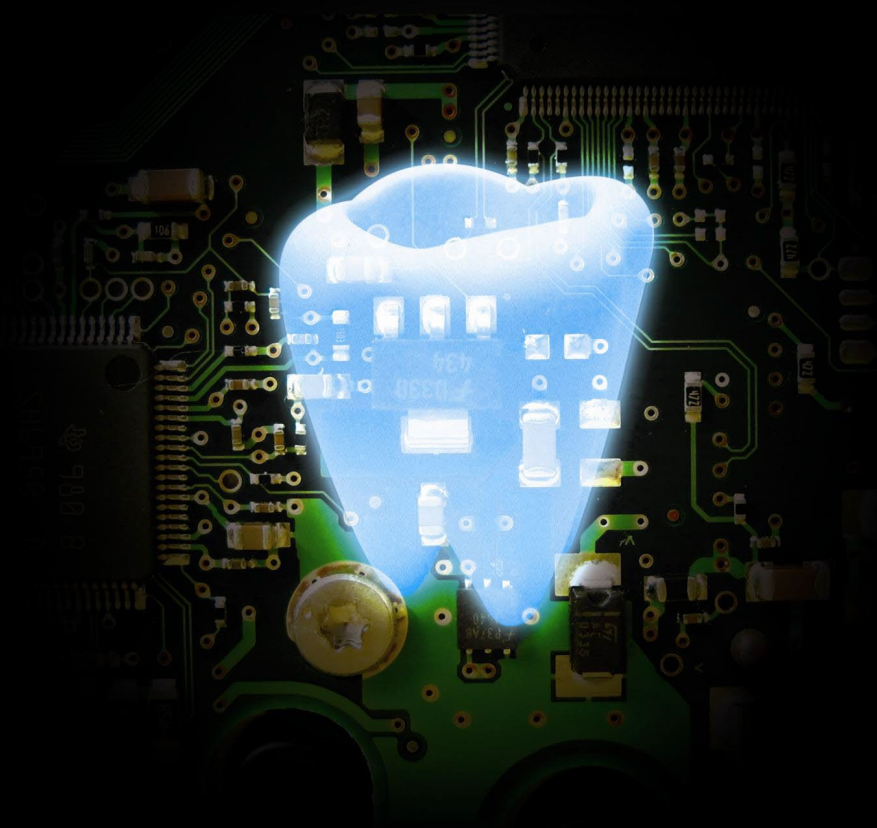


Πτυχιακή Εργασία:
“Ανάλυση Δομής Ad-Hoc Δικτύων Τύπου Bluetooth/PAN
και Πειραματική Παρατήρηση Τοπολογιών”



του Αποστολίδη Ανδρέα
Α.Μ 131/2002006
Επιβλέπων Καθηγητής: Δαμιανός Γαβαλάς



Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Σχολή Κοινωνικών Επιστημών
Τμήμα Πολιτισμικής Τεχνολογίας και Επικοινωνίας

**Ανάλυση Δομής Ad-Hoc Δικτύων Τύπου Bluetooth/PAN και
Πειραματική Παρατήρηση Τοπολογιών**

Εργασία που υποβλήθηκε από τον
Αποστολίδη Ανδρέα
ως μερική εκπλήρωση για την απόκτηση
Πτυχιακού Διπλώματος Σπουδών

Συγγραφέας:

Αποστολίδης Ανδρέας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δαμιανός Γαβαλάς

ΑΘΗΝΑ, ΓΕΝΑΡΗΣ 2008

Στην οικογένεια,
τη σύντροφο, και
τους φίλους μου.

Ανάλυση Δομής Ad-Hoc Δικτύων Τύπου Bluetooth / PAN και Πειραματική Παρατήρηση Τοπολογιών

Αποστολίδης Ανδρέας
Πτυχιακή Εργασία
Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Τμήμα Πολιτισμικής Τεχνολογίας
& Επικοινωνίας

Περίληψη

Καθημερινά γινόμαστε μάρτυρες της αλματώδους εξέλιξης της τεχνολογίας χωρίς ωστόσο να είμαστε σε θέση να κρίνουμε τα οφέλη αυτής σε βραχυπρόθεσμη βάση. Πρόκειται για φαινόμενο που δεν επηρεάζει μονάχα τους αποδέκτες της νεότερης τεχνολογίας (καταναλωτές, χρήστες κλπ) αλλά και τους ίδιους τους δημιουργούς της.

Κάτι παρόμοιο συνέβη και στην περίπτωση της τεχνολογίας Bluetooth η οποία έκανε τα πρώτα της βήματα στα τέλη της δεκαετίας του 90' ωστόσο δεν είναι παρά οι μέρες οι οποίες την βρίσκουν να ανέρχεται στο τεχνολογικό πεδίο και να καταξιώνεται στις υπολήψεις των καταναλωτών αλλά και των επιστημονικών ομάδων ανάπτυξης .

Η παρούσα εργασία προσπαθεί να εστιάσει πάνω στα κύρια τεχνολογικά χαρακτηριστικά του προτύπου Bluetooth και να φωτίσει ορισμένες από τις πτυχές του. Επίσης προσπαθεί να παντρέψει δυο ακόμα έννοιες που φαίνεται να συμβαδίζουν τεχνολογικά και να καθιστά η μια την άλλη αλληλένδετες. Πρόκειται φυσικά για τους όρους : Δίκτυα Προσωπικής Περιοχής (Personal Area Network, PAN) και Αδόμητα Δίκτυα (Ad – Hoc networks). Η έρευνα που κρατάτε στα χέρια σας εξηγεί πως οι τρεις αυτές τεχνολογικές έννοιες συνδυάζονται και τις αναλύει τόσο σε κοινό όσο και σε διακριτά πλαίσια.

Τέλος επιχειρεί να διεισδύσει στο τομέα πρακτικής επίδοσης του προτύπου Bluetooth μέσω κάποιων πειραματικών μετρήσεων και το συγκρίνει με παλαιότερο παρεμφερές πρότυπο του οποίου η χρήση πλέον έχει αρχίσει και περιορίζεται και δεν είναι άλλο από το IrDA (Infrared Data Association).

Ευχαριστίες

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την πτυχιακή μου εργασία θα ήθελα πρώτα από όλους να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δαμιανό Γαβαλά χωρίς τη συμβολή του οποίου είμαι απόλυτα πεπεισμένος ότι το παρόν σύγγραμμα δεν θα ολοκληρωνόταν ποτέ και ως εκ τούτου δεν θα μου δινόταν η ευκαιρία να πάρω το πτυχίο μου.

Από εκεί και έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την Θεοδώρα Κιρκιλέση πιστή σύντροφο εδώ και σχεδόν δύο χρόνια, για την υπομονή της, τη συμπαράσταση που μου παρείχε, τη πολύτιμη βοήθεια στην ανάγνωση των μεταφρασμένων κειμένων με σκοπό τη γρήγορη συγγραφή τους και γενικά για την παρουσία της σε κάθε στιγμή που οι δυσκολίες και η πίεση γινόντουσαν αφόρητες.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συνοδοιπόρους στη ζωή, Γιώργο Κωστούρο για τη βοήθεια στη συγγραφή και την παροχή μέσω του πανεπιστημίου του υλικοτεχνικού εξοπλισμού, Μιχάλη Κάρολο για τη πολύτιμη συνεισφορά του στη δημιουργία του εξώφυλλου της παρούσας πτυχιακής, και Κωνσταντίνο Κλάγκο για τη καλάρωση που μπορούσε να προσφέρει με το να είναι απλά ο εαυτός του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την πολυαγαπημένη μου αδερφή Ευδοκία Αποστολίδου για το γεγονός πως δεν έπαψε ποτέ να πιστεύει σε μένα και να με στηρίζει πρώτα απ' όλα ψυχολογικά. Όπως επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πολυαγαπημένο μου αδερφό Απόστολο γιατί όλα τα στοιχεία της καθημερινότητας μου συνέβαλαν στην επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου.

Τέλος και με σημασία αντιστρόφως ανάλογη από τη σειρά αναφοράς τους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Γονείς μου Μιχαήλ-Ανδρέα και Ελένη για τους οποίους τα λόγια που μπορεί να εκφέρει κάποιος μόνο να υστερούν μπροστά στην πραγματική τους αξία γίνεται. Ήταν πάντα εκεί πριν το ζητήσω, μου έδωσαν τα πάντα πριν τα ζητήσω και δεν δίστασαν να θυσιάσουν πολλές φορές την προσωπική τους ευημερία μπροστά στο βωμό της δικής μου επιτυχίας, και γι' αυτό συμβολικά αναφέρονται τελευταίοι καθώς ακόμα και αν όλα στη ζωή μου καθούν Αυτοί θα είναι για μένα το τελευταίο καταφύγιο. Ευχαριστώ...

Αποστολίδης Ανδρέας

Περιεχόμενα

Περίληψη

Κεφάλαιο1 Εισαγωγή 10

1.1 Πλαίσιο εργασίας.....	10
1.2 Συνεισφορά εργασίας.....	11
1.3 Δομή εργασίας.....	12

Κεφάλαιο2 Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα και επισκόπηση δικτύων P.A.N 14

2.1 Εξέλιξη ασύρματων δικτύων.....	14
2.2 Ασφάλεια στα ασύρματα δίκτυα.....	16
2.3 Εισαγωγή στις τεχνολογίες και εφαρμογές των P.A.N.....	16
2.4 Ζητήματα των δικτύων P.A.N.....	20
2.5 Εφαρμογές δικτύων P.A.N.....	22

Κεφάλαιο3 Η τεχνολογία Bluetooth 24

3.1 Επισκόπηση αρχιτεκτονικής / Αρχιτεκτονική υλοποίησης.....	25
3.2 Λειτουργία επιπέδου ραδιοσυχνοτήτων.....	28
3.2.1 Χαρακτηριστικά Πομπού.....	28
3.2.2 Frequency Hoping.....	29
3.2.3 Ορισμός καναλιού.....	29
3.3 Λειτουργία επιπέδου Baseband.....	31
3.3.1 Μορφή πακέτων.....	31
3.3.2 Τύποι πακέτων.....	32
3.3.3 Έλεγχος και διόρθωση λαθών.....	33
3.4 Οι καταστάσεις του Bluetooth.....	34
3.4.1 Κατάσταση αναμονής.....	34
3.4.2 Κατάσταση αναζήτησης.....	35
3.4.3 Καταστάσεις ανίχνευσης /απάντησης αναζητήσεων.....	36
3.4.4 Κατάσταση αίτησης σύνδεσης.....	37
3.4.5 Κατάσταση ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης.....	38
3.4.6 Καταστάσεις χειραψίας κύριου /υποτελή.....	39
3.4.7 Κατάσταση σύνδεσης.....	39
3.5 Μικροδίκτυα (Piconets) και δίκτυα διασποράς(Scatternets).....	40

Κεφάλαιο4 Αδόμητα ασύρματα δίκτυα (Ad - hoc) 43

4.1 Χαρακτηριστικά.....	43
4.2 Προσδιορισμός Τοπολογίας.....	45
4.3 Διατήρηση συνεκτικότητας.....	46
4.4 Εισαγωγή στη δρομολόγηση Πακέτων.....	48
4.4.1 Πρωτοκόλλα δρομολόγησης που βασίζονται σε πίνακες.....	48
4.4.1.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης διανύσματος απόστασης με ακολουθία προορισμών.....	48
4.4.1.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταγωγής πύλης επικεφαλής ομάδας.....	50
4.4.1.3 Πρωτόκολλο ασύρματης δρομολόγησης.....	52
4.4.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης κατ' απαίτηση.....	53
4.4.2.1 Αδόμητη δρομολόγηση διανύσματος απόστασης κατ' απαίτηση.....	53
4.4.2.2 Δυναμική δρομολόγηση προέλευσης.....	56
4.4.2.3 Δρομολόγηση βάσει συσχετισμού.....	58
4.4.2.4 Δρομολόγηση σταθερότητας σήματος.....	57
4.5 Ημιαδόμητα Δίκτυα(semi Ad – hoc).....	62

Κεφάλαιο5 Πειραματικές μετρήσεις και σύγκριση τεχνολογιών 63

5.1 Περιβάλλον μετρήσεων.....	63
5.1.1 Λίγα λόγια για τη συσκευή μέτρησης.....	64
5.2 Σενάρια εξομοίωσης / μετρήσεων.....	66
5.2.1 Σενάριο 1 ^ο : Σύνδεση ενός κυρίου με έναν υποτελή και σταδιακή προσθήκη ενεργών και ανενεργών υποτελών.....	67
5.2.2 Σενάριο 2 ^ο : Προσθήκη μιας συσκευής υποτελούς σε κατάσταση «ύπνου» στο πειραματικό δίκτυο του πρώτου σεναρίου.....	70
5.2.3 Σενάριο 3 ^ο : Σύνδεση δύο μικροδικτύων μέσω μιας γέφυρας και δημιουργία ενός δικτύου διασποράς με έναν κοινό πόρο.....	72
5.2.4 Σενάριο 4 ^ο Σύγκριση ταχύτητας (με χρονικές μονάδες μέτρησης) μεταφοράς δεδομένων μεταξύ δυο συσκευών σε τεχνολογίες Bluetooth και IrDA.....	74

Κεφάλαιο6 Συμπεράσματα επίλογος και μελλοντική μελέτη	76
6.1 Συμπεράσματα.....	76
6.2 Μελλοντική μελέτη.....	76
Λεξικό Τεχνικών Όρων και Ακρωνυμίων	78
Βιβλιογραφία	

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα2.1 Διάφορα είδη ασύρματων δικτύων.....	17
Σχήμα3.1 Αρχιτεκτονική του Bluetooth.....	26
Σχήμα3.2 Συχνότητες περιοχής ISM ανά περιοχή του κόσμου.....	28
Σχήμα3.3 Υπολογισμός του επόμενου Hop.....	30
Σχήμα3.4 Υλοποίηση καναλιού διπλής κατεύθυνσης στο Bluetooth.....	31
Σχήμα3.5 Μορφή πακέτων Bluetooth.....	31
Σχήμα3.6 Λειτουργία των ARQs στο Bluetooth.....	33
Σχήμα3.7 Μηχανή καταστάσεων του Bluetooth.....	34
Σχήμα3.8 Αναζήτηση συσκευών και δημιουργία σύνδεσης στο Bluetooth....	37
Σχήμα3.9 Τοπολογία του Bluetooth / μικροδίκτυα.....	41
Σχήμα3.10 Τοπολογία Scatternet στο Bluetooth.....	41
Σχήμα4.1 Ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο.....	46
Σχήμα4.2 Αλλαγή τοπολογίας λόγω κινητότητας.....	47
Σχήμα4.3 Δρομολόγηση με το πρωτόκολλο CGSR από τον κόμβο Α στον κόμβο Β.....	51
Σχήμα4.4 Διάδοση ενός πακέτου αιτήματος διαδρομής (RREQ)[16].....	54
Σχήμα4.5 Διάδοση ενός πακέτου απάντησης διαδρομής (RREP)[16].....	54
Σχήμα5.1 Οι παραγόμενοι θόρυβοι λόγω της ύπαρξης φούρνου μικροκυμάτων.....	64
Σχήμα5.2 Η εν λόγω συσκευή.....	65
Σχήμα5.3 Ένα παράδειγμα του interface.....	66
Σχήμα5.4 Το πειραματικό μας δίκτυο.....	68
Σχήμα5.5 Μέσος όρος ρυθμού μετάδοσης δικτύου κατά την προσθήκη ενεργών συνδέσεων.....	69
Σχήμα5.6 Διάγραμμα απεικόνισης μέσου όρου Latency.....	69

Σχήμα5.7 Το δίκτυο του πρώτου πειράματος μετά την προσθήκη μιας συσκευής σε κατάσταση ύπνου.....	70
Σχήμα5.8 Μέσος όρος ρυθμού μετάδοσης δικτύου κατά την προσθήκη ενεργών συνδέσεων και μιας συσκευής σε κατάσταση ύπνου.....	71
Σχήμα5.9 Διάγραμμα απεικόνισης μέσου όρου Latency μετά και την είσοδο της νέας συσκευής.....	71
Σχήμα5.10 Το δίκτυο διασποράς του 3 ^{ου} Σεναρίου	73
Σχήμα5.11 Σύγκριση Average Network Throughput μεταξύ μικροδικτύων και δικτύου διασποράς.....	73
Σχήμα5.12 Μέσος Όρος Latency μικροδικτύων και δικτύου διασποράς... ..	74
Σχήμα5.13 Σύγκριση τεχνολογιών IrDA και Bluetooth (όπου * οι αναμενόμενες αλλά και μη αληθείς τιμές των υποθετικών μετρήσεων).....	75

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο Εργασίας

Ασύρματη τεχνολογία, η αιχμή των τεχνολογιών επικοινωνίας στον πλανήτη και ένας τομέας που απαιτεί τεχνογνωσία για να ενασχοληθεί κανείς με επιτυχία. Στο πλαίσιο αυτής της παραδοχής η παρούσα έρευνα επιχειρεί να διαφωτίσει κάποια από τα σημεία που ίσως στο μέλλον αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας.

Ξεκινώντας όμως από την αρχή πρέπει να εμβαθύνουμε στο θέμα εξετάζοντας βιβλιογραφικά ορισμένες ορολογίες και τεχνολογίες που θα μας βοηθήσουν να αφομοιώσουμε ευκολότερα τα πραγματευόμενα αντικείμενα της μελέτης μου γύρω από τις ασύρματες τεχνολογίες, τα δίκτυα προσωπικής περιοχής και το πρότυπο Bluetooth γενικότερα.

Πλέον οι ασύρματοι τρόποι επικοινωνίας έχουν διεισδύσει στην καθημερινότητά μας. Ένας, και ίσως ο πιο διαδεδομένος από αυτούς είναι το Wi – Fi (Wireless Fidelity). Είναι ένας τύπος εγκεκριμένος από την Wi – Fi Alliance που περιγράφει τη βαθύτερη τεχνολογία του ασύρματου τοπικού δικτύου βασισμένο στις προδιαγραφές του προτύπου IEEE 802.11. Το Wi – Fi προοριζόταν να χρησιμοποιηθεί για κινητούς υπολογιστικούς μηχανισμούς, όπως laptops, σε τοπικά δίκτυα αλλά τώρα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για εφαρμογές, πρόσβαση στο internet, παιχνίδια και καταναλωτικές συσκευές, όπως τηλεοράσεις και DVD players. Υπάρχουν πολλά υποδείγματα που αναπτύσσονται για να επιτρέψουν στο Wi – Fi να χρησιμοποιηθεί από αυτοκίνητα διατηρώντας έξυπνο σύστημα μεταφοράς, αυξάνοντας την ασφάλεια και επιτρέποντας κινητό εμπόριο. Μια συσκευή με

Wi – Fi μηχανισμό, όπως υπολογιστή, τηλέφωνο ή προσωπικό ψηφιακό βοηθό (PDA), μπορεί εύκολα να συνδεθεί στο internet.

Η ασύρματη τεχνολογία Bluetooth είναι μια ασύρματη τεχνολογία μικρών αποστάσεων. Η τεχνολογία Bluetooth μπορεί να μεταδώσει σήματα σε μικρές αποστάσεις ανάμεσα σε τηλέφωνα, υπολογιστές και άλλους μηχανισμούς, ως εκ τούτου απλουστεύει επικοινωνίες και συγχρονισμούς ανάμεσα σε μηχανισμούς. Αυτό είναι ένα διεθνές πρότυπο για να :

- ❖ Αφαιρεθούν τα τηλεφωνικά σύρματα και τα καλώδια ανάμεσα σε δύο ακίνητους ή κινητούς μηχανισμούς.
- ❖ Διευκολυνθεί η επικοινωνία ανάμεσα σε δύο ηχητικές πηγές ή ανάμεσα σε δύο πομπούς δεδομένων.
- ❖ Δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ad – hoc, (αδόμητων) δικτύων που να μπορούν να επιτυγχάνουν συγχρονισμό ανάμεσα σε όλες τις προσωπικές συσκευές ενός ατόμου¹.

Η ασύρματη τεχνολογία Bluetooth περιλαμβάνει software, hardware και διαχείριση απαιτήσεων. Πέρα από μηχανισμούς αποδεσμευμένους από καλώδια σύνδεσης, η ασύρματη τεχνολογία Bluetooth εξασφαλίζει μια διεθνή γέφυρα δικτύων, μια περιφερειακή εφαρμογή διεπαφής και ένα μηχανισμό που σχηματίζει μικρά ιδιωτικά Ad – hoc ομαδοποιημένα σε συνδεδεμένους μηχανισμούς μακριά από ακίνητα δίκτυα. Το ασύρματο Bluetooth χρησιμοποιεί μια γρήγορη αναγνώριση και συχνότητα για να εγκαταστήσει μια αδιάλειπτη σύνδεση, γερή ακόμα και σε θορυβώδη ασύρματα περιβάλλοντα².

1.2 Συνεισφορά εργασίας

Πρώτη και κυριότερη συνεισφορά της παρούσας εργασίας αποτελεί η εκτενής βιβλιογραφική έρευνα σε τεχνολογίες wireless nets, Bluetooth, PAN(Personal Area Networks – Δίκτυα προσωπικής περιοχής), ad – hoc networks, που

¹ Βλ. Κεφ2 παρ. 2.5

² Μόνη εξαίρεση οι φούρνοι μικροκυμάτων Βλ. Κεφ5

δημιουργεί μια αναφορά η οποία θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη σε οποιονδήποτε θα επιθυμούσε μια πρώτη γνωριμία με αυτό το χώρο.

Κατά την διαδικασία διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας προέκυψε η ανάγκη πρακτικής εφαρμογής της θεωρίας με απώτερο σκοπό την κατανόηση των βασικών αρχών ενός PAN σε τεχνολογία Bluetooth. Αυτή η ανάγκη οδήγησε στην δημιουργία τεχνητών σεναρίων με σκοπό την καταγραφή συμπεριφοράς ενός Bluetooth δικτύου. Γι' αυτό το λόγο διεξάγονται κάποιες πειραματικές μετρήσεις οι οποίες κατά την άποψη του συγγραφέα θα βοηθήσουν σε μελλοντικές εργασίες ως προς την επιλογή τύπου δικτύου από την άποψη πως ο μελλοντικός αναγνώστης, έχοντας στα χέρια του αποτελέσματα μετρήσεων και καταγραφής συμπεριφοράς ενός δικτύου Bluetooth σε πραγματικές συνθήκες, θα μπορεί να αξιολογήσει την αναγκαιότητα δημιουργίας ενός τέτοιου δικτύου, θα μπορεί να ξέρει τους περιορισμούς σε επίπεδο υλοποίησης όπως επίσης θα είναι σε θέση να διατάξει το καλύτερο δυνατό συνδυασμό συσκευών από σκοπιά απόδοσης³. Επίσης ο χώρος των ασύρματων δικτύων περιλαμβάνει τεράστια βιβλιογραφία η οποία υπάρχει κυρίως στα αγγλικά. Ο μελλοντικός μελετητής / φοιτητής που θα θελήσει να ασχοληθεί με παρόμοιο θέμα θα έχει τη δυνατότητα πρόσβασης σε συγκεντρωμένη ύλη καθώς και σε πρακτικής φύσεως πληροφορίες.

1.3 Δομή εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 επιχειρείται μια γενική προσέγγιση στα ασύρματα δίκτυα. Ειδικότερα δίνεται έμφαση στη δομή και γενικότερες πληροφορίες πάνω στα δίκτυα προσωπικής περιοχής πως αυτά βρίσκουν εφαρμογή σήμερα και πως αποτελούν ενδεδειγμένη λύση για υλοποίηση συγκεκριμένων σεναρίων. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο πρότυπο Bluetooth που αποτελεί τον βασικό κορμό της εργασίας. Συγκεκριμένα αναφέρονται διεξοδικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του προτύπου και οι καταστάσεις στις οποίες πραγματοποιούνται οι βασικές λειτουργίες ενός Ad – Hoc δικτύου προσωπικής περιοχής που βασίζεται στο πρότυπο Bluetooth (IEEE 802,15). Έπειτα, στο Κεφάλαιο 4 γίνεται εκτενής αναφορά σε μεθοδολογίες δρομολόγησης και δομής ενός Ad – hoc δικτύου με

³ Βλ. Κεφ5

σκοπό να εξεταστεί ένα PAN από σκοπιά δομής υλοποίησης. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5 και με βάση την τεκμηρίωση της θεωρητικής βάσης που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια γίνεται υλοποίηση ενός PAN Ad – hoc δικτύου Bluetooth και καταγράφονται ποσοτικά δεδομένα που όπως θα «γίνει φανερό» μαρτυρούν τις προδιαγραφές του προτύπου. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 υπάρχει ο επίλογος και προτάσεις / σκέψεις για μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα και επισκόπηση δικτύων P.A.N

2.1 Εξέλιξη ασύρματων δικτύων

Σύμφωνα και με τις βιβλιογραφικές μελέτες του M.S Obaidat [3] αν και έχει ιστορία μεγαλύτερη από έναν αιώνα, η ασύρματη μετάδοση έχει εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο των επικοινωνιακών συστημάτων μόλις τα τελευταία 15 με 20 χρόνια. Ο τομέας των ασυρμάτων επικοινωνιακών συστημάτων αποτελεί σήμερα έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών. Τα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα, όπως και τα κυψελικά (cellular), τα ασύρματα (cordless), και τα δορυφορικά τηλέφωνα, αλλά και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), χρησιμοποιούνται ευρέως και αποτελούν χρήσιμο εργαλείο στην προσωπική και επαγγελματική ζωή πολλών ανθρώπων. Ένα σημαντικό παράδειγμα της δυναμικής της αγοράς των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων, όπως αναφέρεται στην εισαγωγή της μελέτης των Π.Νικοπολιτίδη, Γ.Παπαδημητρίου και Α.Πομπόρτση [15], αποτελεί η εκτίμηση ότι στα προσεχή χρόνια το πλήθος των συνδρομητών ασύρματων δικτύων θα υπερβεί το αντίστοιχο των συνδρομητών ενσύρματων δικτύων. Η εξάπλωση αυτή των ασύρματων συστημάτων οφείλεται σε διάφορα πλεονεκτήματα, με πιο σημαντικά την κινητικότητα (mobility) και το χαμηλό κόστος.

Τα ασύρματα δίκτυα είναι χρήσιμα στην μείωση των δαπανών δικτύωσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου απαιτεί σημαντικά λιγότερη (ή και καθόλου) καλωδίωση σε σύγκριση με την εγκατάσταση ενός ενσύρματου δικτύου. Αυτό το γεγονός είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε διάφορες περιπτώσεις :

- ❖ Στην εγκατάσταση δικτύων σε περιοχές όπου η τοποθέτηση καλωδίων είναι δύσκολη. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η τοποθέτηση καλωδίων σε ποταμούς, ωκεανούς κ.λ.π. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο αμιάντος που έχει τοποθετηθεί σε παλαιά κτίρια. Η εισπνοή των μορίων αμιάντου είναι πολύ επικίνδυνη, και έτσι είτε πρέπει να ληφθεί ειδική προφύλαξη κατά την τοποθέτηση των καλωδίων είτε ο αμιάντος πρέπει να αφαιρεθεί. Δυστυχώς, και οι δύο αυτές λύσεις είναι δαπανηρές και αυξάνουν το συνολικό κόστος της εγκατάστασης καλωδίων.
- ❖ Σε περίπτωση απαγόρευσης εγκατάστασης καλωδίων. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση δικτύων σε ιστορικά κτίρια.
- ❖ Στην εγκατάσταση προσωρινού δικτύου. Μόνο που στην περίπτωση αυτή, η εγκατάσταση καλωδίων δεν έχει νόημα, επειδή το δίκτυο θα χρησιμοποιηθεί για μικρό χρονικό διάστημα.

Στις παραπάνω περιπτώσεις, η εγκατάσταση μιας ασύρματης λύσης, όπως ενός ασύρματου τοπικού δικτύου, απαιτεί σημαντικά λιγότερο χρόνο σε σύγκριση με την εγκατάσταση ενός ενσύρματου. Ο λόγος είναι ο ίδιος με αυτόν που αναφέρεται παραπάνω : Δεν χρειάζεται να εγκατασταθεί κανένα καλώδιο.

Η ασύρματη μετάδοση εμφανίζεται πολύ παλιά στην ιστορία της ανθρωπότητας. Ακόμη και στα αρχαία χρόνια, οι άνθρωποι χρησιμοποίησαν πρωτόγονα συστήματα επικοινωνιών, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως ασύρματα. Τέτοια παραδείγματα είναι τα σήματα καπνού, τα σήματα με ανάκλαση του ηλιακού φωτός σε καθρέφτες, οι σημαίες, οι φωτιές κ.λ.π. Αναφέρεται ότι οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν ένα σύστημα επικοινωνιών (τις φρυκτωρίες) που βασιζόταν σε μια ομάδα σταθμών παρατήρησης στις κορυφές υψωμάτων, με κάθε σταθμό να είναι ορατός από τους γειτονικούς του. Μετά την λήψη ενός μηνύματος, ο σταθμός επαναλάμβανε το μήνυμα προκειμένου να το αναμεταδώσει στους γειτονικούς σταθμούς με τους οποίους είχε οπτική επαφή. Χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτό, γινόταν δυνατή η μετάδοση μηνυμάτων μεταξύ σταθμών τους οποίους χώριζαν πολύ μεγάλες αποστάσεις. Ανάλογα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν και από άλλους πολιτισμούς.

Η προέλευση των ασύρματων δικτύων, όπως τα γνωρίζουμε σήμερα, ξεκινά με την πρώτη ραδιομετάδοση. Αυτή πραγματοποιήθηκε το 1895, μερικά χρόνια μετά από μια άλλη σημαντική εφεύρεση, το τηλέφωνο. Εκείνη τη χρονιά, ο

Guglielmo Marconi έκανε την πρώτη ασύρματη μετάδοση με την χρήση ραδιοκυμάτων μεταξύ του νησιού Wight και ενός ρυμουλκού πλοίου που βρισκόταν σε απόσταση 18 μιλίων. Έξι χρόνια αργότερα, ο Marconi μετέδωσε επιτυχώς ένα ραδιοφωνικό σήμα από την Κορνουάλη της Βρετανίας στην άλλη άκρη του Ατλαντικού ωκεανού. Το 1902 πραγματοποιήθηκε η πρώτη αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των δύο πλευρών του Ατλαντικού ωκεανού. Στα χρόνια που ακολούθησαν μετά το επίτευγμα του Marconi, η μετάδοση μέσω ραδιοκυμάτων συνέχισε να εξελίσσεται. Η τηλεφωνία μέσω ραδιοκυμάτων χρονολογείται από το 1915, όταν πραγματοποιήθηκε η πρώτη συνομιλία μεταξύ πλοίων με ραδιοφωνική μετάδοση.[14]

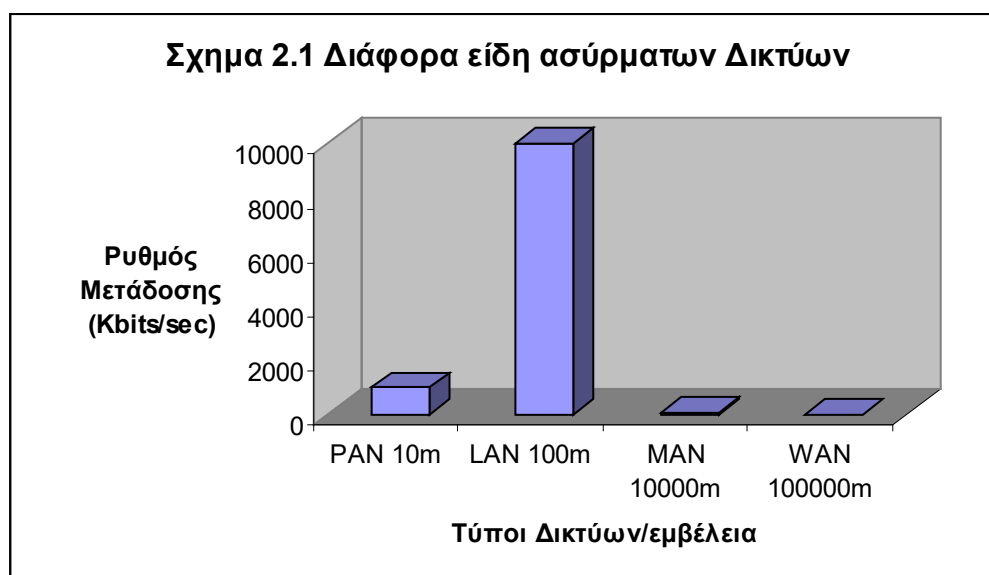
2.2 Ασφάλεια στα ασύρματα δίκτυα

Το ζήτημα της ασφάλειας αφορά σε όλα τα είδη των δικτύων. Ιδιαίτερα όμως στην περίπτωση των ασυρμάτων η πρόκληση είναι ακόμα μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ασύρματες μεταδόσεις είναι δυνατόν να υποκλαπούν πολύ πιο εύκολα απ' ό,τι οι ενσύρματες. Ο λόγος είναι πως, ενώ σε ένα ενσύρματο δίκτυο για να υποκλαπεί μια μετάδοση απαιτείται φυσική πρόσβαση στο καλώδιο, σε ένα ασύρματο δίκτυο οι μεταδόσεις είναι δυνατόν να υποκλαπούν ακόμη και εκατοντάδες ή χιλιάδες μέτρα μακριά από τον πομπό. Συνεπώς πρέπει να βρεθούν τρόποι ώστε να παρέχονται ικανοποιητικά επίπεδα ασφάλειας – ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως οι ηλεκτρονικές τραπεζικές συναλλαγές και το ηλεκτρονικό εμπόριο.

2.3 Εισαγωγή στις τεχνολογίες και εφαρμογές των P.A.N

Η έννοια του δικτύου προσωπικής περιοχής (Personal Area Network, P.A.N) διαφέρει από τους άλλους τύπους δικτύων δεδομένων (π.χ., τοπικά μητροπολιτικά και ευρείας περιοχής) σε ό,τι αφορά το μέγεθος, την απόδοση, και το κόστος (Σχήμα 2.1). Τα δίκτυα προσωπικής περιοχής (P.A.N), σύμφωνα με τους D.F. Bantz και F.J. Bauchot [23], βρίσκονται – σε ό,τι αφορά την κλίμακα – ακριβώς υπό τα τοπικά δίκτυα (L.A.N) και στοχεύουν σε εφαρμογές που απαιτούν

επικοινωνίες περιορισμένης εμβέλειας εντός του προσωπικού χώρου λειτουργίας (Personal Operating Space, P.O.S) ενός ατόμου ή μιας συσκευής. Ο όρος P.O.S χρησιμοποιείται για να ορίσει το χώρο που περιβάλλει ένα άτομο ή μια συσκευή και μπορεί να θεωρηθεί ως μια φουσαλίδα γύρω του. Καθώς το άτομο εκτελεί τις καθημερινές του δραστηριότητες, ο προσωπικός του χώρος αλλάζει περιλαμβάνοντας διάφορες συσκευές (όπως κινητά τηλέφωνα, βομβητές, ακουστικά, διασυνδέσεις, P.C, κλπ.) με τις οποίες θα ήταν επιθυμητή η δυνατότητα εύκολης και διαφανούς ανταλλαγής πληροφοριών. Τα δίκτυα P.A.N στοχεύουν στην αποδοτική παροχή αυτής της δυνατότητας.



Σχήμα 2.1 Διαφορετικά είδη ασύρματων δικτύων

Υπάρχουν διάφορα μέσα επικοινωνίας που μπορούν να επιλεγούν για την υλοποίηση ενός δικτύου P.A.N, όπως το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο η ασύρματη μετάδοση, και τα οπτικά σήματα. Μια από τις πρώτες ερευνητικές προσπάθειες για την δημιουργία προσωπικών δικτύων αποτέλεσε, το 1996, το ερευνητικό πρόγραμμα της IBM που είναι γνωστό «Διασωματικό επικοινωνιακό δίκτυο προσωπικής περιοχής κοντινού πεδίου» (Near field Intra Body Communication P.A.N, NIC-PAN)[21]. Η συγκεκριμένη λύση χρησιμοποιεί το ανθρώπινο σώμα ως μέσο επικοινωνίας, καθώς αυτό άγει την ηλεκτρική ενέργεια επειδή από τη φύση του περιέχει άλατα. Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση, οι συσκευές που είναι συμβατές με την τεχνολογία NIC-PAN και

φοριούνται από ένα χρήστη μπορούν να επικοινωνήσουν η μια με την άλλη μέσω του σώματος του, οπότε και δεν απαιτείται κανένα καλώδιο. Επιπλέον, ένας χρήστης που φορά μια τέτοια συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με μια άλλη συσκευή την οποία φέρει κάποιος άλλος χρήστης μέσω μιας απλής χειραψίας. Για να μεταδοθούν τα δεδομένα μεταξύ των συσκευών που βρίσκονται σε επαφή με το σώμα ή τα ρούχα των χρηστών η συσκευή – μεταδότης NIC – PAN «φορτίζει» και «αποφορτίζει» το ανθρώπινο σώμα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διακύμανσης δυναμικού μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος. Αυτές οι αλλαγές του δυναμικού λαμβάνονται από την συσκευή – δέκτη NIC – PAN και έτσι εγκαθίσταται ένα κανάλι επικοινωνίας. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται σε αυτή τη προσέγγιση είναι περίπου 1 νανοαμπέρ, μια τιμή πολύ μικρότερη από το φυσικό ηλεκτρικό ρεύμα του ανθρώπινου σώματος. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας κατασκευάστηκε ένα μικρό πρωτότυπο το οποίο πέτυχε ρυθμούς μετάδοσης γύρω στα 2,4 KBps.

Ενώ η προσέγγιση NIC –PAN δεν εξελίχθηκε σε κάτι περισσότερο από ένα ερευνητικό πρόγραμμα, η αληθινή επανάσταση στο τομέα των δικτύων PAN επήλθε με την χρήση ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής (Wireless PAN, WPAN). Η πρώτη προσπάθεια καθορισμού προτύπου για δίκτυα προσωπικής περιοχής ήταν ένα πρόγραμμα της Ericsson το 1994, το οποίο στόχευε στην εύρεση μιας λύσης για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κινητών τηλεφώνων και των σχετικών συνοδευτικών εξαρτημάτων (π.χ, ακουστικών). Το πρόγραμμα αυτό ονομάστηκε Bluetooth από τον βασιλιά που ένωσε τις φυλές των Βίκινγκς.⁴

Μια άλλη πρωτοβουλία από μέλη της Βιομηχανίας για την ανάπτυξη ενός προτύπου για δίκτυα PAN ξεκίνησε το 1997 με το σχηματισμό της ομάδας εργασίας HomeRF. Κύριος στόχος αυτής της ομάδας είναι να κάνει δυνατή τη συνδυασμένη ασύρματη δικτύωση φωνής και δεδομένων μέσα στο σπίτι. Η έκδοση 1.0 του HomeRF δημοσιεύτηκε το 1999 και υποστήριζε 4 συνδέσεις φωνής των 32 KBps, ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 1,6MBps και εμβέλεια έως 50 μέτρα. Η έκδοση 2.0 του HomeRF δημοσιεύτηκε το 2001 και αύξησε αυτές τις τιμές σε 8 κανάλια και 10MBps αντίστοιχα καθιστώντας το HomeRF καταλληλότερο από το Bluetooth για την μετάδοση μουσικής, ήχου, βίντεο και άλλων εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων. Ωστόσο, το Bluetooth φαίνεται να έχει περισσότερη

⁴ Περαιτέρω πληροφορίες για το πρότυπο αναφέρονται στην αρχή του 3^{ου} Κεφαλαίου

υποστήριξη από την βιομηχανία. Το HomeRF υποστηρίζει και αυτό ασύγχρονα κανάλια δεδομένων και κανάλια φωνής χρησιμοποιώντας διαμόρφωση FHSS στη ζώνη συχνοτήτων ISM των 2,4GHz.

Μετά την εμφάνιση των προτύπων Bluetooth και HomeRF το ίδρυμα IEEE των Η.Π.Α αποφάσισε να συμμετάσχει και αυτό στον χώρο ανάπτυξης προδιαγραφών για δίκτυα προσωπικής περιοχής (PAN). Έτσι, το Μάρτιο του 1999 διαμορφώθηκε η ομάδα εργασίας 802.15 [2,16], με την ευθύνη του ορισμού προδιαγραφών για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο πρόσβασης στο μέσο των δικτύων PAN, τα οποία και εμφανίζουν μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης και μικρή κατανάλωση ενέργειας. Αν και υπήρχε η ομάδα εργασίας 802,11 που ασχολείται με τα δίκτυα WLAN, αποφασίστηκε ότι ήταν αναγκαία η δημιουργία μιας νέας ομάδας εργασίας για την προτυποποίηση των δικτύων PAN. Η επιλογή αυτή αποδίδεται στο γεγονός ότι υπάρχει πολύ μεγαλύτερο ενδιαφέρον σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, το μέγεθος, και το κόστος των προϊόντων δικτύωσης PAN, το οποίο και προκύπτει από τις απαιτήσεις για τις συσκευές PAN έναντι των συσκευών WLAN :

- ❖ Μικρό μέγεθος και βάρος, προκειμένου να μπορούν να μεταφέρονται ή να φοριούνται εύκολα για μεγάλες χρονικές περιόδους. Από την άλλη μεριά, το μέγεθος και το βάρος των καρτών για δίκτυα WLAN αποτελεί δευτερεύον ζήτημα. Ο λόγος είναι ότι οι συσκευές αυτές είναι συνήθως συνδεδεμένες σε φορητούς υπολογιστές (που δεν μεταφέρονται συνεχώς από τους χρήστες) ή σε σταθερούς υπολογιστές γραφείου.

- ❖ Χαμηλό κόστος ώστε να μην αυξηθεί το συνολικό κόστος της συσκευής. Οι συσκευές PAN στοχεύουν στην παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας σε εμπορικές ηλεκτρονικές συσκευές. Προκειμένου να γίνει εφικτό το μικρό μέγεθος των συσκευών, οι λειτουργίες δικτύωσης PAN ενσωματώνονται στις συσκευές. Για να ανταποκριθεί η αγορά, θα πρέπει το κόστος αυτής της λειτουργικότητας να είναι μικρό σε σύγκριση με το συνολικό κόστος της συσκευής. Από την άλλη μεριά, οι χρήστες μπορούν να αγοράζουν χωριστά τις κάρτες για δίκτυα WLAN, με συνέπεια το αντίκτυπο του κόστους τους να μην είναι τόσο σημαντικό.

Η ομάδα εργασίας 802,15 έχει 4 ομάδες καθηκόντων (Task Groups TG)[2,16]:

- ❖ TG1. Ασχολείται με ένα πρότυπο για δίκτυα PAN που βασίζεται στο πρότυπο Bluetooth.
- ❖ TG2. Στοχεύει στη διευκόλυνση της συνύπαρξης δικτύων PAN και WLAN.
- ❖ TG3. Έχει στόχο την δημιουργία ενός προτύπου για δίκτυα PAN με ρυθμούς μετάδοσης που να ξεπερνούν τα 20Mbps, διατηρώντας χαμηλό το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας, καθώς και την συμβατότητα με τα υπόλοιπα βιομηχανικά πρότυπα.
- ❖ TG4. Στοχεύει στην ανάπτυξη ενός προτύπου για δίκτυα PAN που να επιτρέπει τη λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, με διατήρηση της κατανάλωσης ενέργειας σε τόσο χαμηλά επίπεδα ώστε να μπορεί η μπαταρία να διαρκεί για μήνες ή και χρόνια.

Λόγω του ότι οι διάφορες πρωτοβουλίες των κοινοπραξιών της βιομηχανίας για την ανάπτυξη προτύπων για δίκτυα PAN προηγήθηκαν της πρωτοβουλίας του ιδρύματος IEEE, μια βασική αποστολή της ομάδας εργασίας 802,15 θα είναι να συνεργαστεί στενά με αυτές τις κοινοπραξίες (όπως των Bluetooth και HomeRF) προκειμένου να επιτευχθεί διαλειτουργικότητα μεταξύ δικτύων PAN τα οποία συνυπάρχουν σε ένα κοινόχρηστο ασύρματο σύστημα μετάδοσης.

2.4 Ζητήματα των δικτύων PAN

Στην έρευνα του ο T.G Zimmerman δηλώνει πως υπάρχουν ορισμένα ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου PAN[21]. Το πιο προφανές, που επηρεάζει όλους τους τύπους ασύρματων δικτύων, αφορά στον αυξημένο ρυθμό σφαλμάτων (BER) του ασύρματου μέσου. Ο κύριος λόγος για τον αυξημένο ρυθμό BER είναι ο ατμοσφαιρικός θόρυβος τα φυσικά εμπόδια που βρίσκονται στην πορεία του σήματος, η πολύδρομη διάδοση, και οι παρεμβολές από άλλα συστήματα. Κύριες αιτίες παρεμβολών στην ζώνη ISM των 2,4GHz, στην οποία λειτουργούν τα δίκτυα PAN, αποτελούν οι πηγές στενής και ευρείας ζώνης, όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων. Εκτός από τις ισχυρές ιδιότητες αποφυγής παρεμβολών στη διαμόρφωση ευρέως φάσματος που υιοθετείται για την

ελεύθερη μετάδοση στη ζώνη ISM των 2,4GHz, οι τεχνικές των αυτόματων αιτήσεων επανάληψης (Automatic Repeat Request, ARQ) και μεταγενέστερης διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και προς σε αυτή την κατεύθυνση. Επιπλέον, τα δίκτυα PAN πρέπει να αντιμετωπίζουν τις παρεμβολές από άλλα δίκτυα PAN και WLAN που συνυπάρχουν στον ίδιο χώρο, αν και αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα λόγω της χρήσης της διαμόρφωσης FHSS.

Τα δίκτυα PAN πρέπει να παρέχουν πλήρη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ όλων των συσκευών στον προσωπικό χώρο ενός ατόμου. Ωστόσο, δύο συσκευές ενός τέτοιου δικτύου που επικοινωνούν μέσα στον προσωπικό χώρο ενός ατόμου δεν πρέπει να παρεμβάλλονται με άλλες συσκευές όταν αυτό δεν είναι επιθυμητό.

Οι συσκευές PAN προβλέπεται να μεταφέρονται από τους ανθρώπους για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Κατά συνέπεια, πρέπει να είναι αρκετά μικρές ώστε να μεταφέρονται χωρίς κόπο. Οι συσκευές αυτές χρειάζεται επομένως να είναι όσο το δυνατό μικρές και ελαφριές. Η ενεργειακή τους απόδοση πρέπει να είναι υψηλή για να μην ενοχλείται ο χρήστης από τη συχνή επαναφόρτιση των μπαταριών με ταυτόχρονη διατήρηση του βάρους σε χαμηλά επίπεδα. Κατά συνέπεια, απαιτούνται τόσο συσκευές χαμηλής κατανάλωσης όσο και μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας. Επιπλέον, το μικρό μέγεθος και βάρος των συσκευών δεν πρέπει να οδηγεί σε αύξηση του κόστους των συσκευών PAN έτσι ώστε να γίνουν αποδεκτές από την αγορά.

Τα ζητήματα ασφάλειας είναι επίσης κρίσιμα στα δίκτυα PAN. Οι επικοινωνίες πρέπει να είναι ασφαλείς και να υποκλέπτονται δύσκολα. Επομένως απαιτείται η ανάπτυξη ανθεκτικών μοντέλων πιστοποίησης και κρυπτογράφησης σε μια προσπάθεια να αποτραπεί η μη ηθελημένη έναρξη επικοινωνίας και η υποκλοπή. Τα μοντέλα αυτά θα πρέπει να αναπτυχθούν με δεδομένες τις σχετικά μικρές δυνατότητες επεξεργασίας και ισχύος των συσκευών PAN, οι οποίες προκύπτουν από τις απαιτήσεις για μειωμένο κόστος, μέγεθος και βάρος.

Τέλος όπως και σε όλες τις περιπτώσεις ασύρματων δικτύων, τα ζητήματα ανθρώπινης ασφάλειας και υγείας είναι μεγάλου ενδιαφέροντος. Μια συσκευή PAN θα βρίσκεται συνήθως πολύ κοντά στον χρήστη για μεγάλα χρονικά διαστήματα, οπότε ακόμη και οι μικροί κίνδυνοι θα μπορούσαν ενδεχομένως να έχουν επιπτώσεις στον χρήστη με το πέρασμα του χρόνου. Το θετικό εδώ είναι ότι

οι συσκευές PAN εκπέμπουν συνήθως σε επίπεδα ισχύος έως 0,5W. Παρά το γεγονός ότι δεν έχει δοθεί ακόμη μια τελική απάντηση στο θέμα των επιπτώσεων της ακτινοβολίας στην ανθρώπινη υγεία, είναι καθησυχαστικό για τους καταναλωτές να γνωρίζουν ότι τα επίπεδα ισχύος στα οποία λειτουργεί μια συσκευή PAN βρίσκονται ουσιαστικά χαμηλότερα από την περιοχή των 600mW – 3W των συνηθισμένων κινητών τηλεφώνων.

2.5 Εφαρμογές Δικτύων PAN[25,16]

Κύριος στόχος των δικτύων προσωπικής περιοχής είναι η αποδέσμευση από τα καλώδια και η εύκολη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ασύρματων συσκευών κάθε είδους. Το πλήθος των διαφόρων πιθανών εφαρμογών μπορεί να είναι πολύ μεγάλο. Παρακάτω παρατίθεται ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο :

- ❖ *Συγχρονισμός προσωπικών συσκευών.* Αυτόματος συγχρονισμός δεδομένων μεταξύ ασύρματων κινητών συσκευών, όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές κλπ οι οποίες εκτελούν παρόμοιες εφαρμογές.

- ❖ *Αδόμητη συνδεσιμότητα.* Μεταφορά αρχείων και άλλων πληροφοριών προς τη συσκευή PAN ενός άλλου χρήστη.

- ❖ *Υπολογιστής χωρίς καλώδια.* Ασύρματη διασύνδεση με τον υπολογιστή διαφόρων συσκευών όπως τα ποντίκια, τα πληκτρολόγια και τα χειριστήρια παιχνιδιών.

- ❖ *Ασύρματες περιφερειακές μονάδες.* Πρόσβαση σε ασύρματες περιφερειακές μονάδες όπως εκτυπωτές, σαρωτές, φαξ, φωτοτυπικά, συστήματα αποθήκευσης κλπ.

- ❖ *Ασύρματη πρόσβαση σε τοπικά δίκτυα.* Οι συσκευές PAN μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στις υπηρεσίες που προσφέρονται από κάποιο ενσύρματο τοπικό δίκτυο μέσω σημείων πρόσβασης (AP) τα οποία είναι συμβατά με τα δίκτυα PAN .

- ❖ *Πρόσβαση στο διαδίκτυο.* Λήψη ηλεκτρονικού ταχυδρομείου ή περιήγηση σε ιστοσελίδες μέσω μιας συσκευής PAN (πχ το κινητό τηλέφωνο).

- ❖ *Ασύρματος συγχρονισμός.* Συγχρονισμός φορητών συσκευών με σταθερούς κεντρικούς υπολογιστές μέσω σημείων πρόσβασης για δίκτυα PAN.

❖ *Ασύρματη Τηλεφωνία/ ακουστικά.* Ο χρήστης επιλέγει ένα όνομα επαφής από την φορητή του συσκευή, η συσκευή ζητά ασύρματα από το κοντινό της κινητό τηλέφωνο να σχηματίσει τον αριθμό και ο ήχος από την κλήση διαβιβάζεται ασύρματα στα ακουστικά του χρήστη.

❖ *Αυτοματοποιημένο σπίτι.* Απρόσκοπτη μεταφορά εντολών στις οικιακές συσκευές PAN. Για παράδειγμα, αυτόματο ξεκλείδωμα της πόρτας κατά την άφιξη του χρήστη στο σπίτι του ή αυτόματος συντονισμός της τηλεόρασης στο αγαπημένο του κανάλι κατά την είσοδό του σε ένα δωμάτιο.

❖ *Ηλεκτρονικές αγορές/ κρατήσεις.* Οι συσκευές PAN είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για την ηλεκτρονική κράτηση εισιτηρίων. Για παράδειγμα, η συσκευή PAN ενός χρήστη μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να στείλει αμέσως ένα αίτημα για ένα εισιτήριο συγκεκριμένης πτήσης μόλις μπει ο χρήστης στον αερολιμένα, αποφεύγοντας έτσι τις μεγάλες ουρές και τους μεγάλους χρόνους αναμονής των παραδοσιακών διαδικασιών κράτησης.

❖ *Καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.* Ιατρικές συσκευές με διασύνδεση PAN είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αυξηθεί η ασφάλεια των ασθενών. Για παράδειγμα, οι βηματοδότες θα μπορούσαν να παρακολουθούνται και να ελέγχονται από μακριά μέσω διασύνδεσης PAN ή να προγραμματιστούν ώστε να καλούν αμέσως ασθενοφόρο στέλνοντας πληροφορίες για την κατάσταση του ασθενή σε περίπτωση καρδιακής προσβολής ή άλλου σοβαρού προβλήματος υγείας.

Κεφάλαιο 3

Η τεχνολογία Bluetooth

Η ιστορία της τεχνολογίας Bluetooth [28] ξεκινά στα μέσα της δεκαετίας του 90 όταν η εταιρεία Ericsson ξεκίνησε τη μελέτη για την ανάπτυξη μιας τεχνολογίας βασισμένη σε ραδιοκύματα (radio interface) που θα αντικαθιστούσε τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών. Η νέα τεχνολογία προοριζόταν να χρησιμοποιηθεί σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, ασύρματα ακουστικά και περιφερειακά υπολογιστών και η αγορά στην οποία στόχευε ήταν άνθρωποι που ασχολούνταν με τις επιχειρήσεις και ταξίδευαν συχνά. Βάσει αυτών, σαν απαιτήσεις από τη νέα τεχνολογία οριοθετήθηκαν τα ακόλουθα:

- ❖ Λειτουργία σε παγκόσμιο επίπεδο
- ❖ Λειτουργία σε περιβάλλοντα χωρίς υποδομή (ad-hoc λειτουργία)
- ❖ Υποστήριξη μεταφοράς τόσο δεδομένων όσο και φωνής
- ❖ Μικρό μέγεθος και κόστος
- ❖ Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Το Bluetooth ήταν μια ελπιδοφόρα προσέγγιση και, έτσι, οι Nokia, Intel, Toshiba και η IBM συμμαχισαν τον Μάιο του 1998 με την Ericsson για την συγκρότηση της ειδικής ομάδας ενδιαφέροντος Bluetooth (Special Interest Group SIG). Σκοπός αυτής της ομάδας είναι η ανάπτυξη ενός κοινώς αποδεκτού προτύπου για δίκτυα PAN που να καλύπτει τις ανάγκες επικοινωνίας όλων των κινητών συσκευών που βρίσκονται σε περιορισμένο γεωγραφικό χώρο, ανεξάρτητα από το μέγεθος και την διαθέσιμη ενέργεια τους. Το μέγεθος της ομάδας SIG έχει αυξηθεί σήμερα από τα 5 αρχικά μέλη σε περίπου 2000. Οποιαδήποτε ενδιαφερόμενη εταιρεία έχει την άδεια να συμμετάσχει στην ομάδα SIG με τον

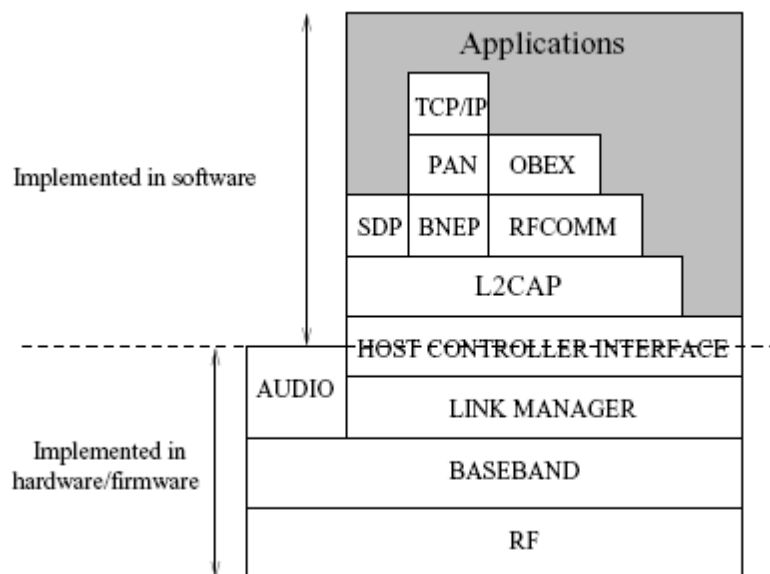
όρο να επιτρέπει σε όλα τα υπόλοιπα μέλη να χρησιμοποιούν ελεύθερα τις όποιες πατέντες, σε μια προσπάθεια να διατηρηθεί το πρότυπο ανοικτό. Η έκδοση 1.0 της προδιαγραφής Bluetooth κυκλοφόρησε από την ομάδα SIG το 1999, και ακολούθησε η έκδοση 1.1 το 2001.

Και οι δύο αυτές εκδόσεις υποστηρίζουν κανάλια φωνής των 64KBps και ασύγχρονα κανάλια δεδομένων, είτε ασύμμετρα με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 721KBps στη μια κατεύθυνση και 57,6 στην άλλη είτε συμμετρικά με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 432KBps και στις δύο κατευθύνσεις. Το πρότυπο Bluetooth χρησιμοποιεί διαμόρφωση διασποράς φάσματος μεταπήδησης συχνότητας (Frequency Hopping Spread Spectrum FHSS) στη ζώνη των 2,4GHz. Η υποστηριζόμενη εμβέλεια είναι 10 μέτρα με δυνατότητα επέκτασης μέχρι τα 100 μέτρα [22].

Σήμερα το πρότυπο του Bluetooth βρίσκεται στην έκδοση βρίσκεται στην έκδοση 1.1 [30] και έχει τύχει ευρείας αποδοχής από τη βιομηχανία, με νέα προϊόντα που το χρησιμοποιούν να εμφανίζονται συνεχώς. Το Bluetooth SIG εργάζεται τώρα ταυτόχρονα προς τις εκδόσεις 1.2 και 2 του προτύπου. Η έκδοση 1.2 θα έχει μικρές βελτιώσεις πάνω στο υπάρχον πρότυπο, ενώ η έκδοση 2 αναμένεται να δώσει λύσεις σε πολλά από τα υπάρχοντα προβλήματα. Στο μεταξύ η ομάδα εργασίας της IEEE που εργάζεται πάνω στο πρότυπο 802.15 [2] που αφορά στα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής επέλεξε το Bluetooth σαν την τεχνολογία στην οποία θα στηριχθεί το πρότυπο.

3.1 Επισκόπηση Αρχιτεκτονικής / Αρχιτεκτονική Υλοποίησης

Σύμφωνα με τον Matthew S. Gast στο [26] το Bluetooth έχει δομηθεί σαν ένα σύνολο στρωμάτων όπως φαίνονται στο σχήμα 3.1. Μια υλοποίηση (στοίβα) του Bluetooth, περιέχει τόσο μέρη υλικού (hardware) όσο και μέρη λογισμικού. Η δόμηση σε στρώματα απλοποιεί την υλοποίηση συσκευών Bluetooth αλλά και διευκολύνει την συγγραφή του μέρους της στοίβας Bluetooth που υλοποιείται σε λογισμικό.



Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική του Bluetooth[32]

Τα μέρη που απεικονίζονται στο σχήμα 3.1 περιγράφονται συνοπτικά αμέσως παρακάτω:

- ❖ Επίπεδο ραδιοσυχνοτήτων (RF): Σε αυτό το επίπεδο υλοποιείται το κανάλι επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το Bluetooth με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 2.2. Επίσης το επίπεδο αυτό ασχολείται με την διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του σήματος, παρέχοντας στο επίπεδο Baseband μια ιδεατή ροή bits.

- ❖ Επίπεδο Baseband : Το επίπεδο αυτό αντιστοιχεί περίπου στο επίπεδο ελέγχου μέσου (Medium Access Control-MAC) του Bluetooth. Δηλαδή στο επίπεδο αυτό γίνεται η διαιτησία της χρήσης του καναλιού. Επίσης στο επίπεδο αυτό μετατρέπεται η ροή από bits που έρχεται από το επίπεδο ραδιοσυχνοτήτων σε πακέτα Bluetooth.

- ❖ Επίπεδο ελέγχου ζεύξης (Link Manager-LM): Χρησιμοποιεί τις δυνατότητες που παρέχει το baseband επίπεδο για να δημιουργήσει ζεύξεις (links) με άλλες συσκευές Bluetooth, εφαρμόζοντας το πρωτόκολλο LM (Link Manager Protocol-LMP).

- ❖ Επίπεδο διεπαφής ελέγχου (Host Controller Interface – HCI): Το επίπεδο αυτό προσφέρει στα στρώματα που βρίσκονται πάνω από αυτό πρόσβαση σε λειτουργίες χαμηλότερων επιπέδων. Είναι υλοποιημένο εν μέρει σε λογισμικό

firmware που τρέχει στη συσκευή Bluetooth και εν μέρει σε λογισμικό που τρέχει στη συσκευή που ελέγχει αυτήν. Έτσι επιτυγχάνεται διαφανής επικοινωνία των προγραμμάτων της συσκευής ελεγκτή με τη συσκευή Bluetooth πάνω από οποιοδήποτε δίαυλο επικοινωνίας (π.χ σειριακό URT, USB). Πέρα από αυτά το επίπεδο HCI δεν έχει άλλες λειτουργίες και γι' αυτό δε θα αναλυθεί περισσότερο.

❖ Επίπεδο λογικών καναλιών (Logical Link Control and Adaptation Protocol-L2CAP): Το επίπεδο έχει σαν κύριο σκοπό να παρέχει στα υψηλότερα επίπεδα πολλαπλά λογικά κανάλια πάνω από μια ζεύξη. Επίσης παρέχει στα υψηλότερα επίπεδα μέγιστη μονάδα μετάδοσης (Maximum Transmission Unit-MTU) μεγέθους μέχρι και 64K. Αυτό το κατορθώνει κάνοντας κατάτμηση/ ανακατασκευή των πακέτων από τα υψηλότερα επίπεδα σε/ από πακέτα που μπορεί να χειριστεί το επίπεδο Baseband.

❖ Υποστήριξη ήχου (Audio): Το επίπεδο αυτό κωδικοποιεί (κατά CVSD[31]) και στέλνει ήχο χωρίς καμία μεσολάβηση του Host Controller.

❖ Τα επίπεδα αυτά εμφανίζονται σε όλες τις υλοποιήσεις Bluetooth. Τα υπόλοιπα επίπεδα, που εμφανίζονται στο σχήμα 3.1, υπάρχουν ή όχι ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούμε τη συσκευή Bluetooth.

❖ RFCOMM: Το επίπεδο αυτό προσομοιώνει το πρωτόκολλο RS-232 για σειριακή επικοινωνία πάνω από το επίπεδο L2CAP. Έτσι μια πληθώρα εφαρμογών που έχουν προγραμματιστεί για να δουλεύουν πάνω από σειριακή πόρτα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, με το Bluetooth να μεταφέρει τα δεδομένα αντί του παραδοσιακού σειριακού καλωδίου.

❖ OBEX (Object Exchange): Το επίπεδο αυτό αποτελείται από ένα σύνολο πρωτοκόλλων για μεταφορά αντικειμένων πάνω από συνδέσεις Bluetooth. Τα πρωτόκολλα αυτά προϋπήρχαν του Bluetooth και δούλευαν πάνω από την τεχνολογία IrDA μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν.

❖ BNEP (Bluetooth Network Encapsulation Protocol): Το επίπεδο αυτό υλοποιεί ένα πρωτόκολλο ενθυλάκωσης πακέτων από άλλου τύπου δίκτυα και τη μεταφορά τους πάνω από Bluetooth.

❖ PAN (Personal Area Networking): Το επίπεδο αυτό έχει σαν σκοπό να δώσει τα απαραίτητα για τη δημιουργία ad-hoc TCP/IP δικτύων πάνω από το Bluetooth.

❖ Πρωτόκολλο ανακάλυψης υπηρεσιών (Service Discovery Protocol-SDP): Το επίπεδο SDP επιτρέπει σε μια συσκευή να ανακαλύψει τις υπηρεσίες που προσφέρουν άλλες συσκευές. Χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική πελάτη-εξυπηρετητή και η επικοινωνία γίνεται μέσω των λογικών καναλιών που προσφέρει το επίπεδο L2CAP.

3.2 Λειτουργία Επιπέδου Ραδιοσυχνοτήτων

3.2.1 Χαρακτηριστικά Πομπού

Για να είναι ελεύθερη (license free) η χρήση των συσκευών Bluetooth επιλέχθηκε να λειτουργούν στην περιοχή (band) των 2.4GHz που είναι γνωστή ως ISM band (Industrial Scientific Medical band). Οι συχνότητες που περιλαμβάνει η ISM band ανά χώρα, φαίνονται στο σχήμα 3.2. Συσκευές Bluetooth κατασκευασμένες για διαφορετικές περιοχές δεν είναι συμβατές.

Περιοχή	Συχνότητες	Διαθέσιμα Hops
Ιαπωνία	2471-2497MHz	$f = 2473 + kMHz, k = 0, \dots, 22$
Γαλλία, Ισπανία	2446.5-2483.5MHz	$f = 2454 + kMHz, k = 0, \dots, 22$
Υπόλοιπος Κόσμος	2400-2483.5MHz	$f = 2402 + kMHz, k = 0, \dots, 78$

Σχήμα 3.2 Συχνότητες περιοχής ISM ανά περιοχή του κόσμου[19]

Στο σήμα που εκπέμπεται γίνεται διαμόρφωση GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) και η ταχύτητα εκπομπής είναι 1Msymbol/sec. Η ισχύς εκπομπής των συσκευών Bluetooth κυμαίνεται από 1mW έως 100mW. Ανάλογα με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους, οι συσκευές κατατάσσονται σε 3 κλάσεις, με μέγιστη ισχύ 1mW, 2.5 mW και 100 mW. Ανάλογα με την ισχύ εκπομπής, οι συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν μέχρι σε απόσταση 5m, 20m και 100m αντίστοιχα.

3.2.2 Frequency Hopping

Στην ISM band, επειδή ακριβώς δεν απαιτείται άδεια ή μίσθωση για τη χρήση της, λειτουργούν και άλλες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων όπως HomeRF και IEEE 802.11 καθώς και οικιακές συσκευές όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων⁵. Για να μπορέσει να λειτουργήσει πάρα τις πιθανές αυτές παρεμβολές, το Bluetooth χρησιμοποιεί την τεχνική Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS – Αλλαγή Συχνότητας Ευρέως Φάσματος) [29].

Πιο αναλυτικά, χωρίζει το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων σε περιοχές του 1 MHz οι οποίες ονομάζονται διαδοχικά άλματα(hops).

Κάθε συσκευή Bluetooth εκπέμπει σε ένα hop για διάστημα 625 μsec και έπειτα αλλάζει hop. Η επιλογή του επόμενου hop γίνεται με καθορισμένο ψευδοτυχαίο τρόπο. Για να επικοινωνήσουν δύο συσκευές Bluetooth θα πρέπει να συγχρονίσουν τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούν αλλαγές συχνότητας (Frequency Hops). Στην περίπτωση που στην τρέχουσα συχνότητα του hop υπάρχει κάποια παρεμβολή και διαπιστωθεί λάθος στη λήψη του πακέτου, ζητείται η επαναμετάδοσή του.

Η χρήση της τεχνικής FHSS κατά τον C.M Cordeiro [19] είναι και ένας από τους λόγους που το κόστος των συσκευών Bluetooth είναι χαμηλό. Εναλλακτική της τεχνικής FHSS είναι η τεχνική DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum – Άμεση Σειρά Ευρέως Φάσματος) που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία WiFi (πρότυπο 802.11). Η τεχνική DSSS επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, αλλά πιο ακριβή στην υλοποίησή της, καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και είναι πιο ευαίσθητη στις παρεμβολές.

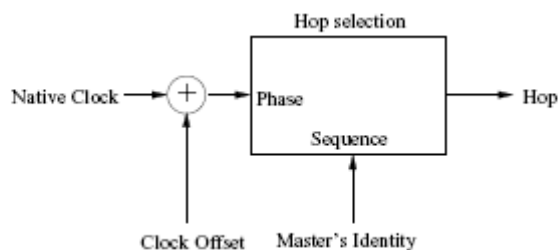
3.2.3 Ορισμός Καναλιού

Το κανάλι του Bluetooth υλοποιήση με το συνδυασμό της χρήσης ενός σχήματος Frequency Hopping και Time Division Duplex(FH/TDD – Αμφίδρομη Διάρθρωση Χρόνου). Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.2, το κανάλι διαιρείται χρονικά σε χρονοθυρίδες (timeslots) των 625μsec, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί

⁵ Αναφέρεται η περίπτωση παρεμβολών κατά την διάρκεια του Transmission σε ένα PAN στην εισαγωγή του 5^{ου} κεφαλαίου.

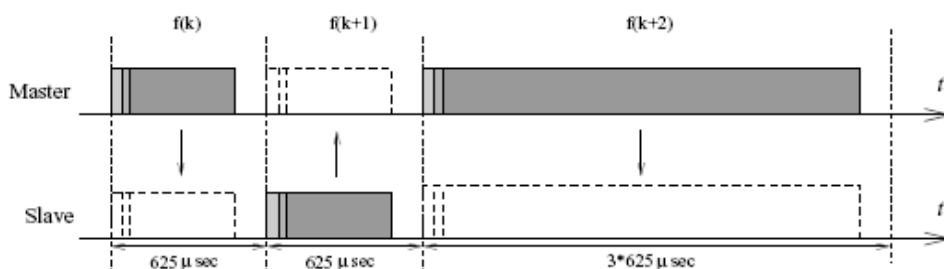
σε ένα συγκεκριμένο hop. Έχουμε δηλαδή 1600hops/sec. Σε κάθε χρονοθυρίδα μεταδίδεται σε ένα και μόνο πακέτο. Υπάρχουν και τύποι πακέτων που καταλαμβάνουν περισσότερες χρονοθυρίδες. Κατά την διάρκεια τέτοιων πακέτων η συχνότητα μετάδοσης δεν αλλάζει.

Δύο ή περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούν την ίδια ακολουθία από hops σχηματίζουν ένα μικροδίκτυο. Μια από αυτές παίζει το ρόλο της συσκευής-κυρίου (master) στο μικροδίκτυο και βάσει της διεύθυνσής της επιλέγεται η ακολουθία (sequence) hops που θα χρησιμοποιηθεί. Επίσης κάθε φορά, το επιλεγόμενο hop στην ακολουθία αυτή, δηλαδή η φάση (phase) της ακολουθίας, επιλέγεται βάσει της τιμής του ρολογιού της συσκευής-κυρίου. Για να υπολογίζουν όλα τα μέλη ενός μικροδικτύου το ίδιο hop αν και έχουν διαφορετικό ρολόι, οι συσκευές-υποτελείς προσθέτουν στο τοπικό ρολόι (native clock) τη διαφορά (offset) που έχει αυτό από το ρολόι της συσκευής-κυρίου. Η διαφορά αυτή αποκτάται κατά την χειραψία που προηγείται της εγκαθίδρυσης ζεύξης. Άμεση συνέπεια του τρόπου που γίνεται ο υπολογισμός του επόμενου hop, είναι πως μια συσκευή δεν μπορεί να παίξει τον ρόλο του κυρίου σε πάνω από ένα μικροδίκτυο. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται πώς γίνεται ο υπολογισμός του επόμενου hop.



Σχήμα 3.3 Υπολογισμός του επόμενου Hop[27]

Η συσκευή-κύριος ελέγχει επίσης πλήρως τη λειτουργία του μικροδικτύου. Οι συσκευές υποτελείς παραμένουν ανενεργές στο μικροδίκτυο και εκπέμπουν μόνο αν τους δώσει η συσκευή-κύριος «το λόγο». Το σχήμα που ακολουθείται φαίνεται στο σχήμα 3.4. Στις άρτιες χρονοθυρίδες εκπέμπει πάντα η συσκευή-κύριος, ενώ στις περιττές πάντα μια συσκευή-υποτελής. Δηλαδή το αμφίδρομο του καναλιού στο Bluetooth επιτυγχάνεται με πολυπλεξία στο χρόνο, έχουμε δηλαδή ένα σχήμα TDD.



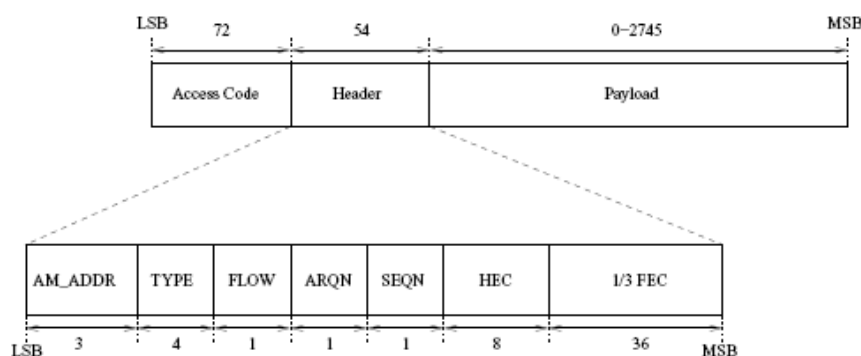
Σχήμα 3.4 Υλοποίηση καναλιού διπλής κατεύθυνσης στο Bluetooth[27]

Για να δώσει το λόγο σε κάποια συσκευή-υποτελή, η συσκευή κύριος στέλνει ένα ειδικού τύπου πακέτο που απευθύνεται σε αυτήν. Αφού λάβει το πακέτο, η συσκευή-υποτελής εκπέμπει την επόμενη περιττή χρονοθυρίδα. Η εκπομπή της απευθύνεται μόνο στη συσκευή-κύριο. Ο λόγος που υπάρχει αυτός ο περιορισμός, είναι πως επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας: οι συσκευές υποτελείς μπορούν να μείνουν ανενεργές χωρίς να παρακολουθούν καν το κανάλι μέχρι την επόμενη άρτια χρονοθυρίδα.

3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΟΥ BASEBAND

3.3.1 Μορφή πακέτων

Όπως αναφέρεται στο [20] σε κάθε χρονοθυρίδα μπορεί να ανταλλαχθεί ένα πακέτο. Τα πακέτα έχουν την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 3.5. Η σημασία του κάθε πεδίου περιγράφεται αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 3.5 Μορφή πακέτων Bluetooth[27]

- ❖ Κωδικός Πρόσβασης (Access Code): Ο κωδικός πρόσβασης βοηθάει τις συσκευές Bluetooth να διαπιστώσουν αν το πακέτο αφορά τη διαδικασία αίτησης σύνδεσης,

τη διαδικασία αναζήτησης ή αν αφορά επικοινωνία στο συγκεκριμένο μικροδίκτυο. Αντίστοιχα οι κωδικοί αυτοί ονομάζονται DAC (Device Access Code), IAC (Inquiry Access Code), CAC (Channel Access Code)

❖ **Επικεφαλίδα (Header)**

ο Διεύθυνση μέλους (AM_ADDRESS): Χρησιμοποιείται για να ξεχωρίζουν οι ενεργές συσκευές υποτελείς του ίδιου μικροδικτύου σε ποια από αυτές απευθύνεται η συσκευή-κύριος, και αντίστροφα.

ο Τύπος πακέτου (TYPE): Δείχνει τον τύπο του πακέτου.

ο Ένδειξη ροής (FLOW): Ενημερώνει για το αν ο αποστολέας του πακέτου μπορεί ή όχι να λάβει επιπλέον πακέτα δεδομένων χωρίς να υπάρξει υπερχείλιση.

ο Ένδειξη σωστής λήψης (ARQN): Ενημερώνει για το αν ο αποστολέας έλαβε σωστά ή όχι το τελευταίο πακέτο.

ο Ένδειξη αναμετάδοσης (SEQN): Χρησιμοποιείται για να ξεχωρίσει ο παραλήπτης αν το πακέτο που έλαβε πρόκειται για νέο πακέτο ή επαναμετάδοση

ο Έλεγχος λάθους επικεφαλίδας (HEC): Περιέχει πληροφορία που βοηθάει τον παραλήπτη να ελέγξει την ακεραιότητα της επικεφαλίδας.

ο Φορτίο (Payload): Τα δεδομένα τα οποία μεταφέρει το πακέτο, μαζί με μια δικιά τους επικεφαλίδα και κώδικα για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών. Το πεδίο αυτό μπορεί να μην υπάρχει σε πακέτα ελέγχου.

3.3.2 Τύποι πακέτων

Τα πακέτα του Bluetooth, μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: πακέτα ήχου, πακέτα δεδομένων και πακέτα ειδικού τύπου. Όλα ακολουθούν τη μορφή που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3.1

Τα πακέτα δεδομένων του Bluetooth μπορεί να καταλαμβάνουν 1,3 ή 5 χρονοθυρίδες και να είναι ή όχι προστατευμένα με κώδικα διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction code – FEC code). Ένα πακέτο με τύπο DMx καταλαμβάνει x χρονοθυρίδες και είναι προστατευμένο με κώδικα FEC. Ένα πακέτο με τύπο DHx καταλαμβάνει x χρονοθυρίδες και δεν είναι προστατευμένο με κώδικα FEC. Η μετάδοση είναι συμμετρική όταν αποστολέας και παραλήπτης χρησιμοποιούν πακέτα ίδιου μήκους (σε χρονοθυρίδες) και ασύμμετρα κάθε άλλη

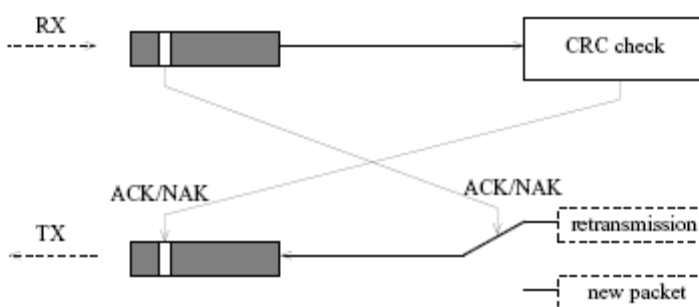
περίπτωση. Τα κυριότερα πακέτα ειδικού τύπου είναι τα πακέτα ID, NULL, POLL και FHS.

3.3.3 Έλεγχος και διόρθωση λαθών

Με τη λήψη κάθε πακέτου ελέγχεται η επικεφαλίδα του, για το αν έφτασε ακέραια, με τη χρήση του HEC. Έπειτα, αν υπάρχει φορτίο, γίνεται χρήση του FEC κώδικα του, αν το πακέτο είναι τύπου DM_x, και ελέγχεται ο 16bit CRC κώδικας του.

Αν επικεφαλίδα και φορτίο είναι έγκυρα, τότε στο επόμενο πακέτο που θα σταλεί προς τον αποστολέα του, το ARQN bit θα έχει τιμή 1. Διαφορετικά θα έχει τιμή 0. Στη δεύτερη περίπτωση, ο αποστολέας του πακέτου το επαναμεταδίδει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να πετύχει η μετάδοση.

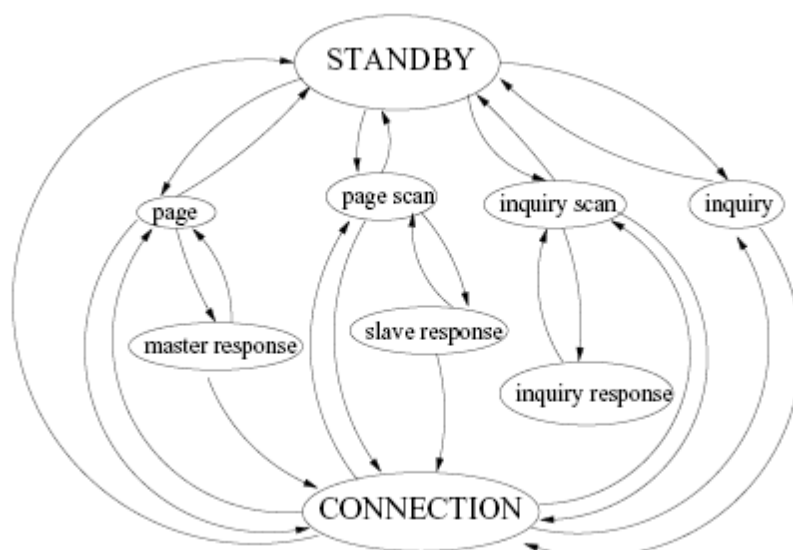
Σε κάθε πακέτο με ARQN bit με τιμή 1 που λαμβάνει μια συσκευή Bluetooth, αντιστρέφει την τιμή του SEQN bit στην επικεφαλίδα του επόμενου πακέτου που θα στείλει. Έτσι ο παραλήπτης μπορεί να διαπιστώσει αν ένα πακέτο πρόκειται για αναμετάδοση ή όχι συγκρίνοντας το SEQN με αυτό του προηγούμενου πακέτου. Επειδή η αναμετάδοση των πακέτων ζητείται ρητώς (explicitly), η αίτηση επαναμετάδοσης ονομάζεται αυτόματη (Automatic Retransmission Query- ARQ). Στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται πως δουλεύει το σχήμα επαναμετάδοσης του Bluetooth.



Σχήμα 3.6 Λειτουργία των ARQs στο Bluetooth[27].

3.4 Οι καταστάσεις του Bluetooth [19]

Η λειτουργία σε χαμηλό επίπεδο των συσκευών Bluetooth, μπορεί να μοντελοποιηθεί σε μια μηχανή καταστάσεων, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.7. Κάθε χρονική στιγμή η συσκευή Bluetooth, μπορεί να βρίσκεται σε μια μόνο κατάσταση. Ο περιορισμός αυτός επηρεάζει αρνητικά τη συμπεριφορά του Bluetooth λόγω του χρόνου που χρειάζεται για να γίνουν οι μεταβάσεις από κατάσταση σε κατάσταση, ειδικά όταν η αρχική κατάσταση αντιστοιχεί σε κάποια χρονοβόρα διαδικασία (π.χ αναζήτηση άλλων συσκευών). Οι καταστάσεις περιγράφονται αμέσως παρακάτω. Οι περισσότερες καταστάσεις αποτελούνται από κάποιες διαδικασίες που εκτελούνται σ' αυτές. Θα αναφερόμαστε στο εξής στις διαδικασίες αυτές με το όνομα της κατάστασης που αντιστοιχούν.



Σχήμα 3.7 Μηχανή καταστάσεων του Bluetooth[27]

3.4.1 Κατάσταση αναμονής (Standby)

Η κατάσταση αναμονής(Standby) είναι εξ' ορισμού (default) κατάσταση στην οποία βρίσκονται οι συσκευές Bluetooth. Στην κατάσταση αυτή η συσκευή Bluetooth καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια, καθώς λειτουργεί μόνο το τοπικό ρολόι.

Περιοδικά η συσκευή αφήνει την κατάσταση αναμονής για να μεταβεί σε μια από τις καταστάσεις ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης (Page Scan) ή ανίχνευσης

αναζητήσεων (Inquiry Scan). Αυτό είναι απαραίτητο για να μπορέσουν άλλες συσκευές να συνδεθούν σε αυτή και να ανακαλύψουν την ύπαρξη της αντίστοιχα. Αντίθετα από την αυτόματη αυτή περιοδική μετάβαση, η μετάβαση στις καταστάσεις αίτησης σύνδεσης (Page) και αναζήτησης (Inquiry) γίνεται μόνο έπειτα από απαίτηση από κάποια τοπική εφαρμογή

3.4.2 Κατάσταση αναζήτησης

Στην κατάσταση αναζήτησης εκτελούνται οι διαδικασίες που επιτρέπουν σε μια συσκευή να ανακαλύψει ποιες άλλες συσκευές υπάρχουν στο περιβάλλον της. Οι παράμετροι που δέχεται από τα υψηλότερα επίπεδα είναι ο μέγιστος χρόνος που θα διαρκέσει και ο μέγιστος των αποτελεσμάτων που θα επιστρέψει. Η συσκευή φεύγει από την κατάσταση αναζήτησης είτε αφού συλλέξει τον αριθμό απαντήσεων που καθορίστηκε, είτε αφού περάσει ο καθορισμένος χρόνος αναζήτησης.

Έπειτα από μια επιτυχή διαδικασία αναζήτησης, το αποτέλεσμα είναι η συσκευή που εκτέλεσε την αναζήτηση να μάθει τις διευθύνσεις και τις τιμές των ρολογιών που ανακαλύφθηκαν καθώς και κάποιες άλλες πληροφορίες γι' αυτές. Πρέπει πάντως να επισημανθεί πως δεν ανακαλύπτονται πάντα όλες οι συσκευές που βρίσκονται στην εμβέλεια μιας συσκευής που πραγματοποιεί αναζήτηση.

Κατά τη διαδικασία αναζήτησης σε κάθε χρονοθυρίδα αποστολής των 625μsec η συσκευή μεταδίδει δύο πακέτα ID σε δυο διαφορετικές συχνότητες. Στη χρονοθυρίδα λήψης που έπεται η συσκευή περιμένει για δύο πακέτα-απαντήσεις σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Τα πακέτα-απαντήσεις είναι τύπου FHS.

Καθώς στη διαδικασία αναζήτησης δεν υφίσταται η λογική διαχωρισμού των συσκευών σε συσκευές-κυρίους και συσκευές υποτελείς, πρέπει να επαναοριστεί ο τρόπος που επιλέγεται η ακολουθία Hopping. Αυτή λοιπόν παράγεται χρησιμοποιώντας τον κώδικα IAC αντί της διεύθυνσης της συσκευής. Αυτή η διαδικασία δίνει 32 hops, τα οποία χωρίζονται σε δυο ομάδες (trains) των 16. Κάθε ομάδα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον 256 φορές πριν χρησιμοποιηθεί η άλλη.

3.4.3 Καταστάσεις ανίχνευσης/ απάντησης αναζητήσεων

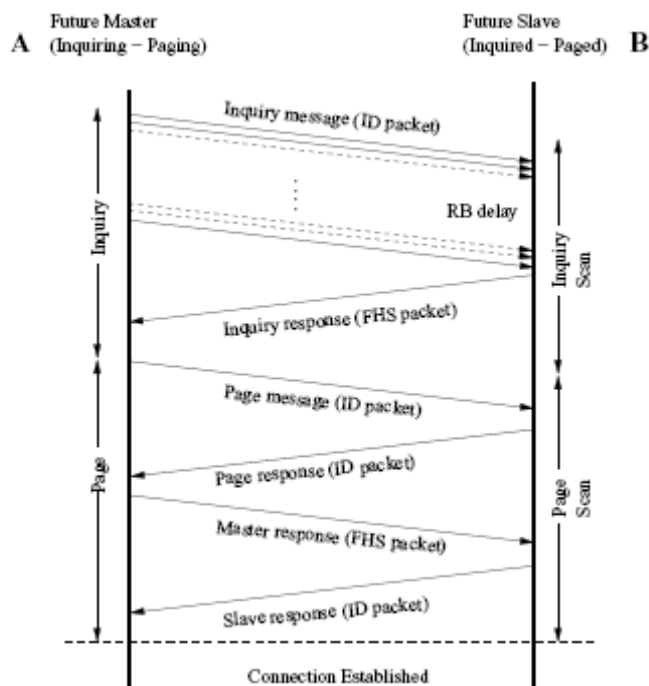
Όταν μια συσκευή Bluetooth βρίσκεται σε κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων περιμένει σε μια συγκεκριμένη συχνότητα για πιθανά πακέτα αναζήτησης (πακέτα ID) για διάστημα ισοδύναμο με 160hops , δηλαδή περίπου 100ms ($16 \times 625\mu\text{sec} / 626\mu\text{sec} = 100\text{ms}$). Η συχνότητα στην οποία περιμένει καθορίζεται από το τοπικό ρολόι τη στιγμή που η συσκευή μπαίνει στην κατάσταση και αλλάζει κάθε $1,28\text{sec}$.

Για να μειωθεί η πιθανότητα περισσότερες από μια συσκευές να «ακούσουν» το ίδιο πακέτο αναζήτησης και να απαντήσουν σε αυτό ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται ένα σχήμα τυχαίας οπισθοχώρησης (random backoff). Οι συσκευές αλλάζουν δηλαδή κατάσταση για ένα τυχαίο διάστημα από 0 έως 1023 χρονοθυρίδες. Αν όταν επιστρέψουν στην κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων ανιχνεύσουν ξανά πακέτο αναζήτησης, περνούν στην κατάσταση απάντησης αναζητήσεων για να απαντήσουν σε αυτό.

Στην κατάσταση απάντησης σε αναζητήσεις η συσκευή στέλνει ένα FHS πακέτο για να δηλώσει την παρουσία της και έπειτα επιστρέφει στην κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων, όπου η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή. Το σχήμα αυτό κάνει μια συσκευή να απαντήσει στην ίδια αναζήτηση παραπάνω από μια φορές.

Για να εξασφαλιστεί η ανακάλυψη των συσκευών σε λογικά χρονικά πλαίσια, η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών ανιχνεύσεων αναζητήσεων έχει καθοριστεί να είναι το πολύ $2,56\text{sec}$, όσο δηλαδή διαρκεί η σάρωση της μιας από τις δυο ομάδες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση.

Οι διαδικασίες αναζήτησης και ανίχνευσης /απάντησης αναζήτησης μαζί με τις διαδικασίες αίτησης σύνδεσης και ανίχνευσης αίτησης σύνδεσης απεικονίζονται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Αναζήτηση συσκευών και δημιουργία σύνδεσης στο Bluetooth[27]

3.4.4 Κατάσταση αίτησης σύνδεσης

Η κατάσταση αυτή χρησιμεύει ως ενδιάμεση κατάσταση για τη μετάβαση στην κατάσταση σύνδεσης. Στην κατάσταση αυτή μπαίνει μια συσκευή όταν δοκιμάζει να συνδεθεί σε μια άλλη συσκευή της οποίας την διεύθυνση γνωρίζει. Η συσκευή αυτή που μπαίνει στην κατάσταση αίτησης σύνδεσης θα είναι και η συσκευή – Κύριος⁶ του μικροδικτύου που θα προκύψει.

Η διαδικασία υποβολής αίτησης σύνδεσης (paging) έχει αρκετές ομοιότητες με τη διαδικασία αναζήτησης συσκευών. Η συσκευή που υποβάλλει την αίτηση (έστω A) όπως και στη διαδικασία αναζήτησης, στέλνει δυο πακέτα ID σε κάθε χρονοθυρίδα των 625μsec και περιμένει απάντηση σε δύο διαφορετικές συχνότητες στην επόμενη χρονοθυρίδα. Αν ληφθεί απάντηση τότε η συσκευή μπαίνει στην κατάσταση χειραφίας κυρίου.

Η ακολουθία Hopping που χρησιμοποιεί η ‘A’ επιλέγεται βάσει της διεύθυνσης της συσκευής στην οποία θέλει να συνδεθεί (έστω B). Τα πακέτα ID που στέλνει η συσκευή A περιέχουν το Device Access Code της ‘B’ οπότε δεν συγχέονται

⁶ (Βλ. παρ 3.5)

με τα ID πακέτα αναζήτησης που περιέχουν το Inquiry Access Code. Η 'Α' ξεκινά τη διαδικασία από την συχνότητα αυτή όπου πιστεύει πως ακούει η 'Β' τη δεδομένη χρονική στιγμή. Η τιμή αυτή μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια αν είναι γνωστή η τιμή του ρολογιού της 'Β'. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι γνωστή από προηγούμενη διαδικασία αναζήτησης, καθώς περιέχεται στο πακέτο FHS με το οποίο απαντάει η 'Β' στην 'Α'. Αν δεν είναι γνωστή τότε η συσκευή 'Α' επιλέγει τυχαία μια συχνότητα.

Όπως και στη διαδικασία αναζήτησης, η ακολουθία Hopping χωρίζεται σε δυο ομάδες των 16 Hops. Οι δυο ομάδες ορίζονται βάσει της συχνότητας που ξεκινά η αναζήτηση. Η πρώτη ομάδα Hops περιλαμβάνει τις 16 πιο κοντινές συχνότητες στη συχνότητα που ξεκινά η διαδικασία. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τις 16 μακρινότερες. Ο χρόνος που χρειάζεται για να καλυφθεί η κάθε ομάδα είναι 1,28sec.

3.4.5 Κατάσταση ανίχνευσης αιτήσεων σύνδεσης

Η κατάσταση αυτή μοιάζει με την κατάσταση ανίχνευσης αναζητήσεων. Η συσκευή 'Β' επιλέγει βάσει του ρολογιού της μια από τις συχνότητες της ακολουθίας hops που αντιστοιχεί στην διεύθυνση της. Στη συχνότητα αυτή περιμένει για τυχόν πακέτα από κάποια συσκευή που θέλει να συνδεθεί μαζί της για διάστημα ισοδύναμο με 16 hops. Η συχνότητα στην οποία περιμένει αλλάζει κάθε 1,28 sec.

Καθώς εδώ τα ID πακέτα από τη διαδικασία αίτησης σύνδεσης απευθύνονται σε μία μόνο συγκεκριμένη συσκευή δεν χρειάζεται το σχήμα Random Backoff. Αν η συσκευή λάβει ένα ID πακέτο που απευθύνεται σε αυτή μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας υποτελή.

Το μέγιστο διάστημα μεταξύ δύο περασμάτων από την κατάσταση ανίχνευσης σύνδεσης μπορεί να είναι 0 sec (συνεχής ανίχνευση), 1,28sec ή 2,56sec. Ένδειξη για το ποιο μέγιστο διάστημα από τα τρία χρησιμοποιεί η συσκευή 'Β', περιέχεται στο πακέτο FHS που στέλνει αυτή σαν απάντηση σε αναζήτηση.

3.4.6 Καταστάσεις χειραψίας κυρίου / υποτελή

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, πάντα πρώτη η συσκευή 'B' μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας υποτελή. Από την κατάσταση αυτή στέλνει προς την συσκευή 'A' ένα ίδιο ID πακέτο με αυτό που την έκανε να μπει στην κατάσταση χειραψίας υποτελή.

Αν η 'A' λάβει το πακέτο, τότε μπαίνει στην κατάσταση χειραψίας κυρίου και στέλνει ένα πακέτο FHS στη συσκευή 'B' και έπειτα περιμένει ένα πακέτο FHS από αυτή. Αν όλα πάνε καλά, οι συσκευές θα μπορέσουν να συγχρονιστούν χρησιμοποιώντας την πληροφορία στα FHS πακέτα και θα περάσουν στην κατάσταση σύνδεσης.

Αν κάποιο από τα πακέτα FHS δεν έρθει μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, κάποιο σφάλμα έχει συμβεί και η συσκευή που το περιμένει επιστρέφει στην προηγούμενη κατάστασή της.

3.4.7 Κατάσταση σύνδεσης

Η κατάσταση σύνδεσης προκύπτει μετά από μια επιτυχημένη χειραψία συσκευής – κυρίου και συσκευής – υποτελή. Στην κατάσταση αυτή, οι συσκευές που μόλις τελείωσαν επιτυχώς την χειραψία είναι μέλη του ίδιου μικροδικτύου. Η συσκευή που ήρθε στην κατάσταση σύνδεσης περνώντας από την κατάσταση αίτησης σύνδεσης γίνεται η συσκευή – κύριος, ενώ αυτή που απάντησε στην αίτηση γίνεται συσκευή - υποτελής. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση της εναλλαγής ρόλων (Role Switch).

Όσο μία συσκευή Bluetooth είναι συνδεδεμένη με κάποια άλλη συσκευή, η σύνδεση μπορεί να πάρει μία από τις παρακάτω μορφές :

❖ **Ενεργή (Active Mode):** Σε μια ενεργή σύνδεση η συσκευή συμμετέχει ανελλιπώς σε όλες τις επικοινωνίες. Όσο μια συσκευή είναι ενεργή, η συσκευή – κύριος της αναθέτει μια διεύθυνση ενεργού μέλους (Active Member Address). Η διεύθυνση αυτή περιέχεται στο πεδίο AM_ADDR (μήκος 3bits) των πακέτων που απευθύνονται στη συσκευή.

❖ Μειωμένων Ευθυνών (Sniff Mode): Σε μια σύνδεση μειωμένων ευθυνών η συσκευή θεωρείται ενεργό μέλος του μικροδικτύου, δηλαδή διατηρεί τη διεύθυνση ενεργού μέλους της.

❖ Σε αναστολή(Hold Mode): Μια σύνδεση σε αναστολή διατηρεί τη διεύθυνση ενεργού μέλους της όμως δεν δέχεται πακέτα δεδομένων. Το διάστημα που βρίσκεται σε αναστολή συμφωνείται με τη συσκευή-κύριο. Κατά το διάστημα αυτό μπορεί είτε να μείνει ανενεργή για εξοικονόμηση ενέργειας ή να ασχοληθεί με χρονοβόρες διαδικασίες όπως η αναζήτηση συσκευών.

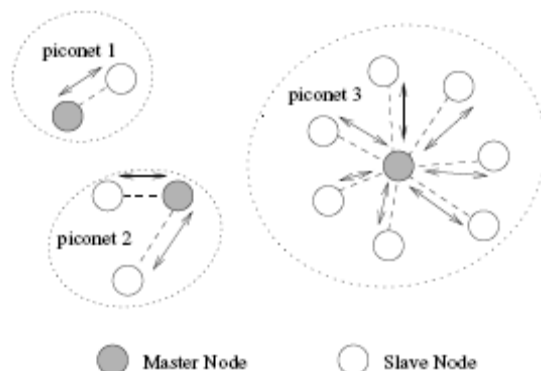
❖ Σε στάση / ύπνου(Park / Sleep Mode) : Οι συνδέσεις σε στάση δε διατηρούν τη διεύθυνση μέλους τους στο μικροδίκτυο. Αντί αυτής τους ανατίθεται μια διεύθυνση μέλους σε στάση. Η συσκευή μένει συγχρονισμένη με το μικροδίκτυο και περιοδικά επικοινωνεί με τη συσκευή-κύριο για να μπορέσει κάποια στιγμή να ξαναγίνει ενεργό μέλος. Η τοποθέτηση μιας σύνδεσης σε στάση μπορεί να γίνει είτε για εξοικονόμηση ενέργειας, είτε για να ελευθερώσει η συσκευή – κύριος μια διεύθυνση ενεργού μέλους και να μπορέσει να επικοινωνήσει με περισσότερες από 7 συσκευές – υποτελείς χωρίς καμιά από αυτές να εγκαταλείψει το μικροδίκτυο.

3.5 Μικροδίκτυα (Piconets) και δίκτυα διασποράς (Scatternets)

Τα δίκτυα που σχηματίζουν οι συσκευές Bluetooth έχουν μορφή αστέρα. Η τοπολογία αυτή προκύπτει από τον κεντριοποιημένο τρόπο με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος του καναλιού μετάδοσης. Οι «αστέρες» που σχηματίζουν οι συσκευές Bluetooth ονομάζονται μικροδίκτυα. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται 3 μικροδίκτυα με 2,3 και 8 συσκευές αντίστοιχα.

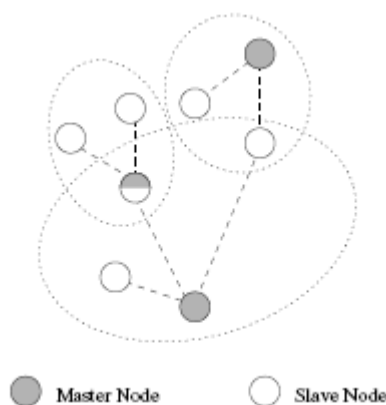
Η (μια) συσκευή σε κάθε μικροδίκτυο που αναλαμβάνει τον έλεγχο του μικροδικτύου ονομάζεται συσκευή-κύριος (master). Οι υπόλοιπες συσκευές ονομάζονται συσκευές υποτελείς (slaves). Η τοπολογία αστέρα του Bluetooth χαρακτηρίζεται ως αυστηρή, γιατί άμεση επικοινωνία υπάρχει μόνο μεταξύ συσκευής-κυρίου και των συσκευών-υποτελών του και ποτέ μεταξύ δύο συσκευών υποτελών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.

Το μέγεθος των μικροδικτύων μπορεί να φτάσει μέχρι 8 συσκευές: 1 συσκευή-κύριος και 7 συσκευές-υποτελείς.



Σχήμα 3.9 Τοπολογία του Bluetooth / μικροδίκτυα [16]

Το Bluetooth προβλέπει την δυνατότητα μια συσκευή να ανήκει σε παραπάνω από ένα μικροδίκτυο ή ισοδύναμα στα μικροδίκτυα να περιέχουν κοινές συσκευές. Ένα σύνολο από μικροδίκτυα τα οποία έχουν κοινές συσκευές σχηματίζοντας ένα συνδεδεμένο απλό γράφο με τις ακμές μεταξύ συσκευών-κυρίων και συσκευών υποτελών, ονομάζεται scatternet. Ένα παράδειγμα scatternet φαίνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Τοπολογία Scatternet στο Bluetooth [16]

Για να μπορούν οι συσκευές να συμμετέχουν σε πολλά μικροδίκτυα μαζί πρέπει να κάνουν καταμερισμό του χρόνου τους μεταξύ των μικροδικτύων. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κάποια από τις καταστάσεις σύνδεσης που περιγράφονται στην ενότητα 3.4.7 για να τους επιτραπεί η απουσία από τα

μικροδίκτυα στα οποία συμμετέχουν. Πάντα βέβαια ισχύει ο περιορισμός πως κάθε συσκευή μπορεί να παίξει τον ρόλο του κυρίου σε ένα και μόνο μικροδίκτυο

Τα Scatternets υπόσχονται αύξηση της συνολικής χωρητικότητας (bandwidth) που είναι διαθέσιμη για επικοινωνία καθώς κάθε μικροδίκτυο χρησιμοποιεί διαφορετικό κανάλι, οπότε η συνολικά διαθέσιμη χωρητικότητα αυξάνει. Επίσης με τη χρήση αλγορίθμων δρομολόγησης μπορούν να επιτρέψουν επικοινωνία με κόμβους οι οποίοι δεν βρίσκονται σε απόσταση εμβέλειας. Τα Scatternets παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία δικτύων προσωπικής περιοχής βασισμένα στο Bluetooth, γιατί επιτρέπουν την ευέλικτη σύνδεση συστάδων συσκευών και βοηθούν να ξεπεραστεί ο περιορισμός των 8 συσκευών ανά μικροδίκτυο.

Όμως τα scatternets δεν είναι επαρκώς καθορισμένα στην περιγραφή του Bluetooth. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι συσκευές που υποστηρίζουν Scatternets, έχουν κυκλοφορήσει σχετικά πρόσφατα (τέλη του 2002) και έχουν περιορισμούς στην υποστήριξή τους. Επίσης, αφού ο κάθε κατασκευαστής υλοποιεί την υποστήριξη για scatternets χωρίς να βασίζεται σε κάποια αυστηρή περιγραφή, η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων scatternets είναι αμφίβολη.

Κεφάλαιο 4

Αδόμητα Ασύρματα Δίκτυα (Ad – Hoc)

4.1 Χαρακτηριστικά

Η έννοια των αδόμητων (Ad-hoc) δικτύων [6,24] ούτε είναι νέα ούτε σχετίζεται αποκλειστικά με τα ασύρματα δίκτυα. Προέρχεται από τα αρχικά στάδια δημιουργίας του διαδικτύου, τα οποία έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου και στόχευαν στη δημιουργία ενός δικτύου το οποίο θα μπορούσε να συνεχίσει τη λειτουργία του ακόμη και μετά τη καταστροφή κόμβων και συνδέσεών του. Η ίδια ιδέα ισχύει και για τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα, τα οποία φυσικά έχουν και κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά λόγω της χρήσης ασύρματης μετάδοσης. Συνεπώς, ο όρος ασύρματο αδόμητο δίκτυο σημαίνει ένα ασύρματο δίκτυο χωρίς κάποιο κεντρικό κόμβο που να διαχειρίζεται την λειτουργία του δικτύου.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αδόμητων ασύρματων δικτύων είναι τα ακόλουθα :

❖ *Κατανεμημένη λειτουργία.* Τα αδόμητα δίκτυα διαφέρουν από άλλα είδη ασύρματων δικτύων, όπως τα κυψελικά, από πλευράς λειτουργίας. Στα αδόμητα δίκτυα, κάθε σταθμός έχει τις ίδιες δυνατότητες και ευθύνες, και έτσι δεν υπάρχει κάποια κεντρική οντότητα που να ελέγχει το δίκτυο. Σε ένα αδόμητο δίκτυο δεν υπάρχουν σταθμοί βάσης και κέντρα μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Κυψελικά δίκτυα). Κατά συνέπεια, όλα τα πρωτόκολλα του δικτύου λειτουργούν κατανεμημένα.

❖ *Δυναμική τοπολογία.* Σε ένα ασύρματο αδόμητο δίκτυο, κάθε τερματικό μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα. Το γεγονός ότι (α) μερικοί σταθμοί μπορεί να βρίσκονται εκτός εμβέλειας και (β) η συμπεριφορά του ασύρματου μέσου μεταβάλλεται με τον χρόνο, οδηγεί σε δυναμικές τοπολογίες δικτύου με την φύση της αλλαγής να μην είναι γνωστή εκ των προτέρων.

❖ *Πολύοδη επικοινωνία (Multihop)*. Λόγω της εξασθένησης στο ασύρματο μέσο, αλλά και της πεπερασμένης εμβέλειας των πομπών, ένα αδόμητο δίκτυο δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει μια πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία. Στη περίπτωση λοιπόν, που ένας σταθμός Α θέλει να στείλει δεδομένα σε ένα σταθμό Β εκτός εμβέλειας, η μετάδοση θα πρέπει να υλοποιηθεί με προώθηση μέσω ενδιάμεσων σταθμών. Τα δίκτυα αυτά είναι γνωστά ως ασύρματα αδόμητα πολύοδα δίκτυα (ή δίκτυα αποθήκευσης και προώθησης). Παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών είναι το πρότυπο ασύρματου τοπικού δικτύου HIPERLAN 1 και το Bluetooth.

❖ *Μεταβαλλόμενη ποιότητα συνδέσεων*. Αν και ισχύει για κάθε ασύρματο δίκτυο, το χαρακτηριστικό αυτό είναι περισσότερο σημαντικό στη περίπτωση των πολύοδων αδόμητων δικτύων επειδή η ποιότητα της πολύοδης (Multihop) σύνδεσης εξαρτάται από την ποιότητα κάθε επιμέρους σύνδεσης από την οποία αποτελείται. Το γεγονός αυτό καθιστά πιο δύσκολη την παρακολούθηση της ποιότητας μιας σύνδεσης στην περίπτωση των ασύρματων αδόμητων δικτύων.

❖ *Εξάρτηση από την διάρκεια της μπαταρίας*. Αν και το χαρακτηριστικό αυτό ισχύει για κάθε ασύρματο δίκτυο, είναι πολύ πιο σημαντικό στη περίπτωση των αδόμητων. Για παράδειγμα, σε ένα κυψελικό δίκτυο, επειδή ο σταθμός βάσης δεν αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα η συνολική απόδοση του δικτύου δεν επηρεάζεται από τον τερματισμό της λειτουργίας κάποιων κινητών τερματικών λόγω εξάντλησης της μπαταρίας τους. Αντίθετα, σε ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο, η αποδοτική λειτουργία εξαρτάται από όλα τα τερματικά. Ο τερματισμός της λειτουργίας κάποιων από αυτά οδηγεί σε μείωση της συνολικής απόδοσης, επειδή έτσι απομένουν λιγότερα τερματικά για την προώθηση πακέτων μεταξύ τερματικών που βρίσκονται εκτός εμβέλειας το ένα από το άλλο. Έτσι η ικανότητα δρομολόγησης του δικτύου μειώνεται.

Τα τελευταία χρόνια κατά τον W.Stallings [18] παρατηρείται μεγάλο ενδιαφέρον για τα ασύρματα δίκτυα, κάτι που οφείλεται και στην δυνατότητα χρήσης τους σε ειδικές εφαρμογές, όπως τα συστήματα έκτακτης ανάγκης και οι στρατιωτικές εφαρμογές. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν γρήγορη εγκατάσταση δικτύου σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει δικτυακή υποδομή για άλλα ασύρματα δίκτυα, ή υπάρχει υποδομή η οποία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λόγους ασφάλειας ή κόστους. Η δυνατότητα λειτουργίας των αδόμητων δικτύων χωρίς κάποια κεντρική οντότητα τα καθιστά πολύ χρήσιμα για τέτοια περιβάλλοντα.

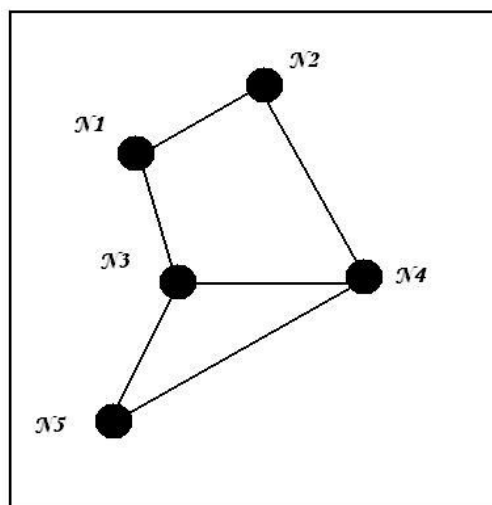
Παρομοίως η χρησιμότητα τους είναι σημαντική σε περιπτώσεις που απαιτείται αξιοπιστία παρά τον τερματισμό της λειτουργίας κάποιων τερματικών ή την αποχώρησή τους από το δίκτυο. Τέτοια παραδείγματα βρίσκουμε και πάλι σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπου τα αδόμητα ασύρματα δίκτυα είναι πολύ χρήσιμα επειδή ακριβώς η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από κάποια κεντρική οντότητα.

Τα χαρακτηριστικά της δυναμικής τοπολογίας και της πολύοδης επικοινωνίας καθιστούν το σχεδιασμό των αδόμητων δικτύων μια ενδιαφέρουσα πρόκληση. Τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς γνώση της τοπολογίας τους και γενικά χωρίς την ύπαρξη απ' ευθείας σύνδεσης μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Είναι φανερό ότι η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόδοση του σχήματος δρομολόγησης που χρησιμοποιείται. Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης σε αδόμητα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να είναι αποδοτικοί.

4.2 Προσδιορισμός Τοπολογίας[16]

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε αδόμητα δίκτυα θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα παρακολούθησης και προσαρμογής στις μεταβολές της τοπολογίας του δικτύου. Επειδή σε αυτά τα δίκτυα δεν υπάρχει πάντοτε μια πλήρως συνδεδεμένη τοπολογία, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης θα πρέπει να εξασφαλίζουν την ύπαρξη μιας τουλάχιστον διαδρομής μεταξύ δυο οποιωνδήποτε τερματικών. Η απαίτηση αυτή φυσικά δεν ισχύει στην περίπτωση των δικτύων που έχουν διαμεριστεί. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, δεν υπάρχει διαδρομή μεταξύ δυο οποιωνδήποτε τερματικών που ανήκουν σε διαφορετικά διαμερίσματα, καθώς τα τερματικά αυτά είναι εκτός εμβέλειας το ένα από το άλλο. Προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα παρακολούθησης και προσαρμογής σε μεταβολές τοπολογίας, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης θα πρέπει να δίνουν σε κάθε τερματικό τη δυνατότητα να έχει πληροφόρηση σχετικά με τα γειτονικά του τερματικά (δηλαδή, με αυτά με τα οποία μπορεί να επικοινωνήσει απ' ευθείας, χωρίς τη μεσολάβηση ενδιάμεσων). Λόγω της κατανεμημένης λειτουργίας των αδόμητων δικτύων, είναι προφανές ότι η παρακολούθηση της τοπολογίας θα πρέπει να γίνεται κατανεμημένα. Οι πληροφορίες για αλλαγές στις καταστάσεις των διαδρομών μεταδίδονται στα τερματικά μόλις συμβεί κάποια αλλαγή στη τοπολογία του δικτύου

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται ένα αδόμητο δίκτυο στο οποίο εισέρχονται τα τερματικά κατά αύξουσα σειρά με βάση των αριθμό τους. Το δίκτυο ουσιαστικά δημιουργείται όταν το τερματικό N_2 έρχεται εντός εμβέλειας του N_1 . Και τα δυο τερματικά δηλώνουν την επιθυμία τους να σχηματιστεί ένα δίκτυο κάνοντας περιοδικές εκπομπές πακέτων ελέγχου που περιέχουν πληροφορίες όπως την διεύθυνση τερματικών. Όταν σχηματιστεί το αδόμητο δίκτυο των N_1 και N_2 , οι πίνακες δρομολόγησης αυτών των τερματικών ενημερώνονται ώστε να είναι σύμφωνοι με την τρέχουσα τοπολογία – δηλαδή, την ύπαρξη διαδρομής από το N_1 στο N_2 . Όταν ένα τρίτο τερματικό N_3 εισέλθει στο δίκτυο, οι πίνακες δρομολόγησης θα αλλάξουν ξανά ώστε να περιέχουν την καινούργια τοπολογία. Αν το N_3 βρίσκεται εντός εμβέλειας τόσο με το N_1 όσο και με το N_2 , ο πίνακας δρομολόγησης κάθε τερματικού θα περιέχει δυο διαδρομές προς κάθε άλλο κόμβο. Η μια διαδρομή θα είναι προφανώς η απ' ευθείας σύνδεση των δυο τερματικών, ενώ η δεύτερη θα πραγματοποιείται μέσω του ενδιάμεσου τρίτου κόμβου. Όταν το N_3 είναι εντός εμβέλειας μόνο με το N_1 ή μόνο με το N_2 , ο πίνακας δρομολόγησης κάθε τερματικού διαμορφώνεται ανάλογα.



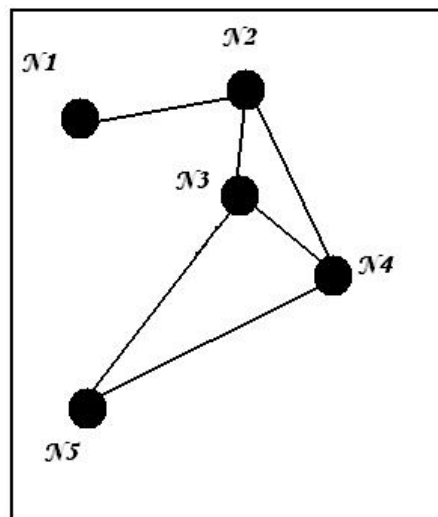
Σχήμα 4.1 Ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο

4.3 Διατήρηση συνεκτικότητας

Μετά τη δημιουργία ενός αδόμητου δικτύου, αναμένονται αλλαγές τοπολογίας είτε λόγω κινητότητας / βλάβης των τερματικών είτε λόγω μεταβολών των χαρακτηριστικών των ασύρματων συνδέσεων σε αυτό. Σύμφωνα με τους D.Aksou

και M.Franklin [21] για να διατηρήσει τις συνδέσεις μεταξύ των τερματικών σε ένα τέτοιο περιβάλλον, το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα εύρεσης εναλλακτικών διαδρομών. Για παράδειγμα στο σχήμα 4.1 αν τα τερματικά N1 και N3 μετακινηθούν έτσι ώστε το N3 να βρεθεί εκτός εμβέλειας του N1 αλλά εντός εμβέλειας του N2 τότε η τοπολογία αλλάζει σε αυτή του σχήματος 4.2. Στην περίπτωση αυτή, τα τερματικά N1 και N3 μπορούν και πάλι να επικοινωνούν αλλά αυτή τη φορά μόνο μέσω του N2. Η αλλαγή της τοπολογίας ανιχνεύεται πρώτα από τα N2 και N3, τα οποία αλλάζουν τους πίνακες δρομολόγησης τους και στη συνέχεια ενημερώνουν τα υπόλοιπα τερματικά για την αλλαγή της τοπολογίας.

Η απόδοση ενός αδόμητου ασύρματου δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυνατότητα του πρωτοκόλλου δρομολόγησης (α) να καταλήγει σε δρομολόγια χωρίς βρόχους μετά από αλλαγή στην τοπολογία και (β) στην ταχύτητα διάδοσης των πληροφοριών σχετικά με την τοπολογία στα τερματικά του δικτύου. Όταν οι αλλαγές τοπολογίας συμβαίνουν με τέτοια ταχύτητα ώστε μια νέα αλλαγή να συμβαίνει πριν την ενημέρωση όλων των τερματικών για την προηγούμενη αλλαγή, η απόδοση του δικτύου μειώνεται σημαντικά. Συνεπώς, η συχνότητα στις αλλαγές της τοπολογίας δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη.



Σχήμα 4.2 Αλλαγή τοπολογίας λόγω κινητότητας

4.4 Εισαγωγή στη δρομολόγηση πακέτων

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι διάφορες διαδρομές μεταξύ δύο τερματικών, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούν διάφορα κριτήρια, πέρα από αυτά της μεγιστοποίησης της απόδοσης και της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα ενσύρματα δίκτυα. Τα κύρια κριτήρια που χρησιμοποιούν είναι τα παρακάτω[24]:

- ❖ Μεγιστοποίηση της απόδοσης /ταχύτητας από άκρο σε άκρο.
- ❖ Ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο.
- ❖ Ελαχιστοποίηση της διαδρομής.
- ❖ Ελαχιστοποίηση των επιβαρύνσεων από σηματοδοσία των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.
- ❖ Προσαρμοστικότητα σε μεταβλητή τοπολογία.
- ❖ Ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο.

Βέβαια, δεν είναι δυνατή η πλήρης και ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των παραπάνω κριτηρίων, και αυτό που γίνεται στην πράξη είναι κάποιος συμβιβασμός. Για παράδειγμα, η οικογένεια των κατ'απαιτηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης, τα οποία παρουσιάζονται στη παράγραφο 4.4.2, επιτυγχάνουν μείωση των επιβαρύνσεων σηματοδοσίας σε βάρος του κριτηρίου της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο.

4.4.1 Πρωτοκόλλα δρομολόγησης που βασίζονται σε πίνακες

4.4.1.1 Πρωτόκολλο δρομολόγησης διανύσματος απόστασης με ακολουθία προορισμών[9,16]

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης διανύσματος απόστασης με ακολουθία προορισμών (Destination – Sequenced Distance – Vector, DSDV) αποτελεί επέκταση του κλασικού αλγορίθμου δρομολόγησης Bellman – Ford. Οι επεκτάσεις

που ενσωματώνονται στο DSDV στοχεύουν στην απελευθέρωση των πινάκων δρομολόγησης από βρόχους. Στο DSDV, κάθε κόμβος διατηρεί ένα πίνακα δρομολόγησης ο οποίος περιέχει πληροφορίες σχετικά με όλες τις πιθανές διαδρομές μέσα στο δίκτυο, το πλήθος των βημάτων (Hops) κάθε διαδρομής, και τον αύξοντα αριθμό κάθε διαδρομής. Ο τελευταίος είναι ένας αριθμός που ορίζεται από τον προορισμό της διαδρομής και δείχνει την «παλαιότητα» της. Όσο μικρότερος είναι ο αύξων αριθμός, τόσο «παλαιότερη» είναι η διαδρομή. Όταν ένας κόμβος A χρειάζεται να επιλέξει μια διαδρομή προς τον κόμβο B, ελέγχει τον κόμβο δρομολόγησής του. Αν βρεθούν περισσότερες από μια τέτοιες διαδρομές, χρησιμοποιείται η πιο πρόσφατη (αυτή με τον μεγαλύτερο αύξοντα αριθμό). Αν περισσότερες από μία διαδρομές έχουν τον ίδιο αύξοντα αριθμό, επιλέγεται η πιο σύντομη (αυτή με το μικρότερο πλήθος βημάτων).

Οι κόμβοι του δικτύου εκπέμπουν περιοδικά τους πίνακες δρομολόγησης τους προκειμένου να διαδώσουν σε ολόκληρο το δίκτυο πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία. Εκτός από αυτές τις περιοδικές μεταδόσεις, ένας σταθμός μπορεί να επιλέξει να εκπέμψει τον πίνακα δρομολόγησης του όταν εμφανιστούν σημαντικές αλλαγές στην τοπολογία. Η διάδοση των πινάκων δρομολόγησης οδηγεί προφανώς σε μεγάλη δικτυακή επιβάρυνση. Σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, έχουν οριστεί δυο τύποι ενημερώσεων : Οι ενημερώσεις πλήρους αντιγράφου (Full – Dump) και οι ενημερώσεις επαύξησης (Incremental). Στην πρώτη περίπτωση, οι σταθμοί μεταδίδουν ολόκληρο τον πίνακα δρομολόγησής τους. Επειδή, όμως, οι πίνακες δρομολόγησης είναι συνήθως αρκετά μεγάλοι, μια ενημέρωση πλήρους αντιγράφου περιλαμβάνει συνήθως περισσότερες από μια εκπομπές πακέτων. Αυτό καταναλώνει προφανώς αρκετούς πόρους, οπότε τα πλήρη αντίγραφα μεταδίδονται σπάνια. Οι ενημερώσεις επαύξησης μεταδίδονται μεταξύ των πλήρων αντιγράφων και μεταβιβάζουν μόνο εκείνες τις πληροφορίες που έχουν αλλάξει από την τελευταία ενημέρωση. Έτσι, οι ενημερώσεις επαύξησης καταναλώνουν λιγότερους πόρους και μεταδίδονται με ένα μόνο πακέτο. Η σχετική συχνότητα των ενημερώσεων πλήρους αντιγράφου και επαύξησης εξαρτάται από την φύση των αλλαγών στην τοπολογία. Σε ένα δίκτυο όπου η τοπολογία μεταβάλλεται με αργό ρυθμό, τα πλήρη αντίγραφα χρησιμοποιούνται σπάνια, καθώς τα αντίγραφα επαύξησης είναι σε θέση να μεταβιβάζουν τις αργές αλλαγές.

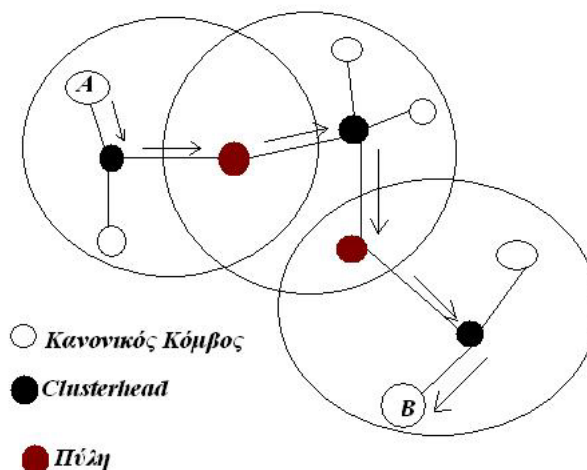
Από την άλλη μεριά, σε ένα δίκτυο ταχείας μεταβαλλόμενης τοπολογίας, τα πλήρη αντίγραφα είναι συχνότερα.

4.4.1.2 Πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταγωγής πύλης επικεφαλής ομάδας[16,8]

Το πρωτόκολλο δρομολόγησης μεταγωγής πύλης επικεφαλής ομάδας (Clusterhead Gateway Switch Routing, CGSR) είναι μια τροποποίηση του πρωτοκόλλου DSDV, από το οποίο και διαφέρει στο ότι, ενώ το DSDV θεωρεί ότι το δίκτυο είναι «επίπεδο» (που σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι έχουν ίδιες ευθύνες), το πρωτόκολλο CGSR χωρίζει το δίκτυο σε διάφορες «συστοιχίες/ ομάδες» (Clusters). Οι κόμβοι μιας ομάδας ελέγχονται από ένα κόμβο που είναι γνωστός ως επικεφαλής ομάδας (Clusterhead). Αυτοί οι κόμβοι επιλέγονται από τα μέλη κάθε ομάδας. Είναι προφανές ότι, καθώς οι κόμβοι κινούνται, μερικές ομάδες θα εξαφανιστούν, νέες θα δημιουργηθούν και νέοι κόμβοι πιθανόν να εισέλθουν σε υπάρχουσες ομάδες. Έτσι, κατά διαστήματα γίνονται νέες επιλογές κόμβων επικεφαλής ομάδων. Σε μια προσπάθεια να μειωθεί η δικτυακή επιβάρυνση λόγω των διαδικασιών επιλογής των κόμβων επικεφαλής ομάδων, για την επιλογή τους χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος ελάχιστων αλλαγών ομάδας (Least Cluster Change, LCC). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο LCC, οι διαδικασίες επιλογής κόμβων επικεφαλής ομάδων λαμβάνουν χώρα μόνο όταν δυο κόμβοι επικεφαλής ομάδων βρεθούν σε εμβέλεια μετάδοσης μεταξύ τους, ή όταν ένας κόμβος μετακινείται εκτός εμβέλειας από όλους τους κόμβους επικεφαλής ομάδων.

Το πρωτόκολλο CGSR χρησιμοποιεί μία τροποποίηση του DSDV ως μοντέλο δρομολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το CGSR όλες οι διαδρομές που ξεκινούν από τους κόμβους μίας ορισμένης ομάδας περνούν από τον επικεφαλής αυτής της ομάδας. Αν μια διαδρομή εξυπηρετεί μια σύνδεση μεταξύ κόμβων διαφορετικών ομάδων, ο επικεφαλής ομάδας δρομολογεί τα πακέτα της σύνδεσης απευθείας στον προορισμό τους. Αν η διαδρομή εξυπηρετεί μια σύνδεση μεταξύ κόμβων διαφορετικών ομάδων, ο επικεφαλής ομάδας δρομολογεί τα πακέτα προς ένα κόμβο – πύλη (Gateway), δηλαδή έναν κόμβο που βρίσκεται στην εμβέλεια περισσότερο από ενός επικεφαλής ομάδας. Μετά την παραλαβή τους από την πύλη, τα πακέτα δρομολογούνται προς τον επικεφαλής της γειτονικής ομάδας, και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να φτάσουν στον επικεφαλής ομάδας του προορισμού

τους, οπότε και δρομολογούνται προς το σταθμό- προορισμό. Ένα παράδειγμα δρομολόγησης με το πρωτόκολλο δρομολόγησης CGSR παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3 .



Σχήμα 4.3 Δρομολόγηση με το πρωτόκολλο CGSR από τον κόμβο A στον κόμβο B

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο CGSR, οι κόμβοι διατηρούν δυο πίνακες : Τον πίνακα δρομολόγησης και τον πίνακα μελών ομάδων(Cluster Member Table), ο οποίος και περιέχει τον επικεφαλής ομάδας κάθε κόμβου του δικτύου. Οι πίνακες αυτοί μεταδίδονται από κάθε κόμβο ανά τακτά διαστήματα. Κατά την παραλαβή ενός τέτοιου πίνακα που προέρχεται από ένα γειτονικό κόμβο, κάθε κόμβος ενημερώνει τον δικό του πίνακα μελών ομάδων. Αυτού του είδους οι πίνακες απαιτούνται για την δρομολόγηση των πακέτων. Όταν λαμβάνεται ένα πακέτο, ο κόμβος ελέγχει τον πίνακα μελών ομάδων για να βρει τον επικεφαλής της επόμενης ομάδας κατά μήκος της διαδρομής προς το σταθμό προορισμού. Κατόπιν, ελέγχει τον πίνακα δρομολόγησης για να βρει το επόμενο βήμα που πρέπει να επιλεγεί ώστε να φτάσει στον επόμενο επικεφαλής ομάδας, και προωθεί το πακέτο μέσω αυτού του βήματος.

4.4.1.3 Πρωτόκολλο ασύρματης δρομολόγησης[16,9]

Για να λειτουργήσει το πρωτόκολλο ασύρματης δρομολόγησης (Wireless Routing Protocol, WRP), κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί τέσσερις πίνακες, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απαιτήσεις μνήμης, ειδικά στην περίπτωση των δικτύων που περιλαμβάνουν πολλούς κόμβους. Αυτοί οι τέσσερις πίνακες είναι ο πίνακας απόστασης, ο πίνακας δρομολόγησης, ο πίνακας κόστους – σύνδεσης, και ο πίνακας λίστας αναμετάδοσης μηνυμάτων (Message Retransmission List, MRL). Για ένα κόμβο A, ο πίνακας απόστασης περιέχει την απόσταση προς κάθε κόμβο προορισμού X μέσω του κάθε γείτονα Y του A. Επιπλέον, κάθε καταχώρηση περιέχει τον επόμενο γείτονα του Y μέσω του οποίου περνάει η διαδρομή από τον A στον X. Ο πίνακας δρομολόγησης του κόμβου A περιέχει την απόσταση προς κάθε κόμβο προορισμού X, το διάδοχο του A σε αυτή τη διαδρομή, και μια σημαία που δείχνει αν η διαδρομή είναι απλή ή βρόχος. Ο πίνακας κόστους – σύνδεσης του κόμβου A περιέχει το κόστος της σύνδεσης από τον A προς κάθε γείτονα του Z και το πλήθος των λήξεων χρόνου αναμονής από τη στιγμή της λήψης ενός μηνύματος χωρίς σφάλματα από τον κόμβο Z. Τέλος, η λίστα MRL περιέχει καταχωρήσεις σχετικά με τα μηνύματα ενημέρωσης που στέλνονται από τον κόμβο A. Μια τέτοια καταχώρηση περιλαμβάνει τον αύξοντα αριθμό του μηνύματος ενημέρωσης, ένα μετρητή αναμετάδοσης, μια σημαία που δείχνει αν απαιτείται επιβεβαίωση από τον γείτονα για μια ενημέρωση που μεταδόθηκε από τον A, και μια λίστα ενημερώσεων που στέλνεται με το μήνυμα ενημέρωσης. Έτσι, η λίστα MRL περιέχει πληροφορίες σχετικά με (α) τους γειτονικούς κόμβους που δεν έχουν επιβεβαιώσει τα μηνύματα ενημέρωσης από τον A, (β) το χρονικό σημείο που πρόκειται να αναμεταδοθούν τα μηνύματα ενημέρωσης σε αυτούς τους κόμβους.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο WRP, οι κόμβοι ανταλλάσσουν μηνύματα ενημέρωσης με τους γείτονές τους τόσο ανά τακτά χρονικά διαστήματα όσο και μετά από αλλαγές στις ζεύξεις. Τέτοια είναι και η περίπτωση της απώλειας σύνδεσης μεταξύ δυο κόμβων A και B : ο A και ο B στέλνουν πληροφορίες ενημέρωσης στους γείτονές τους, οι οποίοι τροποποιούν τους πίνακές τους και αναζητούν εναλλακτικές διαδρομές που δεν περιέχουν την σύνδεση μεταξύ A και B. Οι ενημερώσεις περιέχουν πληροφορίες σχετικά με νέες διαδρομές προορισμών (που μπορεί να

δημιουργήθηκαν από γειτονικούς κόμβους και άλλους κόμβους του δικτύου), νέες αποστάσεις διαδρομών, τον προκάτοχο του προορισμού κάθε διαδρομής, και μια λίστα κόμβων που πρέπει να επιβεβαιώσουν αυτή την ενημέρωση. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα ενημέρωσης από έναν από τους γείτονές του, τροποποιεί τον πίνακα αποστάσεων και ελέγχει για πιθανές εναλλακτικές πορείες σε κάθε διαδρομή. Σε περιπτώσεις αργά μεταβαλλόμενων τοπολογιών, είναι πιθανό να μην έχει αλλάξει η δικτυακή τοπολογία γύρω από ένα συγκεκριμένο κόμβο (π.χ τον A) μεταξύ δυο διαδοχικών ενημερώσεων. Σε αυτή την περίπτωση, ο κόμβος A δεν θα μεταδώσει μήνυμα ενημέρωσης · απλώς θα επιβεβαιώσει την παρουσία του στους γείτονές του μέσω της μετάδοσης ενός μηνύματος. Τα πακέτα αυτά, αν και είναι χρήσιμα, καταναλώνουν εύρος ζώνης και δεν επιτρέπουν στους κόμβους την μετάβαση σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας.

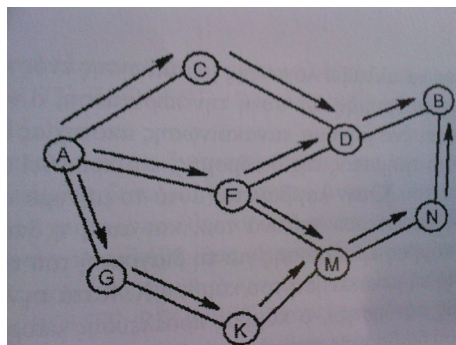
Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου WRP είναι ότι κάθε κόμβος ελέγχει την συνέπεια όλων των γειτόνων του όταν ανιχνεύσει μια αλλαγή στη σύνδεση με οποιονδήποτε από αυτούς. Αυτού του είδους οι έλεγχοι συνέπειας βοηθούν στην εξάλειψη των καταστάσεων απουσίας βρόχου.

4.4.2 Πρωτόκολλα δρομολόγησης κατ' απαίτηση

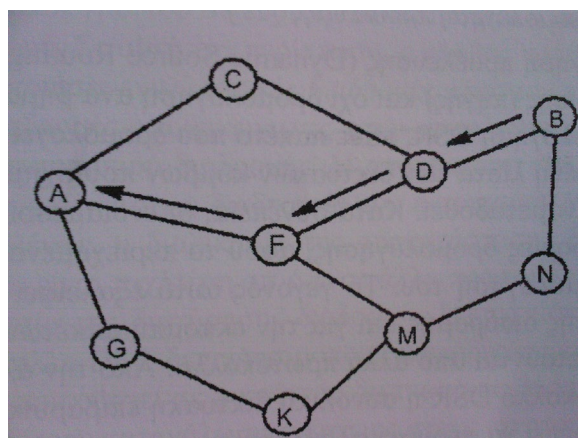
4.4.2.1 Αδόμητη δρομολόγηση διανύσματος απόστασης κατ' απαίτηση[16,10]

Ο αλγόριθμος αδόμητης δρομολόγησης διανύσματος απόστασης κατ' απαίτηση (Ad -hoc On-demand Distance Vector, AODV) αποτελεί το «κατ' απαίτηση» αντίστοιχο πρωτόκολλο του αλγορίθμου DSDV που βασίζεται σε πίνακες. Η βασική τους διαφορά είναι ότι ο αλγόριθμος AODV δημιουργεί διαδρομές μετά από αίτηση, ενώ το πρωτόκολλο DSDV διατηρεί τη λίστα όλων των διαδρομών. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο AODV, μια διαδρομή δημιουργείται μόνο όταν ζητηθεί από μια δικτυακή σύνδεση, και οι πληροφορίες σχετικά με τη διαδρομή αυτή αποθηκεύονται μόνο στους πίνακες δρομολόγησης των κόμβων που παρεμβάλλονται στην πορεία της διαδρομής.

Η διαδικασία της εγκατάστασης διαδρομών παρουσιάζεται στα σχήματα 4.4 και 4.5.



Σχήμα 4.4 Διάδοση ενός πακέτου αιτήματος διαδρομής (RREQ)[16]



Σχήμα 4.5 Διάδοση ενός πακέτου απάντησης διαδρομής (RREP)[16]

Για παράδειγμα, θεωρούμε ότι ο κόμβος A θέλει να εγκαταστήσει μια σύνδεση με τον κόμβο B. Στο σχήμα 4.4, ο κόμβος A ξεκινά μια διαδικασία εντοπισμού διαδρομής με τον κόμβο B εκπέμποντας στους άμεσους γείτονές του ένα πακέτο αιτήματος διαδρομής (Route Request, RREQ). Κάθε πακέτο RREQ προσδιορίζεται μέσω ενός συνδυασμού της διεύθυνσης IP του κόμβου που το μεταδίδει και ενός αναγνωριστικού εκπομπής. Το τελευταίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό διαφορετικών εκπομπών RREQ του ίδιου κόμβου και αυξάνεται με κάθε εκπομπή αιτήματος διαδρομής. Επιπλέον, κάθε πακέτο RREQ φέρει ένα αύξοντα αριθμό (Παρόμοιο με εκείνον του DSDV) που επιτρέπει στους ενδιάμεσους κόμβους να απντούν στα αιτήματα διαδρομών μόνο με επίκαιρες πληροφορίες. Μετά την παραλαβή ενός αιτήματος διαδρομής από έναν κόμβο, αυτό

προωθείται στους άμεσους γείτονες του κόμβου και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να παραληφθεί το αίτημα διαδρομής είτε από τον κόμβο B είτε από έναν κόμβο που έχει εγκαταστήσει πρόσφατα μια διαδρομή προς τον B. Αν ληφθούν από κάποιον κόμβο επόμενα αντίγραφα του ίδιου αιτήματος διαδρομής, απορρίπτονται.

Όταν ένας κόμβος προωθεί ένα πακέτο RREQ στους γείτονές του, καταγράφει στους πίνακες δρομολόγησης του τη διεύθυνση του γειτονικού κόμβου όπου παραλήφθηκε το πρώτο αντίγραφο του RREQ. Το γεγονός αυτό βοηθά τους κόμβους να εγκαταστήσουν μια αντίστροφη διαδρομή, η οποία θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να μεταφερθεί η απάντηση του αιτήματος διαδρομής. Επιστρέφοντας στο προηγούμενο παράδειγμα, στο σχήμα 4.5 φαίνεται ότι, όταν φτάσει το αίτημα διαδρομής στον προορισμό του, επιστρέφεται στον κόμβο A ένα πακέτο απάντησης διαδρομής. Να σημειωθεί ότι η απάντηση διαδρομής (Route Reply, RREP) ακολουθεί τη διαδρομή B-D-F-A λόγω του ότι η πρώτη λήψη του πακέτου RREQ από τον κόμβο B οφείλεται στον κόμβο D και η πρώτη λήψη του πακέτου RREQ από τον κόμβο D οφείλεται στον κόμβο F. Καθώς το πακέτο RREP ταξιδεύει κατά μήκος της αντίστροφης διαδρομής, οι κόμβοι που σχηματίζουν τη διαδρομή (D,F,A) πραγματοποιούν τις κατάλληλες αλλαγές στους πίνακες δρομολόγησης τους (που δείχνουν στο επόμενο γειτονικό μέλος της διαδρομής) οι οποίοι προσδιορίζουν την ευθεία πορεία από τον A στον B. Λόγω του ότι το πακέτο απάντησης διαδρομής ταξιδεύει αντίθετα από το αίτημα διαδρομής, το πρωτόκολλο AODV υποστηρίζει μόνο την χρήση συμμετρικών συνδέσεων · δεν παρέχει υποστήριξη για ασύμμετρες συνδέσεις. Όταν εγκαθίσταται μια διαδρομή, κάθε καταχώρηση διαδρομής σε κάθε κόμβο συσχετίζεται με μια τιμή «διάρκειας ζωής». Όσο δεν χρησιμοποιείται η διαδρομή «τρέχει» ένα χρονόμετρο. Αν το χρονόμετρο υπερβεί τη «διάρκεια ζωής», η καταχώρηση της διαδρομής διαγράφεται.

Μια διαδρομή μπορεί να αλλάξει λόγω της μετακίνησης ενός κόμβου (π.χ του X) που αποτελεί μέλος της διαδρομής. Σε αυτή τη περίπτωση, ο «ανώτερος» γείτονας αυτού του κόμβου παράγει ένα μήνυμα «ανακοίνωσης αποτυχίας σύνδεσης» που ειδοποιεί για τη διαγραφή του τμήματος της διαδρομής, και προωθεί αυτή την ειδοποίηση στον «ανώτερο» γείτονά του. Όταν λαμβάνεται αυτό το μήνυμα από ένα κόμβο, μεταδίδεται στον επόμενο «ανώτερο» γείτονά του και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ενημερωθεί ο κόμβος προέλευσης για τη διαγραφή του τμήματος της διαδρομής που προκλήθηκε από τη μετακίνηση του κόμβου X. Κατά

τη λήψη του μηνύματος «ανακοίνωσης αποτυχίας σύνδεσης», ο κόμβος προέλευσης μπορεί να ξαναξεκινήσει τη διαδικασία εντοπισμού διαδρομής προς τον κόμβο προορισμού.

4.4.2.2 Δυναμική δρομολόγηση προέλευσης[16,11]

Η δυναμική δρομολόγηση προέλευσης (Dynamic Source Routing, DSR) χρησιμοποιεί δρομολόγηση προέλευσης (πηγής) και όχι δρομολόγηση ανά βήμα (Hop-by-Hop). Έτσι, σύμφωνα με τη δρομολόγηση DSR, κάθε πακέτο που δρομολογείται φέρει στην κεφαλίδα του την διατεταγμένη λίστα των δικτυακών κόμβων που σχηματίζουν τη διαδρομή μέσω της οποίας θα αναμεταδοθεί. Κατά συνέπεια, οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν χρειάζεται να τηρούν πληροφορίες δρομολόγησης, αφού το περιεχόμενο του ίδιου του πακέτου αρκεί για τη δρομολόγησή του. Το γεγονός αυτό εξαλείφει την ανάγκη για την περιοδική αναγγελία της διαδρομής και για την εκπομπή πακέτων ανίχνευσης γειτονικών κόμβων που υιοθετούνται από άλλα πρωτόκολλα. Από την άλλη μεριά, όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο DSR η συνολική δικτυακή επιβάρυνση είναι μεγαλύτερη καθώς κάθε πακέτο πρέπει να περιέχει ολόκληρη την ακολουθία των κόμβων που σχηματίζουν τη διαδρομή. Επομένως, η τεχνική DSR είναι αποδοτικότερη σε περιπτώσεις δικτύων μικρής διαμέτρου.

Το πρωτόκολλο περιλαμβάνει τις διαδικασίες του εντοπισμού και της διατήρησης διαδρομής. Ένας κόμβος προέλευσης που επιθυμεί να εγκαταστήσει μια σύνδεση με έναν άλλο κόμβο ξεκινά τη διαδικασία εντοπισμού διαδρομής εκπέμποντας ένα πακέτο αίτησης διαδρομής (ROUTE_REQUEST). Το πακέτο περιλαμβάνεται από τους γειτονικούς κόμβους οι οποίοι και το προωθούν στους γείτονές τους. Ένας κόμβος προωθεί ένα μήνυμα ROUTE_REQUEST μόνο αν δεν το έχει ξαναλάβει και αν η διεύθυνσή του δεν αποτελεί τμήμα της διαδρομής. Όταν παραληφθεί το πακέτο ROUTE_REQUEST είτε από τον κόμβο προορισμού είτε από έναν ενδιάμεσο κόμβο που γνωρίζει μια διαδρομή προς τον προορισμό, ξεκινά μια διαδικασία απάντησης διαδρομής (ROUTE_REPLY). Κατά την άφιξη του μηνύματος ROUTE_REQUEST είτε στον προορισμό είτε σε έναν ενδιάμεσο κόμβο που γνωρίζει μια διαδρομή προς τον προορισμό, το πακέτο περιέχει την ακολουθία

των κόμβων που σχηματίζουν την διαδρομή. Αυτές οι πληροφορίες εισάγονται στο μήνυμα ROUTE_REPLY και έτσι παρέχονται και στον κόμβο προέλευσης. Το πρωτόκολλο DSR υποστηρίζει τόσο συμμετρικές όσο και ασύμμετρες συνδέσεις. Κατά συνέπεια, το μήνυμα ROUTE_REPLY μπορεί να μεταφερθεί μέσω της ίδιας πορείας με το αρχικό μήνυμα ROUTE_REQUEST ή ο κόμβος προορισμού μπορεί να ξεκινήσει τη δική του διαδικασία εντοπισμού διαδρομής προς τον κόμβο προέλευσης και να συμπεριλάβει το μήνυμα ROUTE_REPLY στο δικό του μήνυμα ROUTE_REQUEST. Η διαδικασία εντοπισμού διαδρομής απεικονίζεται στο σχήμα 4.6.

Προκειμένου να περιοριστεί η δικτυακή επιβάρυνση που προκαλούν αυτά τα μηνύματα ελέγχου, κάθε κόμβος διατηρεί μια κρυφή μνήμη (cache) η οποία περιλαμβάνει τις διαδρομές που είτε χρησιμοποιήθηκαν από αυτό τον κόμβο είτε απλώς του γνωστοποιήθηκαν. Μετά την παραλαβή μιας αίτησης διαδρομής από κάποιο κόμβο, όλες οι πιθανές διαδρομές που του γίνονται γνωστές αποθηκεύονται στην κρυφή μνήμη. Έτσι, μια διαδικασία ROUTE_REQUEST μπορεί να οδηγήσει στην αποθήκευση αρκετών διαδρομών στην κρυφή μνήμη του κόμβου προέλευσης.

Η διατήρηση διαδρομών ξεκινά από τον κόμβο προέλευσης κατά την ανίχνευση μιας αλλαγής στην τοπολογία του δικτύου η οποία αποτρέπει την άφιξη των πακέτων στον κόμβο προορισμού. Σε αυτή τη περίπτωση, ο κόμβος προέλευσης μπορεί να επιχειρήσει να χρησιμοποιήσει εναλλακτικές διαδρομές προς τον κόμβο προορισμού (Αν υπάρχουν τέτοιες διαδρομές αποθηκευμένες στην κρυφή του μνήμη) ή να ξεκινήσει μια νέα διαδικασία εντοπισμού διαδρομής. Η αποθήκευση εναλλακτικών διαδρομών στην κρυφή μνήμη σημαίνει ότι η διαδικασία του εντοπισμού νέας διαδρομής μπορεί να αποφευχθεί. Επομένως, η διαδικασία αποκατάστασης διαδρομής στο πρωτόκολλο DSR μπορεί να είναι ταχύτερη από ότι σε άλλα πρωτόκολλα κατά απαίτηση.

Επειδή η διαδικασία της διατήρησης διαδρομής ξεκινά μόνο όταν αποτυγχάνει η σύνδεση, το πρωτόκολλο DSR δε χρησιμοποιεί περιοδικές μεταδόσεις πληροφοριών δρομολόγησης κάτι που οδηγεί σε μικρότερη δικτυακή επιβάρυνση από τη σηματοδότηση ελέγχου και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στους κινητούς κόμβους.

4.4.2.3 Δρομολόγηση βάσει συσχετισμού[16,12]

Ο κύριος στόχος της δρομολόγησης βάσει συσχετισμού (Associativity Based Routing, ABR) είναι να βρεθούν διαδρομές μεγάλης διάρκειας ζωής για αδόμετα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αυτό οδηγεί προφανώς σε λιγότερες ανακατασκευές διαδρομών και σε υψηλότερη ρυθμαπόδοση (Throughput). Το πρωτόκολλο ABR ορίζει ένα νέο μέτρο δρομολόγησης, το οποίο ονομάζεται «βαθμός συσχέτισης» (degree of association). Αυτό το μέτρο καθορίζει το επίπεδο σταθερότητας της συσχέτισης μεταξύ γειτονικών κόμβων και παράγεται ως εξής : όλοι οι κόμβοι παράγουν και μεταδίδουν περιοδικά μηνύματα σηματοδοσίας προκειμένου να ενημερώσουν τους γειτονικούς τους κόμβους για την ύπαρξή τους. Τα διαστήματα μεταξύ αυτών των σημάτων πρέπει να είναι αρκετά μικρά ώστε να παρέχονται ακριβείς πληροφορίες χώρου και συνδεσιμότητας. Κάθε φορά που ένας κόμβος (π.χ ο A) λαμβάνει ένα τέτοιο αναγνωριστικό σήμα από ένα γειτονικό του κόμβο (π.χ τον B), ενημερώνει τον πίνακα συσχετισμού του (Associativity Table) αυξάνοντας έναν μετρητή που δηλώνει τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ αυτού του κόμβου και του γείτονα που μετέδωσε το σήμα. Οι τιμές συσχετισμού μηδενίζονται όταν οι γείτονες ενός κόμβου ή ο ίδιος κόμβος βρεθούν εκτός εμβέλειας. Έτσι, για δύο γειτονικούς κόμβους A και B, το μέτρο συσχέτισης που περιγράφηκε παραπάνω καθορίζει το βαθμό σταθερότητας της συσχέτισης μεταξύ των δύο κόμβων. Οι υψηλές τιμές του μετρητή συσχετισμού για τους κόμβους A και B μαρτυρούν μια κατάσταση μικρής σχετικής κινητότητας, ενώ μια χαμηλή τιμή του μετρητή συσχετισμού μπορεί να υποδηλώνει μια κατάσταση μεγάλης κινητότητας των κόμβων.

Η τεχνική ABR περιλαμβάνει τρεις φάσεις οι οποίες και περιγράφονται παρακάτω :

- ❖ *Εντοπισμός διαδρομής (Route Discovery)*. Προκειμένου ένας κόμβος να εντοπίσει μια διαδρομή, μεταδίδει ένα πακέτο εκπομπής ερωτήματος (Broadcast Query, BQ) που περιέχει τη διεύθυνση του κόμβου και τις τιμές του μετρητή συσχετισμού με τους γείτονές του. Κατά τη λήψη ενός μηνύματος BQ, ένας κόμβος διαγράφει την τιμή των μετρητών συσχετισμού με τον «άνωτερο» γείτονά του και διατηρεί μόνο το μετρητή συσχετισμού που αφορά τον ίδιο και τον «άνωτερο» κόμβο. Στη συνέχεια, προωθεί το μήνυμα στους «κατώτερους» γείτονές του. Κανένας κόμβος δεν προωθεί ένα αίτημα BQ περισσότερες από μια φορές. Έτσι, καθώς ένα πακέτο

BQ φτάνει στον κόμβο προορισμού, περιέχει τις τιμές των μετρητών συσχετισμού κατά μήκος της διαδρομής. Όταν ο κόμβος προορισμού λάβει ένα σύνολο πακέτων BQ (καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια διαφορετική διαδρομή), έχει στη διάθεσή του πληροφορίες σχετικά με το γενικό βαθμό σταθερότητας συσχέτισης για κάθε διαδρομή, και μπορεί έτσι να επιλέξει την καλύτερη από αυτές. Αν οι δύο ή περισσότερες διαδρομές εμφανίζουν την ίδια σταθερότητα συσχέτισης, επιλέγεται εκείνη που προβλέπει το ελάχιστο πλήθος βημάτων. Αφού επιλεγεί μια διαδρομή από τον προορισμό στέλνεται στον κόμβο προέλευσης ένα απαντητικό πακέτο «REPLY» μέσω της πορείας που ορίζεται από την διαδρομή. Όσο μεταφέρεται το πακέτο REPLY η αντίστοιχη διαδρομή χαρακτηρίζεται ως ενεργή, ενώ οι εναλλακτικές διαδρομές παραμένουν ανενεργές. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως διαδικασία BQ-REPLY.

❖ *Ανακατασκευή διαδρομής (Route Reconstruction, RRC).* Ανάλογα με το ποιος κόμβος ή κόμβοι κινούνται κατά μήκος της διαδρομής, η φάση της ανακατασκευής διαδρομής περιλαμβάνει τον μερικό εντοπισμό διαδρομών, την εξάλειψη άκυρων διαδρομών, την ενημέρωση έγκυρων διαδρομών και τον εντοπισμό νέων διαδρομών. Όταν κινείται ο κόμβος προέλευσης, ξεκινά μια νέα διαδικασία BQ-REPLY και η παλαιά διαδρομή διαγράφεται. Όταν κινείται ο κόμβος προορισμού, ο αμέσως «ανώτερος» γείτονάς του σβήνει τη διαδρομή του και ελέγχει αν ο προορισμός είναι ακόμα προσπελάσιμος εκτελώντας μια διαδικασία ερωτημάτων εντοπισμού (Localized Query Process, LQ[H]), όπου το H αντιπροσωπεύει το πλήθος των διαδρομών από τον «ανώτερο» κόμβο μέχρι τον κόμβο προορισμού. Αν ο κόμβος προορισμού λάβει το πακέτο LQ, επιλέγει την καλύτερη μερική διαδρομή και εκδίδει ένα απαντητικό μήνυμα. Διαφορετικά ο «ανώτερος» γείτονας του κόμβου προορισμού καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο τελευταίος βρίσκεται εκτός εμβέλειας και αναθέτει στον επόμενο «ανώτερο» γείτονα να εκτελέσει τη διεργασία LQ. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εγκατασταθεί μια νέα διαδρομή ή μέχρι να ακολουθηθούν αντίστροφα περισσότερα από τα μισά βήματα που σχηματίζουν τη διαδρομή από την προέλευση στον προορισμό. Στην τελευταία περίπτωση, η διαδικασία ακυρώνεται και ξεκινά μια νέα διεργασία BQ-REPLY στον κόμβο προέλευσης.

❖ *Διαγραφή διαδρομής (Route Deletion, RD).* Μια εκπομπή RD ξεκινά όταν μια διαδρομή δεν είναι πλέον έγκυρη. Κατά την λήψη ενός πακέτου RD όλοι οι κόμβοι

κατά μήκος της διαδρομής διαγράφουν τις αντίστοιχες καταχωρήσεις από τους πίνακες δρομολόγησης τους. Τα μηνύματα RD διαδίδονται με πλήρη εκπομπή, επειδή ο κόμβος προέλευσης μπορεί να μην είναι ενήμερος για κάποιες αλλαγές στους κόμβους της διαδρομής που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια των διαδικασιών RRC .

4.4.2.4 Δρομολόγηση σταθερότητας σήματος[13,16]

Η δρομολόγηση σταθερότητας σήματος (Signal Stability Routing, SSR) δρομολογεί τα πακέτα διαδρομών με βάση την ισχύ του σήματος των κόμβων και τη σταθερότητα της θέσης ενός κόμβου. Έτσι, σύμφωνα με τη τακτική SSR επιλέγονται εκείνες οι διαδρομές που έχουν την ισχυρότερη συνδεσιμότητα με στόχο την μείωση των ανακατασκευών διαδρομών και, κατά συνέπεια, την υψηλότερη απόδοση.

Η δρομολόγηση σταθερότητας σήματος περιλαμβάνει δύο πρωτόκολλα που συνεργάζονται μεταξύ τους : το δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης (Dynamic Routing Protocol, DRP) και το στατικό πρωτόκολλο δρομολόγησης (Static Routing Protocol, SRP). Το πρώτο διατηρεί τον πίνακα σταθερότητας σήματος (Signal Stability Table, SST) και τον πίνακα δρομολόγησης (Routing Table, RT). Ο πίνακας SST χρησιμοποιείται για τη αποθήκευση της ισχύος του σήματος των γειτονικών κόμβων. Η αποθήκευση αυτών των τιμών κατά τη δρομολόγηση SSR πραγματοποιείται με περιοδική σηματοδότηση στο επίπεδο σύνδεσης των κόμβων. Με βάση την ποιότητα του σήματος του αναγνωριστικού πλαισίου, οι καταχωρήσεις της SSR προσδιορίζουν τις συνδέσεις ως «αδύναμες» ή «ισχυρές». Όλες οι μεταδόσεις πακέτων ελέγχονται από το πρωτόκολλο DRP πριν προωθηθούν στον πίνακα SRP του κόμβου, το οποίο και εξετάζει το πακέτο προκειμένου να διαπιστώσει αν προορίζεται για τον συγκεκριμένο κόμβο ή κάποιον άλλο. Στη πρώτη περίπτωση το πακέτο προωθείται στα υψηλότερα επίπεδα του πρωτοκόλλου, ενώ στη δεύτερη πρέπει να προωθηθεί στον προορισμό του. Έτσι ο κόμβος αναζητά στον πίνακα RT μια διαδρομή προς τον προορισμό. Αν δεν βρεθεί καμία διαδρομή, ξεκινά μια διαδικασία εντοπισμού διαδρομών. Τα αντίστοιχα πακέτα ελέγχου μεταδίδονται στους γείτονες του τρέχοντος κόμβου και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να προσεγγιστεί ο προορισμός. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, οι ενδιάμεσοι

κόμβοι επιτρέπεται να προωθήσουν το πακέτο ελέγχου μόνο αν (α)δεν έχει είδη ληφθεί από τον κόμβο και (β) λήφθηκε μέσω μιας ισχυρής σύνδεσης. Όταν ο προορισμός λάβει το πρώτο πακέτο ελέγχου, επιστρέφει στον κόμβο που ξεκίνησε την διαδικασία εντοπισμού διαδρομών ένα μήνυμα απάντησης. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται το πρώτο πακέτο ελέγχου που φτάνει στον προορισμό είναι ότι, κατά πάσα πιθανότητα, το πακέτο έφτασε μέσω της μικρότερης ή και λιγότερο κορεσμένης διαδρομής. Καθώς η απάντηση ταξιδεύει κατά μήκος της πορείας επιστροφής, το πρωτόκολλο DRP ενημερώνει κατάλληλα τους πίνακες RT των ενδιάμεσων κόμβων. (Το γεγονός ότι τα πακέτα που φτάνουν μέσω ενός αδύναμου καναλιού απορρίπτονται στους ενδιάμεσους κόμβους σημαίνει ότι τα πακέτα εντοπισμού διαδρομής που καταφέρνουν να φτάσουν στον προορισμό έχουν ακολουθήσει υποχρεωτικά τη διαδρομή με την ισχυρότερη σταθερότητα σήματος. Έτσι, το πρωτόκολλο δρομολογεί τα πακέτα μέσω διαδρομών που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη πιθανή σταθερότητα σήματος. Ωστόσο, σε συνθήκες υψηλού ρυθμού BER, λίγες συνδέσεις είναι δυνατό να χαρακτηριστούν «ισχυρές». Σε τέτοιες περιπτώσεις, η διαδικασία εντοπισμού διαδρομών ενδέχεται να μην βρει κάποια διαδρομή προς τον προορισμό. Τότε, ο κόμβος που ξεκίνησε την όλη διαδικασία έχει τη δυνατότητα να επιλέξει να την ξεκινήσει και πάλι γεγονός που υποδηλώνει ότι πλέον θεωρείται αποδεκτή η ύπαρξη αδύναμων συνδέσεων κατά μήκος της διαδρομής.

Όταν οι διαδρομές διακόπτονται λόγω αλλαγών στην τοπολογία, η δρομολόγηση σταθερότητας σήματος (καθώς και τα πρωτόκολλα AODV και DSR) ξεκινά τη διαδικασία εντοπισμού διαδρομών από τον κόμβο προέλευσης. Αντίθετα από ότι συμβαίνει στη δρομολόγηση βάσει συσχετισμού, δεν εκτελείται μερικώς εντοπισμός διαδρομών (στους ενδιάμεσους κόμβους). Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί απαραίτητως μειονέκτημα επειδή σε μερικές περιπτώσεις η αποτυχία των ενδιάμεσων κόμβων να βρουν μια έγκυρη εναλλακτική διαδρομή έχει συνέπεια τη μετατόπιση της όλης διαδικασίας στον κόμβο προέλευσης. Συνεπώς, είναι πιθανόν να προκύψει νέα αύξηση στη καθυστέρηση της κατασκευής διαδρομής συγκριτικά με την καθυστέρηση που προκαλείται όταν αυτός που ξανά ξεκινά τη διαδικασία ανακατασκευής είναι ο κόμβος προέλευσης.

4.5 Ημιαδόμητα δίκτυα (semi Ad – hoc)

Πρόκειται για ένα είδος ασύρματων δικτύων το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου στην ίδια περιοχή υπάρχουν περισσότερα από ένα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης. Από τη μελέτη των C.M Cordeiro και D.P Agrwal [19] προκύπτει πως τα ημιαδόμητα δίκτυα απαιτούν συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν με διπλό τρόπο, ώστε να δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης είτε σε ένα ασύρματο δίκτυο με συγκεντρωτικό έλεγχο (π.χ Κυψελικό) είτε σε ένα αδόμητο ασύρματο δίκτυο. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει την αξιοπιστία. Αυτό συμβαίνει είτε σε περίπτωση παύσης της λειτουργίας του δικτύου με συγκεντρωτικό έλεγχο είτε σε περίπτωση μετακίνησης ενός τερματικού πέρα από την εμβέλεια του δικτύου. Σε μια τέτοια περίπτωση λοιπόν, το κινητό τερματικό μπορεί να συνδεθεί με άλλα τερματικά του αδόμητου δικτύου. Επιπλέον, όταν κάποια τερματικά βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψης του συγκεντρωτικού δικτύου, μπορούν – μέσω του αδόμητου δικτύου - να παρέχουν πρόσβαση στο συγκεντρωτικό δίκτυο και σε άλλα τερματικά τα οποία βρίσκονται έξω από την εμβέλεια του. Αρκετά εμπορικά προϊόντα ακολουθούν την προσέγγιση του ημιαδόμητου δικτύου. Τέτοια είναι το πρότυπο ασύρματου τοπικού δικτύου IEEE 802.11 και τα πρότυπα δικτύων προσωπικής περιοχής Bluetooth και HomeRF.

Τα αδόμητα δίκτυα χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές ειδικού τύπου, όπως οι στρατιωτικές. Αντίθετα, τα περισσότερα εμπορικά δίκτυα (Όπως τα κυψελικά) βασίζονται σε μια κεντρική οντότητα. Τα ημιαδόμητα δίκτυα συνδυάζουν τις παραπάνω προσεγγίσεις και αναμένεται να αναπτυχθούν περισσότερο με την εμφάνιση των ασύρματων δικτύων τέταρτης γενιάς (4G), η οποία στοχεύει στην ολοκλήρωση των διαφόρων ασύρματων δικτύων σε μία κοινή πλατφόρμα.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικές μετρήσεις και σύγκριση τεχνολογιών

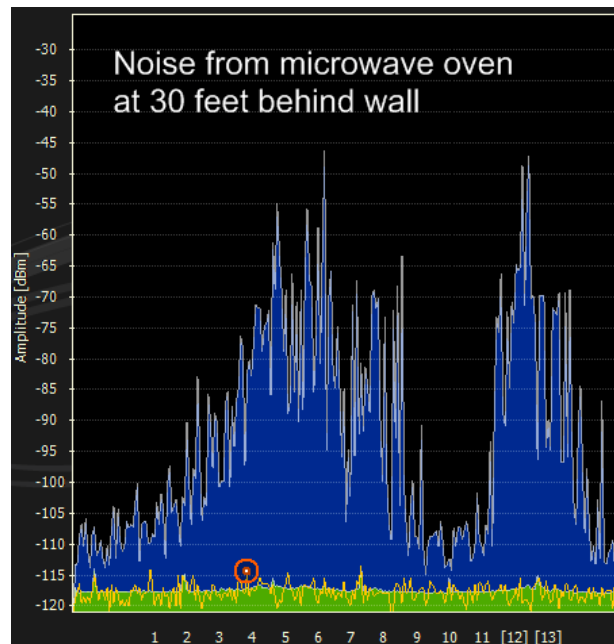
5.1 Περιβάλλον μετρήσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια καταγραφής των μετρήσεων ροής δεδομένων σε ένα δίκτυο Bluetooth τύπου PAN. Τα τελευταία χρόνια το πρότυπο Bluetooth αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο από την επιστημονική κοινότητα. Απόρροια του συγκεκριμένου γεγονότος είναι να προκύψουν περισσότερες ανάγκες από αυτό. Δυστυχώς όμως οι διαθέσιμοι πόροι πληροφοριών για τις επιδόσεις του προτύπου, μέσα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, είναι είτε περιορισμένοι είτε πρόκειται για πληροφορίες τις οποίες μπορεί κανείς να αποκτήσει μέσω συνδρομής σε κάποιο διαδικτυακό βιβλιοπωλείο.

Στα πλαίσια της παραπάνω ανάγκης οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας έρευνας φιλοδοξούν να συμβάλουν στο ήδη υπάρχον γνωστικό υπόβαθρο του αναγνωστικού κοινού προσφέροντας πληροφορίες σχετικά με την λειτουργικότητα και τα όρια απόδοσης του προτύπου Bluetooth. Επίσης, αποτελούν ανάγκη και μέσο κατανόησης των θεωρητικών αξιών που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Το περιβάλλον παρατήρησης θεωρείται ότι είναι ένας εξωτερικός ατμοσφαιρικός χώρος (Σε περίπτωση κενού οι μετρήσεις θα ήταν μηδενικές) απουσία συσκευών εκπομπής ραδιοκυματομορφών όπως για παράδειγμα φούρνοι μικροκυμάτων. Ο λόγος δεν είναι άλλος από το γεγονός πως στην παραπάνω περίπτωση λόγω πολύ κοντινής περιόδου και μήκους κύματος των δύο κυματογραμμών εκπομπής και λόγω του ότι οι συχνότητες από το επίπεδο RFCOMM του Bluetooth και η συχνότητα του εκπεμπόμενου από το φούρνο κύματος εκπέμπουν στην ίδια ISM περιοχή⁷ (2,4GHz), η μια συσκευή λειτουργεί ως πηγή «θορύβων» για την άλλη και έτσι ο ρυθμός μετάδοσης πέφτει δραματικά. Ακολουθεί σχήμα της εν λόγω περίπτωσης:

⁷ Βλ. Κεφάλαιο 3 παρ.3.2.1



Σχήμα 5.1 Οι παραγόμενοι θόρυβοι λόγω της ύπαρξης φούρνου μικροκυμάτων[4]

5.1.1 Λίγα λόγια για την συσκευή μέτρησης

Για την πραγματοποίηση των παρακάτω πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Merlin Bluetooth v1.2 Protocol Analyzer⁸ της εταιρίας LeCroy©[33]. Πρόκειται για μία συσκευή ανάλυσης πρωτοκόλλων Bluetooth, δημιουργίας εξομοιωμένων δικτύων στην εν λόγω τεχνολογία (και όχι μόνο). Βασίζεται στην φιλοσοφία καταγραφής απεσταλμένων πακέτων, αποθήκευσης τους σε ένα Buffer (Προσωρινή μνήμη) και ανακατασκευής τους σε διάφορα σενάρια ανάλογα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Εύκολη στην χρήση εφ' όσον πρόκειται για βασικές λειτουργίες με αρκετές αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Η συσκευή από μόνη της μπορεί να λειτουργήσει και ως Σταθμός εργασίας ασύρματου δικτύου και ως Master Device αλλά και ως Slave Device αφού διαθέτει κεραία λήψης εμβέλειας έως και 100 μέτρα.

⁸ Protocol Analyzer: Πρόκειται για λογισμικό ή για συσκευή (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση) που έχει τη δυνατότητα να επεμβαίνει και να καταγράφει τη «κίνηση» ή τη ροή δεδομένων σε ένα κομμάτι ενός ψηφιακού δικτύου ή σε ένα ολόκληρο ψηφιακό δίκτυο.

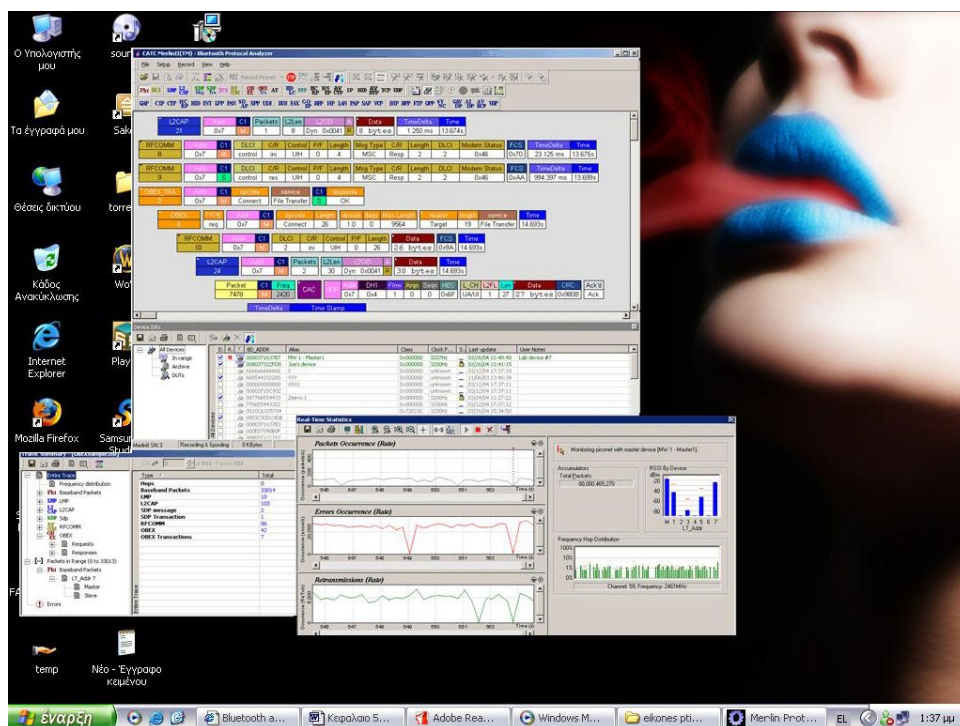


Σχήμα 5.2 Η εν λόγω συσκευή

Μερικά από τα σημαντικότερα στοιχεία της είναι τα ακόλουθα:

- ❖ Παρέχει πολλές επιλογές αναφορικά με τα επίπεδα του Bluetooth και τις δυνατότητες αποκωδικοποίησης τους: Baseband, HCI, LMP, L2CAP, SDP, TCS, RFCOMM, OBEX, AT commands, HCRP, HDLC, BNEP, HID, AVCTP, AVDTP, Handsfree and PPP (LCP, CCP, CHAP, NBFCP, NetBIOS), IPv4, IPv6, TCP & UDP⁹
- ❖ Αποθηκεύει τα δεδομένα παρατήρησης σε δικό του σκληρό δίσκο ώστε να επιτρέπει στον χρήστη να διεξάγει μεγάλες περιόδους μέτρησης και παρατήρησης
- ❖ Σε περίπτωση σφάλματος κατά τη μετάδοση ενημερώνει αυτόματα τον χρήστη.
- ❖ Δυνατότητα καταγραφής και ανάλυσης ποσοτικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
- ❖ Ιδανικό για αρχάριους από τη στιγμή που σου παρέχεται η δυνατότητα να αφαιρέσεις επίπεδα που δεν σε απασχολούν από της μετρήσεις με ένα εύκολο στη χρήση εργαλείο του συστήματος
- ❖ Δυνατότητα δημιουργίας ενσύρματων δικτυακών τόπων τύπου Star, Unidirectional Ring, Bidirectional Ring

⁹ Ορισμένα από τα παραπάνω επίπεδα αναφέρονται στο 3^ο Κεφάλαιο



Σχήμα 5.3 Ένα παράδειγμα της Γραφικής Διεπαφής

5.2 Σενάρια εξομοίωσης / μετρήσεων

Για τις μετρήσεις του Average network Throughput (δηλαδή του λόγου όγκου μεταφερόμενων δεδομένων προς τον πεπερασμένο χρόνο) μέσω του προγράμματος οδήγησης δεν χρειάζεται κάποια εξελιγμένη τεχνογνωσία. Πρόκειται για ζήτημα σωστής παραμετροποίησης και κατοχή βασικών γνώσεων πάνω στις διαφορές μικροδικτύων και δικτύων διασποράς.

Όπως προαναφέρθηκε στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου 3 τα μικροδίκτυα μπορούν να αποτελούνται μέχρι από 8 ενεργές συσκευές συμπεριλαμβανομένου του κυρίου (master) οπότε οι πειραματικές μετρήσεις σε σενάριο με μικροδίκτυο θα αποτελούνται από (α)8 συσκευές ενεργές και (β) σε άλλο σενάριο από 8 συσκευές ενεργές και μια σε κατάσταση «ύπνου». Ο λόγος που επιλέγονται 8 συσκευές δεν είναι άλλος από το γεγονός πως θέλουμε να εξετάσουμε τα φυσικά όρια των μικροδικτύων το λεγόμενο Benchmark. Στη συνέχεια θα εξεταστεί το σενάριο μεταφοράς δεδομένων μεταξύ δυο μικροδικτύων δηλαδή ενός δικτύου διασποράς αφού η μεταφορά θα γίνεται από συσκευή «γέφυρα». Τέλος θα συγκριθούν και οι τεχνολογίες IrDA και Bluetooth σε κλιμακούμενο ποσό δεδομένων ώστε να φανεί η πραγματική διαφορά ανάμεσα τους. Για το τελευταίο

πείραμα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό τύπου Freeware, που διατίθεται δωρεάν μέσω Internet, Martindale's File Download Time Calculator[5]. Πρόκειται για εργαλείο υπολογισμού του απαιτούμενου χρόνου μεταφοράς ενός οποιουδήποτε τύπου αρχείου μεταξύ δύο συσκευών ίδιου τύπου ή μέσω μιας σύνδεσης internet.

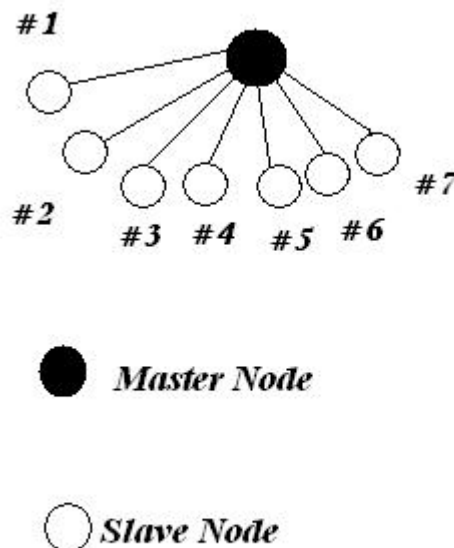
5.2.1 Σενάριο 1^ο : Σύνδεση ενός κυρίου με έναν υποτελή και σταδιακή προσθήκη ενεργών και ανενεργών υποτελών

Σε αυτή τη περίπτωση όπως και σε αυτές που θα ακολουθήσουν το πακέτο δεδομένων θεωρείται ένα αρχείο πολυμέσων (κινούμενο εικονίδιο τύπου GIF με αναπαραγωγή ήχου) με συνολικό μέγεθος 180Kb. Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων σε αυτό το πείραμα όπως και σε κάθε παρόμοιο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως Average Network Throughput και θα μετριέται σε KBps. Η ταχύτητα επίτευξης σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών με τεχνολογία Bluetooth θεωρείται από το κατασκευαστικό πρότυπο ως 728 KB/s(αν και αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από της προδιαγραφές της κάθε συσκευής και πρακτικά αγγίζει τα 200KB/s) και βάσει των πληροφοριών που ανταλλάζουν μέσω των αντίστοιχων Layers θεωρείται δεδομένη στα 1.3sec(1.28sec ακριβέστερα) και δεν επανεξετάζεται σε κανένα από τα πειράματα.

Στο πρώτο σενάριο παρατηρούμε λοιπόν ότι η διαδικασία ανταλλαγής ενός πακέτου μεγέθους 180KB κρατάει κατά προσέγγιση 1sec. Ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει αυτός ο ρυθμός μετάδοσης καθώς από τη στιγμή που αρχίζει να μεγαλώνει το μικροδίκτυο, δηλαδή από τη στιγμή που συνδέονται καινούργιες συσκευές υποτελείς και επιχειρούν να στείλουν το ίδιο πακέτο δεδομένων(ενεργές συνδέσεις), αυτός μειώνεται σε άμεσο ποσοστό έως και 89.9% μικρότερο της αρχικής ταχύτητας ενώ ακόμα και στην περίπτωση που οι συσκευές δεν επιχειρούν να στείλουν κάτι μεταξύ τους(ανενεργές συνδέσεις) παρατηρούμε πως ο χρόνος απόκρισης σε ping μηνύματα του δικτύου (ο εικονικός δηλαδή χρόνος που εκφράζεται, μέσω της αποστολής και παραλαβής «μηνυμάτων» μεταξύ των συσκευών, και αντιπροσωπεύει την ταχύτητα απόκρισης των συσκευών του δικτύου) αυξάνεται (δηλαδή αυξάνονται τα ms) σε μικρότερο να μεν αρκετά μεγάλο δε ποσοστό με το μέγιστο να αγγίζει οριακά τα 150ms και το ελάχιστο να κινείται κοντά στα 100ms.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί πως η απόσταση της κάθε υποτελούς συσκευής θεωρείται σταθερή και μη μεταβαλλόμενη στα 20cm ώστε να έχουμε μηδενικές απώλειες σε ταχύτητα

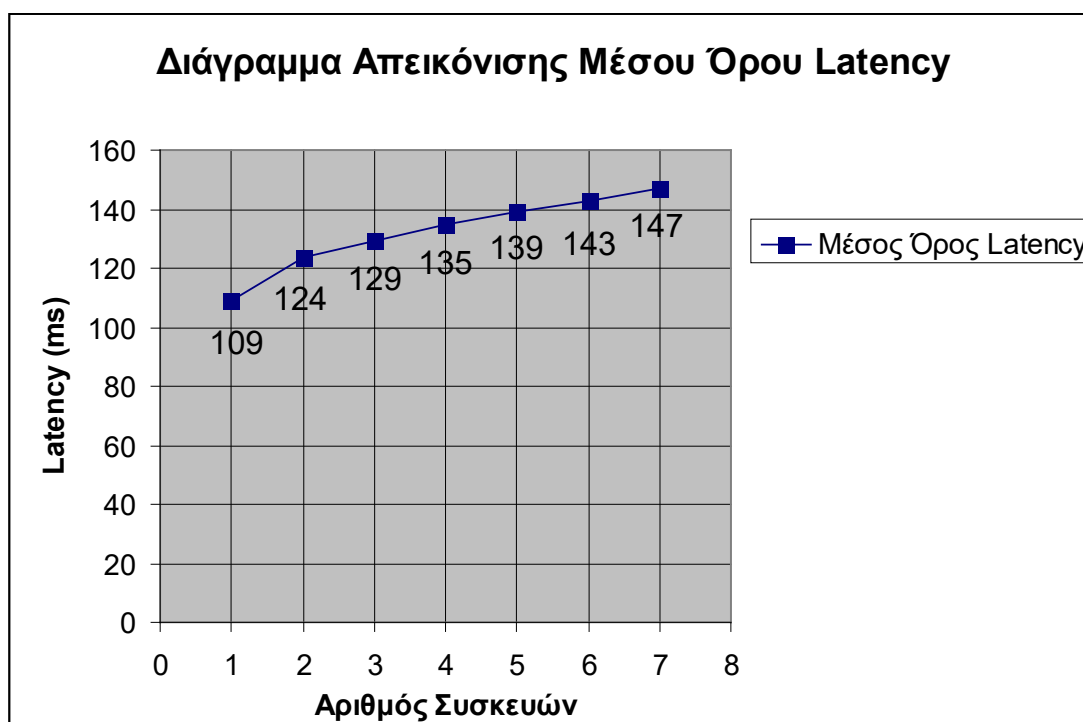
Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται γραφικά το μικροδίκτυο μας ενώ παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα των μετρήσεών μας. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 5.5 βλέπουμε αφενός το Average Network Throughput-κάθετος άξονας-σε διακριτά χρονικά σημεία (κατά τη είσοδο μιας νέας συσκευής στο δίκτυο-οριζόντιος άξονας) αφετέρου τη μείωσή του, γραφικά, συνολικά μετά την είσοδο και των επτά συσκευών. Τέλος στο Σχήμα 5.6 παρατηρούμε την σταδιακή αύξηση του μέσου όρου του Latency μιας συσκευής-κάθετος άξονας-του μικροδικτύου σε συγκεκριμένο αριθμό συνδεδεμένων υποτελών-οριζόντιος άξονας.



Σχήμα 5.4 Το πειραματικό μας δίκτυο



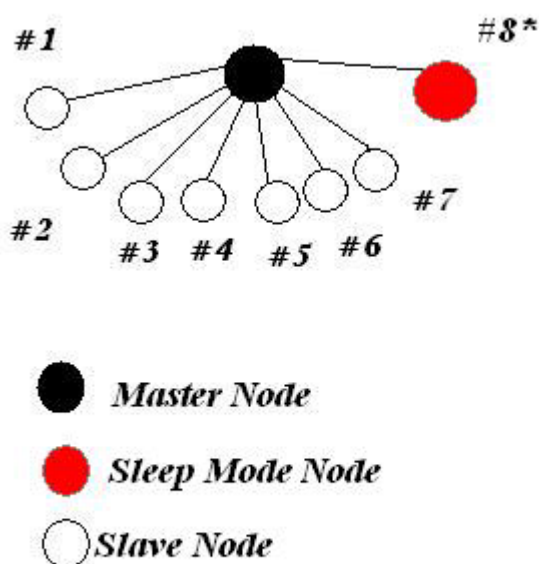
Σχήμα 5.5 Μέσος όρος ρυθμού μετάδοσης δικτύου ως συνάρτηση του αριθμού ενεργών συνδέσεων



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα απεικόνισης μέσου όρου Latency

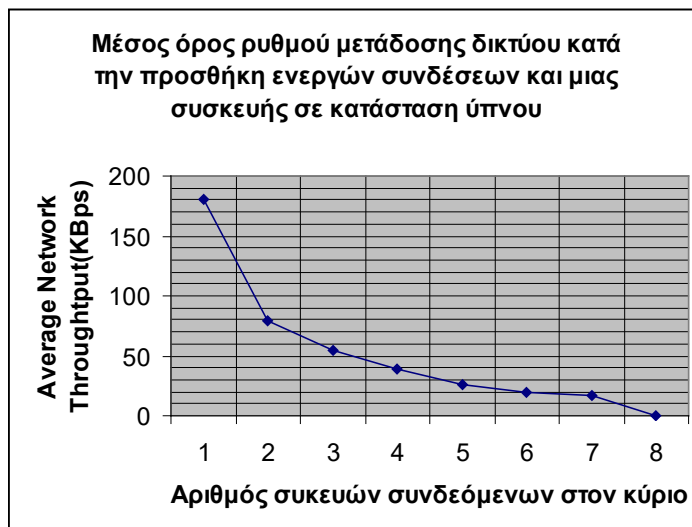
5.2.2 Σενάριο 2^ο : Προσθήκη μιας συσκευής υποτελούς σε κατάσταση «ύπνου» στο πειραματικό δίκτυο του πρώτου σεναρίου.

Ακολουθώντας τις διαδικασίες του πρώτου πειράματος δημιουργήθηκε ένα πανομοιότυπο δίκτυο . Αυτή τη φορά όμως και από τη στιγμή που ο μέγιστος αριθμός ενεργών υποτελών που μπορεί να κρατάει συνδεδεμένους ο κύριος είναι 7, πρόσθεσα και μια ακόμη συσκευή η οποία αναγκαστικά μετά τη σύνδεση περιήλθε σε κατάσταση «ύπνου» (*sleep/park mode*)¹⁰. Οι μετέπειτα μετρήσεις δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές με του πρώτου πειράματος ωστόσο καταγράφηκαν και αναφέρονται για λόγους πειραματικής πληρότητας. Συγκεκριμένα στην επανάληψη της πρώτης μέτρησης παρατηρήθηκε μια μείωση κατά μέσο όρο της τάξης των 1.5 KBps στο throughput ενώ στην επανάληψη της δεύτερης μέτρησης το ring πρακτικά δεν μεταβλήθηκε καθόλου παρά μόνο θεωρητικά και σε ποσοστά 1% του nanosecond, ενώ παρόλο που η όγδοη συσκευή δεν βρίσκεται σε κατάσταση ετοιμότητας δέχεται και επιστρέφει κανονικά το ring στην ταχύτητα της τελευταίας εισελθείσας συσκευής. Ακολουθούν τα σχήματα του νέου δικτύου καθώς και των 2 νέων μετρήσεων.

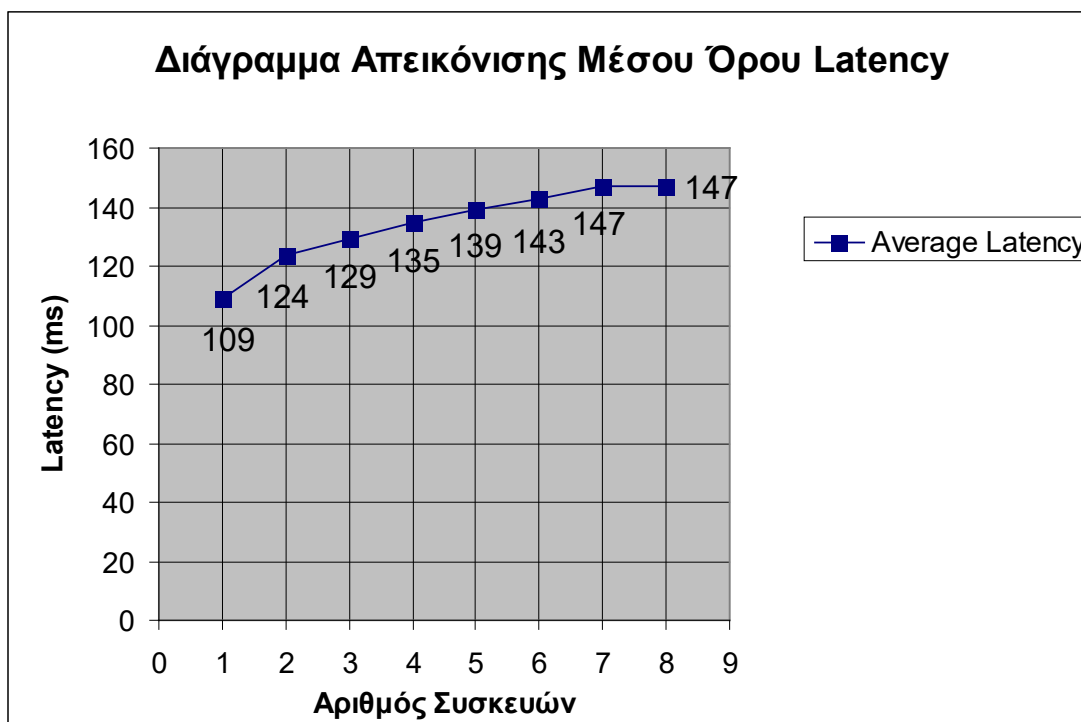


Σχήμα 5.7 Το δίκτυο του πρώτου πειράματος μετά την προσθήκη μιας συσκευής σε κατάσταση ύπνου

¹⁰ Βλ Κεφάλαιο 3 Παρ 3.4.7



Σχήμα 5.8 Μέσος όρος ρυθμού μετάδοσης δικτύου κατά την προσθήκη ενεργών συνδέσεων και μιας συσκευής σε κατάσταση ύπνου

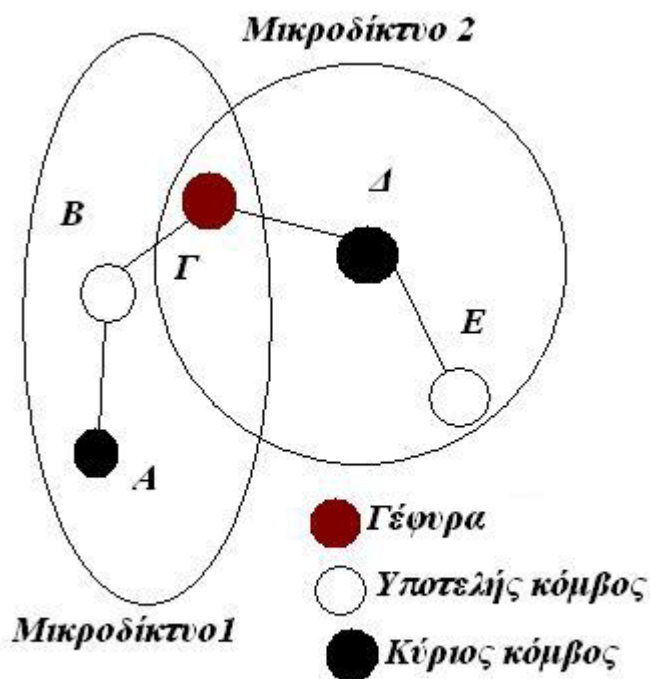


Σχήμα 5.9 Διάγραμμα απεικόνισης μέσου όρου Latency μετά και την είσοδο της νέας συσκευής.

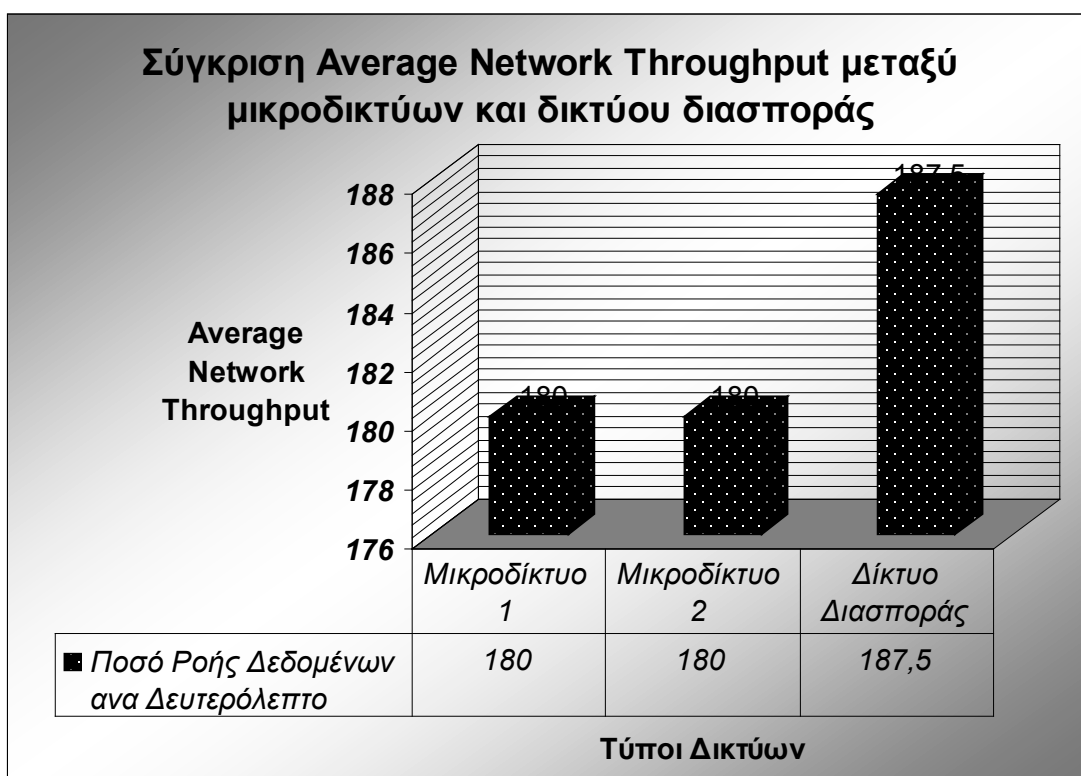
5.2.3 Σενάριο 3^ο : Σύνδεση δύο μικροδικτύων μέσω μιας γέφυρας και δημιουργία ενός δικτύου διασποράς με έναν κοινό πόρο.

Στο τρίτο πειραματικό σενάριο για την υλοποίηση του χρησιμοποιούμε συνολικά πέντε συσκευές οι οποίες είναι ομαδοποιημένες σε δύο μικροδίκτυα και τα οποία έχουν μία κοινή συσκευή η οποία με τη σειρά της παίζει το ρόλο της «γέφυρας», έτσι ώστε να μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα απλό στη δομή του δίκτυο διασποράς. Το αποτέλεσμα του εικονικού δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Παρατηρείται λοιπόν κατά την διάρκεια των μετρήσεων πως σε επίπεδο μικροδικτύων όταν δηλαδή δεν επιχειρούνται να σταλούν δεδομένα στην κοινή συσκευή η συμπεριφορά των δικτύων είναι αντίστοιχη με τη συμπεριφορά του μικροδικτύου του πρώτου σεναρίου στην περίπτωση που ανταλλάζει δεδομένα η κύρια συσκευή με την πρώτη υποτελή (θεωρητικά υπάρχει απόκλιση της τάξεως του 43%ο). Όταν όμως επιχειρούν όλες οι συσκευές να στείλουν από ένα μέρος του πακέτου παρατηρούμε αξιοπρόσεκτη διαφορά τόσο στο Average Network Throughput όσο και στο μέσο όρο του Ping των συσκευών. Αυτό συμβαίνει διότι με την προσθήκη της γέφυρας το εύρος ζώνης (Bandwidth) του ενιαίου δικτύου αλλάζει και πιο συγκεκριμένα μεγαλώνει αφού λειτουργεί αθροιστικά σε επίπεδο δομικών μικροδικτύων¹¹. Στην ουσία έχουμε ένα ενιαίο δίκτυο που λειτουργεί με εντελώς διαφορετικές συνθήκες από ότι τα δύο συστατικά του. Οπότε με μεγαλύτερο Bandwidth έχουμε ναί μεν μεγαλύτερο Throughput αλλά έχουμε επίσης και μεγαλύτερο Latency. Αυτό συμβαίνει διότι σε Packet Switched Συστήματα(Συστήματα όπου η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω της δρομολόγησης πακέτων[34]) η μέγιστη τιμή του Throughput πλησιάζει τη ελάχιστη τιμή του Load (φορτίο) b/s σε όλους τους κόμβους και αυτό προκαλεί αστάθεια στο Latency οδηγώντας το θεωρητικά προς το άπειρο (πρακτικά αυξάνεται κατά 'ένα συγκεκριμένο ποσοστό)[35]. Τέλος πρέπει να σημειωθεί πως στα δίκτυα διασποράς μεγάλο ρόλο παίζει η απόσταση, πρακτικά μεγαλύτερο από ότι σε ένα μικροδίκτυο, και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται για ακόμα μια φορά η ελάχιστη απόσταση απώλειας ταχύτητας 20cm.

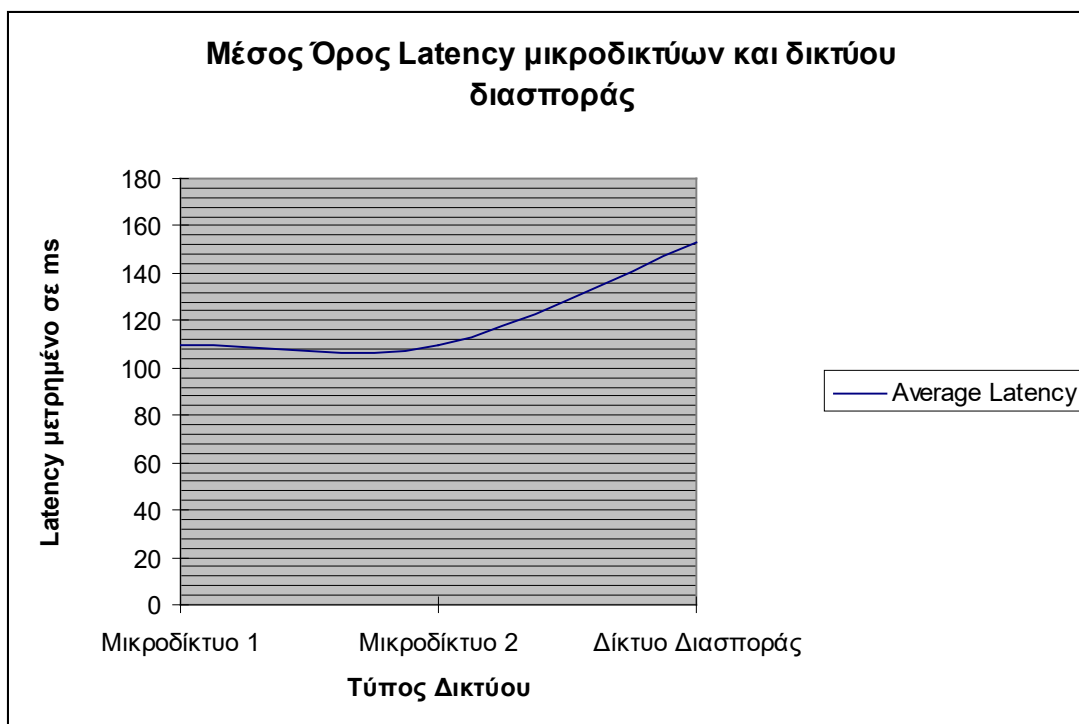
¹¹ Βλ. Κεφάλαιο 3 παρ. 3.5



Σχήμα 5.10 Το δίκτυο διασποράς του 3ου Σεναρίου



Σχήμα 5.11 Σύγκριση Average Network Throughput μεταξύ μικροδικτύων και δικτύου διασποράς



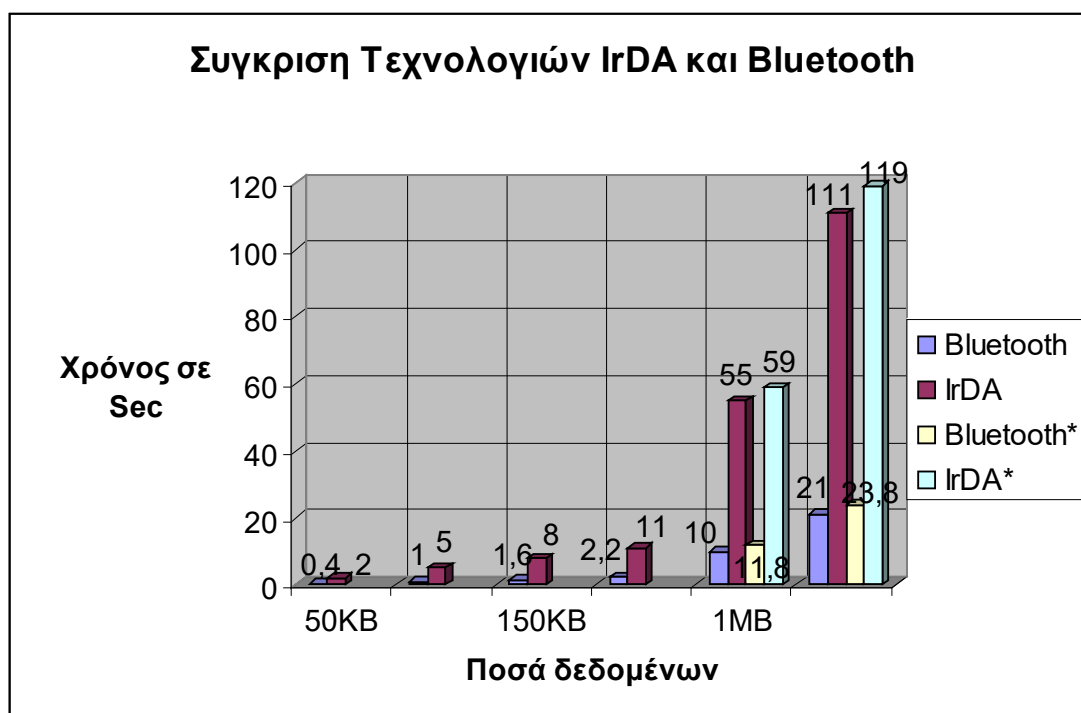
Σχήμα 5.12 Μέσος Όρος Latency μικροδικτύων και δικτύου διασποράς

5.2.4 Σενάριο 4^ο Σύγκριση ταχύτητας (με χρονικές μονάδες μέτρησης) μεταφοράς δεδομένων μεταξύ δυο συσκευών σε τεχνολογίες Bluetooth και IrDA.

Στο συγκεκριμένο σενάριο χρησιμοποιείται το λογισμικό ελεύθερης διαδικτυακής διάθεσης File Download Time Calculator[5] του Jim Martindale. Αυτό το λογισμικό εγκαταστάθηκε μόνο σε έναν υπολογιστή και οι μετρήσεις διενεργήθηκαν βάσει της βάσης δεδομένων του συγκεκριμένου προγράμματος. Συγκεκριμένα επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή ενός μεγέθους δεδομένων και μετά από τις απαραίτητες ρυθμίσεις μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που απαιτείται για την διεκπεραίωση της η εν λόγω μεταφοράς σε διάφορα πρότυπα τεχνολογιών.

Πρακτικά χρησιμοποίησα τα παρακάτω πακέτα δεδομένων : (α)50KB, (β) 100KB, (γ) 150KB, (δ) 200KB, (ε) 1MB και τέλος (στ) 2MB. Τα αποτελέσματα που έλαβα και τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 5.14 είναι αρκετά διαφωτιστικά ως προς τις διαφορές των δυο τεχνολογιών. Αυτό όμως που προκαλεί ιδιαίτερη εντύπωση είναι πως ενώ μέχρι τα 200KB και οι δύο τεχνολογίες αυξάνουν τους χρόνους μετάδοσης με αριθμητική πρόοδο η μεν IrDA με $\alpha=3\text{sec}$ και η δε Bluetooth με $\alpha =$

0.6sec, όταν τα ποσά δεδομένων αυξάνονται και συγκεκριμένα μετά το 1MB και μέχρι τα 2MB που εξετάζει το παρόν πείραμα παρατηρούμε μη σταθερή αναλογική μείωση του χρόνου μετάδοσης και έτσι ενώ η IrDA συσκευή θα έπρεπε σύμφωνα με τη συμπεριφορά της μέχρι τα 200KB να μεταφέρει το 1MB σε 59sec και τα 2MB σε 119sec παρατηρούμε ότι τα μεταφέρει σε 55sec και 111sec αντίστοιχα. Ομοίως και η Bluetooth συσκευή θα έπρεπε σύμφωνα με τη συμπεριφορά της μέχρι τα 200KB, να μεταφέρει το 1MB σε 11,8sec και τα 2MB σε 23,8sec παρατηρούμε όμως ότι τα μεταφέρει σε 10sec και 21sec αντίστοιχα. Παρατηρούμε δηλαδή διαφορές της τάξεως των 4 και 8sec στην IrDA και 1.8 και 2.8 στην Bluetooth.



Σχήμα 5.13 Σύγκριση τεχνολογιών IrDA και Bluetooth (όπου * οι αναμενόμενες αλλά και μη αληθείς τιμές των υποθετικών μετρήσεων).

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα επίλογος και μελλοντική μελέτη

6.1 Συμπεράσματα

Φτάνοντας στο τέλος της συγκεκριμένης μελέτης μπορεί κανείς να βγάλει ασφαλή συμπεράσματα αναφορικά με τις προδιαγραφές της ασύρματης τεχνολογίας στον χώρο των δικτύων γενικά και στα αδόμητα σε πρότυπο Bluetooth δίκτυα ειδικότερα. Εξετάσαμε τη ιστορία των ασύρματων δικτύων με μια γρήγορη ιστορική επισκόπηση. Θίχτηκαν θέματα πέραν των αυστηρά τεχνολογικών και θέσαμε τις βάσεις για την εξέταση και αξιολόγηση των τεχνολογιών που ακολούθησαν.

Επειτα εξετάσαμε τη δομή των Bluetooth Ad – Hoc δικτύων με σκοπό να κατανοήσουμε τη θεωρία που απαιτείται για την διεξαγωγή επιστημονικά ορθών πειραματικών μετρήσεων. Βγάλαμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την τοπολογία των δικτύων Bluetooth όπως επίσης εξετάσαμε τα φυσικά όρια του προτύπου, ενώ τέλος μέσω της σύγκριση IrDA με Bluetooth καταφέραμε να αποδείξουμε και μαθηματικά την υπεροχή του Bluetooth αλλά και να παρατηρήσουμε την ποσοστιαία μεταβολή των διαφορών τους κάνοντας μας έτσι να κατανοήσουμε τον σταδιακό παραγκωνισμό του προτύπου IrDA.

6.2 Μελλοντική μελέτη

Βάσει των πειραματικών μετρήσεων μπορέσαμε να αποκτήσουμε ένα γενικό υπόβαθρο πάνω στο γενικό γνωστικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται το Bluetooth. Λόγω του ότι όμως δεν υπάρχουν συσκευές σε HomeRF μας είναι αδύνατο να συγκρίνουμε το Bluetooth σε ποιο πλήρες και ανταγωνιστικό πλαίσιο. Σε

μελλοντικό σενάριο και αν τελικά το πρότυπο HomeRF εξελισσόταν επαρκώς και έβγαινε στην αγορά τότε θα αποτελούσε καλή περίπτωση μελέτης.

Λόγω των γνώσεων που μπορούν να αποκτηθούν, από τη φοίτηση του στο τμήμα Πολιτισμικής Τεχνολογίας & Επικοινωνίας, από έναν φοιτητή του είναι δύσκολο έως αδύνατο να επεκτείνει την έρευνα του σε γνωστικά πεδία αμιγώς πληροφορικής φύσης. Ακόμα αν οι χρονικές προθεσμίες το επέτρεπαν θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν και να αξιολογηθούν πειραματικά επιπλέον σενάρια από εκείνα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για παράδειγμα πως επηρεάζεται το Throughput από την απόσταση των συσκευών (για αποστάσεις έως και 10m σε ένα μικροδίκτυο).

Τέλος για τον προαναφερθέντα λόγο απεφεύχθει εκτενέστερη αναφορά στα πρωτόκολλα δρομολόγησης των Ad – hoc δικτύων. Σε διαφορετική περίπτωση θα μπορούσαν να εισαχθούν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τους χρόνους μετάδοσης δεδομένων και σχετικά με την χρονοκαθυστέρηση των δικτύων στα πειράματα που περιγράφηκαν παραπάνω.

Λεξικό Τεχνικών Όρων και Ακρωνυμίων

A

ACL	Asynchronous ConnectionLess
AM_ADDRESS	Active Member Address
AODV	Ad-hoc On-Demand Distance Vector
ARQ	Automatic Retransmission Query

B

BNEP	Bluetooth Network Encapsulation Protocol
-------------	---

C

CRC	Cyclic Redundancy Check
------------	--------------------------------

D

DSDV	Dynamic Destination Sequenced Distance Vector
DSR	Dynamic Distance Routing
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum

F

FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum

G

GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
-------------	--

H

HCI	Host Controller Interface
------------	----------------------------------

I

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IrDA	Infrared Data Association

L

L2CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
--------------	---

O

OBEX	Object Exchange
-------------	------------------------

P

PAN	Personal Area Network
------------	------------------------------

R

RF	Radio Frequency
RVM	Routing Vector Method

S

SDP	Service Discovery Protocol
------------	-----------------------------------

T

TDD	Time Division Duplexing
------------	--------------------------------

U

UART	Universal Asynchronous Receiver & Transmitter
-------------	--

W

WiFi	
-------------	--

Βιβλιογραφία

- [1] R.Schneiderman, Bluetooth's Slow Dawn, IEEE Spectrum, November 2000, σελ 61-65
- [2]IEEE Project 802.15 <http://www.ieee802.org/15>
- [3]Dr Mohammad S. Obaidat, Security of e-Systems and Computer Networks, Cambridge University Press 2007, p33-39
- [4]blogs.zdnet.com/Ou/images/ap-signal.png
- [5]<http://www.martindalecenter.com/AATimeCalc.html>
- [6]S.Chakrabarti και A.Mishra, QoS Issues in Ad – hoc Wireless Networks, IEEE Communications Magazine, February 2001, p142 – 148
- [7]C.E Perkins και P.Bwaghat, Highly Dynamic Destination – Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers, Computer Communications Review, October 1994, p234-244
- [8]C.C Chiang, Routing in Clustered Multihop, Mobile wireless Networks with Fading Channel, Proceedings of IEEE SICON, 1997
- [9]S. Murthy και J.J Garcia – Luna – Aceves, An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks, ACM Mobile Networks and Applications Journal, Special Issue on Routing in Mobile Communication Networks, October 1996, p 183 – 197
- [10]C. E Perkins και E.M Royer, Ad – hoc On – Demand Distance Vector Routing, Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications, February 1999, p 90-100
- [11]D.B Johnson και D.A Maltz, The Dynamic Source Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks, IETF Draft, October 1999
- [12]C.K Toh, A Novel Distributed Routing Protocol to Support Ad Hoc Mobile Computing, Proceedings of IPCCC '96, 1996
- [13]R. Dube, C.D. Rais, K. – Y. Wang, και S.K Tripathi, Signal Stability Based Adaptive Routing for Ad Hoc Mobile Networks, IEEE Personal Communications, February 1997
- [14]V. H McDonald, The Cellular Concept, Bell Systems Technology Journal, January 1979
- [15]Π. Νικοπολιτίδης Γ. Παπαδημητρίου και Α. Πομπόρτσης, Design Alternatives for Wireless Local Area Networks, International Journal of Communication Systems, Wiley, February 2001, p 1-42
- [16]Π. Νικοπολιτίδης Μ.Σ Obaidat Γ. Παπαδημητρίου Α.Σ Πομπόρτσης, Ασύρματα δίκτυα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2006
- [17]D.Aksou και M.franklin, Scheduling for Large – Scale On – Demand Data Broadcasting, ACM Online Projects, December 1999

- [18]W.Stallings, Data and Computer Communications, 5th Edition, Prentice Hall, 2002
- [19]C.M Cordeiro D.P Agrawal, Ad- Hoc & Bluetooth Sensor Networks Theory and Applications, World Scientific, 2002
- [20]Bluetooth SIG website <http://www.bluetooth.com>
- [21]T.G Zimmerman, Personal Area Networks : Near – Field Intrabody Communication, IBM Systems Journal, 35, 1996, p 609 – 617
- [22]J. Haartsen, The Bluetooth Radio System, IEEE Personal Communications, February 2000, p28-30
- [23]D.F Bantz και F.Z Bauchot, Wireless LAN Design Alternatives, IEEE Network, March/April 1994 p43 – 53
- [24]J. Haas M. Garla D.B Johnson C.E Perkins M.B Parsley M. Steenskrup και C.K Toh, wireless Ad – hoc Networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, August 1999, p1329 – 1332
- [25]Dr M.S Obaidat, Wireless Networks, John Wily and Sons, 2003 p414 -416
- [26] 802.11, Wireless Networks the Definite Guide, O’Reilly, 2005 p225 – 232
- [27]J Zhu και D. Djonin, Project Report Elec 510 – Computer Communication Networks “The Bluetooth System”, University of Victoria, July 21, 2001
- [28]J. Haartsen, Bluetooth – The Universal Radio Interface of Ad – hoc Wireless Connectivity, Ericsson Review, (3) , 1998
- [29]J.G Proakis, Digital Communications, Chapter B: ‘Spread Spectrum Signals for Digital Communications’, McGraw – Hill, 4th edition, August 2000
- [30]Bluetooth 516, Specification of the Bluetooth System: Core Version 1.1, February 2001
- [31]Gilbert Held, Understanding Data Communications, Addison Wasley Professional, 7th edition, February 2002
- [32]S.Weber και X. Yang, Wireless Ad-Hoc Networks with Successive Interference Cancellation, February 2005
- [33]<http://www.lecroy.com/tm/products/ProtocolAnalyzers>
- [34] <http://en.wikipedia.org/wiki/Throughput>
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Throughput#Throughput_and_latency