξηθεί ο ρυθμός αφίξεων. Όμως, η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός μεγάλου διαστήματος για την ίδια χρονική καθυστέρηση, έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη κατανάλωση ανενεργούς ισχύος.

7.1.5.2 Διάφορες Τοπολογίες, Χωρίς Κίνηση

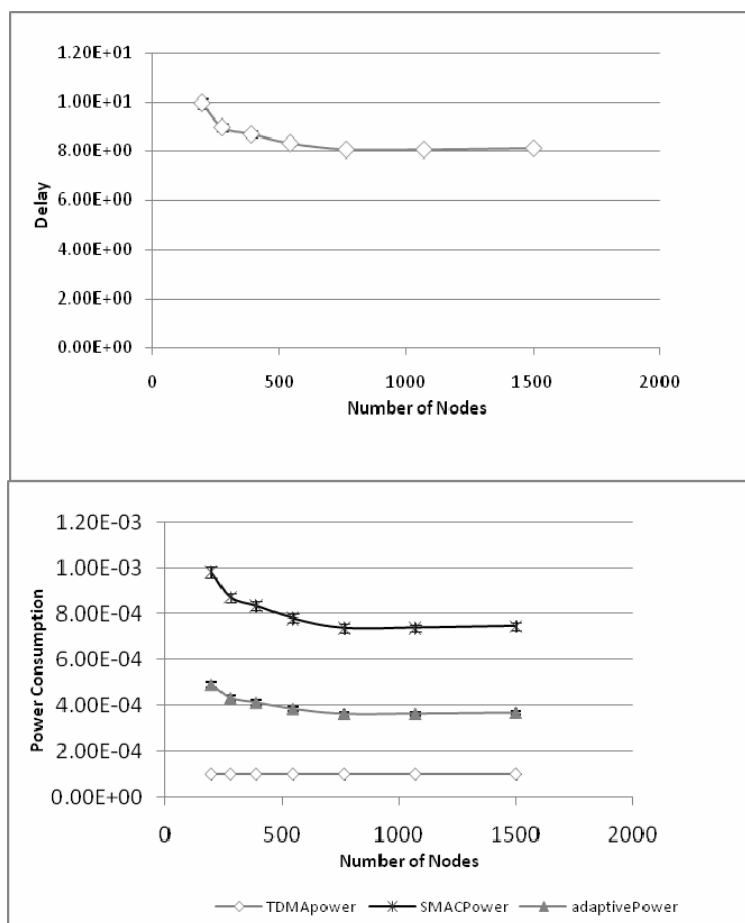
Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η σύγκριση μεταξύ των τριών σχημάτων, δημιουργήθηκαν πολλές διαφορετικές τοπολογίες των οποίων οι κόμβοι κυμαίνονταν μεταξύ 198 και 1500.

Για κάθε αριθμό κόμβων, δημιουργήθηκαν μεσοδιαστήματα εμπιστοσύνης (confidence intervals) $a = 0.02$ με την παραγωγή 50 διαφορετικών τοπολογιών.



Σχήμα 7-5: Κατανάλωση ισχύος/ρυθμός άφιξης πακέτων με τυχαία τοπολογία 1000 κόμβων

Επεξήγηση του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα σχήματα: S-MAC (SMACPower), Adaptive Listening (AdaptivePower), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMAPower).



Σχήμα 7-6: Χρονική καθυστέρηση (α), και εξοικονόμηση ενέργειας (β), χωρίς κίνηση

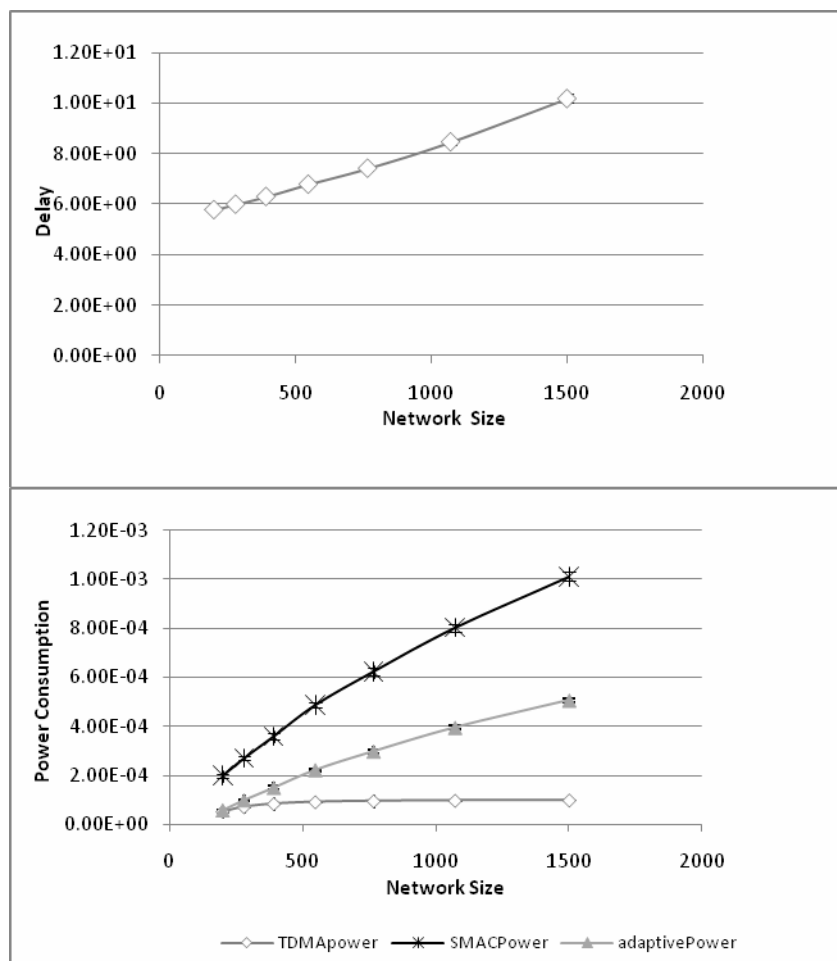
Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα εξής σχήματα: S-MAC (SMACPower), Adaptive Listening (AdaptivePower), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMAPower, για τοπολογίες με αυξανόμενο αριθμό κόμβων, χωρίς κίνηση).

Τα Σχήματα 7-6 (α) και 7-6 (β) απεικονίζουν τη λειτουργία που προέκυψε. Το σχήμα TDMA καταναλώνει πολύ λιγότερη ισχύ κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες (χωρίς κίνηση), όταν το σύστημα συντονίζεται ώστε να παρέχει την ίδια χρονική καθυστέρηση και για τα τρία σχήματα.

Ένας ακόμη σπουδαίος παράγοντας που θα μπορούσε να επηρεάσει τη λειτουργία του δικτύου, είναι η *πυκνότητά* του. Για αυτόν το λόγο δημιουργήθηκαν πολλά τυχαία δίκτυα, που το κάθε ένα περιείχε 1000 κόμβους και μέγεθος το οποίο κυμαινόταν μεταξύ 200m και 1500m. Η εμβέλεια μετάδοσης ρυθμίστηκε στα 100m.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7-7, διαπιστώνει κανείς ότι η χρονική καθυστέρηση αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι απαιτούνται περισσότερες αναμεταδόσεις για να φθάσουν τα πακέτα στο σταθμό βάσης. Επίσης διαπιστώνεται ότι η κατανάλωση ισχύος στο TDMA παραμένει σχεδόν σταθερή και σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Το πλεονέκτημα του σχήματος TDMA γίνεται πλέον ολοφάνερο σε δίκτυα μεγάλου μεγέθους (Σχήμα 7-7), όταν το σύστημα συντονίζεται ώστε να παρέχει την ίδια χρονική καθυστέρηση και για τα τρία σχήματα



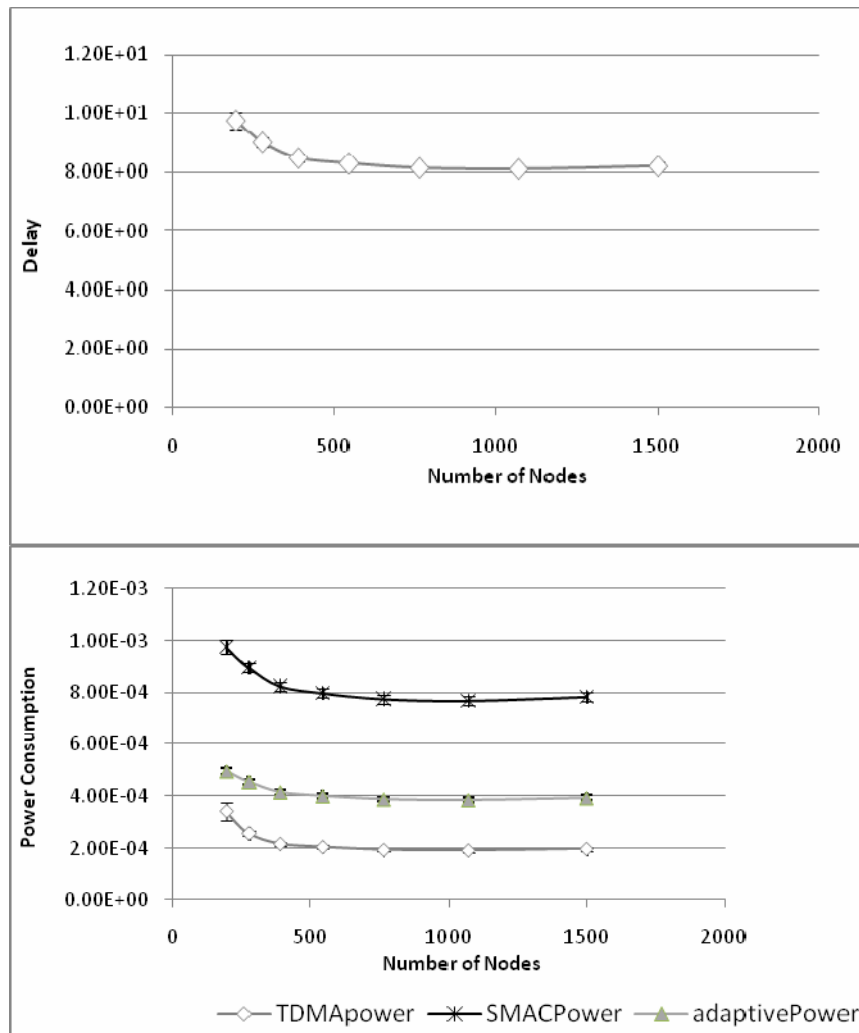
Σχήμα 7-7: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) με 1000 κόμβους

Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα εξής σχήματα: S-MAC (SMACPower), Adaptive Listening (AdaptivePower), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMAPower, για τοπολογίες με αυξανόμενο αριθμό κόμβων).

7.1.5.3 Διάφορες Τοπολογίες, Με Κίνηση

Η λειτουργία των σχημάτων διαφοροποιείται δραστικά όταν υπάρχει κίνηση (traffic) στο δίκτυο.

Το Σχήμα 7-8 παρουσιάζει το ίδιο πείραμα, για δίκτυα με κυμαινόμενο αριθμό κόμβων, αλλά αυτή τη φορά προστέθηκε κίνηση ίση με $\lambda_o = 0.00001$ πακέτα/sec/κόμβο.



Σχήμα 7-8: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) ($\lambda_o = 0.00001$)

Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα εξής σχήματα: S-MAC (SMACPower), Adaptive Listening (AdaptivePower), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMAPower, για τοπολογίες με αυξανόμενο αριθμό κόμβων και κίνηση).

Αντί να διατηρείται σταθερή η κίνηση ανά κόμβο, δημιουργήθηκε το Σχήμα 7-9 με την ίδια, όπως και προηγουμένως διάρθρωση, αλλά διατηρώντας σταθερή την ολική κίνηση στο $N \lambda_o = 0.005$.

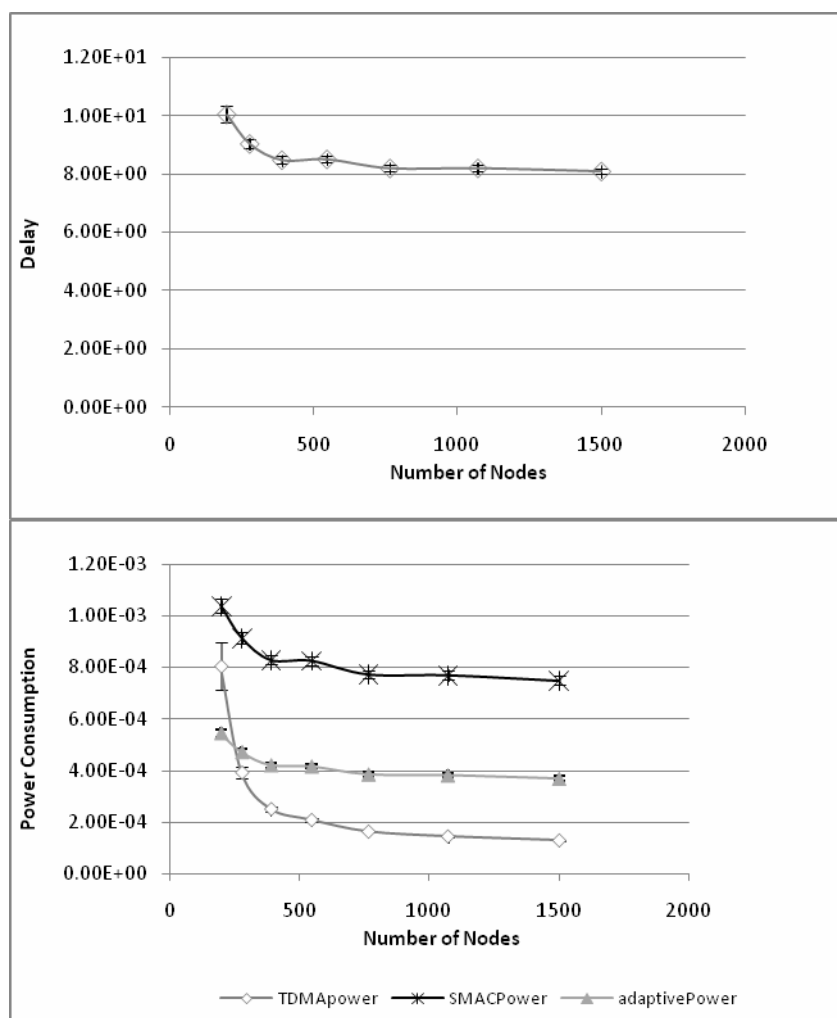
Με αυτήν τη διάρθρωση, το σχήμα TDMA είναι πάντοτε καλύτερο από το S-MAC, όταν το σύστημα συντονίζεται ώστε να παρέχει την ίδια χρονική καθυστέρηση και στα τρία σχήματα

Τελικά το Σχήμα 7-10 δημιουργήθηκε για διαφορετικές τιμές της ολικής κίνησης $N \lambda_o = 0.05$.

Για αυτήν τη διάρθρωση (configuration), το σχήμα TDMA είναι καλύτερο μόνο σε δίκτυα μεγάλου μεγέθους (με περισσότερους από 700 κόμβους).

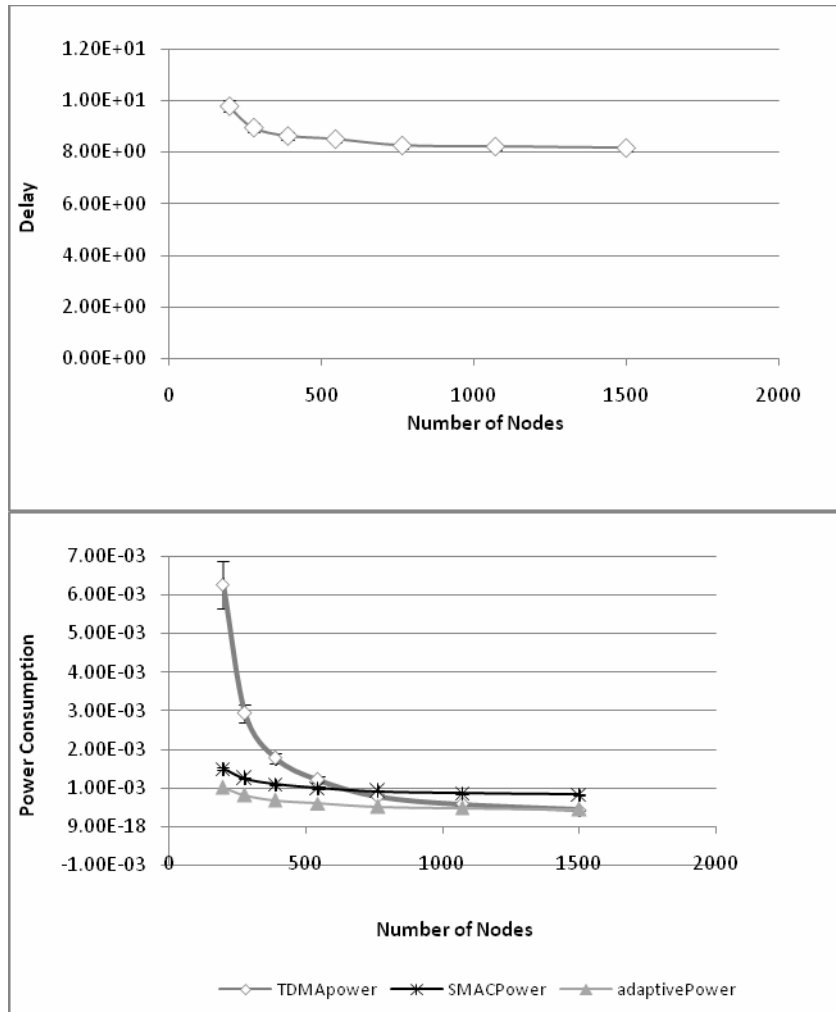
Συμπέρασμα

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, διαφαίνεται ότι το προτεινόμενο σχήμα παρουσιάζει μία πολύ καλή συμπεριφορά. Για μία δεδομένη χρονική καθυστέρηση, η κατανάλωση ενέργειας του σχήματος TDMA είναι η μικρότερη, ακολουθούμενη από το adaptive listening, και το S-MAC, εφόσον δεν εφαρμόζεται καμία κίνηση στο δίκτυο, ανεξάρτητα από το μέγεθος ή την πυκνότητα του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) επιτρέπει μεγαλύτερα διαστήματα ύπνου για το ίδιο επίπεδο χρονικής καθυστέρησης, με αποτέλεσμα να παραμένουν οι αισθητήρες στην ενεργό κατάσταση για πολύ ελάχιστο χρόνο. Όμως, καθώς αυξάνεται η κίνηση, η κατανάλωση ισχύος του προτεινόμενου σχήματος TDMA αυξάνεται ταχύτερα από ότι στα άλλα δύο σχήματα, και τελικά τα ξεπερνά. Αυτό το γεγονός μπορεί να δικαιολογηθεί από το χρόνο παθητικής ακρόασης ο οποίος προκαλείται από τους κόμβους που αναμένουν τη λήψη ενός πακέτου, μετά τη λήψη ενός πακέτου αφύπνιση. Ως εκ τούτου, το TDMA είναι το πλέον κατάλληλο σχήμα για δίκτυα τα οποία σε κανονικές συνθήκες παραμένουν ανενεργά (idle), αλλά αναμένεται να αντιδρούν γρήγορα σε μεγάλα φορτία κίνησης, όπου τότε το adaptive listening είναι το πλέον κατάλληλο σχήμα.



Σχήμα 7-9: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) ($N\lambda_o = 0.005$)

Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα εξής σχήματα: S-MAC (SMACPower), Adaptive Listening (AdaptivePower), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMAPower, για τοπολογίες με αυξανόμενο αριθμό κόμβων και λίγη κίνηση.



Σχήμα 7-10: Χρονική καθυστέρηση (α) και κατανάλωση ενέργειας (β) ($N \lambda_o = 0.05$)

Ερμηνεία του Σχήματος: Η σύγκριση αφορά τα εξής σχήματα: S-MAC (SMACPower), Adaptive Listening (AdaptivePower), και χρονοπρογραμματισμού TDMA (TDMAPower, για τοπολογίες με αυξανόμενο αριθμό κόμβων και λίγη κίνηση).

7.2 Αξιολόγηση της Επίδοσης του Αλγόριθμου LCMMER

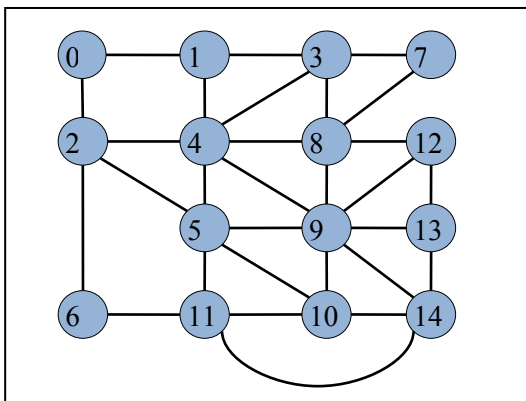
Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των σχημάτων MTPR, MMBCR, και LCMMER δημιουργήθηκε ένα εργαλείο προσομοίωσης με βάση τη γλώσσα Java. Στο Σχήμα 7-11 απεικονίζεται η τοπολογία του δικτύου η οποία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των υπό μελέτη σχημάτων.

Το Σχήμα 7-12 απεικονίζει το μέσο αριθμό των ζωντανών κόμβων, σε συνάρτηση με τον αριθμό των προσπαθειών σύνδεσης. Εδώ έχουμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

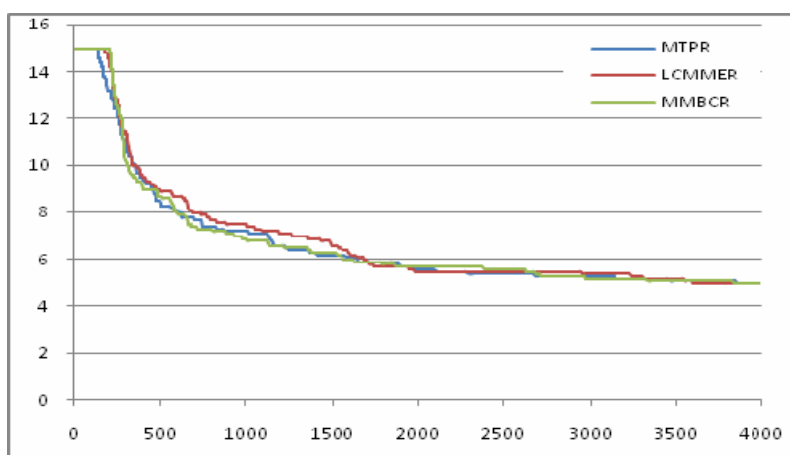
Το σχήμα MTPR έχει τους λιγότερους ζωντανούς κόμβους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της προσομοίωσης.

Στο σχήμα MMBCR, ο πρώτος κόμβος που πεθαίνει έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής συγκρινόμενος με τα δύο άλλα σχήματα.

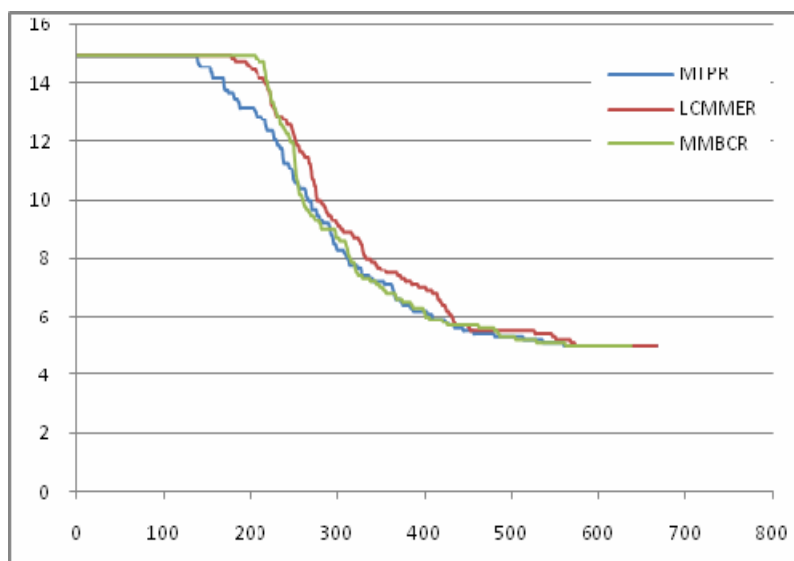
Όμως, το προτεινόμενο σχήμα LCMMER, το οποίο υπερτερεί πάντοτε του σχήματος MTPR, πολύ γρήγορα υπερτερεί και του σχήματος MMBCR, και διασφαλίζει περισσότερους ζωντανούς κόμβους καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 7-11: Η τοπολογία του υπό μελέτη ασύρματου δικτύου αισθητήρων



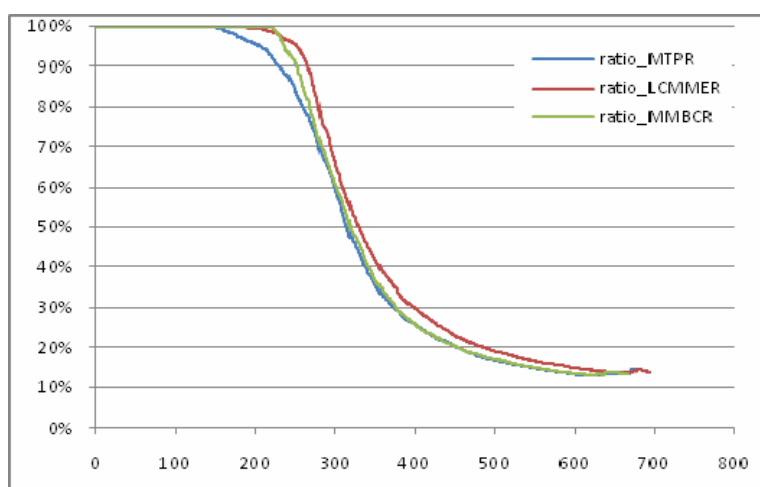
Σχήμα 7-12: Αριθμός ζωντανών κόμβων/αριθμός προσπαθειών σύνδεσης



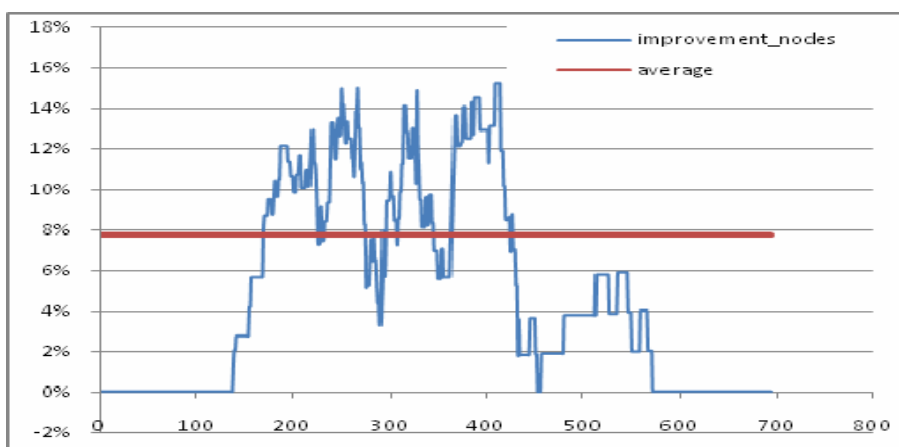
Σχήμα 7-13: Αριθμός ζωντανών κόμβων/αριθμός επιτυχημένων συνδέσεων

Σε αυτήν την τοπολογία εφαρμόστηκε το μοντέλο παραγωγής συνδέσεων (η πλήρης περιγραφή του οποίου παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) και για τις τρεις υπό μελέτη διαφορετικές στρατηγικές επιλογής της καταλληλότερης διαδρομής. Για κάθε μία στρατηγική εκτελέστηκαν 10 ανεξάρτητες προσομοιώσεις, και τα αποτελέσματα των μετρήσεων στρογγυλεύτηκαν στο μέσο όρο.

Όμως, το Σχήμα 7-12 απεικονίζει τη λειτουργία και των τριών σχημάτων τεχνητά και με τέτοιο τρόπο ώστε το ένα σχήμα να βρίσκεται δίπλα στο άλλο. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι ότι η αύξηση του αριθμού των ενεργών (ζωντανών) κόμβων στο LCMMER συντελεί στην αύξηση του λόγου επιτυχίας του δικτύου (success ratio of the network). Επειδή, οι περισσότερες συνδέσεις είναι επιτυχείς, καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια, και με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η διάρκεια ζωής του δικτύου. Αυτό το αποτέλεσμα διορθώνεται στο Σχήμα 7-13, το οποίο απεικονίζει το μέσο αριθμό των ζωντανών κόμβων, ως συνάρτηση των επιτυχημένων συνδέσεων. Σε αυτό το Σχήμα, παρατηρούμε ότι το πλεονέκτημα του LCMMER καθίσταται περισσότερο φανερό, επειδή λαμβάνονται υπόψη μόνο οι επιτυχείς συνδέσεις.



Σχήμα 7-14: Ποσοστό απωλειών δικτύου/αριθμός επιτυχημένων συνδέσεων

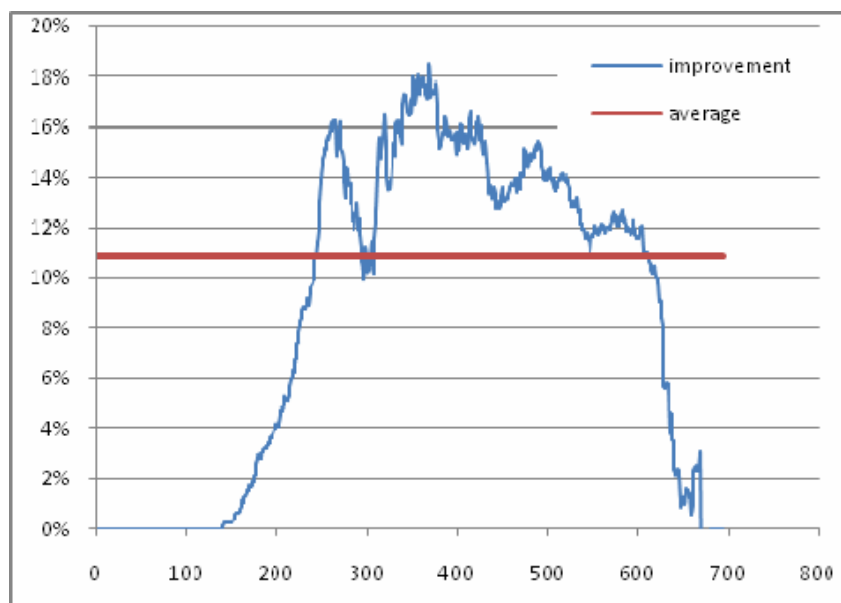


Σχήμα 7-15: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MTPR)/Αριθμός ζωντανών κόμβων

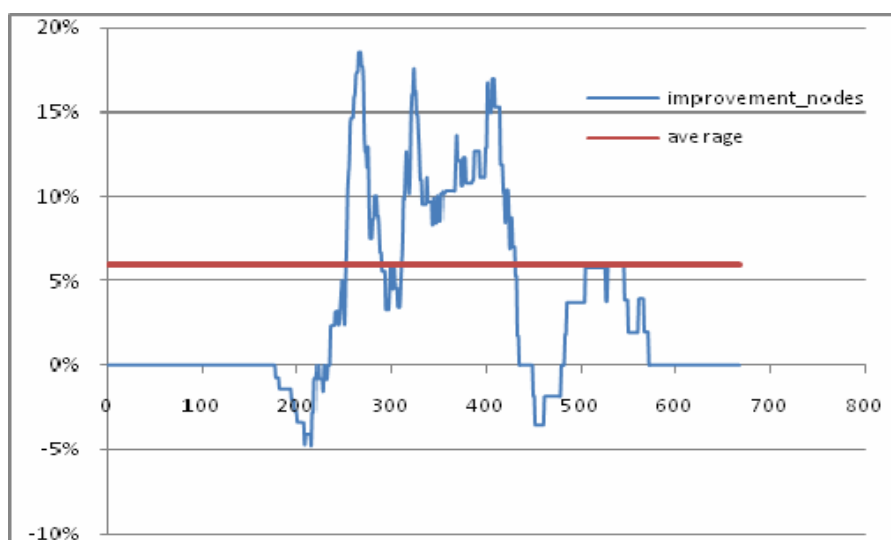
Το Σχήμα 7-14 απεικονίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου σε συνάρτηση με τον αριθμό των επιτυχημένων συνδέσεων και για τις τρεις στρατηγικές επιλογής της καταλληλότερης διαδρομής. Μολονότι η στρατηγική MMBCR δείχνει να είναι καλύτερη στο πρώτο στάδιο της εφαρμογής της, το προτεινόμενο σχήμα LCMMER καταφέρνει να είναι τελικά πιο αποδοτικό. Πράγματι, στο

μεγαλύτερο μέρος των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, το προτεινόμενο σχήμα LCMMER κατάφερε να επιτύχει ένα σταθερά υψηλότερο συντελεστή συνδεσιμότητας του δικτύου.

Τα Σχήματα 7-15 και 7-17 παρουσιάζουν το σχετικό πλεονέκτημα του LCMMER έναντι των MTPR και MMBCR αντίστοιχα, σε σχέση με τον αριθμό των ζωντανών κόμβων που έχουν απομείνει στο δίκτυο. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου σχήματος LCMMER είναι ολοφάνερο, επειδή παραμένει σταθερά καλύτερο από τα άλλα δύο σχήματα, και καταφέρνει να επιτύχει μία κατά μέσο όρο βελτίωση της τάξης του 8% και του 6% αντίστοιχα.



Σχήμα 7-16: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MTPR)/Συνδεσιμότητα δικτύου

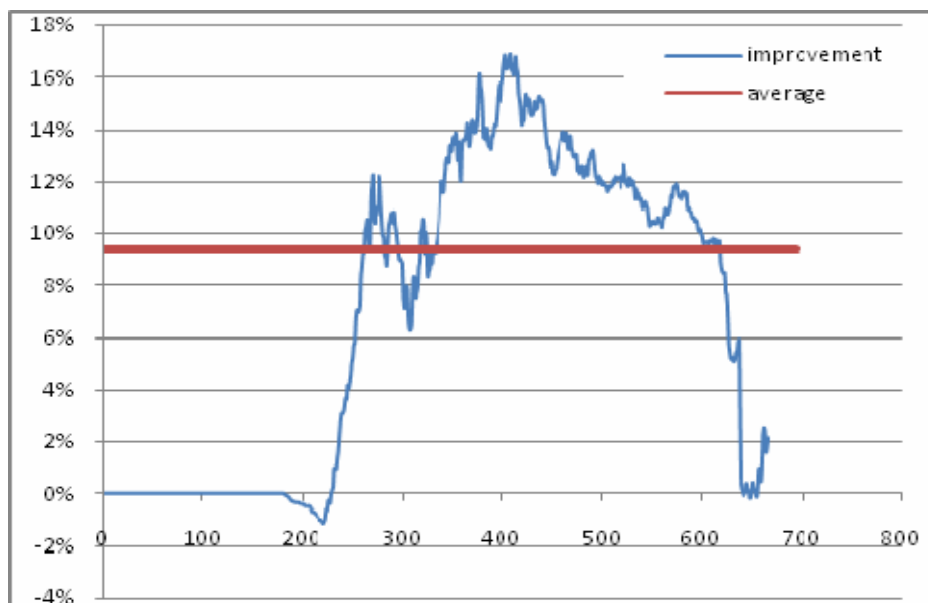


Σχήμα 7-17: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MMBCR)/Αριθμός ζωντανών κόμβων

Εξ' άλλου, τα Σχήματα 7-16 και 7-18 παρουσιάζουν το σχετικό πλεονέκτημα του LCMMER έναντι του MTPR και του MMBCR αντίστοιχα, σε σχέση με τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Από αυτές τις εικόνες μπορεί να διαπιστώσει κανείς, ότι το προτεινόμενο σχήμα LCMMER είναι

σταθερά καλύτερο από τα άλλα δύο σχήματα, και επιτυγχάνει μία βελτίωση κατά μέσον όρο της τάξης του 11% και του 9% αντίστοιχα.

Έτσι, το προτεινόμενο σχήμα LCMMER υπερτερεί κατά πολύ των άλλων δύο σχημάτων, MTPR και MMBCR, όχι μόνο ως προς τη διάρκεια ζωής των κόμβων, αλλά και ως προς τη συνδεσιμότητα του δικτύου.



Σχήμα 7-18: Βελτίωση LCMMER (σε σχέση με MMBCR/Συνδεσιμότητα δικτύου)

7.3 Αξιολόγηση της Επίδοσης των Αλγορίθμων MBCR2 και MREPSum2

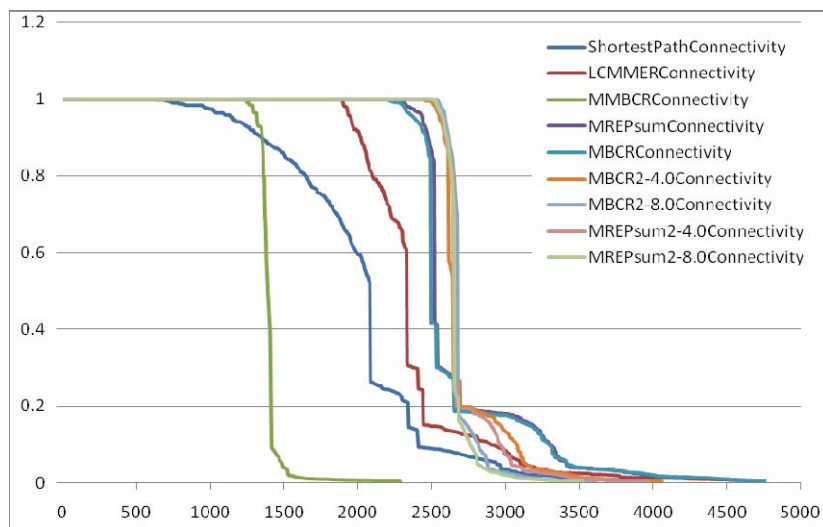
7.3.1 Λεπτομερής Περιγραφή της Επίδοσης μιας Απλής Τοπολογίας

Η πρώτη εκτέλεση της προσομοίωσης έγινε σε μία τυχαία τοπολογία 1000 κόμβων, στην οποία εφαρμόστηκαν συνδέσεις οι οποίες παρήχθησαν με επίσης τυχαίο τρόπο. Όλα τα σχήματα δρομολόγησης εφαρμόστηκαν στην ίδια τοπολογία, με την ίδια ακολουθία συνδέσεων. Το Σχήμα 7-19 απεικονίζει τη συνδεσιμότητα του δικτύου ως συνάρτηση του αριθμού των επιτυχών συνδέσεων, για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σχήματα δρομολόγησης.

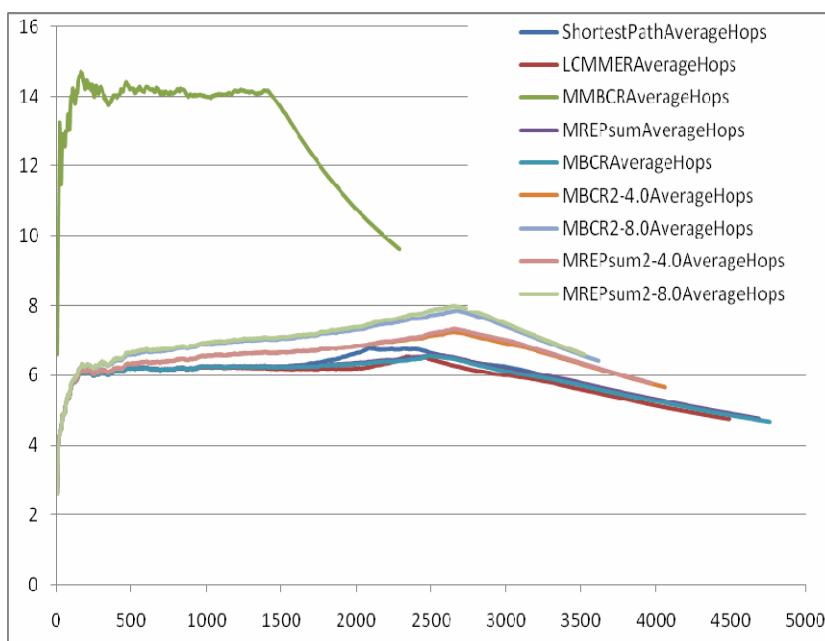
Η κάθε μία εφαρμοζόμενη πολιτική επιλογής διαδρομής επιτυγχάνει διαφορετικά επίπεδα συνδεσιμότητας, και έχει αναλυτικότερα ως εξής:

- *Shortest Path Connectivity*: Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επιτυχών συνδέσεων, ο αλγόριθμος του “Συντομότερου Μονοπατιού” είναι ο πρώτος που θα προκαλέσει την αστοχία του πρώτου αισθητήρα, μετά από 640 συνδέσεις (cons), οδηγώντας αναπόφευκτα σε μείωση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Αυτό άλλωστε ήταν αναμενόμενο, εφόσον αυτός ο αλγόριθμος δεν κάνει χρήση καμίας πληροφορίας που να έχει σχέση με την ενέργεια.
- *MMBCR Connectivity*: Αντιθέτως, στη στρατηγική *MMBCR*, η πρώτη αποτυχία συμβαίνει αρκετά αργότερα, και συγκεκριμένα μετά από 1250 επιτυχείς συνδέσεις (cons). Όμως, η συνδεσιμότητα του *MMBCR* πέφτει απότομα, φθάνοντας στο επίπεδο 0.5 μετά από 1490 επιτυχείς συνδέσεις (cons), πολύ γρηγορότερα δηλαδή από τη συνδεσιμότητα του συντομότερου μονοπατιού, η οποία φθάνει στο ίδιο επίπεδο μετά από 2080 συνδέσεις (cons). Αυτή η ταχεία πτώση της συνδεσιμότητας του δικτύου μπορεί να ερμηνευθεί εφόσον ληφθεί

υπόψη ότι το *MMBCR* επιβάλλει μία στρατηγική Max/Min, η οποία είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσει σε εξαιρετικά μεγάλα μονοπάτια τα οποία καταναλώνουν τεράστια ποσά ενέργειας.



Σχήμα 7-19: Συνδεσιμότητα δικτύου/Αριθμός επιτυχών συνδέσεων



Σχήμα 7-20: Μέσος αριθμός βημάτων (hops)/Αριθμός επιτυχών συνδέσεων

- *LCMMER Connectivity*: Όσον αφορά τον αλγόριθμο *LCMMER*, η πρώτη αστοχία κόμβου συμβαίνει μετά από 1890 επιτυχείς συνδέσεις (cons), και η συνδεσιμότητα 0.5 επιτυγχάνεται μετά από 2335 επιτυχείς συνδέσεις (cons). Αυτή η συνδεσιμότητα, η οποία είναι καταφανώς μεγαλύτερη και από τις δύο προηγούμενες (*Συντομότερον Μονοπατιού* και *MMBCR*), μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο, επειδή εφαρμόζει τη στρατηγική Max/Min μεταξύ των συντομότερων μονοπατιών.
- *MBCR and MREPSum Connectivity*: Οι στρατηγικές κόστους μπαταρίας έχουν πάντοτε την καλύτερη συνδεσιμότητα. Και οι δύο στρατηγικές (*MBCR* και *MREPSum*) υφίστανται την πρώτη απώλεια κόμβου μετά από 2205 επιτυχείς συνδέσεις (cons), ενώ η συνδεσιμότητα 0.5 επιτυγχάνεται μετά από τις 2500 και 2520 συνδέσεις (cons), αντίστοιχα. Αυτό το γεγονός

δείχνει με τον πλέον ξεκάθαρο τρόπο, ότι το κριτήριο κόστους της μπαταρίας επιτυγχάνει μία πολύ καλύτερη επίδοση από ότι τα υπόλοιπα σχήματα. Αυτό συμβαίνει διότι το κριτήριο κόστους της μπαταρίας εξισορροπεί την ανάγκη για διατήρηση σε χαμηλά επίπεδα της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε διαδρομή, ενώ ταυτόχρονα αποφεύγει να ξοδεύει την ενέργεια των κόμβων του δικτύου που έχουν κρίσιμα (ελάχιστα) αποθέματα ενέργειας.

- *MBCR2 and MREPSum2 Connectivity*: Όμως, η βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους της μπαταρίας μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερα επίπεδα επιδόσεων. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 7-19, το σχήμα *MBCR2*, για παραμέτρους $p=4$ και $p=8$ υφίσταται την πρώτη απώλεια κόμβου μετά από 2455 και 2540 επιτυχείς συνδέσεις (cons), και συνδεσιμότητα 0.5 μετά από 2650 και 2574 επιτυχείς συνδέσεις (cons) αντίστοιχα. Επίσης, οι ίδιες τιμές για το σχήμα *MREPSum2* είναι 2505, 2505, 2650 και 2655 συνδέσεις (cons). Έτσι, από τα όσα μέχρι στιγμής αναφέρθηκαν, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για τη συγκεκριμένη τοπολογία των 1000 κόμβων, και για το συγκεκριμένο πρότυπο (pattern) σύνδεσης, τα προαναφερθέντα σχήματα *MBCR* και *MREPSum*, αφήνουν περιθώρια βελτίωσης, η οποία βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια των προτεινόμενων σχημάτων *MBCR2* και *MREPSum2*, για τις παραμέτρους $p=4$ και $p=8$.

Για το προαναφερθέν σενάριο, ο μέσος αριθμός των βημάτων του κάθε σχήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 7-20 και υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των επιτυχών συνδέσεων που έχουν πραγματοποιηθεί από την αρχή της προσομοίωσης μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτή η μετρική είναι πάρα πολύ χρήσιμη για δύο βασικούς λόγους:

- Η ισχύς που καταναλώνεται σε κάθε σύνδεση είναι ανάλογη του αριθμού των κόμβων ή των βημάτων (hops) που αυτή περιέχει.
- Ο μεγαλύτερος αριθμός βημάτων που εμπεριέχεται σε κάθε σύνδεση, συνεπάγεται μεγαλύτερες χρονικές καθυστερήσεις για τη μετάδοση των πακέτων από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τις ευαίσθητες σε χρονικές καθυστερήσεις εφαρμογές.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7-20, διαπιστώνουμε ότι το σχήμα *LCMMER* περιέχει το μικρότερο αριθμό βημάτων ανά σύνδεση, το οποίο μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι χρησιμοποιεί πάντοτε τα συντομότερα μονοπάτια.

Τα σχήματα *MBCR* και *MREPSum* καταλαμβάνουν τη δεύτερη και την τρίτη θέση, παρά το γεγονός ότι δεν επιλέγουν πάντοτε τα συντομότερα μονοπάτια. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η μεγαλύτερης διάρκειας ζωή εμποδίζει τους κόμβους να χάσουν όλα τους τα ενεργειακά αποθέματα, αφήνοντας έτσι «ζωντανά» συντομότερα μονοπάτια δρομολόγησης.

Το τέταρτο καλύτερο σχήμα, σε ό,τι αφορά το σύνολο της καταμέτρησης των βημάτων (hop count), είναι ο αλγόριθμος του «Συντομότερου Μονοπατιού». Παρατηρούμε ότι η επιλογή των συντομότερων μονοπατιών οδηγεί σε ένα μεγάλο αριθμό αστοχιών κόμβων (node failures), με αποτέλεσμα να γίνονται μεγαλύτερες οι διαθέσιμες διαδρομές που έχουν απομείνει στο δίκτυο.

Τα προτεινόμενα σχήματα *MBCR2* και *MREPSum2* επιτυγχάνουν τα υψηλότερα επίπεδα διάρκειας ζωής του δικτύου με κόστος, όμως, τη μεγάλη χρονική καθυστέρηση μετάδοσης.

- Επίσης, υψηλότερες τιμές p (p -values) οδηγούν σε ακόμη μεγαλύτερο αριθμό βημάτων. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η p -value, ελαττώνεται με ταχύτερο ρυθμό η συνάρτηση κόστους της μπαταρίας. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν μεγαλύτερες κυρώσεις (penalty) όταν χρησιμοποιούνται κόμβοι με χαμηλά διαθέσιμα ποσά ενέργειας, και οδηγεί σε μεγαλύτερα μονοπάτια.

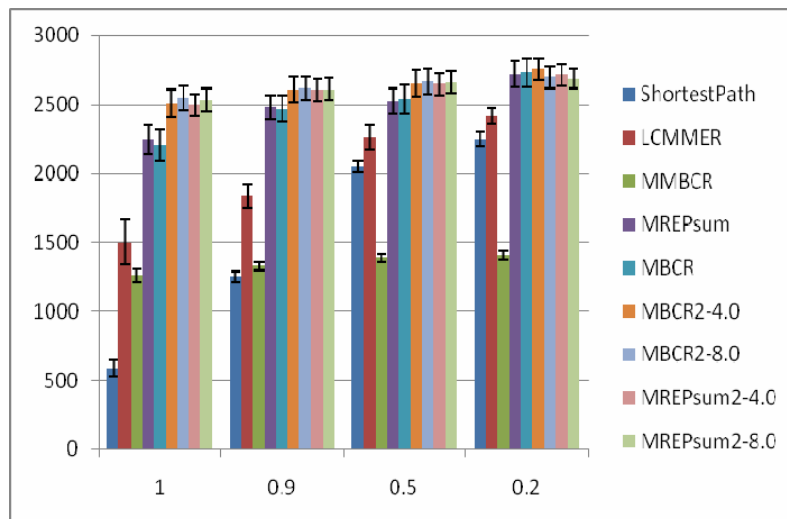
- Αντιθέτως, χαμηλότερες τιμές p (p -values) οδηγούν σε μία με αργό ρυθμό μειούμενη συνάρτηση κόστους της μπαταρίας, που τείνει να μην ποινικοποιεί τόσο πολύ τη χρήση κόμβων με χαμηλά ενεργειακά αποθέματα, και έτσι να οδηγεί σε συντομότερα μονοπάτια.

Ως εκ τούτου, η p -value μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο διακρίβωσης (calibrating) της επιθυμητής διάρκειας ζωής του δικτύου σε συνάρτηση με την από άκρο-σε-άκρο χρονική καθυστέρηση, στο επίπεδο δρομολόγησης. Αυτή η τεχνική διακρίβωσης (calibration technique) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με τις τεχνικές χρονοπρογραμματισμού στο επίπεδο MAC, όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο πρώτο προτεινόμενο σχήμα αυτής της διατριβής [1].

Τελικά, θα πρέπει εδώ να παρατηρήσουμε ότι το σχήμα *MMBCR* οδηγεί σε πολύ μακρύτερα μονοπάτια από τα υπόλοιπα σχήματα, και αυτό από μόνο του εξηγεί γιατί η διάρκεια ζωής είναι τόσο μικρή.

7.3.2 Επιδόσεις Παρόμοιων Τοπολογιών

Η λεπτομερής περιγραφή της προηγούμενης ενότητας έδωσε ιδιαίτερη έμφαση στα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων σχημάτων. Όμως, επειδή όλα τα αποτελέσματα ελήφθησαν από μία και μόνη τοπολογία, θα ήταν πολύ χρήσιμη η λήψη ακόμη περισσότερων μετρήσεων προκειμένου να υπάρξουν σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα. Γι' αυτό το λόγο, το προηγούμενο πείραμα επανελήφθη 10 φορές. Επειδή η γραφική απεικόνιση όλων αυτών των μετρήσεων καθίσταται εξαιρετικά πολύπλοκη, ελήφθη υπόψη μόνο ο αριθμός των επιτυχών συνδέσεων που εφαρμόστηκαν στο δίκτυο, πριν οι τιμές συνδεσιμότητας του κάθε σχήματος πέσουν κάτω από τις παρακάτω τιμές: 1 (πρώτος νεκρός κόμβος), 0.9, 0.5, και 0.2. Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων, καθώς επίσης και τα διαστήματα εμπιστοσύνης (confidence intervals) 0.02 απεικονίζονται στο Σχήμα 7-21.



Σχήμα 7-21: Μέση διάρκεια ζωής και διαστήματα εμπιστοσύνης

Ερμηνεία του Σχήματος: Η απεικόνιση αναφέρεται σε 10 παρόμοιες τοπολογίες και σε διαφορετικά επίπεδα συνδεσιμότητας.

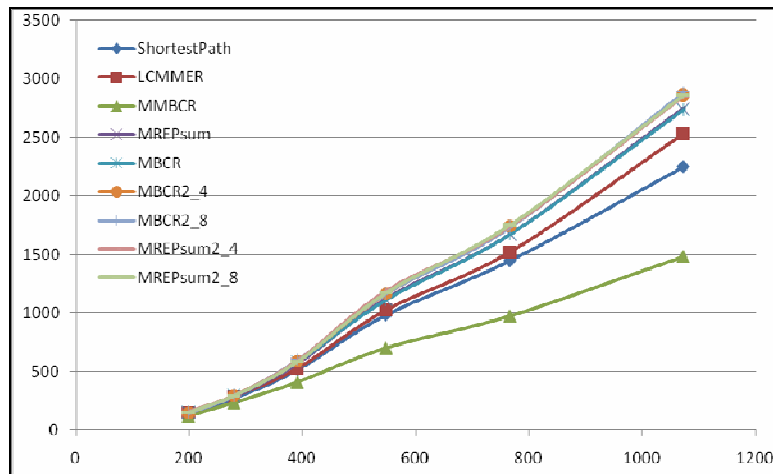
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, τα προηγούμενα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται.

- Για Συνδεσιμότητα ίση με 1, το σχήμα *MMBCR* έχει τη συντομότερη διάρκεια ζωής, με μόνη εξαίρεση το σχήμα του *Συντομότερου Μονοπατιού*. Η τρίτη καλύτερη επίδοση επιτυγχάνεται με το *LCMMER* και ακολουθούν τα σχήματα *MBCR* και *MREPSum*.

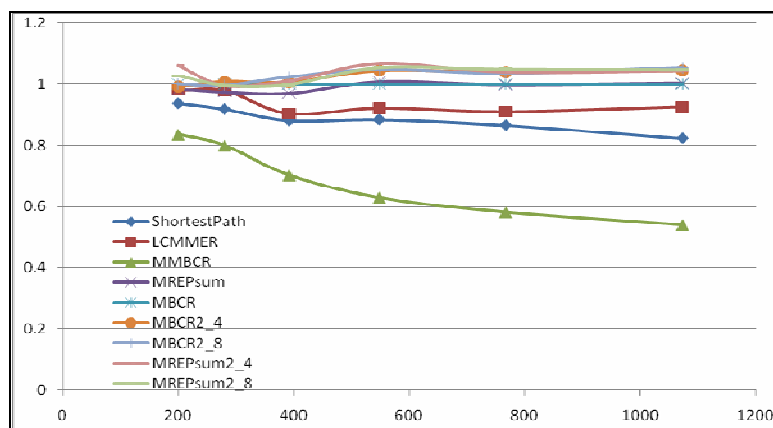
- Τα προτεινόμενα σχήματα *MBCR2* και *MREPSum2* έχουν τις μεγαλύτερες διάρκειες ζωής, για τις περισσότερες τιμές συνδεσιμότητας. Επίσης, όπως δείχνουν τα διαστήματα εμπιστοσύνης (confidence intervals), η βελτίωση είναι στατιστικά σημαντική.

7.3.3 Η Επίδραση της Τοπολογίας του Δικτύου

Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα εξήχθησαν με την ίδια διάρθρωση (configuration) των 1000 κόμβων. Το Σχήμα 7-22 παρήχθη με βάση τις ίδιες παραμέτρους, όπως και προηγουμένως. Όμως, ο αριθμός των κόμβων μετεβλήθη μεταξύ 200 και 1073 κόμβων, σε γεωμετρικά βήματα του 1.4. Για κάθε αριθμό κόμβων, εκτελέστηκαν 10 προσομοιώσεις, και σχεδιάστηκαν οι μέσες διάρκειες ζωής συνδεσιμότητας 0.5.



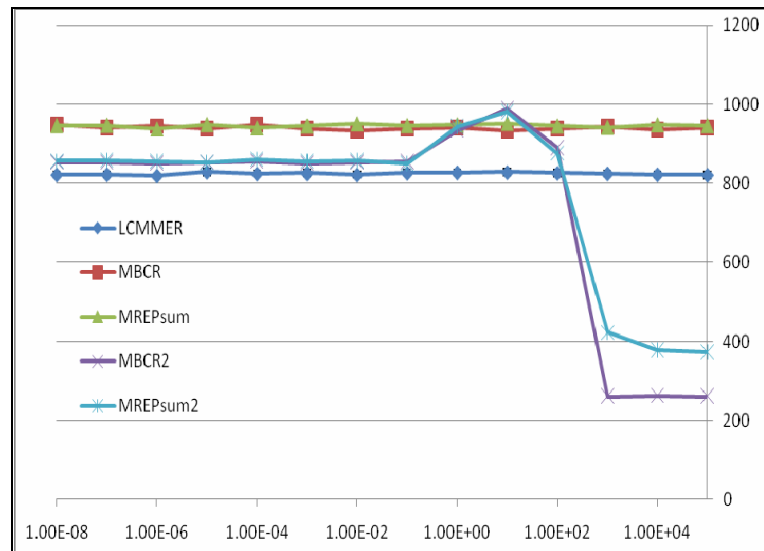
Σχήμα 7-22: Μέση διάρκεια ζωής συνδεσιμότητας 0.5/διαφορετικός αριθμός κόμβων (I)



Σχήμα 7-23: Μέση διάρκεια ζωής συνδεσιμότητας 0.5/διαφορετικός αριθμός κόμβων (II)

Ερμηνεία του Σχήματος: Η απεικόνιση είναι κανονικοποιημένη στη διάρκεια ζωής του MBCR.

Ανεξάρτητα από το σχήμα δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε, η διάρκεια ζωής του δικτύου αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των κόμβων. Αυτό συμβαίνει διότι ο μεγαλύτερος αριθμός κόμβων διασφαλίζει περισσότερες εναλλακτικές διαδρομές για επικοινωνία, οπότε χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να εξαντληθούν τα ενεργειακά τους αποθέματα.



Σχήμα 7-24: Διάρκεια ζωής με 0.5/διαφορετικές τιμές p -value, τοπολογία 500 κόμβων

Ερμηνεία του Σχήματος: Η απεικόνιση είναι κανονικοποιημένη στη διάρκεια ζωής του MBCR.

Το σχετικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου αλγορίθμου παραμένει το ίδιο ανεξάρτητα από το είδος της τοπολογίας. Αυτό φαίνεται πιο ξεκάθαρα στο Σχήμα 7.23, όπου τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν σχεδιασθεί με βάση την κλίμακα της διάρκειας ζωής του σχήματος *MBCR*. Το μέγεθος της βελτίωσης που προσφέρουν τα δύο σχήματα *MBCR2* και *MREPSum2* είναι σταθερό για τοπολογίες δικτύων με αριθμό κόμβων μεγαλύτερο από 500. Μικρότερες τοπολογίες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη μεταβλητότητα, οπότε και τα αποτελέσματά τους είναι λιγότερο σημαντικά.

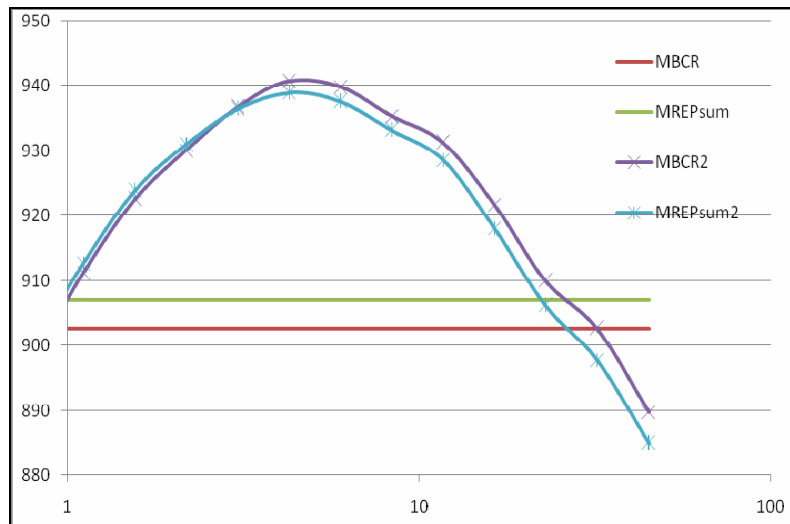
7.3.4 Η Επίδραση της p -value

Η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος έχει άμεση σχέση με την τιμή της παραμέτρου p . Προκειμένου να κατανοήσουμε τον τρόπο που η εν λόγω παράμετρος επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του δικτύου, έχουμε εφαρμόσει τα σχήματα με μεταβλητές p -values στην ίδια τοπολογία των 500 κόμβων, και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 7-24. Παρατηρώντας το Σχήμα 7-24, διαπιστώνουμε ότι η διάρκεια ζωής είναι μεγαλύτερη μόνο όταν η p -value βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 1 και 50, περίπου.

Μία λεπτομερέστερη απεικόνιση αυτού του φαινομένου εμφανίζεται στο Σχήμα 7-25, το οποίο δημιουργήθηκε έπειτα από μία σειρά προσομοιώσεων με τιμές p -value μεταξύ 1 και 45, σε διαφορετικές τυχαίες τοπολογίες.

Επειδή οι στρατηγικές *MBCR* and *MREPSum* δεν εξαρτώνται από την p -value, βγάλαμε το μέσο όρο όλων των τιμών που προέκυψαν από την εκτέλεση του πειράματος.

Αντίθετα, στα δύο προτεινόμενα σχήματα *MBCR2* και *MREPSum2* εξήχθη ο μέσος όρος για τις ίδιες τιμές του p .



Σχήμα 7-25: Μέση διάρκεια ζωής με 0.5/διαφορετικές τιμές p -value, 500 κόμβοι

Αρχίζοντας με $p = 1$, η επίδοση όλων των σχημάτων είναι παρόμοια. Καθώς αυξάνεται η p -value, οι στρατηγικές $MBCR2$ και $MREPSum2$ επιτυγχάνουν αρχικά μεγαλύτερες διάρκειες ζωής, ενώ στη συνέχεια αυτές οι διάρκειες ζωής μειώνονται. Η βέλτιστη τιμή της p -value για αυτό το σενάριο διάρθρωσης έχει βρεθεί ότι είναι 9.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εξοικονόμηση ενέργειας και η διατήρηση της ισχύος στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία επιθυμούμε να λειτουργούν χωρίς φροντίδα για όσο γίνεται περισσότερο χρόνο, είναι από τα πλέον σημαντικά θέματα, διότι προσδιορίζουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν κατά καιρούς προταθεί πολλά σχήματα εξοικονόμηση ενέργειας και διατήρησης της ισχύος. Όλα έχουν ως στόχο την εξασφάλιση της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής τους, είτε με το να προσπαθούν να ελαττώσουν στο ελάχιστο δυνατό τον αριθμό των μεταδόσεων, μέσα από μία ενεργητικά αποδοτική δρομολόγηση των πληροφοριών, είτε με το να εκμεταλλεύονται τα διαστήματα ύπνου των αισθητήρων.

Στην παρούσα διατριβή προτάθηκαν και αναλύθηκαν τα εξής τρία βασικά σχήματα:

- *Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks using Sleep Mode TDMA Scheduling*

Αν και η λειτουργία ύπνου/αφύπνισης παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας, η περιοδική τοποθέτηση των αισθητήριων κόμβων στην κατάσταση ύπνου, εισάγει μία χρονική καθυστέρηση η οποία σχετίζεται άμεσα με αυτήν και η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια που εξοικονομείται. Επιπλέον, η αναπόφευκτη παθητική ακρόαση (idle listening) περιορίζει την κατανάλωση ισχύος, σε φορτία με χαμηλή κίνηση.

Οι στρατηγικές, Path-WakeUp και συσσώρευσης μηνυμάτων wakeup, που παρουσιάστηκαν σε αυτήν τη διατριβή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης, που σχετίζεται με την κατάσταση ύπνου, αλλά και για την ελαχιστοποίηση του χρόνου της παθητικής ακρόασης, προκειμένου να μειωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται σε δεδομένα επίπεδα χρονικής καθυστέρησης. Ο συγκεντρωτικός χρονοπρογραμματισμός TDMA μπορεί να υπολογίζει τους κατάλληλους χρόνους ακρόασης και ανίχνευσης που έχουν άμεση σχέση με τα μηνύματα wakeup. Αναπτύχθηκαν απλά αναλυτικά μοντέλα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της κατανάλωσης ισχύος αρκετών σχημάτων. Η αξιολόγηση της επίδοσης, καθώς και τα αναλυτικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν, έδειξαν τα πλεονεκτήματα και την υπεροχή του προτεινόμενου σχήματος TDMA, έναντι των άλλων παρόμοιων σχημάτων (S-MAC και Adaptive Listening), σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τη χρονική καθυστέρηση για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο. Το προτεινόμενο σχήμα επιτυγχάνει πολύ μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας από ότι τα άλλα σχήματα, όταν είναι χαμηλός ο ρυθμός παραγωγής πακέτων. Ως εκ τούτου, το προτεινόμενο σχήμα χρονοπρογραμματισμού TDMA, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στα ενδιάμεσα διαστήματα αφύπνισης, επιτυγχάνει την κρίσιμη εξισορρόπηση μεταξύ της εξοικονομούμενης ενέργειας και της από άκρο-σε-άκρο χρονικής καθυστέρησης, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία εποπτεύουν σπάνια γεγονότα και τα οποία αναμένεται να λειτουργούν χωρίς φροντίδα για μεγάλες χρονικές περιόδους, μεγιστοποιώντας τα ποσά της εξοικονομούμενης ενέργειας.

- *Enhanced Route Selection for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks*

Το δεύτερο από τα τρία προτεινόμενα σχήματα παρουσιάζει μία στρατηγική, η οποία εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, σκοπός της οποίας είναι να επιλέγει μόνο τη διαδρομή εκείνη η οποία έχει τη μεγαλύτερη εναπομείνουσα διάρκεια ζωής.

Στην εργασία με τον ως άνω τίτλο, παρουσιάστηκαν δύο βασικά σχήματα επιλογής δρομολόγησης, το MTPR και το MMBCR, και προτάθηκε το νέο σχήμα LCMMER. Όλες οι στρατηγικές δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκαν είχαν ως στόχο την ανάλυση ενός συνόλου υποψήφιων μονοπατιών μιας συγκεκριμένης σύνδεσης, και προσδιόρισαν ποιο από όλα αυτά τα

μονοπάτια χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών από τον ένα κόμβο στον άλλο. Η διαφορά μεταξύ αυτών των σχημάτων εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο αυτά επιλέγουν τα μονοπάτια. Το σχήμα MTPR επιλέγει πάντοτε το συντομότερο μονοπάτι από τον πηγαίο κόμβο μέχρι τον κόμβο προορισμού, ενώ το σχήμα MMBCR επιλέγει τη διαδρομή εκείνη η οποία περιλαμβάνει τους χαμηλού κόστους κόμβους με τα μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος LCMMER προσπαθεί να αποφύγει όλους εκείνους τους κόμβους που έχουν τα μικρότερα αποθέματα ενέργειας, ενώ παράλληλα επιδιώκει να διατηρεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα την ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε μετάδοση των πακέτων δεδομένων. Τα αποτελέσματα, που προέκυψαν μέσα από ένα μεγάλο πλήθος μετρήσεων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του συστήματος, επιβεβαιώνουν την υπεροχή της προτεινόμενης στρατηγικής, σε ότι αφορά τη διάρκεια ζωής των κόμβων και τη συνδεσιμότητα του δικτύου σε μία τοπολογία δειγματισμού, συγκρινόμενη πάντοτε με άλλες παρεμφερείς στρατηγικές επιλογής της πλέον κατάλληλης διαδρομής, όπως είναι ή MTPR και η MMBCR.

- *Energy-Efficient Route Selection Strategies for Wireless Sensor Networks*

Το τρίτο σχήμα που προτάθηκε αναφέρεται επίσης στην εξεύρεση της καλύτερης στρατηγικής η οποία θα μπορεί να επιλέγει την καταλληλότερη διαδρομή ώστε να παρατείνεται η διάρκεια ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Η καινοτομία που εισάγει αυτό το σχήμα είναι ότι προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου μέσα από τον ορισμό μιας εκθετικής συνάρτησης. Αυτή η συνάρτηση φέρνει μία ισορροπία ανάμεσα στην ανάγκη για διατήρηση της ενέργειας στους συχνότερα χρησιμοποιούμενους αισθητήριους κόμβους, και στην ανάγκη για διατήρηση της ενέργειας που καταναλώνεται σε κάθε μία διαδρομή σε χαμηλά επίπεδα, προσδιορίζοντας κάθε φορά τον καλύτερο εκθέτη.

Βασισμένοι στα σχήματα επιλογής διαδρομής, προτείναμε δύο νέους αλγόριθμους, τον MBCR2 και τον MREPSum2 οι οποίοι στοχεύουν στη βελτίωση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Ο αλγόριθμος MBCR2 που προτάθηκε, βασίστηκε στον αλγόριθμο MBCR, αλλά προσπαθεί να βελτιώσει τη συνάρτηση κόστους της μπαταρίας, κάνοντας χρήση μιας διαφορετικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος MREPSum2 βασίστηκε στον αλγόριθμο MREPSum, αλλά και αυτός ο αλγόριθμος κάνει χρήση μιας εκθετικής παραμέτρου προκειμένου να υπολογίσει το κόστος. Τα σχήματα που προτάθηκαν επιτυγχάνουν να επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου για διαφορετικά επίπεδα συνδεσιμότητας, και για διαφορετικούς τύπους τοπολογιών. Επίσης, έχει βρεθεί η πλέον κατάλληλη τιμή της παραμέτρου μέσα από ένα μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων διαφορετικών τοπολογιών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. A. Pantazis, D. J. Vergados, D. D. Vergados, and C. Douligeris, "Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks using Sleep Mode TDMA Scheduling", *Ad Hoc Networks Journal, Elsevier*, 2008.
- [2] D. J. Vergados, N. A. Pantazis, D. D. Vergados, "Enhanced Route Selection for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 3rd International Mobile Multimedia Communications Conference (MOBIMEDIA 2007) - Supported by ACM, EURASIP, ICST, Create-Net, Nafpaktos, Greece*, 2007.
- [3] N. A. Pantazis, D. J. Vergados, and D. D. Vergados, "Energy-Efficient Route-Selection Strategies for Wireless Sensor Networks", *ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2008.
- [4] I.F. Akyildiz *et al.*, "Wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 38, Issue 4, pp. 393-422, 2002.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, Issue. 8, pp. 102-114, 2002.
- [6] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, "Directed Diffusion A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," *Proceedings of the ACM MobiCom '00*, pp. 56-57, Boston, MA, 2000.
- [7] E. Shih *et al.*, "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the ACM MobiCom '01*, pp. 272-286, Rome, Italy, 2001.
- [8] G. J. Pottie, and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," *Communications of the ACM*, vol. 43, Issue. 5, pp. 551-558, 2000.
- [9] J. M. Kahn, R. H. Katz, and K. S. J. Pister, "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust," *Proceedings of the ACM, MobiCom '99*, pp. 271-278, Washington DC, 1999.
- [10] C. Shen, C. Srisathapornphat, and C. Jaikaeo, "Sensor Information Networking Architecture and Applications," *Proceedings of the IEEE Pers. Commun.*, pp. 52-59, 2001.
- [11] G. Hoblos, M. Staroswiecki, and A. Aitouche, "Optimal Design of Fault Tolerant Sensor Networks," *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications '00*, pp. 467-472, Anchorage, AK, 2000.
- [12] N. Bulusu *et al.*, "Scalable Coordination for Wireless Sensor Networks: Self-Configuring Localization Systems," *Proceedings of the ISCTA '01*, pp. 272-286, Ambleside, U.K., 2001.
- [13] A. Woo, and D. Culler, "A Transmission Control Scheme for Media Access in Sensor Networks," *Proceedings of the ACM MobiCom '01*, pp. 221-235, Rome, Italy, 2001.
- [14] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva Jr., D. Patel, and S. Roundy, "PicoRadio Supports Ad-hoc Ultra-low Power Wireless Networking," *IEEE Computer Magazine*, pp. 42-48, 2000.
- [15] M. A. M. Vieira, C. N. Coelho Jr., D. C. da Silva Jr., and J. M. da Mata, "Survey on Wireless Sensor Network Devices," *IEEE Computer Magazine*, pp. 42-48, 2000.
- [16] PushPin, <http://www.media.mit.edu/reseach/PushPin/>. Web Site

- [17] J. Wiley and Sons, “Wireless Sensor Network Designs,” *ISBN 0-470-86736-1*, pp. 142-143, 2003.
- [18] <http://www.emmarin.com/>. Web Site
- [19] <http://www.mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>. Web Site
- [20] N. Ickes, F. S. Lee, and P. Phanaphat, “Hardware Architecture for a Power-Aware Micro-sensor Modem,” [http://www.mtl.mit.edu/research/annual reports/2002/01ics/006 hapamn.pdf](http://www.mtl.mit.edu/research/annual%20reports/2002/01ics/006%20hapamn.pdf)
- [21] R. Kling, “Intel Research Mote,” Intel Corporation Research [http://webs.cs.berkeley. edu/retreat-1-03/slides/imote-nest-q103-03-dist.ppt](http://webs.cs.berkeley.edu/retreat-1-03/slides/imote-nest-q103-03-dist.ppt)
- [22] <http://www.btnode.ethz.ch/>. Web Site
- [23] <http://www.mics.org>. Web Site
- [24] <http://www.smart-its.org>. Web Site
- [25] [http://www.btnode.ethz.ch/ovrview/purchase index.html](http://www.btnode.ethz.ch/ovrview/purchase%20index.html). Web Site
- [26] <http://www.jlhlabs.com./hardware.htm/>. Web Site
- [27] M. Srivastava, “Sensor Node Platforms and Energy Issues Part II” <http://www.nesl.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02/slides/Mobicom-Tutorial-2-MS.pdf>. Web Site
- [28] <http://www.ttdp.org/tpg/html/book1.htm/>. Web Site
- [29] Crossbow, “MICA2 Datasheet” [http://www.xbow.com/products/product.pdf files/wireless pdf/MICA2 Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/products/product.pdf%20files/wireless.pdf/MICA2%20Datasheet.pdf)
- [30] <http://www.xbow.com/>. Web Site
- [31] Crossbow, “MICA2DOT Datasheet” [http://www.xbow.com/products/product.pdf files/wireless pdf/MICA2DOT Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/products/product.pdf%20files/wireless.pdf/MICA2DOT%20Datasheet.pdf)
- [32] Crossbow, “Wireless Sensor Networks Getting Started Guide”, ver. B, August 2004, Document 7430-0022-05. [http://www.xbow.com/Support/Support.pdf files/Getting Started Guide 74 30-0022-05 B.pdf](http://www.xbow.com/Support/Support.pdf%20files/Getting%20Started%20Guide%2074%2030-0022-05%20B.pdf)
- [33] Crossbow, “MICA-z Datasheet” [http://www.xbow.com/products/product.pdf files/wireless pdf/MICA-z Datasheet.pdf](http://www.xbow.com/products/product.pdf%20files/wireless.pdf/MICA-z%20Datasheet.pdf)
- [34] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html/>. Web Site
- [35] <http://www.zigbee.org/>. Web Site
- [36] “The Speck Node” <http://www.eecs.harvard.edu/~mdw/proj/vitaldust/>. Web Site
- [37] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*. Fourth Edition. New Jersey, Pearson Education, 2003.
- [38] IEEE 802.11, 1999 Edition (ISO/IEC 8802-11: 1999) IEEE Standards for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Network – Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [39] IEEE 802.11a-1999 (8802-11:1999/Amd 1:2000(E)), IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band.

- [40] IEEE 802.11b-1999 Supplement to 802.11-1999, Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band.
- [41] IEEE 802.11g-2003 IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 4: Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band.
- [42] IEEE 802.11n-2007 IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – amendment to the IEEE 802.11-2007 standard to improve system performance.
- [43] IEEE 802.11i-2004 Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition (Reaff 2003). IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between system – Local and metropolitan area networks?Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications-- Amendment 6: Medium Access Control (MAC) Security Enhancements.
- [44] IEEE 802.11h-2003 IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN Specific Requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5GHz band in Europe.
- [45] IEEE 802.11j-2004 IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications – Amendment 7: 4.9 GHz–5 GHz Operation in Japan.
- [46] IEEE 802.11d-2001, Amendment to IEEE 802.11-1999, (ISO/IEC 8802-11) Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Specification for Operation in Additional Regularatory Domains.
- [47] IEEE 802.11e-2005, IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements.
- [48] J. M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, and S. Roundy , “PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking,” *IEEE Comp. Mag.*, pp. 42-48, 2000.
- [49] J. Elson, and Kay Romer, “Wireless Sensor Networks: A new Regime for Time Synchronization,” <http://www.lecs.cs.ucla.edu/ublications/Papers/wsn-ts.pdf>
- [50] C. J. Elson, M. Hamilton, and J. Zhao, “Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology,” *Proceedings of the ACM SIGCOMM '00*, Costa Rica, 2001.
- [51] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, “Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks,” *Proceedings of the ACM MobiCom '99*, pp. 263-270, Washington, USA, 1999.

- [52] <http://www.dmc.ajou.ac.kr/~sensor/applications.htm>. Web Site
- [53] C.Y. Chong, and S. P. Kumar, "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges," <http://www.cs.utah.edu/classes/cs6935/papers/sensNet1.pdf>
- [54] <http://www.alertsystems.org/>. Web Site
- [55] Q. Luo, and L. M. Ni, "Meadows: Modelling, Emulation, and Analysis of Data of WSNs," http://www.ihome.ust.hk/~whjnn/papers/meadows_dms04.pdf
- [56] K. Sohrabi, B. Manriquez, and G. Pottie, "Near-Ground Wideband Channel Measurements," *Proceedings of the IEEE VTC*, New York, 1999.
- [57] C. Chien, I. Elgorriaga, and C. McConaghy, "Low-Power Direct-Sequence Spread Spectrum Modem Architecture for Distributed Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the ISLPED '01*, Huntington Beach, CA, 2001.
- [58] J. Cramer, M. Z. Win, and R. A. Scholtz, "Impulse Radio multipath Characteristics and Diversity Reception," *Proceedings of the ICC '98*, vol. 3, pp. 1650-54, 1998.
- [59] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi and G. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network," in *IEEE Personal Communications*, vol. 7, No. 5, pp. 16-27, 2000.
- [60] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the ACM MOBiCom '99*, Seattle, WA, pp. 174-185, 1999.
- [61] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in *IEEE Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 3005-3014, 2000.
- [62] J. N. Al-Karaki, and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: A survey," *IEEE Wireless Communications*, pp. 6-28, 2004.
- [63] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, Seattle, WA, vol. 8, pp. 169-185, 2002.
- [64] D. Braginsky, and D. Estrin, "Rumor routing algorithm for sensor networks," *Proceedings of the first workshop on sensor networks and applications (WSNA)*, Atlanta, GA, 2002.
- [65] F. Ye, A. Chen, S. Liu, and L. Zhang, "SPEED: A Scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks," in *Proceedings of the 10th Int'l. Conf. on Computer Communications and networks (ICCCN)*, pp. 304-09, 2001.
- [66] C. Schurgers and M.B. Srivastava, "Energy efficient routing in wireless sensor networks," in *Proceedings of the MILCOM on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force*, McLean, VA, 2001.
- [67] M. Chu, H Haussecker and F. Zhao, "Scalable information-driven sensor querying and routing for ad-hoc heterogeneous sensor networks," *the International Journal of high performance computing applications*, vol. 16, No 3, pp. 293-313, 2002.
- [68] Y. Yao, and J. Gehrke, "The COUGAR approach to in-network query processing in sensor networks," in *Proceedings of the SIGMOD Record*, 2002.
- [69] N. Sadagopan, *et al.*, "The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks," in *Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications*, Anchorage, AK, 2003.

- [70] S. Lindsey, and C.S. Raghavendra, "PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems," in *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, 2002.
- [71] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal, "TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 1st Int'l. Workshop on Parallel and Distrib. Comp. Issues in Wireless Networks and Mobile Comp.*, 2001.
- [72] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal, "APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks," in *Proceedings of the Int'l Parallel and Distrib. Proc. Symp.*, pp. 195-202, 2001.
- [73] V. Rodoplu and T.H. Meng, "Minimum energy mobile wireless networks," in *Proceedings of the IEEE JSAC*, vol. 17, no. 8, pp. 1334-44, 1999.
- [74] L. Li and J.Y. Halpern, "Minimum energy mobile wireless networks revisited," in *Proceedings of the IEEE ICC 2001*, vol. 1, pp. 278-83, 1999.
- [75] L. Subramanian and R.H. Katz, "An architecture for building self-configurable systems," in *Proceedings of the IEEE/ACM Workshops Mobile ad-hoc Networks and Comp.*, Boston MA, 2000.
- [76] Q. Fang, F. Zhao, and L. Guibas, "Leichtweigt sensing and communication protocols for target enumeration and aggregation," in *Proceedings of the 4th ACM MOBIHOD*, pp. 165-76, 2003.
- [77] J.N. Al-Karaki, *et al.*, "Data aggregation in wireless sensor networks – Exact and approximate algorithms," in *Proceedings of the Workshops High performance switching and routing*, Phoenix, AZ, pp. 18-21, 2004.
- [78] F. Ye, *et al.*, "A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks," in *Proceedings of the ACM/IEEE MOBICOM*, 2002.
- [79] Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan, "Geographical and energy-aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks," *UCLA Comp. Sci. Dept. tech. rep.*, *UCLA-CSD TR-010023*, 2000.
- [80] I. Stojmenovic, and X. Lin, "GEDIR: Loop-free location based routing in wireless networks," in *Proceedings of the International Conf. Parallel and Distrib. Comp. and Sys.*, Boston, MA, 1999.
- [81] F. Kuhn, R. Wattenhofer, and A. Zollinger, "Worst-case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing," in *Proceedings of the 4th ACM Int'l Conf. Mobile Comp. and NET.*, pp. 267-78, 2003.
- [82] J.-H. Chang, and L. Tassioulas, "Maximum Lifetime routing in wireless sensor networks," in *Proceedings of the 4th Conference on Advanced Telecommunications/ Information Distribution Research Program (ATIRP '00)*, College Park, MD, 2000.
- [83] C. Rahul, and J. Rabay, "Energy-aware routing for Low-energy ad-hoc sensor networks," in *Proceedings of the IEEE WCNC*, vol. 1, pp. 350-355, Orlando, FL, 2002.
- [84] K. Sohrabi, and J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, vol. 7, No. 5, pp. 16-27, 2000.
- [85] T. He, *et al.*, "SPEED: A stateless protocol for real time communication in sensor networks," in *Proceedings of the Int'l. Conf. Distrib. Comp. Sys.*, Providence, RI, 2003.

- [86] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and J. Broch, "The Dynamic Source Routing (DSR) protocol for mobile ad hoc networks," in *Internet Draft, MANET Working Group, draft-ietf-manet-dsr-03.txt*, 1999.
- [87] C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector routing (DSDV) for Mobile Computers," *Computer Communication*, pp. 234-244, 1994.
- [88] C. E. Perkins, and E. Royer, "Ad-hoc On Demand Distance Vector (AODV) routing," in *Internet Draft, MANET Working Group, draft-ietf-manet-aodv-05.txt*, March 2000.
- [89] <http://www.ietf.org/internet-draft-ietf-manet-aodv-08.txt>
- [90] NIST, "A quick guide to AODV routing"
- [91] T. Clausen, P. Jacquet, A. Laouiti, P. Muhlethaler, a. Qayyum and L. Viennot, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," in *Proceedings of the IEEE INMIC*, Pakistan 2001.
- [92] A. Laouiti, P. Muhlethaler, A. Najid, and E. Plakoo, "Simulation Results of the OLSR Routing Protocol for Wireless Network," in *Proceedings of the 1st Mediterranean Ad-Hoc Networks workshop (Med-Hoc-Net)*, Sardegna, Italy, 2002.
- [93] V. Park and M. Corson, "Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 – Functional Specification," in *Internet Draft, MANET Working Group, draft-ietf-manet-tora-spec-02.txt*, 1999.
- [94] S. Hedetniemi, and A. Liestman, "A survey of gossiping and broadcasting in communication networks," *Networks*, vol. 18, Issue 4, pp. 319-349, 1988.
- [95] P. Rentala, R. Musunui, S. G. Gandham, and U. Saxena, "Survey on Sensor Networks," in *Proceedings of the International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2001.
- [96] N. A. Pantazis, D. D. Vergados and D. J. Vergados, "Power Control Schemes in Tactical Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 12th European Wireless (EW2006) Conference*, Athens, Greece, 2006.
- [97] N. A. Pantazis, and D. D. Vergados, "A Survey on Power Control Issues in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys*, vol. 9, No. 4, pp. 86-107, 2007.
- [98] C. Srisathapornphat, and C.-C. Shen, "Coordinated Power Conservation for Ad Hoc Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '02)*, 2002.
- [99] T. Issariyakul, E. Hossain, and D. I. Kim, "Medium Access Control Protocols for Wireless Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Approaches," in *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003, vol. 3, pp. 935-958.
- [100] International Standard ISO/IEC 8802-11; IEEE Std 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHL) specifications, 1999.
- [101] F.A. Tobagi, and L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels: Part II – The hidden terminal problem in carrier sense multiple access and the busy tone solution," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, pp. 1417-1433, 1975.
- [102] D. J. Vergados, D. D. Vergados, and N. A. Pantazis, "An Energy Efficiency Scheme for Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the TEMU 2006*, Herakleion, Crete, 2006.
- [103] L. V., Hoesel, T., Nieberg, J., Wu, and Havinga, P.J.M., "Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks by Cross-Layer Interaction", *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, No. 6, pp. 78-86, 2004.

- [104] C. I., H. Kim, and S. Ha, "Dynamic Voltage Scheduling Technique for Low-Power," in *International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Pages 92-95, 2001.
- [105] T. D. Burd, T. A. Pering, A. J. Stratakos, and R. W. Brodersen, "A Dynamic Voltage Scaled Microprocessor System," in *Proceedings of the IEEE Int'l Solid State Circuits Conference Digest of Technical Papers*, pp. 294-295, 2000.
- [106] T. D. Burd, and R. W. Brodersen, "Design issues for Dynamic Voltage Scaling," in *Proceedings of the Int'l Symp. on Low Power Electronics and Design*, 2000.
- [107] A. Sinha, and A. Chandrakasan, "Dynamic Power Management in wireless sensor Networks," in *IEEE Design and Test of Computers*, vol. 18, Issue 2, pp. 62-74, 2001.
- [108] S. Singh, and C. Raghavendra, "PAMAS: Power Aware Multi-Access protocol with Signaling for Ad hoc networks," *SIGCOMM Computer Communication Review* 28, 1998.
- [109] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, vol.3, pp. 1567-1576, New York, NY, USA, 2002.
- [110] R. Kravets, and P. Krishnam, "Application-Driven power Management for Mobile Communication," in *Wireless Networks* vol. 6, pp. 263-277, 2000.
- [111] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," in *Proceedings of the MobiCom ' 2001*, (Rome, Italy) 2001.
- [112] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, "Adaptive Energy-Conserving Routing for Multi-hop Ad Hoc Networks," *Tech. Rep. 527, USC/Information Sciences Institute*, 2000.
- [113] Z. Guo, R. Yao, W. Zhu, X. Wang, and Y. Ren, "Intra-Superframe Power Management for IEEE 802.15.3 WPAN," *IEEE Communications letters*, vol. 9, Issue3, 2005.
- [114] T. El Batt *et al.*, "Joint Scheduling and Power Control for Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Trans. On Wireless Communications*, vol. 3, Issue 1, pp 74-84, 2004.
- [115] D. D. Vergados, D.J. Vergados, and C. Douligeris, "A new approach for TDMA scheduling in Ad-hoc networks," in *Proceedings of the 10th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications (PWC'05)*, Colmar, France, pp. 107-114, 2005.
- [116] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, "Span: An Energy-efficient Coordination Algorithm for topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks," in *Proceedings of the MobiCom ' 2001*, Rome, Italy, 2001.
- [117] J. Gomez, A. T. Campbell, M. Naghshineh, and C. Bisdikian, "Power aware Routing in Wireless Packet networks," in *Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, (San Diego, CA), 1999.
- [118] B. Das and V. Bharghavan, "Routing in Ad Hoc Networks using Minimum Connected Dominating sets," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications ICC'97*, Berlin, Germany, 1997.
- [119] V. Tsaoussidis, and H. Badr, "TCP-Probing: Towards an error Control Schema with Energy and Throughput Performance Gains," in *Proceedings of the International Conference on Network Protocols*, Osaka, Japan, 2000.
- [120] J. Liu and S. Singh, "ATCP: TCP for Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Journal on Selected Areas Communications*, Wireless Communications Series 10, 2001.

- [121] S. Agrawal and S. Singh, "An experimental Study of TCP's Energy Consumption over a Wireless Link," in *Proceedings of the 4th European personal Mobile Communications Conference* (Vienna, Austria), 2001.
- [122] R.H. Katz, et al., "Mobile networking for smart dust," in *Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99)* Seattle, WA, 1999.
- [123] V. Gutnik and A. P. Chandrakasan, "Embedded Power Supply for Low-Power DSP," in *IEEE Trans. VLSI Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 425-435, 1997.
- [124] A. Wang and A. Chandrakasan, "Energy Efficient System Partitioning for Distributed Wireless Sensor Networks," in *IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 2, pp. 905-908, 2001.
- [125] E. Shih, B. H. Calhoun, S. H. Cho, and A. P. Chandrakasan, "Energy-Efficient Link Layer for Wireless Microsensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Workshop on VLSI*, pp. 16 -2, 2001.
- [126] V. Bharghavan, A. Demers, S. Shenkar, and L. Zhang, "MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM'94*, pp. 212-225, 1994.
- [127] P. Karn, "MACA – a new channel access method for packet radio," in *Proceedings of the ARRL CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference*, pp. 134-140, April 1990.
- [128] J. Deng, and Z.J. Hass, "Dual busy tone multiple access (DBTMA): A new medium access control for packet radio networks," in *Proceedings of the International Conf. Universal Personal Communications*, 1998.
- [129] F.A Tobagi and L. Kleinrock, "Packet Switching In Radio Channels: Part II- The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple Access Modes and the Busy Tone Solution," *IEEE Transactions Communications*, vol. 23, pp. 1417-1443, 1975.
- [130] C.L Fullmer, and G-L-Aceves JJ, "Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for packet radio networks," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 95*, pp. 262-273, 1995.
- [131] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. Pottie, "A Self Organizing Wireless Sensor Network," in *Proceedings of the. 39th Annual Allerton Conference, Comm., Control, and Comp.*, Urbana, IL, 1999.
- [132] D. D. Vergados *et al.*, "The 3G wireless technology in tactical communication networks," in *Proceedings of the IEEE 60th Vehicular technology conference 2004-Fall (2004 VTC – Fall VTS)*, Los Angeles, CA, USA, ISBN CD-ROM: 0-7803-8522-5, 2004.
- [133] D. D. Vergados *et al.*, "Network management approaches in 3G tactical wireless communication networks," in *Proceedings of the AFCEA – IEEE Military Communication Conference (MILCOM 2001)*, IEEE Vol. 2, pp 923-927, USA, 2001.
- [134] D. D. Vergados *et al.*, "New generation features for tactical wireless communication networks," in *Proceedings of the IEEE 52nd Vehicular technology Conference (2000 VTC – Fall VTS)*, IEEE, Vol. 2, pp 542-549, USA, 2000.
- [135] N. A. Pantazis, D. J. Vergados, and D. D. Vergados, "Increasing Intelligent Wireless Sensor Networks Survivability by Applying Energy-Efficient Schemes," *IFIP, Computer Science, Artificial Intelligence Applications and Innovations, Springer*, Boston, vol. 204/2006, pp. 657-664, 2006.

- [136] Y. Yu, B. Krishnamachari, and V. Prassana, "Energy-latency tradeoffs for data collection in wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM*, 2004.
- [137] S. Cui, R. Madan, A. Goldsmith, and S. Lall, "Energy-delay tradeoffs for data collection in TDMA-based sensor networks," in *Proceedings of the ICC South Korea*, 2005.
- [138] S. Agarwal, S. V. Krishnamurthy, R.H. Katz, and S. K. Dao, "Distributed power control in ad-hoc wireless networks," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, San Diego, CA, 2001.
- [139] S-R Ye, Y-C Wang, and Y-C Tseng, "A jamming-based MAC protocol to improve the performance of wireless multihop ad-hoc networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 4, pp. 75-84, 2004.
- [140] S.-L. Wu, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, "Intelligent Medium Access for Mobile Ad Hoc Networks with Busy Tones and Power Control," in *Proceedings of the IEEE J. Selected Areas in Comm.*, Vol. 18, No. 9, pp. 1647-1657, 2000.
- [141] J. Monks, V. Bharghavan, and W.-M. Hwu, "A Power Controlled Multiple Access Protocol for Wireless Packet Networks," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM Conf.*, Vol. 1, pp. 219-228, 2001.
- [142] J. Chen, S.-H. G. Chan, Q. Zhang, W.-W. Zhu, and G. Chen, "PASA: Power Adaptation for Starvation Avoidance to Deliver Wireless Multimedia," *IEEE Journal on selected areas in communications*, Vol. 21, No. 10, pp. 1663-1673, 2003.
- [143] E.-S. Jung, and V. Nitin, "A power control MAC protocol for ad hoc networks," in *Proceedings of the ACM Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2002.
- [144] T. Nandagopal, T.-F. Kim Gao, and V. Bharghavan, "Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks," in *Proceedings of the Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, pp. 87-98, 2000.
- [145] C. L. Fullmer and J. J. G.-L-Aceves, "Solutions to hidden terminal problems in wireless networks," in *Proceedings of the SIGCOMM.*, pp. 39-49, 1977.
- [146] S. Singh, M. Woo, and C.S. Raghavendra, "Power-Aware Routing in Mobile Ad-Hoc Networks," in *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, Dallas, Texas, U.S.A. pp. 181-190, 1998.
- [147] R. Shah *et al.*, "Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks," in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Orlando, FL, 2002.
- [148] T. A. ElBatt, S. V. Krishnamurthy, D. Connors, and S. Dao, "Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad-Hoc Networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 1506-1513, 2000.
- [149] A. Muqattash, and M. M. Krunz, "A Distributed Transmission Power Control Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, No. 2, pp. 113-128, 2004.
- [150] P. Gupta, and P.R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 46, No. 2, pp. 388-404, 2002.
- [151] S. Doshi, S. Bhandare, and T.X. Brown, "An On-Demand Minimum Energy Routing Protocol for a Wireless Ad Hoc Network," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Rev.*, vol. 6, no. 3, pp. 50-66, 2002.

- [152] D. Li, X. Jia, and H. Liu, "Energy efficient broadcast routing in static ad hoc wireless networks," *IEEE trans. On mobile computing*, vol. 3, No. 2, pp. 144-150, 2004.
- [153] M. Cagalj, J. P. Hubaux, and C. Enz, "Minimum-energy broadcast in All-Wireless Networks: NP-Completeness and Distribution Issues," in *Proceedings of the MOBICOM '02*, 2002.
- [154] W. Liang, "Constructing minimum-energy broadcast trees in Wireless ad hoc Networks," in *Proceedings of the MOBICOM '02*, 2002.
- [155] A. Segev, "The Node-Weighted Steiner Tree Problem," *Networks* vol. 17, pp. 1-17. 1987.
- [156] P. Djukic, and S. Valaee, "Reliable and Energy Efficient Transport Layer for Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom '06)*, San Francisco, California, USA, pp. 1-5, 2006.
- [157] Y.G. Iyer, S. Gandham, and S. Venkatesan, "Computer Communications and Networks," in *Proceedings of the 14th International Conference, ICCCN 2005*. 2005.
- [158] J. Liu, F. Zhao, P. Cheung, and L. Guibas, "Apply Geometric Duality to Energy-Efficient Non-Local Phenomenon Awareness using Sensor Networks," *IEEE Wireless Communications*, pp. 62-68, 2004.
- [159] N. Trigoni, Y. Yao, A. Demers, J. Gehrke, and R. Rajaraman, "WaveScheduling: Energy-Efficient Data Dissemination for Sensor Networks," in *Proceedings of the 1st International Workshop On Data Management For Sensor Networks*, pp. 48 – 57, 2004.
- [160] M. Arumugam, and S. Kulkarni, "Self-Stabilizing deterministic TDMA for Sensor Networks," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Distributed Computing and Internet Technology (ICDCIT)*, LNCS3816, pp. 69-81, Bhubaneswar, India, 2005.
- [161] S.C. Ergen, and P. Varaja, "TDMA scheduling algorithms for sensor networks," available at http://paleale.eecs.berkeley.edu/~varaiya/papers_ps.dir/tdmaschedule.pdf, 2005.
- [162] B. Yu, Krishnamachari, and V. Prasana, "Energy-Latency Tradeoffs for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM'04*, Hong Kong, 2004.
- [163] S. Cui, R. Madan, A. Goldsmith, and S. Lall, "Joint Routing, Mac, and Link Layer Optimization in Sensor Networks With Energy Constraints," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC*, 2005.
- [164] S. Gandham, M. Dawande, and R. Prakash, "Link Scheduling in Sensor Networks: Distributed Edge Coloring Revisited," in *Proceedings of the IEEE INFOCOM Miami*, 2005.
- [165] S. Kulkarni, and M. Arumugam, "SS-TDMA: A self-stabilizing MAC for Sensor Networks," *Sensor Network Operations*, IEEE Press, 2005.
- [166] X. Yang, and N.H. Vaydia, "A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-end Delay," in *Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'04)*, 2004.
- [167] X. Yang, and N.H. Vaydia, "A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy Saving and End-to-end Delay," *Technical report, CSL*, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.
- [168] B. Dharanaj, B. Manoj, and C.S. Murty, "A New Energy Efficient Protocol for Minimizing Multi-hop Latency in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communication (PerCom 2005)*, 2005.

- [169] K. Akkaya, and M. Younis, "A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Network Journal*, vol. 3, Issue 3, pp. 325-349, 2005.
- [170] J. Moy, and M. Younis, "Open Shortest Path First Version 2," in *Proceedings of the RFC 2328, IETF*, 1998.
- [171] Z.J. Haas, M.R. Pearlman, and P. Samar, "The Zone Routing protocol (ZRP) for Ad-hoc Networks," *IETF Internet Draft*.
- [172] M. Patel, R. Chandrasekaran, and S. Venkatesan, "Efficient Minimum-Cost Bandwidth-Constrained Routing in Wireless Sensor Networks," Special Issue on "Wireless Networks and Pervasive Computing", *Journal of Pervasive Computing and Communications (JPCC)*, vol 2, Issue 2, 2006.
- [173] K. Scott, and N. Bambos, "Routing and Channel Assignment for Low Power Transmission in PCS," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, pp. 498-502, 1996.
- [174] J-C. Cano, and D. Kim, "Investigating Performance of Power-aware Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks," in *Proceedings of the International Mobility and Wireless Access Workshop (MobiWac '02)*, 2002.
- [175] C.-K. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 138-147, 2001.
- [176] M.J. Hossain, O. Chae, M. Mamun-Or-Rashid, and Choong Seon Hong, "Cost-effective maximum lifetime routing protocol for wireless sensor networks," in *Proceedings of the AICT/SAPIR/ELETE*, pp. 314 - 319, 2005.
- [177] G. Xing, L. Chenyang, Y. Zhang, H. Qingfeng, and R. Pless, "Minimum Power Configuration in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc '05)*, Urbana-Champaign, IL, USA, pp. 390-401, 2005.
- [178] H. Kang, and X. Li, "Power-Aware Sensor Selection in Wireless Sensor Networks," in the *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '06)*, Nashville, TN, USA, 2006.
- [179] V. Ponduru, D. Ghosal, and B. Mukherjee, "A Distributed Coverage-Preserving Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks," *Technical Report, Department of Computer Science*, University of California, Davis, 2004.
- [180] A. Misra, and S. Banerjee, "MRPC: Maximizing Network Lifetime for Reliable Routing in Wireless Environments," in *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '02)*, Orlando, FL, USA, vol. 2, pp. 800- 806, 2002.
- [181] I. Ledvich, and A. Segall, "Threshold-Related Throughput - a New Criterion for Evaluation of Sensor Network Performance," in *Proceedings of the 5th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net 2006)*, Lipari, Sicily, Italy, pp. 1-8, 2006.
- [182] R.C.M. Gomes, Eduardo J. P Souto, J. Kelner, and D. Sadok, "Evaluation of Energy Heuristics to On-Demand Routes Establishment in Wireless Sensor Networks," in *Proceedings of the 3rd the Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS '06)*, Les Ménuires, France, pp. 179-184, 2006.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. **Nikolaos A. Pantazis**, Dimitrios J. Vergados, Dimitrios D. Vergados, and Christos Douligeris, "Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks using Sleep Mode TDMA Scheduling", *Ad Hoc Networks Journal*, Elsevier, 2008.
2. Dimitrios J. Vergados, **Nikolaos A. Pantazis**, and Dimitrios D. Vergados, "Energy Efficient Route Selection Strategies for Wireless Sensor Networks", *ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET) Journal*, 2008.
3. **Nikolaos A. Pantazis**, and Dimitrios D. Vergados, "A Survey on Power Control Issues in Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Surveys*, Vol. 9, No. 4, pp. 86-107, 2007.
4. D. J. Vergados, **N. Pantazis**, and D. D. Vergados, "Enhanced Route Selection for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks", *ACM Third International Mobile Multimedia Communications Conference (MOBIMEDIA 2007)*, Nafpaktos, Greece, 2007.
5. D. J. Vergados, M. Koutsogiannaki, D. D. Vergados, V. Loumos and **N. A. Pantazis**, "Enhanced End-to-End TDMA for Wireless Ad-hoc Networks", *Second Workshop on multiMedia Applications over Wireless Networks (MediaWiN 2007)*, in association with the Twelfth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2007), Aveiro, Portugal, 2007.
6. D. D. Vergados, D. Vouyioukas, **N. A. Pantazis**, I. Anagnostopoulos, D. J. Vergados and V. Loumos, "Decision Support Algorithms and Optimization Techniques for Personal Homecare Environment", *IEEE International Special Topic Conference on Information Technology in Biomedicine (ITAB 2006)*, Ioannina, Greece, October 2006.
7. Dimitrios J. Vergados, Dimitrios D. Vergados and **Nikolaos Pantazis**, "An Energy Efficiency Scheme for Wireless Sensor Networks", *International Conference in Telecommunications and Multimedia (TEMU'06)*, Heraklion, Crete, Greece, July, 2006.
8. **Nikolaos A. Pantazis**, Dimitrios J. Vergados, Dimitrios D. Vergados, "Increasing Intelligent Wireless Sensor Networks Survivability by Applying Energy-Efficient Schemes", *3rd IFIP Conference on Artificial Intelligence Innovations & Applications (AIAI 2006)*, Athens, Greece, June 2006.
9. **Nikolaos A. Pantazis**, Dimitrios D. Vergados and Dimitrios J. Vergados "Power Control Schemes in Tactical Wireless Sensor Networks", *12th European Wireless Conference "Enabling Technologies for Wireless Multimedia Communications"*, Athens, Greece, April 2006.

BOOK CHAPTERS

1. **Nikolaos A. Pantazis**, and D. D. Vergados, "Energy Efficiency and Power Control," Chapter 12, Book: *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*, Jun Zheng, and Abbas Jamalipour, Academic Publishers, Wiley-IEEE Press (to appear).

ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΟ ΕΡΓΟ

1. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, ΔΙΟΝΥΣΗΣ Κ. ΚΑΝΔΡΗΣ, “ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ & ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ”, *Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ Α.Ε.*, 1^η Έκδοση, Αθήνα 2006, ISBN: 960-351-661-9, , ISBN-13 978-960-351-661-3, σελ. 481 (24x17 εκ), (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
2. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΝΕΟ ΕΛΛΗΝΟ-ΑΓΓΛΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΌΡΩΝ”, *Εκδόσεις ΚΑΣΤΑΝΙΩΤΗ*, 1^η Έκδοση, Αθήνα 2004, ISBN: 960-03-3870-1, ISBN-13 978-960-03-3870-6, σελ. 1043 (25x18) (Σκληρό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
3. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ ΝΕΟ ΑΓΓΛΟ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΌΡΩΝ” ΟΡΩΝ, *Εκδόσεις ΚΑΣΤΑΝΙΩΤΗ*, 1^η Έκδοση, Αθήνα 2002, ISBN: 960-03-3304-1, ISBN-13 978-960-03-3304-6, σελ. 657 (25x18) (Σκληρό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
4. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ - Τόμος Α”, *Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ Α.Ε.*, Αθήνα, 1^η Έκδοση 1999, 2^η Έκδοση 2002 ISBN: 960-351-228-1, ISBN-13 978-960-351-228-8, σελ. 509 (24x18) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
5. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΜΕ PLC”, *Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ Α.Ε.*, Αθήνα, 1^η Έκδοση 1998, 2^η Έκδοση 2001, ISBN: 960-351-161- 7, ISBN-13 978-960-351-161-8, σελ. 351 (24x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
6. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΑΓΓΛΟ-ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΌΡΩΝ” *Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ Α.Ε.*, Αθήνα 1997, ISBN: 960-351-142-0, ISBN-13 978-960-351-142-7, σελ. 388 (24x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
7. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ – ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ - Τόμος Α”, *Ελληνικές Τεχνολογικές Εκδόσεις*, Αθήνα, 1^η Έκδοση 1994, ISBN: 960-7570-01-4, ISBN-13 978-960-7570-01-7, σελ. 424 (24x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
8. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ - Ηλεκτρολογικό Σχέδιο και PLC - Τόμος Α”, *Ελληνικές Τεχνολογικές Εκδόσεις*, Αθήνα, 1^η έκδοση 1995, ISBN 960-7570-02-2 (set), ISBN-13 978-960-7570-02-4(set), ISBN 960-7570-03-0, ISBN-13 978-960-7570-03-1, σελ. 335 (24x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
9. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ PLC: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ”, *Εκδόσεις ΙΩΝ*, 1^η Έκδοση 1993, 3^η Έκδοση, ISBN: 960-405-435-X ISBN 960-411-168-X, ISBN-13 978-960-411-168-8, σελ. 416 (24x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
10. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΨΗΦΙΑΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ – Γ”, *Εκδόσεις ΙΩΝ*, 1992, ISBN: 960-405- 308-8 set.
11. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ – ΙΙ”, *Εκδόσεις ΙΩΝ*, 1^η Έκδοση 1992, ISBN: ISBN 960-405-307-8(set), ISBN-13 978-960-405-307-0 (set) ISBN 960-405-309-4, ISBN-13 978-960-405-309-4 σελ. 178 (24x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
12. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ – ΙΙΙ”, *Εκδόσεις ΙΩΝ*, 1^η Έκδοση 1992, 2^η Έκδοση 2001, ISBN: 960-405-307-8 set, ISBN 960-411-177-9, ISBN-13 978-960-411-177-0, σελ. 160 (23x17) (Μαλακό εξώφυλλο) [Κυκλοφορεί]
13. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά (Θεωρία) - Τόμος Α”, *Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ*, 1986.
14. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά (Θεωρία) - Τόμος Β”, *Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ*, 1986.

15. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “Control Systems Laboratory Exercises - Part 1”, [*Electrical Engineering*], Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, 1980. Σημείωση: Το παρόν βιβλίο είναι γραμμένο στην Αγγλική γλώσσα.
16. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΕΦΑΣ, “Control Systems Laboratory Exercises - Part 2”, [*Mechanical Engineering*], Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, 1980. Σημείωση: Το βιβλίο είναι γραμμένο στην Αγγλική γλώσσα.
17. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΑΜΟΥΤΑΛΟΣ, “Εργαστηριακές Ασκήσεις Δεκτου Α.Μ. με Λυχνίες και Στοιχεία από τη Θεωρία - Τόμος Α’”, Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, 1977.
18. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΑΜΟΥΤΑΛΟΣ, “Εργαστηριακές Ασκήσεις Δεκτου Α.Μ. με Τρανζίστορ” και Στοιχεία από τη Θεωρία - Τόμος Β’, Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, 1977.
19. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “English Grammar exclusively for Greek students, Book 1”, Athens, 1977, Προσωπική Έκδοση.
20. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “English Grammar exclusively for Greek students, Book 2”, Athens, 1977, Προσωπική Έκδοση.
21. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ”, Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, 1976.
22. **ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ**, “ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ”, Έκδοση ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, 1976.

Σημείωση:

- Τα βιβλία υπ’ αριθμ. 15 και 16 έχουν χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες των σπουδαστών του Ξενόγλωσσου (Λιβύη) Τμήματος.
- Τα βιβλία 19 και 20 έχουν χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες των Φροντιστηρίων ξένων γλωσσών.

Ελληνικά Περιοδικά

1. “Ηλεκτρολόγος”, “Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές”, Τεχνοεκδοτική.
 - α. Τεύχος 103, Ιούνιος 2000.
 - β. Τεύχος 104-105, Ιούλιος-Αύγουστος 2000 (διπλό τεύχος).
 - γ. Τεύχος 106, Σεπτέμβριος 2000.
 - δ. Τεύχος 107, Οκτώβριος 2000.
2. “Μετάδοση Ισχύος”, “Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές”, Τεχνοεκδοτική.
 - α. Τεύχος 59, Σεπτέμβριος 2000.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ



Ο Νικόλαος Α. Πανταζής (npantazis@aegean.gr; nspantazis@teiath.gr) γεννήθηκε στην Αθήνα το 1948. Έλαβε τους εξής τίτλους σπουδών: Δίπλωμα Ηλεκτρονικού από την Ανωτέρα Σχολή Ηλεκτρονικών “Αναστασιάδη” το 1970, Δίπλωμα Παιδαγωγικών Σπουδών από την Παιδαγωγική Τεχνική Σχολή ΠΑΤΕΣ/ΣΕΛΕΤΕ το 1973, Δίπλωμα Εκπαιδευτικού Τεχνολόγου Ηλεκτρονικού Μηχανικού από την ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ το 1980, B.Sc. in Electrical engineering από το Tennessee C. University, Tenn. USA το 1981, Πιστοποιητικό Εξειδίκευσης στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και τα PLCs, μετά από Απόφαση του Ι.Τ.Ε. Έχει λάβει αρκετά Πιστοποιητικά Εξειδίκευσης, σε διάφορα θέματα της ειδικότητάς του, από πολλά Πανεπιστήμια και Εταιρείες του εξωτερικού, όπως: Πανεπιστήμιο της Grenoble, Παρίσι (Γαλλία), Πανεπιστήμιο PAISLEY, της Σκωτίας, SIEMENS, Μόναχο Γερμανίας, κ.α.

Το Νοέμβριο του 1974 διορίστηκε στην ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ όπου και ανέλαβε τα καθήκοντα του προϊσταμένου των Εργαστηρίων Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου και Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, θέση την οποία διατήρησε επί 28 ολόκληρα έτη, μέχρι τον Ιούλιο του 2002. Τον Ιούλιο του 1986 εντάχθηκε στη βαθμίδα του καθηγητή Εφαρμογών, με παράλληλη τοποθέτηση στο Τμήμα Ηλεκτρονικής της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΤΕΙ Αθήνας, και με διάθεση στην ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ, μέχρι τον Αύγουστο του 2002. Από το ίδιο έτος, και μέχρι σήμερα, ανήκει οριστικά στο Τμήμα Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Αθήνας διδάσκοντας Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Βιομηχανική Αυτοματοποίηση, Ρομποτική και Ψηφιακά Ηλεκτρονικά.

Έχει ασχοληθεί με τη συγγραφή και τη δημοσίευση είκοσι δύο βιβλίων σε θέματα σχετικά με την ειδικότητά του (Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Ψηφιακά Ηλεκτρονικά, Βιομηχανική Αυτοματοποίηση, και Ρομποτική).

Έχει συγγράψει, μαζί με τον Δρ. Δημήτρη Δ. Βέργαδο, ένα κεφάλαιο που αφορά τον «Έλεγχο Ισχύος σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων» στο υπό έκδοση βιβλίο του Εκδοτικού Οίκου, John Wiley Press.

Έχει αρκετές δημοσιεύσεις σε διεθνή έγκυρα περιοδικά και συνέδρια με κριτές, ενώ έχει επίσης διατελέσει και ο ίδιος κριτής.

Από το Νοέμβριο του 2004 είναι υποψήφιος Διδάκτορας στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου, συμμετέχοντας ενεργά σε δύο ερευνητικά προγράμματα που αφορούν τις ασύρματες επικοινωνίες. Από το 2004 είναι IEEE Member. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα επικεντρώνονται κυρίως στον έλεγχο ισχύος και την εξοικονόμηση ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

ΑΓΓΛΟΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ

- A/D** (analog-digital) ψηφ. αναλογικός-ψηφιακός # *A/D converter* ψηφ. αναλογικό/ψηφιακός μετατροπέας
- acceptable-power-to-send** (APTS) δ.υ. παραδεκτή ισχύς για την αποστολή μηνυμάτων
- ACK** (acknowledgement) επιβεβαίωση # *acknowledgement message* δ.υ. μήνυμα επιβεβαίωσης
- active** ενεργός # *active mode* ενεργός κατάσταση, ενεργός τρόπος λειτουργίας # *active power conservation mechanisms* ενεργοί μηχανισμοί ελέγχου και διατήρησης της ισχύος # *active state* ενεργός κατάσταση
- actor** ενεργοποιητής
- ad hoc** 1. επί τούτου, αναφερόμενος σε ειδικό σκοπό, για συγκεκριμένο σκοπό. 2. Στα δίκτυα ad hoc η τοπολογία του δικτύου θα πρέπει να δομηθεί σε πραγματικό χρόνο και επιπλέον να αναβαθμίζεται περιοδικά σε περίπτωση που κάποιος από τους κόμβους παρουσιάσει κάποια βλάβη ή καταστραφεί, ή όταν ένας καινούργιος κόμβος έλθει να προστεθεί στο δίκτυο. Επιπλέον, σε αυτά τα δίκτυα δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη σταθμού βάσης.
- ADC** (analog/digital converter) αναλογικό/ψηφιακός μετατροπέας
- administrative tasks** εργασίες διαχείρισης
- admissibility** παραδεκτότητα
- advertised hop-count** δ.υ. αναπαριστά το μέγιστο αριθμό hops (βημάτων) των πολλαπλών διαδρομών που είναι διαθέσιμα σε κάποιον κόμβο
- AFC** (active feasibility condition) δ.υ. ενεργός συνθήκη επιτευξιμότητας
- agents** πράκτορες, πακέτα με μεγάλη διάρκεια ζωής
- aggregate** συναθροίζω, ολικό άθροισμα, συνολικός # *aggregate channel utilization* συνολική χρήση καναλιού
- aggregation** συγκέντρωση, συσσώρευση, συσσωμάτωση, ολικό άθροισμα, σύνολο, συνονθύλευμα # *aggregation tree* δέντρο συνάθροισης
- aggregator** συσσωρευτής, # *aggregator node* κεντρικός ή κύριος κόμβος συσσώρευσης δεδομένων
- allocation** κατανομή, διανομή, εκχώρηση
- ALT** (automatic link transfer) αυτόματη μεταφορά ζεύξης (συνώνυμο του handoff)
- AODV** (ad hoc on-demand distance vector routing protocol) πρωτόκολλο δρομολόγησης ad hoc κατ' απαίτηση μέσω διανυσμάτων απόστασης
- AODV-BR** (ad hoc on-demand distance vector – backup routing protocol) εφεδρικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, ad hoc πρωτόκολλο δρομολόγησης κατ' απαίτηση μέσω διανυσμάτων απόστασης.
- AOMDV** (ad hoc on-demand multipath distance vector routing protocol) πρωτόκολλο δρομολόγησης ad hoc κατ' απαίτηση μέσω διανυσμάτων απόστασης πολλαπλών διαδρομών.
- application** εφαρμογή # *application layer* επίπεδο εφαρμογής
- APs** (Access Points) σημεία πρόσβασης
- APTS** (acceptable-power-to-send) παραδεκτή ισχύς για την αποστολή μηνυμάτων
- AREP** (address reply) απάντηση στη διεύθυνση
- AREQ** (address request) απαίτηση διεύθυνσης
- ARP** (address resolution protocol) πρωτόκολλο ανάλυσης ή διαχωρισμού διεύθυνσης
- ARQ** (automatic repeat request) αυτόματη απαίτηση επανάληψης
- ASIC** (application-specific integrated circuit) τεχνολογία ολοκληρωμένου κυκλώματος συγκεκριμένης εφαρμογής
- association** συσχέτιση # *association class* κλάση συσχέτισης
- ATIM** (announcement traffic indication message) μήνυμα με ένδειξη αναγγελίας κίνησης δικτύου
- attribute** χαρακτηριστικό # *attribute-based* που έχει ως βάση το χαρακτηριστικό
- authentication** πιστοποίηση, επισημοποίηση, θεώρηση έγγραφου
- average** μέσος όρος # *average arrival rate* μέσος ρυθμός άφιξης (π.χ. εκπομπής/λήψης δεδομένων)
- awake mode** κατάσταση λειτουργίας αφύπνισης
- AWMN** (Athens Wireless Metropolitan Network) ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο Αθηνών
- backbone** κορμός, ραχοκοκαλιά # *backbone-based approach* προσέγγιση κορμού # *backbone infrastructure* υποδομή κορμού # *backbone structure* δομή κορμού
- back-office** λογισμικό υποστήριξης
- backup** εφεδρικός # *backup routing (BR) protocol* εφεδρικό πρωτόκολλο δρομολόγησης
- BAN** (Body Area Networks) δίκτυα αποτελούμενα από αισθητήρες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικά σημεία του σώματος και μπορούν να επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους με τη βοήθεια ραδιοκυμάτων ή ακουστικών σημάτων.
- battery** μπαταρία, συστοιχία # *battery cost function* λειτουργικό κόστος μπαταρίας
- benchmark** τεχνική μέτρησης και αξιολόγησης της απόδοσης
- BER** (bit error rate) ταχύτητα εμφάνισης σφάλματος σε δυαδικά ψηφία
- biochips** βιοαισθητήρες
- Bluetooth** είναι ένα χωρίς υποδομή σύστημα μικρής εμβέλειας που έχει ως στόχο να αντικαταστήσει με ραδιοζεύξεις τα καλώδια επικοινωνίας μεταξύ των ηλεκτρονικών τερματικών συσκευών των χρηστών. Είναι ένας ακόμη τρόπος ενδοκομβικής ασύρματης επικοινωνίας στα δίκτυα αισθητήρων. Αποτελεί ένα πρότυπο

το οποίο προσφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, εφόσον βέβαια πρόκειται για ασύρματες επικοινωνίες μικρής εμβέλειας.

bootup period περίοδος εκκίνησης

botnets δίκτυα από μολυσμένους υπολογιστές

broadcast εκπομπή, δημοσιοποίηση # *broadcast-directed tree* δέντρο κατευθυνόμενο από την εκπομπή # *broadcast messages* μηνύματα δημοσιοποίησης, μηνύματα εκπομπής

BT-node Είναι μία ασύρματη αυτόνομη πλατφόρμα μετάδοσης και επεξεργασίας δεδομένων η οποία βασίζεται σε ένα μικροεπεξεργαστή τύπου AVR και έναν πομποδέκτη τεχνολογίας Bluetooth.

buffer overflow υπερχείλιση καταχωρητή

CA (collision avoidance) αποφυγή σύγκρουσης

caching προσωρινή αποθήκευση

CACP πρωτόκολλο ελέγχου αποδοχής

CACTUS (context-aware communications, terminal, and user) επικοινωνίες ενημερωμένες όσον αφορά το πλαίσιο, το τερματικό και το χρήστη

capture phenomenon φαινόμενο κατάληψης

care of address διεύθυνση IP έγκυρη στο ξένο δίκτυο που επισκέπτεται ο κινητός κόμβος

carrier φέρον (κύμα) # *carrier frequency* συχνότητα φέροντος # *carrier sense* ανίχνευση φέροντος

CDA (conflict detection allocation) κατανομή ανίχνευσης συγκρούσεων

CDMA (code-division multiple access) πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα

cellular κυψελωτός # *cellular networks* κυψελωτά δίκτυα

central κεντρικός # *central aggregator node* κεντρικός κόμβος συσσώρευσης δεδομένων

CFA (conflict-free allocation) κατανομή απαλλαγμένη από συγκρούσεις

CHAMP (caching and multipath routing protocol) Πρωτόκολλο δρομολόγησης προσωρινής αποθήκευσης και πολλαπλών διαδρομών. Το CHAMP είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιεί προσωρινή αποθήκευση δεδομένων και δρομολόγηση ελάχιστου μονοπατιού ώστε να ελαχιστοποιήσει την απώλεια πακέτων λόγω συχνών απωλειών διαδρομών.

chance ευκαιρία # *chance of collision* ευκαιρία σύγκρουσης

channel κανάλι # *channel-access protocol* πρωτόκολλο πρόσβασης στο κανάλι # *channel capture phenomenon* φαινόμενο κατάληψης του καναλιού # *channel congestion* συμφόρηση καναλιού # *channel reuse* επαναχρησιμοποίηση καναλιού

chip 1. ψηφίδα. 2. ολοκληρωμένο κύκλωμα, τσιπ

circuit κύκλωμα # *circuit design* σχεδίαση κυκλωμάτων

CISC (complex instruction set computer) υπολογιστής συνόλου σύνθετων (πολύπλοκων) εντολών

class κλάση, τάξη # *class diagram* διάγραμμα κλάσεων

clock frequency συχνότητα ρολογιού

cluster συστοιχία, συστάδα, ομάδα # *cluster-based* βασισμένος σε ομάδες

COB (chip on board) τσιπ στην πλακέτα

co-channel interference ομοδιαυλική παρεμβολή

code κώδικας # *code division* διαίρεση κώδικα # *coding* κωδικοποίηση

cognitive γνωστικός # *cognitive field* γνωστικό πεδίο # *cognitive radios* σκεπτόμενοι ραδιοπομποί

coherent κατανοητός, συναφής, συνδεδεμένος # *coherent-based* βασισμένος στη συνάφεια

collaboration συνεργασία # *collaboration diagram* διάγραμμα συνεργασίας

collision σύγκρουση # *collision probability* πιθανότητα σύγκρουσης

communication επικοινωνία # *communication and documentation sciences* επιστήμες επικοινωνίας και τεκμηρίωσης # *communication overhead* επικοινωνιακή επιβάρυνση # *communication pairs* ζεύγη επικοινωνίας # *communication phase* φάση επικοινωνίας # *communication sciences* επιστήμες επικοινωνίας # *communication unit* μονάδα επικοινωνίας

compass routing method μέθοδος δρομολόγησης καμπύλης τροχιάς

complex σύνθετος, πολύπλοκος, σύμπλοκος

component αντικείμενο, ψηφίδα, συστατικό

composition σύνθεση

computation υπολογισμός # *computational load* υπολογιστικό φορτίο

computing science επιστήμη υπολογιστών

confidence interval διάστημα εμπιστοσύνης

conflict σύγκρουση, αντιπαλότητα # *conflict-free slot* θυρίδα απαλλαγμένη από συγκρούσεις

congested υπερφορτωμένος, υπερπλήρης, φραγμένος, με συνωστισμό

congestion συμφόρηση, στρίμωγμα, συνωστισμός # *congestion avoidance* αποφυγή συμφόρησης

connection σύνδεση # *connectivity* συνδεσιμότητα # *connector* συνδετήρας

control έλεγχος # *control channel* κανάλι ελέγχου # *control flow* ροή ελέγχου. Έχει αντικαταστήσει τα παλαιότερα διαγράμματα ροής (flowcharts) # *control message overhead* επιβάρυνση μηνυμάτων ελέγχου

converge συγκλίνω, σύγκλιση # *converge cast* πρότυπο σύγκλισης

convolutional συνελικτικός # *convolutional code* συνελικτικός κώδικας

CoolRunner-II Επεξεργαστής ο οποίος λειτουργεί στα 1.8 V με συχνότητα 20 MHz και απαιτεί ρεύμα ίσο με 17.22 mA, πράγμα το οποίο τον καθιστά ενεργοβόρο, εφόσον συγκριθεί με κάποιον άλλο αντίστοιχο μικροελεγκτή.

coordination συντονισμός # *coordination function* λειτουργία συντονισμού

critical κρίσιμος # *critical path delay* κρίσιμη χρονική καθυστέρηση μονοπατιού

cross-layer design διαστρωματικό σχέδιο, συνδυαστική σχεδίαση στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

CSMA (carrier-sense multiple access) πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος σήματος

CSMA/CA (carrier-sense multiple access/collision avoidance) πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης

CTS (clear-to-send) ελεύθερος για αποστολή, παροχή δυνατότητας για αποστολή δεδομένων

current τρέχων, ρεύμα # *current connection* τρέχουσα σύνδεση

DAD (duplicate address detection) προσδιορισμός (ή ανίχνευση) αντίγραφου εντολής

DAG (directed acyclic graph) κατευθυνόμενος ακυκλικός γράφος

dark space IP διευθύνσεις οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται από χρήστες.

DARPA (US Defense Advanced Research Project Agency) υπηρεσία έργων προηγμένης αμυντικής έρευνας των ΗΠΑ

data δεδομένα # *data aggregation* συσσώρευση δεδομένων # *data centric* δεδομένο-κεντρικός # *data-centric routing* δεδομένο-κεντρική δρομολόγηση # *data dissemination* διασπορά δεδομένων # *data fusion* συγχώνευση (συσσώρευση) δεδομένων # *data link layer* επίπεδο ζεύξης δεδομένων # # *data-processing* επεξεργασία δεδομένων # *data router* δρομολογητής δεδομένων # *data streams* δεδομορορεύματα

DBTMA (dual busy tone multiple access) πολλαπλή πρόσβαση μέσου με διπλό τόνο κατειλημμένου

DCA (direct chip attach) απευθείας προσάρτηση του τσιπ

DC (direct current) συνεχές ρεύμα # *DC-DC converter* μετατροπέας συνεχούς ρεύματος σε συνεχές

DCF (distributed coordination function) λειτουργία κατανομής συντονισμού

debugging αποσφαλμάτωση, διαδικασία ανεύρεσης σφάλματος

declarative queries δηλωτικά ερωτήματα

dedicated control channel αφιερωμένο κανάλι ελέγχου

delivery παράδοση # *delivery time* χρόνος παράδοσης

demand-based βασιζόμενος στην απαίτηση

denial of service άρνηση παροχής υπηρεσίας

deplete αδειάζω # *depleted* άδειος

deployment ανάπτυξη # *deployment diagram* διάγραμμα ανάπτυξης

derivative παράγωγος

design μελέτη, σχεδίαση

destination προορισμός # *destination station* σταθμός προορισμού

device συσκευή # *device adaptation* προσαρμοστικότητα συσκευής

DHCP server Μηχάνημα το οποίο δίνει διευθύνσεις στα μηχανήματα ενός τοπικού δικτύου.

digital ψηφιακός # *digital circuit design* ψηφιακή σχεδίαση κυκλωμάτων

dilation διεύρυνση

direct απευθείας, άμεσος # *direct communication* απευθείας επικοινωνία

directed κατευθυνόμενος, διατεταγμένος # *directed diffusion (DD)* κατευθυνόμενη διάχυση # *directed pair* διατεταγμένο ζεύγος

disk δισκέτα, δίσκος # *disk drive* οδηγός δισκέτας

dissemination points σημεία διασποράς

distance vector routing δρομολόγηση μέσω διανυσμάτων απόστασης

distinguishable διακριτός

distributed κατανομημένος # *distributed approach* κατανομημένη προσέγγιση # *distributed power control algorithms* κατανομημένοι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος # *distributed protocol* κατανομημένο πρωτόκολλο

documentation τεκμηρίωση # *documentation sciences* επιστήμες τεκμηρίωσης

dot nodes κόμβοι που έχουν το μέγεθος ενός νομίσματος

DPM (dynamic power management) δυναμική διαχείριση ισχύος

drawback αδυναμία, ελάττωμα, μειονέκτημα, ατέλεια, ψεγάδι

DS/CDMA (Direct-Sequence/Code Division Multiple Access) άμεση ακολουθία/διαίρεση κώδικα πολλαπλής πρόσβασης

DSP (Digital Signal Processor) επεξεργαστής ψηφιακού σήματος

DSR protocol (Dynamic Source Routing) δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής

dual διπλός # *dual busy tone* διπλός τόνος κατειλημμένου # *dual-core* διπλού πυρήνα

duplicated messages αντίγραφα μηνυμάτων

duty καθήκον # *duty cycle operation* κατανομημένος κύκλος λειτουργίας # *duty time* χρόνου δέσμευσης

DVS 1. (Dynamic Voltage Scaling) δυναμική κλιμάκωση της τάσης. 2. (Dynamic Voltage Scheduling) δυναμικός χρονοπρογραμματισμός τάσης

EAR (Energy-Aware Routing) δρομολόγηση με ενημέρωση της ενέργειας

ECG (Electro-Cardio-Gram) ηλεκτροκαρδιογράφημα

ECTS (European Credit Transfer System) Ευρωπαϊκό σύστημα μεταφοράς πιστωτικών μονάδων

edge παρυφή, χείλος, άκρο

effect επίδραση, αποτέλεσμα, επακόλουθο

efficiency απόδοση, αποδοτικότητα, επίδοση

efficient αποτελεσματικός, αποδοτικός # *efficient flooding* αποτελεσματική υπερχειλίση

eigenfunction γερμ. χαρακτηριστική συνάρτηση, ιδιοσυνάρτηση

eigenstate γερμ. χαρακτηριστική κατάσταση, ιδιοκατάσταση

eigenvalue γερμ. χαρακτηριστική ρίζα (ή αξία)

eigenvector γερμ. χαρακτηριστικό άνυσμα

electrical ηλεκτρικός, ηλεκτρολογικός # *electrical engineer* ηλεκτρολόγος μηχανικός
electro-mechanical system ηλεκτρομηχανικό σύστημα
electronics ηλεκτρονικά # *electronics engineer* ηλεκτρονικός μηχανικός
embedded ενσωματωμένος, ένθετος # *embedded system* ένθετο σύστημα
end-to-end delay χρονική καθυστέρηση απ' άκρη σ' άκρη
end-user τελικός χρήστης
energy ενέργεια # *energy broadcast* εκπομπή ενέργειας # *energy efficiency* απόδοση ενέργειας # *energy efficient* ενεργειακά αποδοτικός # *energy efficient signal processing algorithms* ενεργειακά αποδοτικοί αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος # *energy efficient system partitioning* ενεργειακά αποδοτικός συστημικός διαμερισμός # *energy gain threshold* κατώφλι κέρδους ενέργειας # *energy-optimal cross-layer design* ενεργειακά βέλτιστο διαστρωματικό σχέδιο εκτέλεσης έργου # *energy saving algorithm* αλγόριθμος εξοικονόμησης ενέργειας # *energy wastage sources* ενεργοβόρες πηγές
environmental περιβαλλοντικός # *environmental sciences* επιστήμες περιβάλλοντος
erase διαγραφή # *erase route process* διαδικασία διαγραφής διαδρομής
error σφάλμα # *error correction* διόρθωση σφαλμάτων # *error-free* χωρίς σφάλματα # *error-free packet reception* παραλαβή πακέτου χωρίς σφάλματα
ESRT (Event-to-Sink Reliable Transport) αξιόπιστο πρωτόκολλο μεταφοράς από φαινόμενο→σταθμό βάσης
estimation αποτίμηση # *estimation theory* θεωρίας αποτίμησης
Euclidian distance Ευκλείδειος απόσταση
EUI (Extended Unique Identifier) εκτεταμένος μοναδικός αναγνωριστής
event γεγονός # *event agents* πράκτορες γεγονότων # *event-to-sink* από το γεγονός→σταθμό βάσης
exposed terminal εκτιθέμενο τερματικό
FA (Forward Algorithm) αλγόριθμος προώθησης
fairness δικαιοσύνη, αμεροληψία
FAMA (Floor Acquisition Multiple Access protocol) πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης για την απόκτηση του χαμηλότερου ορίου
fan-out μέγιστο φορτίο οδήγησης εξόδου, ικανότητα οδήγησης εξόδου
fault tolerance ανοχή σε σφάλματα
FDA (Food and Drug Administration) διαχείριση τροφίμων και φαρμάκων
feasibility επιτευξιμότητα, κατορθωσιμότητα, δυνατότητα επίτευξης
FEC (Forward Error Correction) διόρθωση διαβιβαζόμενων σφαλμάτων
field πεδίο # *field area* θεματική περιοχή, θεματικό πεδίο # *fields of study* γνωστικά πεδία
fine-grain λεπτός διαχωρισμός # *fine-grain power conservation* διατήρηση ισχύος με μηχανισμούς fine-grain
fixed σταθερός # *fixed allocation* σταθερή κατανομή
flash memory μνήμη flash
flat επίπεδος, ομοιόμορφος # *flat-based routing* ομοιόμορφη δρομολόγηση # *flat network* ομοιόμορφο (ή επίπεδο) δίκτυο # *flat pack* επίπεδη συσκευασία
flooding πλημμύρα, υπερχειλίση. Ένας κόμβος στέλνει όλες τις πληροφορίες που έχει στους υπόλοιπους γειτονικούς του κόμβους και αυτοί τις προωθούν στους δικούς τους γειτονικούς κόμβους και ούτω κάθε εξής. Κάθε κόμβος ανανεώνει τον πίνακά του χρησιμοποιώντας τις νέες πληροφορίες κόστους σύνδεσης που έλαβε από τις πλημμύρες.
flowchart διάγραμμα ροής
forward direction ορθή φορά # *forwarder* διεκπεραιωτής, μεταβιβαστής, διαβιβαστής πληροφοριών
forwarding προώθηση, διεκπεραίωση # *forwarding node* κόμβος προώθησης μηνυμάτων
FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) πίνακες πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου
fragmentation κατατεμαχισμός, κατακερματισμός
frame πλαίσιο, πλήρης κύκλος ακρόασης/ύπνου # *framework* πλαίσιο
frequency συχνότητα # *frequency synthesizer* συνθέτης συχνοτήτων
FT (Forwarding Table) πίνακας προώθησης
functionality λειτουργικότητα
fusion συγχώνευση, συσσώρευση
GA (Gateway Advertisement) αναγγελία πύλης
gateway πύλη, σταθμός βάσης
gathering συλλογή
GEDIR (Geographic Distance Routing) δρομολόγηση σε γεωγραφική απόσταση
generator γεννήτρια
geocasting γεω-εκπομπή
global καθολικός, γενικός, παγκόσμιος # *global addressing* καθολική διευθυνσιοδότηση
GPS (Global Positioning System) παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης
gradient άνυσμα, βαθμωτό άνυσμα
graph γράφος, γράφημα # *graphical* γραφικός # *graphical notation* γραφικός συμβολισμός
grid δίκτυο, πλέγμα, δικτυακό πλέγμα
GS (Gateway Solicitation) δελεασμός πύλης
half-duplex ημιαμφίδρομης μετάβασης
handoff διαδικασία αλλαγής καναλιού (συχνότητας, χρονοθυρίδας, κώδικα διασποράς, ή συνδυασμός όλων αυτών) η οποία σχετίζεται με την τρέχουσα σύνδεση, και ενώ είναι σε εξέλιξη μία κλήση
handover διαδικασία αλλαγής καναλιού, συνώνυμο του handoff

handshake χειραψία # *handshake signaling* σηματοδότηση χειραψίας
hard threshold κατώφλι υψηλής ενέργειας
hardware υλικό μέρος, υλικιστικό μέρος # *hardware platform* ηλεκτρονική κάρτα
HDP (High Density Packaging) πακετάρισμα υψηλής πυκνότητας
hibernation περιοδική διαχείριση, χειμέρια νάρκη, λήθαργος
hidden node κρυμμένος κόμβος
hierarchical ιεραρχικός # *hierarchical-based routing protocol* πρωτόκολλο ιεραρχικής δρομολόγησης
honeypot βάζο με μέλι. Υπολογιστής ο οποίος παρακολουθεί IP διευθύνσεις μη χρησιμοποιούμενες από χρήστες.
hop βήμα (διαδρομής), άλμα # *hop-by-hop* βήμα-προς-βήμα, από τμήμα σε τμήμα διαδρομής
host κεντρικός υπολογιστής, οικοδεσπότης
hotspot ασύρματο σημείο πρόσβασης
HRM (Heart Rate Monitor) συσκευή παρακολούθησης των σφυγμών της καρδιάς
hybrid υβριδικός # *hybrid protocols* υβριδικά πρωτόκολλα (χρησιμοποιούν συνδυασμό των δύο πρωτοκόλλων: Proactive και Reactive)
IARP (Intrazone Routing Protocol) ενδοζωνικό πρωτόκολλο δρομολόγησης, πρωτόκολλο δρομολόγησης στην εμβέλεια ενός κόμβου
ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) Διεθνής Επιτροπή για την προστασία από τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία
identifier αναγνωριστής, προσδιοριστής
idle ανενεργός, αδρανής, άεργος # *idle cycle* αδρανής κύκλος # *idle listening* ανενεργός ακρόαση, παθητική ακρόαση, ακρόαση στη μη ενεργό κατάσταση # *idle mode* άεργος τρόπος λειτουργίας, κατάσταση αναμονής. Οι κόμβοι βρίσκονται στην άεργη κατάσταση τον περισσότερο χρόνο της λειτουργίας τους, σε περίπτωση όπου δεν ανιχνεύεται κάποιο γεγονός στο περιβάλλον τους. # *idle state* παθητική κατάσταση, μη ενεργός κατάσταση, κατάσταση αδράνειας
IDS (Intrusion Detection System) σύστημα ανίχνευσης αυθαίρετης εισόδου
IDSQ (Information-Driven Sensor Querying) τεχνική αναζήτησης αισθητήρα μέσα από πληροφορίες
IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Ινστιτούτο ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών
IERP (Interzone Routing Protocol) πρωτόκολλο για τη δρομολόγηση μεταξύ γειτονικών κόμβων
IFS (Interval Frame Space) το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των μεταδιδόμενων πλαισίων
I-ID (Interface Identifier) προσδιοριστής διεπαφής
iMote Τύπος αισθητήριου κόμβου ο οποίος αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα της εταιρείας Intel και κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στο εμπόριο το 2003. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αποτελεί έναν αισθητήριο κόμβο με υψηλό εύρος ζώνης συχνοτήτων, όπως είναι το BT Node. Η διαφορά του με άλλους κόμβους είναι η σημαντικά μεγαλύτερη on-chip μνήμη του (512 Kbytes flash memory και 64 Kbytes SRAM), επειδή χρησιμοποιεί το μικροεπεξεργαστή ARM7TDMI 12-48 MHz
implosion συγκέντρωση, πλήρωση κενών
in-network ενδοδικτυακός # *in-network processing* ενδοδικτυακή επεξεργασία
in-system ενδοσυστημικός, μέσα στο ίδιο το σύστημα
incoming source αφικνούμενη πηγή
incongruence δυσαρμονία, ασυμφωνία
index number αριθμός δεικτοδότησης
indication ένδειξη # *indication message* μήνυμα ένδειξη
infrared (IR) υπέρυθρος
infrastructure υποδομή # *infrastructure-based* που βασίζεται στην υποδομή
initialization αρχικοποίηση # *initialization process* διαδικασία αρχικοποίησης
initiative determination αρχή της πρωτοβουλίας
inset ένθετος(π.χ. γράφος μέσα σε γράφο)
instance στιγμιότυπο
integrated circuits (ICs) ολοκληρωμένα κυκλώματα # **integration** ολοκλήρωση, εντοποίηση
interaction αλληλεπίδραση, συνεργασία # *interaction diagrams* διαγράμματα αλληλεπίδρασης (διαγράμματα ακολουθίας ή/και διαγράμματα συνεργασίας) ή και άτυπες περιγραφές κειμένου
inter-arrival time χρόνος μεταξύ των αφίξεων # *inter-arrival time range* χρονική περιοχή μεταξύ αφίξεων
interchange ανταλλαγή # *interchangeable* ανταλλάξιμος
inter-cluster communication επικοινωνία μεταξύ των συστοιχιών
interdisciplinary fields of study διεπιστημονικά γνωστικά πεδία
interface διεπαφή, σύνδεσμος συμβατότητας, μονάδα διασύνδεσης. Σύνολο λειτουργιών που ορίζουν την εξωτερική συμπεριφορά ενός αντικειμένου. # *interface identifier* (I-ID) προσδιοριστής διεπαφής
interference παρεμβολή, παρενόχληση
interfering παρεμβαλλόμενος # *interfering nodes* παρεμβαλλόμενοι κόμβοι
Internet Διαδίκτυο, Ιντερνέτ # *Internet worm* ιός υπολογιστών που εξαπλώνεται αυτόματα μέσω δικτύου
internetworking διαδικτυακή λειτουργία
intra-task timeslots χρονοθυρίδες μεταξύ των επιτελούμενων εργασιών
intrazone ενδοζωνικός
IP (Internet Protocol) πρωτόκολλο Διαδικτύου # *IP address* παγκόσμιο μοντέλο διευθυνσιοδότησης
IPC protocol (Ideal Power Controlled protocol) ιδανικό πρωτόκολλο ελεγχόμενης ισχύος

IR 1. (Infrared) υπέρυθρος. 2. (Impulse Radio) ασύρματη μετάδοση παλμών

ISM band (Industrial, Scientific and Medicine) band βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη συχνοτήτων (συχνότητα 433 MHz για την Ευρώπη και 916 MHz για τη Βόρεια Αμερική). Το μεγάλο πλεονέκτημα της ζώνης συχνοτήτων ISM είναι η δωρεάν χρήση της, το τεράστιο φάσμα και η παγκόσμια διαθεσιμότητα.

ISP (In-System Programmable) προγραμματιζόμενος μέσα στο ίδιο το σύστημα

IT-manager υπεύθυνος έργων πληροφορικής

LAN (Local Area Network) δίκτυο τοπικής εμβέλειας

latency λανθάνουσα κατάσταση, χρονική καθυστέρηση, χρονική διάρκεια απόκρισης, χρόνος απόκρισης. Ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή του ερεθίσματος μέχρι τη στιγμή της απόκρισης σε συστήματα βάσης δεδομένων αισθητήρων.

learning μάθηση # *learning process* διαδικασία μάθησης

lifespan διάρκεια ζωής

link ζεύξη, σύνδεση, διασύνδεση, ενδιάμεσος σύνδεσμος, κρίκος # *link layer* επίπεδο ζεύξης # *link state routing* δρομολόγηση κατάστασης σύνδεσης # *link transfer* μεταφορά ζεύξης

load φορτίο # *load balancing* ισορροπία φορτίου, εξισορρόπηση φόρτου

localization εντοπισμός # **localized search** επιτόπια έρευνα

location θέση # *location-based routing protocols* πρωτόκολλα θεσικής δρομολόγησης # *location-finding system* σύστημα εντοπισμού θέσης

long data streams δεδομενορεύματα μεγάλου μήκους # **long-lived** μακρόβιος, με μεγάλη διάρκεια ζωής

look-ahead πρόβλεψη

loop βρόχος # *loop-free* χωρίς βρόχους, μη εξαρτώμενος από βρόχους, που δεν περιέχει βρόχους

LOS (Line Of Sight) γραμμή οπτικής επαφής

low-channel bit rate χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δυαδικών ψηφίων μέσα στο κανάλι

LMMER (Low-Cost Min-Max Energy Routing) **algorithm** αλγόριθμος δρομολόγησης χαμηλού κόστους με την ελάχιστη-μέγιστη ενέργεια

low-power signal processor επεξεργαστής σήματος χαμηλής ισχύος

lower-bound argument όρισμα χαμηλού ορίου

LSA (Link State Advertisements) αναγγελίες (ή δημοσιεύσεις) κατάστασης σύνδεσης

M2M (Machine-to-Machine) μηχανή προς μηχανή # *M2M communication* επικοινωνία μεταξύ μηχανών

MAC (Medium Access Control) **protocol** πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης

MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) πολλαπλή πρόσβαση με αποφυγή συγκρούσεων

MACAW (Multiple Access with Collision Avoidance Wireless) πολλαπλή πρόσβαση με αποφυγή συγκρούσεων σε ασύρματα δίκτυα

management plane επίπεδο διαχείρισης

MANETs (mobile ad hoc Networks) κινητά δίκτυα ad-hoc

machine μηχανή # *machine monitoring* παρακολούθηση μηχανών

master aggregator node κύριος κόμβος συσσώρευσης δεδομένων

maximum lifetime routing δρομολόγηση για μέγιστη διάρκεια ζωής

MBCR (Minimum Battery Cost Routing) **algorithm** αλγόριθμος δρομολόγησης με ελάχιστο κόστος μπαταρίας

MDA (Model-Driven Architecture) αρχιτεκτονική που έχει ως βάση το μοντέλο

MDC (Multiple Description Coding) κωδικοποίηση πολλαπλής περιγραφής

MDS (Minimum-Degree Searching) αλγόριθμος ελάχιστου βαθμού έρευνας

medium access control έλεγχος πρόσβασης στο μέσο μετάδοσης

memory effect φαινόμενο (επίδραση) μνήμης

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) μικροηλεκτρονικά μηχανικά συστήματα

mesh network δίκτυο πλέγματος

message μήνυμα # *message inter-arrival time* χρόνος μεταξύ των αφίξεων μηνυμάτων # *message length* χρονική διάρκεια του μηνύματος # *message overhead* επιβάρυνση μηνυμάτων

metadata μεταδεδομένα. Πληροφορίες οι οποίες περιγράφουν τα διαθέσιμα δεδομένα αντί να στέλνουν τα ίδια τα δεδομένα.

MFR (Most Forward within Radius) μεγαλύτερη προώθηση μέσα στο ακτινικό επίπεδο συμμετρίας

minimum ελάχιστος # *minimum-cost path* μονοπάτι ελάχιστου κόστους # *minimum-delay schedule* χρονοδιάγραμμα ελάχιστης χρονικής καθυστέρησης # *minimum-energy broadcast* εκπομπή ελάχιστης ενέργειας # *minimum-power path* μονοπάτι ελάχιστης ενέργειας

MIPS (Million Instructions Per Second) εκατομμύρια εντολές ανά δευτερόλεπτο

MMBCR (Min-Max Battery Cost Routing) **algorithm** αλγόριθμος δρομολόγησης με το ελάχιστο-μέγιστο κόστος μπαταρίας

mobile κινητός, κινούμενος # *mobile sensor node* κινητός αισθητήριος κόμβος # *mobile tracking* εντοπισμός ή ιχνηλασία κινητού # **mobility** κινητικότητα # *mobility management plane* επίπεδο διαχείρισης της κινητικότητας

mobilizer σύστημα κίνησης

mode τρόπος # *mode of operation* τρόπος λειτουργίας

model μοντέλο, η μία όψη ενός συστήματος # *modeling* μοντελοποίηση

MODEM (modulator/demodulator) κύκλωμα διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης, (διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής), διαποδιαμορφωτής

modulation διαμόρφωση # *modulation scheme* σχήμα διαμόρφωσης

module βαθμίδα, δομικό στοιχείο

monitor συσκευή ελέγχου # **monitoring** εποπτεία, παρακολούθηση # *monitoring state* κατάσταση εποπτείας

note μικρό αυτόνομο σύστημα, μικρό τεμάχιο, ασύρματος αισθητήριος κόμβος για εκτέλεση πειραμάτων, πλακέτα επάνω στην οποία έχουν συνδεσμοποιηθεί οι μονάδες επεξεργασίας και επικοινωνίας

moving devices κινητές συσκευές

MP-DSR (MultiPath Dynamic Source Routing) Το MP-DSR είναι ένα πλήρως καταναμημένο πρωτόκολλο πηγής το οποίο λαμβάνει υπόψη το QoS του δικτύου και βασίζεται στο DSR. Δημιουργεί και επιλέγει διαδρομές βασιζόμενο σε σύγχρονα QoS metrics με αξιοπιστία από άκρο σε άκρο.

MPR 1. (Multipoint Relaying) αναμετάδοση πολλαπλών σημείων

MSR (Multipath Source Routing protocol) πηγαίο πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών. Αποτελεί προέκταση του πρωτοκόλλου DSR.

MTE (Minimum Transmission Energy) ελάχιστη ενέργεια εκπομπής

MTU (Maximum Transmission Unit μέγιστη μονάδα μετάδοσης του δικτύου

multi-access protocol πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης

multicast πολλαπλή εκπομπή

multi-channel πολυδιαυλικός

multidiscipline cognitive fields πολλαπλότητα γνωστικών πεδίων

multi-hop πολλαπλών βημάτων, πολλαπλών τμημάτων διαδρομής, πολλαπλών αλμάτων

multimedia πολυμέσα

multipath πολλαπλού μονοπατιού, πολυδιαδρομικός, πολλαπλής διαδρομής # *multipath routing protocol* πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών

multiple πολλαπλός # *multiple access* πολλαπλή πρόσβαση (μέσου)

multiplicity πολλαπλότητα. Υποδηλώνει τον αριθμό των στιγμιότυπων μιας κλάσης που μπορούν να συσχετιστούν με ένα στιγμιότυπο μιας άλλης κλάσης.

multithread πολυνηματικός

NA (Neighbor Advertisement) γειτονική αναγγελία

NAT (Network Address Translation) μετάφραση διεύθυνσης δικτύου

natural φυσικός # *natural sciences* φυσικές επιστήμες

NAV (Network Allocation Vector) άνυσμα ή διάνυσμα κατανομής δικτύου # *NAV timer* χρονομετρητής NAV

NDP (Neighbor Discovery Protocol) πρωτόκολλο ανακάλυψης γειτονικού κόμβου

neighbor pairs γειτονικά ζεύγη, ζεύγος γειτονικών κόμβων

net καθαρός # *net effect* καθαρό αποτέλεσμα

network δίκτυο # *network configuration* δικτυακή διαμόρφωση # *network interface* διεπαφή δικτύου # *network layer* επίπεδο δικτύου # *network monitoring* εποπτεία δικτύου # *network sensors* αισθητήρες δικτύου # *network simulated topology* προσομοιωμένη τοπολογία δικτύου

NFC (Near Field Communications) επικοινωνίες κοντινού πεδίου

NGN (new generation network) δίκτυο νέας γενιάς

node κόμβος. Υπολογιστικός πόρος με μνήμη και υπολογιστική ικανότητα. # *node cache* μνήμη κόμβου # *node deployment density* πυκνότητα ανάπτυξης κόμβων # *node duty cycle* κύκλος δέσμευσης κόμβου

non-coherent data-processing-based routing protocols πρωτόκολλα δρομολόγησης μη συνάφειας βασισμένα στην επεξεργασία δεδομένων

non-software systems συστήματα που δεν περιέχουν λογισμικό

normalized workload κανονικοποιημένο φορτίο

numeric parameters αριθμητικές παράμετροι

OCL (Object Constraint Language) γλώσσα περιορισμού αντικειμένου.

OLSR (Optimized Links State Routing) **protocol**. Πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης βελτιστοποιημένης ζεύξης. Το OLSR αποτελεί βελτιστοποίηση των καθαρών link state πρωτοκόλλων (οι πλήρεις πληροφορίες των συνδέσεων πλημμυρίζουν το δίκτυο) λόγω της συμπτύκνωσης του μεγέθους των πληροφοριών που στέλνονται σε κάθε μήνυμα και της μείωσης του αριθμού των αναμεταδόσεων σε όλο το δίκτυο. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μία τεχνική αναμετάδοσης πολλαπλών σημείων για να πλημμυρίσει το δίκτυο με μηνύματα ελέγχου με αποδοτικό και οικονομικό τρόπο.

omni-directional πολυκατευθυντική

on-demand κατ' απαίτηση, κατόπιν παραγγελίας

on-demand ad hoc routing protocols πρωτόκολλα δρομολόγησης ad-hoc κατ' απαίτηση

one-hop neighbor μονοβηματικός γείτονας

OOK (On-Off Keying). Αποτελεί μία παραλλαγή της ASK όπου δεν υπάρχει φέρον κατά τη διάρκεια μετάδοσης του λογικού μηδέν (0).

operating frequency συχνότητα λειτουργίας # **operating system** λειτουργικό σύστημα

operational λειτουργικός # *operational voltage* τάσης λειτουργίας

original protocol αρχικό πρωτόκολλο

OSPF (Open Shortest Path First) **routing protocol**. Το OSPF είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης με δύο κύρια χαρακτηριστικά. Πρώτον, όπως ορίζει, είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο, το οποίο σημαίνει πως τα χαρακτηριστικά του είναι ανοιχτά στο κοινό. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι πως το OSPF είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο SPF (Shortest Path First), το οποίο ονομάζεται επίσης αλγόριθμος του Dijkstra.

out-of-channel signaling σηματοδότηση εκτός καναλιού

outdoor radio propagation models μοντέλα υπαίθριας ασύρματης μετάδοσης
output transmit power μεταδιδόμενη ισχύς εξόδου
overhearing ακούσια ακρόαση. Περίπτωση όπου ένας κόμβος λαμβάνει πακέτα τα οποία προορίζονται για άλλους κόμβους και όχι για αυτόν.
pack συσκευασία # **packaging** πακετάρισμα
packet πακέτο # **packet generation rate** ρυθμός (ή ταχύτητα) δημιουργίας πακέτων
PAMAS (Power-Aware Multi-Access protocol with Signaling for ad hoc networks) πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με ενημέρωση ισχύος και σηματοδότηση για δίκτυα ad hoc
PAN (Personal Area Networks) δίκτυα προσωπικής εμβέλειας
partition διαίρεση, κατάτμηση, διαμερισμός # **partitioning** διαμοιρασμός, διαμερισμός, καταμερισμός
PASA (Power Adaptation for Starvation Avoidance to deliver wireless multimedia) προσαρμογή ισχύος για αποφυγή εξάντλησης ενέργειας και τη διανομή ασύρματων πολυμέσων
passband ζώνης διέλευσης
passive παθητικός # **passive network monitoring** παθητική εποπτεία δικτύου
path μονοπάτι # **path delay** χρονική καθυστέρηση μονοπατιού
pattern μορφή, σχέδιο # **pattern matching** ανίχνευση συγκεκριμένων χαρακτήρων σε μία ροή χαρακτήρων
PCF (Point Coordination Function) λειτουργία συντονισμού σημείων
PDA (Personal Digital Assistant) προσωπικός ψηφιακός βοηθός
peak performance μέγιστη (ή κορυφαία) απόδοση
peer-to-peer διότιμος, ομότιμη οντότητα # **peer-to-peer model** μοντέλο ομότιμων οντοτήτων
performance evaluation αξιολόγηση της επίδοσης
periodic hibernation περιοδική διαχείμαση (ή χειμέρια νάρκη ή λήθαργος)
PFC (Passive Feasibility Condition) παθητική συνθήκη επιτευξιμότητας
physical layer power conservation διατήρηση της ισχύος στο φυσικό επίπεδο
PID (Partition Identifier) συσκευή προσδιορισμού του διαμελισμού (π.χ. δικτύου)
point-to-point από σημείο σε σημείο
position θέση # **positioning** εντοπισμός θέσης # **positioning system** σύστημα εντοπισμού θέσης
power ισχύς # **power adaptation** προσαρμογή ισχύος # **power-aware routing** δρομολόγηση με ενημέρωση της ισχύος # **power conservation mechanisms** μηχανισμοί διατήρησης της ισχύος # **power control algorithm** αλγόριθμος ελέγχου ισχύος # **power-down techniques** τεχνικές υποβιβασμού της ισχύος # **power efficiency** απόδοση ισχύος # **power generator** γεννήτρια παραγωγής ισχύος # **power management plane** επίπεδο διαχείρισης της ισχύος # **power-off** θέτω εκτός λειτουργίας # **power-saving mode** λειτουργίες για την όσο το δυνατόν περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας # **power unit** μονάδα τροφοδοσίας
PPM (Pulse Position Modulation) διαμόρφωση θέσης παλμού
pre-cached information πληροφορία που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί στη μνήμη
pre-conditions προαπαιτούμενες συνθήκες
pro-active protocols (or table-driven protocols). Τα πρωτόκολλα pro-active (ή οδηγούμενα από πίνακες) δουλεύουν με τρόπο παρόμοιο των πρωτοκόλλων των ενσύρματων δικτύων. Εδώ οι διαδρομές υπολογίζονται πριν προκύψει ανάγκη.
process διαδικασία # **processing unit** μονάδα επεξεργασίας # **processor** επεξεργαστής
propagation delay χρονική καθυστέρηση διάδοσης # **propagation models** μοντέλα μετάδοσης
protocol stack στοίβα πρωτοκόλλων
pure on-demand protocols καθαρά ή αμιγή πρωτόκολλα κατ' απαίτηση
QoS (Quality of Service) ποιότητα υπηρεσιών # **QoS-based** βασισμένος στην ποιότητα υπηρεσιών
quality assurance διασφάλιση ποιότητας # **quality of study** ποιότητα σπουδών
query-based βασισμένος στην αναζήτηση πληροφοριών # **query plan** πλάνο ερωτημάτων
querying αναζήτηση πληροφοριών # **querying node** ερωτών κόμβος
queue model μοντέλο σειράς # **queuing delay** χρονική καθυστέρηση αναμονής
RA (Router Advertisement) αναγγελία δρομολογητή
radio ασύρματος, ράδιο # **radio channel** ασύρματο κανάλι # **radio frequency** (RF) ραδιοσυχνότητα # **radio interface module** βαθμίδα ή υπομονάδα ασύρματης επικοινωνίας # **radio propagation models** μοντέλα ασύρματης μετάδοσης # **radio transceiver** ραδιοπομποδέκτης
random access τυχαία πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης
rate ρυθμός, ταχύτητα (π.χ. εκπομπής/λήψης δεδομένων)
reactive protocols πρωτόκολλα δρομολόγησης κατόπιν αιτήματος, πρωτόκολλα δρομολόγησης όπου όλες οι διαδρομές υπολογίζονται κατόπιν ζήτησης.
receive mode τρόπος λήψης # **receiver sensitivity** ευαισθησία δέκτη
receiving mobile sensor nodes κινητοί αισθητήριοι κόμβοι λήψης
reception λήψη # **reception slots** θυρίδες λήψης
recovery ανάκτηση, επανάκτηση # **recovery cost** κόστος ανάκτησης δεδομένων
relay 1. ρελέ. 2. αναμεταδίδω # **relay region** περιοχή αναμεταδόσεων
relaying αναμετάδοση # **relaying node** κόμβος αναμετάδοσης
request of transmission αίτημα εκπομπής
rerouting επαναδρομολόγηση
RERR (Route Error message) μήνυμα σφάλματος διαδρομής
research έρευνα # **research work** ερευνητική εργασία
resolution ανάλυση, διαχωρισμός

resource adaptation προσαρμογή πόρων # **resource reservation** δέσμευση πόρων
retransmission επανεκπομπή, αναμετάδοση
RFID (Radio-Frequency Identification) προσδιορισμός ραδιοσυχνότητας, αναγνώριση ραδιοσυχνότητας. Επιτρέπει την αυτόματη αναγνώριση προσώπων. Αποτελεί τη σύγχρονη εφαρμογή της ηλεκτρονικής ταυτοποίησης. # *RFID tags* ετικέτες αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας
ring search έρευνα δακτυλίου
RISC (Reduced Instruction Set Computer) υπολογιστής μειωμένου σετ εντολών
ROAM (Routing On-demand Acyclic Multipath) δρομολόγηση ακυκλικού πολλαπλού μονοπατιού κατ' απαίτηση
root maintenance phase φάση διατήρησης βάσης
route διαδρομή # *route discovery process* διαδικασία ανακάλυψης της διαδρομής # *route selection strategy* στρατηγική επιλογής διαδρομής # *route setup* δημιουργία ή εγκατάσταση διαδρομών # *route updating* ενημέρωση διαδρομής
router δρομολογητής
routing δρομολόγηση # *routing algorithm* αλγόριθμος δρομολόγησης # *routing protocol* πρωτόκολλο δρομολόγησης **routing table** πίνακας δρομολόγησης
RPTS (Request-Power-To-Send) απαίτηση ισχύος (ή απαιτούμενη ισχύς) για αποστολή μηνυμάτων
RREP (Route Reply packet) πακέτο απάντησης διαδρομής
RREQ (Route Request) απαίτηση διαδρομής # *RREQ packet* πακέτο απαίτησης διαδρομής
RS (Router Solicitation) δελεασμός δρομολογητή
RS-ID (Random Source Identifier) προσδιοριστής τυχαίας πηγής
RTOS (real time operating systems) πραγματικός χρόνος λειτουργίας συστημάτων
RTT (Round Trip Time) χρόνος μετάβασης και επιστροφής
run-time χρόνος λειτουργίας, χρόνος εκτέλεσης προγράμματος
scalability επεκτασιμότητα # **scaling factor** συντελεστής κλίμακας
schedule 1. χρονοπρογραμματίζω. 2. χρονοδιάγραμμα # **scheduler** χρονοπρογραμματιστής
scheduling χρονοπρογραμματισμός # *scheduling algorithm* αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού
self-administration αυτοτέλεια
self-reconfiguring αυτό-ανασχηματιζόμενος
sense ανιχνεύω # **sensing unit** μονάδα ανίχνευσης, αισθητήρας
sensor αισθητήρας # *sensor field* πεδίο αισθητήρων # *sensor node* αισθητήριος κόμβος
shared-channel μοιραζόμενο ή κοινό κανάλι
shortest-path computation υπολογισμός του συντομότερου μονοπατιού
SIC (serial interference cancellation) σειριακή ακύρωση παρεμβολών
signal σήμα # *signal processing algorithms* αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος # *signal processor* επεξεργαστής σήματος # *signaling channel* κανάλι σηματοδότησης
simple-link scheduling algorithm αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού απλής ζεύξης
single-hop transmission μετάδοση απλού βήματος
sink σταθμός βάσης, αποδέκτης, μονάδα συλλογής δεδομένων
SINR (Signal to Interference Noise Ratio) λόγος σήματος προς θόρυβο παρεμβολών
slack time χρόνος μειωμένης δραστηριότητας
sleep ύπνος # *sleep/awake mode* κατάσταση λειτουργίας ύπνου/αφύπνισης # *sleep-mode synchronization schemes* σχήματα συγχρονισμού της κατάστασης ύπνου # *sleep state transitioning* μετάβαση στην κατάσταση ύπνου # *sleeping intervals* διαστήματα ύπνου # *sleeping state* κατάσταση ύπνου
slot θυρίδα, σχισμή, εγκοπή # *slot time* χρόνος θυρίδας
SMACS (Self-Organizing Medium Access Control for Sensor Networks) αυτόματα διαρρυθμιστικός έλεγχος πρόσβασης μέσου για δίκτυα αισθητήρων
smart dust mote μικρό αυτόνομο σύστημα έξυπνης σκόνης, αυτόνομο σύστημα συλλογής, επεξεργασίας και επικοινωνίας δεδομένων
SMD (Surface Mount Device) συσκευή επιφανειακής στήριξης
SMP (Sensor Management Protocol πρωτόκολλο διαχείρισης αισθητήρων
SMR (Split Multipath Routing) δρομολόγηση διασπασμένου πολλαπλού μονοπατιού.
SNR (Signal-to-Noise ratio) λόγο σήματος προς θόρυβο
SOA (Semiconductor Optical Amplifier) οπτικός ενισχυτής από ημιαγωγό. Δέχεται στην είσοδο δύο φωτεινούς παλμούς και βγάζει στην έξοδο το αποτέλεσμα της λογικής πράξης AND ή XOR.
soft threshold κατώφλι χαμηλής ενέργειας
software λογισμικό # *Software Defined Radios* ραδιοεπικοινωνίες λογισμικού # *software intensive systems* συστήματα με έμφαση στο λογισμικό # *software support* λογισμική υποστήριξη
solicitation δελεασμός, υποκίνηση, ερεθισμός
SOP (Self-Organizing Protocol) πρωτόκολλο αυτόματης αναδιοργάνωσης
source πηγή # *source localization application* εφαρμογή εντοπισμού πηγής # *source node* πηγαίος κόμβος, κόμβος αφετηρία # *source routing protocol* πρωτόκολλο δρομολόγησης πηγής, πηγαίο πρωτόκολλο δρομολόγησης # *source sensor node* πηγαίος αισθητήριος κόμβος # *source station* πηγαίος σταθμός
spatial χωροταξικός # *spatial frequency reuse* χωροταξική επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας
SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) πρωτόκολλα αισθητήρων για πληροφορίες μέσω διαπραγμάτευσης
split phase διασπασμένη φάση # **splitting** κατάμηση

spreading code κώδικας διασποράς

SQDDP (Sensor Query and Data Dissemination Protocol) πρωτόκολλο αναζήτησης και διασποράς δεδομένων

SQTL (Sensor Query and Tasking Language) γλώσσα αναζήτησης αισθητήρων και ανάθεσης έργου

standard πρότυπος, στάνταρ # *standard estimation theory* θεωρία αποτίμησης του προτύπου

start-up εκκίνηση # *start-up energy* ενέργεια εκκίνησης, ενέργεια που καταναλώνεται κατά την εκκίνηση

starvation ασιτία, στέρηση πόρων

steady-state phase φάση μόνιμης κατάστασης λειτουργίας

stick person σχηματικό ανθρωπάκι

storage unit μονάδα αποθήκευσης δεδομένων

sub-optimal paths υποβέλτιστα μονοπάτια

sub-queries δευτερεύοντα ερωτήματα

substitutability principle αρχή υποκατάστασης

subsystem υποσύστημα. Μια μονάδα στην ιεραρχική σύνθεση ενός μεγάλου συστήματος.

switch μεταπηδώ, αλλάζω θέση ή κατάσταση # *switching* μεταγωγή # *switching power* ισχύς μεταγωγής

system σύστημα # *system integration* ενοποίηση συστημάτων # *system partitioning* συστημικός διαμερισμός

table-driven routing protocols πρωτοκόλλα δρομολόγησης με βάση τους πίνακες

TADAP (Task Assignment and Data Advertisement protocol) πρωτόκολλο προσδιορισμού έργου και διαφήμισης δεδομένων

tagged values τιμές με ετικέτες. Επεκτείνουν τις ιδιότητες των δομικών στοιχείων, προσθέτοντας πληροφορία στις προδιαγραφές τους.

task εργασία, ανατεθέν έργο # *task management plane* επίπεδο διαχείρισης των εργασιών # *task manager node* κόμβος διαχείρισης εργασιών # *task queue models* μοντέλα σειράς εργασιών

TBRPF (Topology dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) Ο TBRPF χρησιμοποιεί την αρχή της προώθησης ανάστροφου μονοπατιού για να εκπέμψει της ανανεώσεις της κατάστασης των links σε ανάστροφη κατεύθυνση κατά μήκος του δέντρου που σχηματίζεται από τα μονοπάτια ελάχιστων hops από όλους του κόμβους προς την πηγή της ανανέωσης.

TCP (Transmission Control Protocol) πρωτόκολλο ελέγχου μεταφοράς. χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το διαδίκτυο ή το δίκτυο δορυφόρων.

TDMA (Time-Division Multiple Access) πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου # *TDMA-based wakeup intervals scheduling scheme* σχήμα χρονοπρογραμματισμού των διαλειμάτων αφύπνισης βασισμένο στο TDMA # *TDMA/CDMA* (Time-Division Multiple Access/Code-Division Multiple Access) πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου/πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα

testbed πειραματική υποδομή

through traffic εξωγενής κίνηση, κίνηση που δέχεται ο κάθε κόμβος από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο

throughput ρυθμαπόδοση, ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων

time χρόνος # *time-critical applications* εφαρμογές κρίσιμες ως προς το χρόνο # *time frame* χρονικό πλαίσιο # *time range* χρονική περιοχή # *time-varying computational load* χρονικά μεταβαλλόμενο υπολογιστικό φορτίο # *timeout* διάλλειμα, λήξη χρόνου # *timer* χρονομετρητής # *timeslot* χρονοθυρίδα, χρονοσχισμή # *timestamp* χρονοσφραγίδα # *timing* συγχρονισμός, χρονομέτρηση

TinyOS (Tiny Operating System) μικρο-λειτουργικό σύστημα

TORA (Temporally-Ordered Routing Algorithm) προσωρινά διατεταγμένος αλγόριθμος δρομολόγησης. Είναι ένας πάρα πολύ προσαρμοστικός κατανεμημένος αλγόριθμος βασιζόμενος στην αρχή της διάβασης διασυνδέσεων (link traversal). Παρέχει πολλαπλές διαδρομές χωρίς βρόχους από μία πηγή προς έναν προορισμό. Το κλειδί της σχεδίασης του TORA είναι ο περιορισμός των μηνυμάτων ελέγχου σε ένα μικρό αριθμό κόμβων στη γειτονιά των τοπολογικών αλλαγών.

town planning πολεοδομία, σχεδιασμός πόλεων

TPU (Time Processing Unit) μονάδα χρονικής επεξεργασίας

tradeoff εξεύρεσης της βέλτιστης λύσης

traffic κίνηση # *traffic arrival rate* ρυθμός άφιξης της κίνησης # *traffic load* φορτίο κίνησης

transceiver (transmitter/receiver) πομποδέκτης

transmission εκπομπή, μετάδοση # *transmission power consumption* κατανάλωση ισχύος εκπομπής (ή μετάδοσης) # **transmission time units** μονάδες χρόνου εκπομπής

transmit power μεταδιδόμενη ισχύς # **transmitter power** ισχύς πομπού

turn-off θέτω "εκτός λειτουργίας", διακόπτω τη λειτουργία, διακοπή λειτουργίας

two-hop network simulated topology προσομοιωμένη τοπολογία δικτύου δύο βημάτων

UART τύπος θύρας εισόδου/εξόδου πληροφοριών

ubiquitous city πανταχού παρούσα πόλη

UDP (User Datagram Protocol) πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ σταθμού βάσης και κόμβων

ULA (Unique Local Address) μοναδική τοπική διεύθυνση

ultra-wide band (UWB) εξαιρετικά ευρεία ζώνη, ευρυζωνικός, (συχνότητες: 3.1 GHz -10.6 GHz) # *ultra-wide band networks* ευρυζωνικά δίκτυα

UML (Unified Modeling Language) ενοποιημένη γλώσσα μοντελοποίησης

underwater sensors networks υποβρύχια δίκτυα αισθητήρων

unicast απλή εκπομπή

unified ενοποιημένος

uniform framework ενιαίο πλαίσιο

unilaterally μονομερώς, ετεροβαρώς
unique identifier μοναδικός αναγνωριστής # **uniqueness** μοναδικότητα, σπανιότητα
unmodified μη τροποποιημένος
update 1. ενημερώνω, αναπροσαρμόζω. 2. ενημέρωση, εκσυγχρονισμός, αναπροσαρμογή
upper υπερκείμενος, ανώτερος, υψηλότερος # *upper transport layer* υπερκείμενο επίπεδο μεταφοράς
upstream προς τα πάνω, ανοδικά
use χρήση # *use case* περίπτωση χρήσης. Λειτουργία την οποία επιτελεί σύστημα και είναι διαθέσιμη στο χρήστη. # *use case diagram* διάγραμμα περιπτώσεων χρήσης. Είναι η λειτουργικότητα του συστήματος, όπως φαίνεται από εξωτερικούς συνεργάτες
UWB (Ultra-Wide Band) ευρυζωνικός, υπερευρεία ζώνη (συχνοτήτων), ζώνη των εξαιρετικά υψηλών συχνοτήτων, ραδιοκύματα ακραίων συχνοτήτων
variance τετράγωνο τυπικής απόκλισης
vary μεταβλητή τυχαίων τιμών, μεταβλητή στατικού πειράματος
VCC (virtual cluster center) εικονικό κέντρο συστάδων
vector routing δρομολόγηση μέσω διανυσμάτων
virtual ιδεατός, εικονικός, φανταστικός # *virtual backbone structure* εικονική δομή κορμού # *virtual cluster* ιδεατή συστοιχία # *virtual grid* ιδεατό δίκτυο, εικονικό πλέγμα # *virtual infrastructure* ιδεατή υποδομή
visual οπτικός # *visual modeling* μοντελοποίηση με χρήση πρότυπων γραφικών συμβολισμών
visualization απεικόνιση
voltage τάση # *voltage regulator* σταθεροποιητής τάσης # *voltage scaling* κλιμάκωση της τάσης # *voltage scheduling* χρονοπρογραμματισμός τάσης # *voltage supply* παροχή (τροφοδοσία) τάσης
VS (Voltage Scheduler) χρονοπρογραμματιστής τάσης
VSP (Variable Speed Processor) επεξεργαστής μεταβλητής ταχύτητας
wakeup αφύπνιση # *wakeup intervals scheduling scheme* σχήμα χρονοπρογραμματισμού των διαλλειμάτων αφύπνισης # *wakeup latency* καθυστέρηση απόκρισης κατά την αφύπνιση
WB (Wire Bond) ενσύρματος δεσμός
welfare πρόνοια
wide-area ευρεία περιοχή # *wide-area wireless links* ασύρματες ζεύξεις ευρείας περιοχής
WINS (Wireless Integrated Network Sensors) ασύρματοι ολοκληρωμένοι αισθητήρες δικτύου
wire σύρμα, ενσύρματος # *wire bond* (WB) ενσύρματος δεσμός
wireless ασύρματος # *wireless LANs* ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας # *wireless link* ασύρματη ζεύξη # *wireless multimedia* ασύρματα πολυμέσα # *wireless networking* ασύρματη δικτύωση # *wireless routing protocols* ασύρματα πρωτόκολλα δρομολόγησης # *wireless sensor networks* ασύρματα δίκτυα αισθητήρων
WLAN (Wireless Local Area Networks) ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας, ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής. Έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ανάγκες δικτύων τα οποία δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των περιορισμένων αποθεματικών ενέργειας, όπως είναι π.χ. τα δίκτυα υπολογιστών όπου η τροφοδοσία τους με ισχύ είναι συνεχής, και δεν έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ανάγκες αυτόνομων συσκευών όπως είναι οι αισθητήριοι κόμβοι, των οποίων η διάρκεια ζωής εξαρτάται άρρηκτα από τα περιορισμένα τους αποθέματα ενέργειας
workload φορτίο # *workload monitor* συσκευή ελέγχου του φορτίου
WPAN (Wireless Personal Area Networks) ασύρματα δίκτυα προσωπικής εμβέλειας
WSNs (Wireless Sensor Networks) ασύρματα δίκτυα αισθητήρων
WWD (Wrist Wearable Device) συσκευή που φοριέται στον καρπό του χεριού
XMI (XML Metadata Interchange) ανταλλαγή μεταδεδομένων
ZRP (Zone Routing Protocol). Το ZRP συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των pro-active και re-active πρωτοκόλλων σε ένα υβριδικό σχήμα. Χρησιμοποιεί pro-active πρωτόκολλο στη γειτονιά ενός κόμβου (Intrazone Routing Protocol, IARP) και re-active πρωτόκολλο για τη δρομολόγηση μεταξύ γειτονιών (Interzone Routing Protocol, IERP).
μAMPS (micro-Adaptive Multi-domain Power-aware Sensors) προσαρμόσιμοι πολλαπλού πεδίου ορισμού μικρο-αισθητήρες με ενημέρωση ισχύος. Είναι προϊόν του ομώνυμου ερευνητικού προγράμματος του Αμερικανικού Πανεπιστημίου MIT.
μ-OS (micro-Operating System) μικρο-λειτουργικό σύστημα

Βιβλιογραφία:

- ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ, “**ΝΕΟ ΑΓΓΛΟΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ**”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΑΣΤΑΝΙΩΤΗ, Αθήνα 2002, ISBN: 960-03-3304-1.
- ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ, “**ΕΛΛΗΝΟ-ΑΓΓΛΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ**”, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΑΣΤΑΝΙΩΤΗ, Αθήνα 2004, ISBN: 960-03-3870-1.
- ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α. ΠΑΝΤΑΖΗΣ, “**ΑΓΓΛΟΕΛΛΗΝΙΚΟ ΛΕΞΙΚΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ**” Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, Αθήνα 1997, ISBN: 960-351-142-0.
- Andrew S. Tanenbaum, “**Computer Networks**”, Prentice Hall International Edition, 2003.
- A great number of published papers on “Power Control and Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks”