



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών
Συστημάτων

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής
ζεύξης

(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Η Διπλωματική Εργασία
παρουσιάστηκε ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού του
Πανεπιστημίου Αιγαίου

Σε Μερική Εκπλήρωση
των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του
Μηχανικού Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

του
Παπαϊωάννου Γρηγόριου
ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2018-2019



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ
ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΠΑΠΑΙΩΑΝΝΟΥ ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ

Βουγιούκας Δημοσθένης, Επιβλέπων, 24-10-2019

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σκιάνης Χαράλαμπος, Μέλος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

Σκούτας Δημήτριος, Μέλος

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και
Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΧΕΙΜΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2018-2019

Περίληψη

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, η προσομοίωση και η τεχνολογική πρόταση με βάση την 3GPP για την εγκατάσταση LTE NB-IoT αισθητήρων και συσκευών Machine to Machine σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ σταθμού βάσης και δικτύου κορμού, χρησιμοποιώντας GEO ή LEO δορυφόρους.

Το LTE-A είναι πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται ευρέως στις κινητές επικοινωνίες σήμερα. Προσφέρει ένα σύνολο πλεονεκτημάτων όπως, υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και μεγάλη ευελιξία. Προκειμένου όμως να καλυφθούν οι απαιτήσεις σε ενέργεια και κόστος του δικτύου αυτού, οι σύγχρονες κινητές συσκευές επιβάλλεται να διαθέτουν μεγάλη χωρητικότητα μπαταρίας ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν των υψηλών επιδόσεων επεξεργαστή ο οποίος θα επεξεργάζεται το πρωτόκολλο LTE-A. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι ένα τέτοιο πρωτόκολλο θα ήταν αδύνατον να εγκατασταθεί σε μία συσκευή η οποία θα έπρεπε να διατηρηθεί ενεργή χωρίς φόρτιση για μεγάλο χρονικό διάστημα (διάρκεια ~ 10 χρόνια).

Η τεχνολογία Narrowband του LTE-A η οποία είναι πρωτοπόρα στην εξοικονόμηση ενέργειας (διάρκεια μπαταριών ~ 10 χρόνια), αλλά και στην εξοικονόμηση κόστους συντηρήσεων των εξοπλισμών, χάρη στην επαναστατική αρχιτεκτονική της η οποία λαμβάνει τα βέλτιστα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας του LTE-A αλλά με μικρές παραλλαγές, πετυχαίνει τη μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας NB-IoT είναι κατάλληλο για χρήση σε αισθητήρες χαμηλού κόστους οι οποίοι διαθέτουν αυτόνομη μονάδα παροχής ενέργειας (μπαταρίες) και δεν διαθέτουν μεγάλη επεξεργαστική ισχύ. Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει την εγκατάσταση IoT συσκευών σε απομακρυσμένες περιοχές (Βουνά) όπου μπορούν να μείνουν ενεργές για αρκετά χρόνια.

Στη περίπτωση όμως που δεν υπάρχει επικοινωνία IoT συσκευής και σταθμού βάσης λόγω της μορφολογίας του περιβάλλοντος (Ερημος, Ωκεανοί), επιβάλλεται να χρησιμοποιηθεί δορυφορική ζεύξη προκειμένου τα δεδομένα να σταλούν επιτυχώς από την IoT συσκευή στο δίκτυο κορμού. Παρακάτω περιγράφεται με λεπτομέρεια η προτεινόμενη τοπολογία.

Η προτεινόμενη τοπολογία είναι η εξής: ένας αισθητήρας LTE-A NB-IoT είναι εγκατεστημένος σε απομακρυσμένη τοποθεσία, όπως π.χ. πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου. Προκειμένου να αποστείλει επιτυχώς τα δεδομένα του ο αισθητήρας θα πρέπει να επικοινωνήσει με τον σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης θα πρέπει να πραγματοποιήσει ζεύξη με τον GEO ή LEO δορυφόρο ο οποίος έχει κρίσιμο ρόλο, αφού είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και δικτύου κορμού ώστε να λάβουμε τα δεδομένα.

Βάσει της προτεινόμενης τοπολογίας, θα πρέπει να μελετηθούν τυχόν σφάλματα που μπορούν να προκύψουν στην επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και δορυφόρου. Επιπλέον, θα αναπτυχθεί προσομοίωση της επικοινωνίας NB-IoT μέσω δορυφόρου. Σε επίπεδο μελέτης, αρχικά θα γίνει ανάλυση της τεχνολογίας IoT και NB-IoT.



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

Θα γίνει αναφορά ως προς την συνεισφορά της τεχνολογίας αυτής στην σύγχρονη κοινωνία, καθώς θα γίνει και περιγραφή του τεχνικού της μέρους. Έπειτα, θα γίνει ανάλυση της τεχνολογίας NB-IoT μέσω δορυφορικής ζεύξης που θα περιλαμβάνει θεωρητικό και τεχνικό μέρος σε επίπεδο μελέτης. Επιπλέον, θα γίνει ανάλυση των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν σε μία τέτοια ζεύξη, όπως οι απώλειες λόγω βροχής.

Το φαινόμενο Doppler επίσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα όταν πρόκειται για δορυφόρο LEO ο οποίος κινείται με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Στη συνέχεια, θα γίνει ανάλυση της τεχνικής OFDM και της SC-OFDM για την άνω και κάτω ζεύξη στο LTE που χρησιμοποιείται και στο NB-IoT. Τέλος, θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση Link Budget για το NB-IoT μέσω δορυφόρου το οποίο θα περιλαμβάνει το φαινόμενο Doppler, Path-loss, απώλειες λόγω βροχής και τυχόν άλλες απώλειες.

Θα γίνει τροποποίηση του μοντέλου LTE τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, ώστε να φτιάξουμε το μοντέλο NB-IoT το οποίο θα μας δίνει πραγματικά δεδομένα (υπολογισμός ισχύς σήματος λήψης-εκπομπής, υπολογισμός σφαλμάτων), για 2 σενάρια: 1) δορυφόρο LEO και 2) δορυφόρο GEO. Απώτερος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου NB-IoT το οποίο θα υπολογίζει την ισχύ λήψης και εκπομπής, καθώς και τα σφάλματα τα οποία μπορεί να προκύψουν από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν.

Λέξεις κλειδιά: Επικοινωνία Πρωτόκολλου στενής ζώνης του Διαδικτύου των πραγμάτων μέσω δορυφόρου, γεωστατική τροχιά, χαμηλή τροχιά γης.

© 2019

του

Παπαϊωάννου Γρηγόριου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study, simulate and develop a 3GPP-based technology proposal for deploying LTE NB-IoT Sensors and Machine to Machine devices in remote areas where there is no connection between the base station and the backbone network, using GEO or LEO satellites.

LTE-A is a communication protocol widely used in mobile communications today. It offers a number of advantages such as high data transmission speed and high flexibility. However, in order to meet the energy and cost requirements of this network, modern mobile devices need to have a large battery capacity to serve the high performance processor that will process the LTE-A protocol. It therefore becomes clear that such a protocol would be impossible to install on a device that would have to remain active without charging for a long time (~ 10 years).

LTE-A Narrowband technology is pioneering not only in energy saving (battery life ~ 10 years) but also in equipment maintenance costs thanks to its revolutionary architecture that takes the best features of LTE-A technology but with small variants, achieves maximum energy savings. The NB-IoT communication protocol is suitable for use on low-cost sensors that have an autonomous power unit (batteries) and do not have high processing power. This protocol allows IoT devices to be installed in remote areas (Mountains) where they can stay active for several years.

However, in the absence of IoT device and base station communication due to environmental morphology (Desert, Oceans), satellite links should be used to send data successfully from the IoT device to the backbone network. The proposed topology is described in detail below.

The proposed topology is as follows: a LTE-A NB-IoT sensor is installed at a remote location, such as a remote control. oil extraction platform. The sensor must communicate with the base station in order to send its data successfully. The base station should pair with the GEO or LEO satellite which plays a critical role as it is responsible for communicating between the base station and the backbone network in order to receive the data.

Based on the proposed topology, any errors that may occur in the communication between the base station and the satellite should be studied. In addition, satellite-simulated NB-IoT communication will be developed. At the study level, IoT and NB-IoT technology will first be analyzed.

Reference will be made to the contribution of this technology to modern society as well as a description of its technical part. Next, NB-IoT technology will be analyzed via satellite linking which will include a theoretical and technical part at study level. In addition, problems such as rain losses will be analyzed.

The Doppler effect is also an important factor when it comes to LEO satellite which is moving very fast. Subsequently, the OFDM and SC-OFDM technique for up and down linking in LTE used and NB-IoT will be analyzed. Finally, a Link Budget analysis for NB-IoT via satellite will include Doppler, Path-loss, Rain Loss and any other losses.



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

The LTE model will be modified both uplink and downlink to create the NB-IoT model that will give us real data (receive-signal output power calculation, error calculation).), for 2 scenarios: 1) LEO satellite and 2) GEO satellite. The ultimate goal of this thesis is to develop a NB-IoT model that will calculate the power of reception and transmission, as well as the errors that may arise from the factors mentioned above.

Keywords: NB-IoT communication over satellite, geostationary orbit, low earth orbit

© 2019

Papaioannou Grigorios

Department of Information and Communication Systems Engineering

UNIVERSITY OF THE AEGEAN



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ – ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της εργασίας κύριο Δημοσθένη Βουγιούκα, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος για τις πολύτιμες πληροφορίες που απαιτούνταν για την εκπόνηση της διπλωματικής, για την βοήθεια του, για το κουράγιο καθώς επίσης και για το χρόνο που μου αφιέρωσε . Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον κύριο Σπύρο Λούβρο που τόσο με τις συναντήσεις που είχαμε όσο και με την μελέτη του βιβλίου του, αποκόμισα χρήσιμες και ζωτικής σημασίας πληροφορίες. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την συνάδελφο και φίλη Μαρία Βολακάκη καθώς και την οικογένεια της για το κουράγιο και τις συμβουλές που μου έδιναν τον καιρό αυτό. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο και πολύ καλό φίλο Λευτέρη Τσίπη για το κίνητρο και την βοήθεια που μου προσέφερε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ – ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	14
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ:	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΙΟΤ ΚΑΙ NB-ΙΟΤ.....	17
1.1 Η ΝΕΑ ΤΑΣΗ (INTERNET OF THINGS)	18
1.2 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΜΗΧΑΝΩΝ (M2M).....	20
1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΕΥΡΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ (LPWAN).....	21
1.3.1 LoRa.....	22
1.3.2 Sigfox.....	23
1.3.3 Κυψελωτό ΙοΤ.....	23
1.3.4 EC-GSM-ΙοΤ	24
1.3.5 LTE-M	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ NB-ΙΟΤ ΜΕΣΩ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ	26
2.1 ICARUS	27
2.2 ΜΙΑ ΜΑΤΙΑ ΣΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ ΤΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.....	27
2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΡΟΧΙΩΝ.....	28
2.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ.....	30
2.5 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LTE.....	36
3.1 ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ LTE	36
3.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	37
3.3 ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ.....	39
3.4 ΔΙΕΠΑΦΗ ΑΕΡΑ	41
3.4.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing	41
3.4.2 Single Carrier Frequency Division Multiple Access	44
3.4.3 Cyclic Prefixing.....	46



3.4.4	Δομή πρωτοκόλλων και πλαισίων.....	47
3.4.5	Τυχαία Πρόσβαση	48
3.5	NARROWBAND INTERNET OF THINGS.....	49
3.6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	51
3.7	ΚΑΤΩ ΖΕΥΞΗ	53
3.8	ΑΝΩ ΖΕΥΞΗ.....	55
3.8.1	Φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι άνω ζεύξης στενής ζώνης.	56
3.8.2	Κανάλι τυχαίας πρόσβασης στενής ζώνης.	56
3.8.3	Προγραμματισμός και Medium Access Control	58
3.8.4	Συσκευή Χρήστη (UE).....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ NB-ΙΟΤ ΜΕΣΩ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ	60
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	60
4.2	ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΖΕΥΞΗΣ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΟ LEO	61
4.2.1	Πληροφορίες για τον δορυφόρο LEO	61
4.2.2	Προϋπολογισμός κάτω ζεύξης για δορυφόρο LEO.....	62
4.2.3	Προϋπολογισμός άνω ζεύξης για δορυφόρο LEO.....	73
4.3	ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΖΕΥΞΗΣ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΟ GEO	81
4.3.1	Πληροφορίες για τον δορυφόρο GEO.....	81
4.3.2	Προϋπολογισμός κάτω ζεύξης για δορυφόρο GEO	82
4.3.3	Προϋπολογισμός άνω ζεύξης για δορυφόρο GEO.	88
4.3.4	Συμπεράσματα για τους προϋπολογισμούς ζεύξεων Δορυφόρων GEO και LEO 94	
4.4	ΠΡΟΫΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΖΕΥΞΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΙΟΤ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ.....	95
4.4.1	Προϋπολογισμός κάτω ζεύξης μεταξύ ΙοΤ συσκευής και σταθμού βάσης.	96
4.4.2	Προϋπολογισμός άνω ζεύξης μεταξύ ΙοΤ συσκευής και σταθμού βάσης.....	100
4.4.3	Συμπεράσματα των προϋπολογισμών ζεύξης μεταξύ ΙοΤ συσκευής και σταθμού βάσης.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
5.1	ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ	104
5.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ	105
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Οι εφαρμογές της IoT τεχνολογίας στην ζωή του ανθρώπου. [1]	18
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου του LoRa, Αξίζει να σημειωθεί πως και για τα υπόλοιπα LPWAN δίκτυα η αρχιτεκτονική είναι παρόμοια.[2]	22
Εικόνα 3: Απεικόνιση των τροχιών LEO και GEO με τις βασικές διαφορές τους.[34].....	29
Εικόνα 4: Απεικόνιση των προκλήσεων του λαμβανόμενου σήματος από δορυφόρο σε αστικό περιβάλλον.[6]	34
Εικόνα 5: LTE Evolved Packet System (EPS) Τοπολογία δικτύου και Αρχιτεκτονική.[5].....	38
Εικόνα 6: Η στοίβα των πρωτοκόλλων του LTE δικτύου και οι user plane συνδέσεις.[8]	40
Εικόνα 7: Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM).[11]	42
Εικόνα 8: Οι διαφορές μεταξύ OFDMA και SC-FDMA όταν μεταδίδουν μία σειρά από σύμβολα.[21]	44
Εικόνα 9: Παράδειγμα πρόσθεσης κυκλικού προθέματος στο σήμα[12].	46
Εικόνα 10: Τα ραδιοπλαίσια (radio frames) τα οποία αποτελούνται από 2 slots και 14 σύμβολα.[16]	48
Εικόνα 11: Η εφαρμογή του NB-IoT στο φάσμα του LTE (In-band,Guard-band) καθώς και η λειτουργία του Standalone. [14]	52
Εικόνα 12: Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την άνω ζεύξη του NB-IoT που χρησιμοποιεί το μοτίβο τυχαίας πρόσβασης συχνότητας για χαμηλό εύρος ζώνης για σύνδεση στον σταθμό βάσης.[18].....	57
Εικόνα 13: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας κάτω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου.....	62
Εικόνα 14: Απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου.....	68
Εικόνα 15: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.	69
Εικόνα 16: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με το SNR.....	70
Εικόνα 17: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.....	71
Εικόνα 18: Ολίσθηση συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler σε συνάρτηση το ύψος της τροχιάς που βρίσκεται ο δορυφόρος LEO.	72
Εικόνα 19: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας άνω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου.....	73
Εικόνα 20: Απώλειες ελευθέρου χώρου.....	76
Εικόνα 21: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.	77
Εικόνα 22: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με το SNR.....	78
Εικόνα 23: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.....	79



Εικόνα 24: Ολίσθηση συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler σε συνάρτηση το ύψος της τροχιάς που βρίσκεται ο δορυφόρος LEO.	80
Εικόνα 25: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας κάτω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου.....	82
Εικόνα 26: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.	85
Εικόνα 27: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με λόγο σήματος προς θόρυβο	86
Εικόνα 28: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.	87
Εικόνα 29: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας άνω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου.....	88
Εικόνα 30: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.	91
Εικόνα 31: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με λόγο σήματος προς θόρυβο	92
Εικόνα 32: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.	93
Εικόνα 33: Απώλειες διάδοσης με μοντέλο Free Space.....	97
Εικόνα 34: Διάγραμμα ισχύος λήψης σε συνάρτηση με την απόσταση.	98
Εικόνα 35: Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT	99
Εικόνα 36: Απώλειες διάδοσης με μοντέλο Free Space.....	101
Εικόνα 37: Διάγραμμα ισχύος λήψης σε συνάρτηση με την απόσταση.	102



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι εισόδου για Προϋπολογισμό κάτω ζεύξης δορυφόρου LEO	63
Πίνακας 2: Παράμετροι εξόδου για Προϋπολογισμό κάτω ζεύξης δορυφόρου LEO.....	67
Πίνακας 3: Παράμετροι εισόδου για Προϋπολογισμό άνω ζεύξης δορυφόρου LEO	74
Πίνακας 4: Παράμετροι εξόδου για την άνω ζεύξη του Δορυφόρου LEO	75
Πίνακας 5: Παράμετροι εισόδου για προϋπολογισμό κάτω ζεύξης δορυφόρου GEO.....	83
Πίνακας 6: Παράμετροι εξόδου προϋπολογισμού κάτω ζεύξης σε δορυφόρο GEO	84
Πίνακας 7: Παράμετροι εισόδου για Προϋπολογισμό άνω ζεύξης Δορυφόρου GEO.....	89
Πίνακας 8: Παράμετροι εξόδου προϋπολογισμού άνω ζεύξης σε δορυφόρο GEO.....	90
Πίνακας 9: Διαφορές μεταξύ GEO και LEO δορυφόρου	94
Πίνακας 10: Δεδομένα εισόδου για προϋπολογισμό ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και Σταθμού βάσης.....	96
Πίνακας 11: Δεδομένα εισόδου για προϋπολογισμό άνω ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και Σταθμού βάσης	100



Κατάλογος ακρωνυμίων:

3GPP	3rd Generation Partnership Project. The joint standardization partnership responsible for standardizing UMTS, HSPA and LTE
ACI	Adjacent Channel Interference.
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCH	Broadcast Control CHannel
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying modulation
BS	Base Station
C/I	Carrier-to-Interference Ratio
CAZAC	Constant Amplitude Zero Auto-Correlation
CFO	Carrier Frequency Offset
DL-SCH	DownLink Shared CHannel
eNodeB	evolved NodeB. The base station in LTE systems. Each eNodeB serves one or more E-UTRAN cells
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access. The LTE radio access technology
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple-Access
FEC	Forward Error Correction
GEO	Geosynchronous Earth Orbit of a satellite
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSM:	Global System for Mobile communications
HARQ:	Hybrid ARQ
ICI	Inter-Carrier Interference



ISI	Inter-Symbol Interference
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication sector
LTE	Long-Term Evolution
LEO	Low Earth Orbit of a satellite
MAC	Medium Access Control
NACK	Negative ACKnowledgment
NLOS	Non-Line-Of-Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
UL	UpLink. The radio link in the direction from the mobile to the base station
UL-SCH	UpLink Shared Channel
ZC	Zadoff-Chu. Non-binary unit-amplitude sequences



Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην τεχνολογία IoT και NB-IoT

Τις τελευταίες 2 δεκαετίες η παγκόσμια αύξηση των διασυνδεδεμένων συσκευών στο διαδίκτυο έχει οδηγηθεί από την αύξηση της αγοράς των προσωπικών κινητών συσκευών. Στα αστικά περιβάλλοντα οι ασύρματες επικοινωνίες και τα δίκτυα έχουν αυξηθεί ώστε να προσφέρουν υψηλό throughput για τις απαιτήσεις των δεδομένων των χρηστών. Πρόσφατα παρατηρούνται υψηλές απαιτήσεις σε μεγάλο όγκο δεδομένων και πολλαπλών συνδέσεων για διάφορες εφαρμογές στην καθημερινότητά μας. Εκτιμάται ότι μέχρι το 2020 θα υπάρχουν περίπου 50 δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένες συσκευές. Αυτές οι συσκευές χαρακτηρίζονται ως έξυπνες συσκευές και Internet of Things (IoT) συσκευές, όπου βασίζουν τις λειτουργίες τους στην συνδεσιμότητα με εξυπηρετητές και στην υποδομή υπηρεσιών του Internet χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Για να επιτύχουν την σύνδεση στο διαδίκτυο, οι συσκευές χρησιμοποιούν ad-hoc ή δίκτυα υποδομών, που είναι κατασκευασμένα για την επικοινωνία μηχανών. Αυτά τα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας είναι λιγότερο ανθρωποκεντρικά και έχουν σχεδιαστεί για μεταφορά πρωτογενών δεδομένων, έχουν οδηγήσει σε μεταφορά μέσω πακέτων και δεδομένων, δημιουργώντας έτσι νέες ανάγκες για τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Οι συσκευές IoT δίνουν την δυνατότητα επίβλεψης διάφορων διαδικασιών, απομακρυσμένου ελέγχου, ιχνηλασιμότητας αντικειμένων και ασφάλειας. Ο βασικός λόγος της ύπαρξης της ιδέας του Internet of Things είναι η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών που έως τώρα δεν είχαν την δυνατότητα να συνδεθούν στο δίκτυο. Η σύνδεση στο διαδίκτυο μπορεί να γίνει απευθείας για αυτές τις συσκευές χρησιμοποιώντας τα βασικά πρωτόκολλα διαδικτύου ή μέσω ενός εξυπηρετητή και έτσι να ανταλλάσσονται μόνο οι απαραίτητες πληροφορίες μεταξύ της συσκευής IoT και της υπηρεσίας του εξυπηρετητή. Κατανοούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις τα δεδομένα της IoT συσκευής είναι διαθέσιμα μέσω της υπηρεσίας του Internet η οποία δίνει ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων στις συσκευές. Η μεταδιδόμενη πληροφορία μπορεί να είναι αποτελέσματα από έναν αισθητήρα ή πληροφορίες οι οποίες έχουν συλλεχθεί από μεμονωμένες IoT συσκευές και να υποστούν επεξεργασία χάρις της υπηρεσίας του Internet.

Μπορούμε επίσης να αποκαλέσουμε την τεχνολογία αυτή στην αρχιτεκτονική του IoT ως επικοινωνία μηχανής με μηχανή (Machine to Machine Communication), διαφέρει από παραδοσιακή διαπροσωπική επικοινωνία όπου υπάρχουν υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης σε φωνή, βίντεο και μορφοποιημένο κείμενο. Η αύξηση των διασυνδεδεμένων συσκευών ώθησε τα υπάρχοντα τηλεπικοινωνιακά πρότυπα στα όρια του επιπέδου υποστήριξης, έτσι λοιπόν τα πρότυπα αυτά πρέπει να αναβαθμιστούν ώστε να είναι αντάξια να υποστηρίξουν μεγαλύτερο όγκο διασυνδεδεμένων συσκευών. Θα πρέπει επιπλέον να υποστηρίξουν νέες εφαρμογές με υψηλή απόδοση αλλά και χαμηλή κατανάλωση



ενέργειας. Αυτές οι νέες πλέον απαιτήσεις και εφαρμογές απαιτούν νέα πρότυπα επικοινωνίας στην επικοινωνία M2M.

1.1 Η νέα τάση (Internet of Things)

Τα τελευταία 4 χρόνια ο αριθμός των εγκαταστημένων συσκευών IoT έχει αυξηθεί δραματικά. Οι IoT εφαρμογές δεν έχουν σκοπό να κάνουν πιο έξυπνες τις συσκευές αλλά να συνδέσουν όσο το δυνατόν περισσότερα είδη συσκευών στο Internet και σε υπηρεσίες νέφους ώστε να αυξηθεί δυνατότητα παροχής δυνατοτήτων των συσκευών αυτών. Λόγω της μη-απαίτησης αποκλειστικά ασύρματης σύνδεσης, κάνει την προσέγγιση αυτή πιο βολική για τους τελικούς χρήστες. Οι νέες και καινοτόμες εφαρμογές του IoT επεκτείνει τις δυνατότητες των υφιστάμενων τεχνικών επικοινωνίας, απαιτώντας για παράδειγμα επικοινωνίες εξαιρετικά μικρής ισχύος και φθηνές σε κόστος τηλεπικοινωνιακές λύσεις. Αυτές οι απαιτήσεις αναπαριστούν πραγματικές προκλήσεις για ένα υπάρχον κυψελωτού και ασύρματου τοπικού δικτύου, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικές απαιτήσεις εφαρμογών. Οι εφαρμογές της τεχνολογίας IoT είναι πολυάριθμες, κτήρια, ενέργεια, καταναλωτές, σπίτια, υγεία, επιστήμες υγείας, βιομηχανία, μέσα μαζικής μεταφοράς, αγορές, ασφάλεια, και δίκτυα, είναι κάποιοι τομείς που μπορούν να επωφεληθούν από την τεχνολογία του IoT.



Εικόνα 1: Οι εφαρμογές της IoT τεχνολογίας στην ζωή του ανθρώπου. [1]



Στις περισσότερες εφαρμογές ο βασικός ρόλος της εφαρμογής του IoT είναι η συλλογή δεδομένων εξ' αποστάσεως και ο εξ' αποστάσεως έλεγχος, όπως για παράδειγμα λήψη μετρήσεων από συσκευές (αισθητήρες), επίβλεψη ηλεκτρισμού, ύδρευσης, ή κατανάλωσης νερού. Σε αυτές τις εφαρμογές οι συσκευές θεωρούνται σταθερές και η κίνηση μεταξύ των δικτύων (κόμβων), προκειμένου να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη σύνδεση της συσκευής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν βέλτιστες μεταγωγές δικτύου. Διακοπές σύνδεσης μικρής διάρκειας μπορούν να γίνουν αποδεκτές αφού έχουν μικρή επίδραση στην ποιότητα της υπηρεσίας. Οι συσκευές IoT έχουν την δυνατότητα να είναι πολύ πυκνά συγκεντρωμένες (πάνω από 100.000 χρήστες ανά 1 τετραγωνικό χιλιόμετρο σε αστικές περιοχές) και σπάνια διαδίδονται σε ευρεία κάλυψη υποδομών χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερους σταθμούς βάσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη πρόκληση για την τεχνολογία IoT είναι ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συσκευών που ονομάζεται και ως Massive IoT. Επιπρόσθετα οι συσκευές πλέον γίνονται τόσο μικρές λόγω μείωσης βάρους και όγκου, που δεν είναι δυνατόν να τροφοδοτηθούν από το δίκτυο. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις οι συσκευές αυτές τροφοδοτούνται από μπαταρίες, με το τίμημα ότι οι πόροι και η ισχύς είναι αρκετά περιορισμένα. Λόγω λοιπόν των περιορισμένων πόρων οι συσκευές αυτές θα πρέπει να διαθέτουν λειτουργίες οι οποίες με βέλτιστο τρόπο θα μπορούν να κάνουν επεξεργασία δεδομένων ώστε να μην γίνεται άσκοπη σπατάλη σε πόρους (μπαταρία), ειδικά σε περιπτώσεις που η αλλαγή της μπαταρίας καθίσταται αδύνατη.

Ως συμπέρασμα παρατηρούμε ότι λόγω της υπερβολικής αύξησης των συσκευών δημιουργήθηκαν νέες προκλήσεις στις επικοινωνιακές τεχνικές μεταξύ των συσκευών και των back-end υποδομών. Τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα όπως το WiFi και τα κυψελωτά δίκτυα, έχουν σχεδιαστεί για δεκάδες-εκατοντάδες συσκευές διασυνδεδεμένες ανά σταθμό βάσης. Η τεχνολογία του IoT θα ωθήσει στα άκρα τις αρχιτεκτονικές που προαναφέραμε αφού ένα μέσο νοικοκυριό θα μπορεί να έχει περίπου 40 διασυνδεδεμένες συσκευές NB-IoT. Αυτό αντιστοιχεί περίπου σε 53 χιλιάδες συσκευές ανά σταθμό βάσης. Από αποτελέσματα προσομοιώσεων που διεξήχθησαν αναφέρθηκε ότι ένας σταθμός βάσης NB-IoT μπορεί να εξυπηρετήσει έως 200 χιλιάδες συσκευές, ενώ το δίκτυο του LTE μπορεί μετά βίας να εξυπηρετήσει 750 συσκευές ανά σταθμό βάσης.



1.2 Επικοινωνία μεταξύ μηχανών (M2M)

Παρόλο που γνωρίζουμε ότι η τεχνολογία του IoT είναι μία μόδα που πηγάζει από τους καταναλωτές, οι διαδικασίες που λειτουργούν πίσω από την επικοινωνία του IoT ονομάζεται Επικοινωνία Μηχανής με Μηχανή (Machine to Machine communication). Η επικοινωνία τύπου μηχανής (Machine Type Communication), είναι διαχωρισμένη από την παραδοσιακή τεχνολογία επικοινωνιών. Ένα παράδειγμα είναι τα κυψελωτά δίκτυα τα οποία έχουν σχεδιαστεί για επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων μέσω κινητού τηλεφώνου, τα οποία διαθέτουν υψηλή μετάδοση δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση. Επιπλέον διαθέτει κανάλια τα οποία είναι σχεδιασμένα μόνο για μετάδοση φωνής. Κατανοούμε ότι μόνο κάποιες από τις συσκευές του IoT μπορούν να επωφεληθούν από το σύστημα που μόλις αναφέραμε. Η επικοινωνία τύπου μηχανής αποσκοπεί στην επικοινωνία μεταξύ μηχανών χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, έτσι λοιπόν νέες απαιτήσεις εμφανίζονται στο προσκήνιο.

Στην επικοινωνία μεταξύ μηχανών ένα μεγάλο πλήθος συσκευών δεν απαιτεί απευθείας σύνδεση στο διαδίκτυο και ένα άλλο επίσης δεν απαιτεί την ασφάλεια και την πολυπλοκότητα. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται πολύ μικρές ποσότητες δεδομένων να αποστέλλονται και επίσης με πιο αργές καθυστερήσεις μετάδοσης.

Συνοψίζοντας λοιπόν τα βασικά χαρακτηριστικά μιας επικοινωνίας μεταξύ μηχανών είναι :

- Μικρές απαιτήσεις σε καθυστέρηση και μετάδοση δεδομένων.
- Προτεραιότητα δεδομένων.
- Μεγάλες διαφορές στις πυκνότητες εγκατεστημένων συσκευών μεταξύ αστικών και απομακρυσμένων περιοχών.
- Μεγαλύτερη κάλυψη συσκευών στους εσωτερικούς και απομακρυσμένους χώρους.

Όσο αφορά τα πρότυπα ασύρματων δικτύων στην M2M επικοινωνία είναι πολυάριθμα. Σε μη αδειοδοτημένο φάσμα υπάρχουν το ZigBee, το Z-Wave ή το Bluetooth, τα οποία είναι σχεδιασμένα για δίκτυα σημείο προς σημείο ή δίκτυα βρόχου. Οι περισσότερες IoT συσκευές προορίζονται για τους καταναλωτές συνδέονται μέσω Internet ή μέσω τοπικού WiFi δικτύου, στην περίπτωση των κινητών τηλεφώνων μέσω Bluetooth. Όμως η χρήση του WiFi και του Bluetooth μπορεί να σταθεί και ως εμπόδιο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας του IoT λόγω της μεγάλης κλίμακας του. Οι κινητές επικοινωνίες θα χρειάζονται κάρτες SIM για κάθε συσκευή προκειμένου να λειτουργήσουν, παρόλα αυτά η ισχύς που απαιτείται είναι μη-επιτρέψιμη για την πηγή που τροφοδοτεί την συσκευή (μπαταρία). Υπάρχουν τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών, οι οποίες στοχεύουν σε εφαρμογές IoT, που υποστηρίζουν εξοικονόμηση ενέργειας. Τέτοιες τεχνολογίες είναι το Bluetooth χαμηλής ισχύος (Bluetooth Low Energy).



1.3 Δίκτυα χαμηλής ισχύος σε ευρεία περιοχή (LPWAN)

Προκειμένου να υπερκαλυφθούν οι απαιτήσεις για τις M2M επικοινωνίες, έχουν αναπτυχθεί νέα πρότυπα και τεχνολογίες ώστε να προσαρμόζονται στα δίκτυα χαμηλής ισχύος. Αυτές οι τεχνολογίες ονομάζονται LPWAN (Low Power Wide Area Networks), τα οποία είναι όπως αναφέραμε και παραπάνω κατάλληλα για εφαρμογές χαμηλής ισχύος και συνδεσιμότητας μεγάλου βεληνεκούς. Οι τεχνολογίες όπως για παράδειγμα Z-Wave, SIGFOX, 6LowPAN, LoRa και το Weightless-N είναι κατάλληλα για συνδέσεις με χαμηλό throughput και χαμηλής ισχύος. Τα δίκτυα χαμηλής ισχύος σε ευρεία περιοχή καθιστά τις απομακρυσμένες τοποθεσίες λιγότερο απαιτητικές σε θέμα πυκνότητας σταθμών βάσης, αντίθετα με τις καινούργιες τεχνολογίες στα κυψελωτά δίκτυα που οι σταθμοί βάσης εξυπηρετούν μία ακτίνα κάποιων εκατοντάδων μέτρων μόνο. Ένας σταθμός βάσης LPWAN μπορεί α καλύψει έως και 50 χιλιόμετρα σε ακτίνα.

Τα περισσότερα LPWAN δίκτυα λειτουργούν στις μη-αδειοδοτημένες μπάντες ή κάποιες «ελαφρώς» αδειοδοτημένες όπως το ISM (βιομηχανική, επιστημονική, ιατρική) μπάντα. Το μικρό throughput που απαιτείται για μετάδοση (μερικές εκατοντάδες bits/sec) καθιστά το σύστημα πολύ λιγότερο απαιτητικό σε συσκευές οι οποίες είναι περιορισμένες σε πόρους.

Όσο αφορά τον κόμβο ενός LPWAN δικτύου, ο κόμβος δεν είναι σε θέση να μεταδώσει σε πολύ υψηλή ισχύ ή ταχύτητα και πολλές φορές βρίσκεται σε βαθιά αδράνεια λόγω εξοικονόμησης ενέργειας για να γίνει βέλτιστη χρήση της μπαταρίας. Στα κυψελωτά δίκτυα οι διασυνδεδεμένοι κόμβοι πρέπει να είναι συνεχώς συνδεδεμένοι διότι αν υπάρξει αδράνεια στο σύστημα, προκειμένου να γίνει επανασύνδεση της μεταφοράς δεδομένων απαιτείται μία πολύπλοκη διαδικασία.

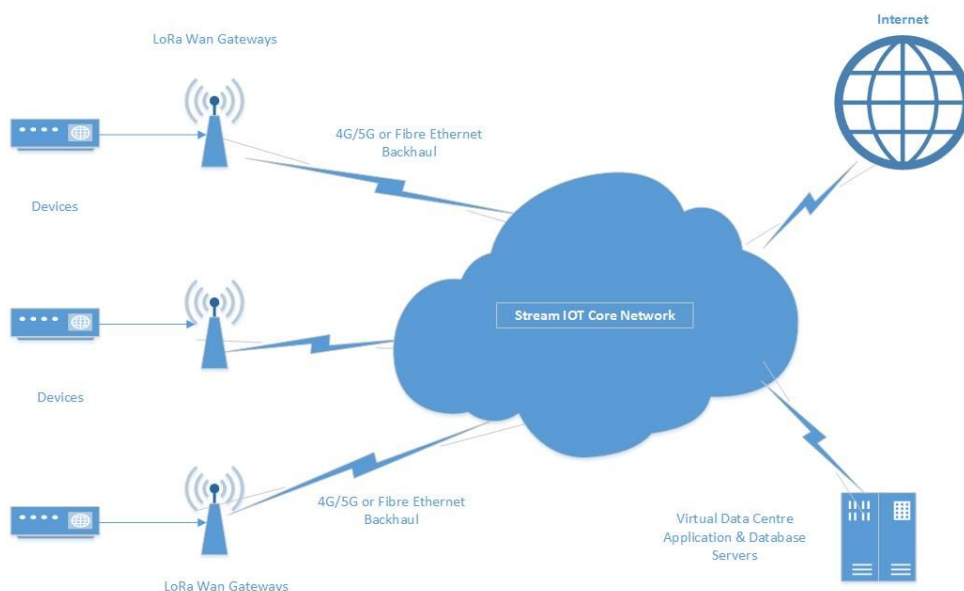
Τα μειονεκτήματα των προτύπων LPWAN είναι η χαμηλή αξιοπιστία τους διότι απαιτούν προγραμματισμό σε νέο οικοσύστημα υλικού όπως νέες υποδομές δικτύων. Επιπλέον τα νέα υπάρχοντα πρότυπα του LPWAN δικτύου βρίσκονται σε αντιπαράθεση το ένα με το άλλο, δημιουργώντας έτσι μία αβεβαιότητα στον προγραμματισμό των νέων συσκευών και εφαρμογών.



1.3.1 LoRa

Το LoRa είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρότυπα στο LPWAN. Το όνομα LoRa προέρχεται από το Long-range Low-power Radio Network (δίκτυο χαμηλής ισχύος μεγάλης απόστασης). Δημιουργήθηκε αρχικά από την Cycleo το 2009, αργότερα το ανέλαβε η εταιρία SEMTECH το 2012 και το 2014 τοποθετήθηκε υπό τον έλεγχο της ομάδας LoRa. Πάνω από 75 πάροχοι προσφέρουν το LoRa LPWAN δίκτυο σε περισσότερες από 40 χώρες. Το LoRa στοχεύει στην δημιουργία μίας χαμηλής ισχύος επικοινωνία για IoT συσκευές και να έχει ομοιότητα με τα κυβελωτά δίκτυα.

Οι προδιαγραφές του LoRa αποτελούνται από ένα ιδιόκτητο φυσικό στρώμα (LoRa PHY) και από ένα υψηλού επιπέδου πρωτόκολλο ανοικτού κώδικα που ονομάζεται LoRaWAN. Όσο αφορά το φυσικό στρώμα του LoRa ορίζει την διεπαφή αέρα μεταξύ της συσκευής και του σταθμού βάσης, ο οποίος μπορεί να εξυπηρετήσει έως και 60.000 συσκευές στην ακτίνα του. Όσο αφορά τα μεταδιδόμενα δεδομένα, ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται γύρω στα 1000 kbit/sec σε μία ακτίνα περίπου 45 χιλιομέτρων. Το LoRa μπορεί να λειτουργήσει σε μη αδειοδοτούμενο φάσμα των 900 MHz για την Αμερική και στα 868 MHz για την Ευρώπη. Το LoRaWAN περιλαμβάνει το MAC (Medium Access Control) πρωτόκολλο για τα δίκτυα ευρείας περιοχής, το οποίο χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων από την συσκευή IoT στους εξυπηρετητές.



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου του LoRa, Αξίζει να σημειωθεί πως και για τα υπόλοιπα LPWAN δίκτυα η αρχιτεκτονική είναι παρόμοια.[2]



1.3.2 Sigfox

Αμέσως μετά από το LoRa στην 2^η θέση σε σχέση με την δημοτικότητα στο LPWAN έρχεται το Sigfox LPWAN πρότυπο το οποίο δημιουργήθηκε από την Γαλλική εταιρία Sigfox το 2009. Το πρότυπο Sigfox σταδιακά έγινε διάσημο στην Γαλλία, στην Αμερική και σιγά σιγά σε ολόκληρο τον κόσμο. Τα δίκτυα Sigfox δημιουργήθηκαν από την SNP (Sigfox Network Partnership). Είναι τόσο διαδεδομένο που στην Φιλανδία το 85% των κατοίκων της χρησιμοποιεί το δίκτυο Sigfox. Έχει μεγάλη ομοιότητα με το LoRa και με τα υπόλοιπα πρότυπα LPWAN αφού ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δεν ξεπερνά τα 600 bits/sec. Το συγκεκριμένο πρότυπο περιορίζει αρκετά την χρήση της άνω ζεύξης αφού ορίζει να αποστέλλονται το πολύ 140 μηνύματα την μέρα τα οποία να μην περιέχουν πάνω από 12 bytes πληροφορία και στην κάτω ζεύξη 4 μηνύματα το μέγιστο που να περιλαμβάνουν όχι περισσότερο από 8 bytes πληροφορίας. Το Sigfox έχει την λειτουργία Ultra-Narrow Band (UNB) η οποία είναι μία τεχνολογία που χρησιμοποιεί διαμορφώσεις DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) και GFSK (Gaussian frequency-shift keying). Παρόμοια με το LoRa και το Sigfox λειτουργεί στο μη-αδειοδοτούμενο φάσμα και συγκεκριμένα για την Ευρώπη στα 868 MHz και για την Αμερική στα 902MHz. Ένας σταθμός βάσης προτύπου Sigfox μπορεί να εξυπηρετήσει σε ακτίνα 20 χιλιομέτρων. Όσο αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, οι συσκευές που χρησιμοποιούν το πρότυπο Sigfox με μία μόνο μπαταρία αλκαλική τύπου AA θα μπορεί να λειτουργεί για περίπου 10 χρόνια[31].

1.3.3 Κυψελωτό IoT

Το κυψελωτό IoT ή αλλιώς CIoT αναφέρεται στην χρήση των κυψελοειδών δικτύων για εφαρμογές που αφορούν το IoT. Το κυψελωτό IoT μπορεί να χρησιμοποιήσει τις τεχνολογίες κυψελοειδών δικτύων 2^{ης} γενιάς, 3^{ης} γενιάς και 4^{ης} γενιάς. Παρόλα αυτά πολλές εφαρμογές των IoT δεν μπορούν να συμβαδίσουν με τα χαρακτηριστικά των κυψελοειδών δικτύων. Ένα σημαντικό παράδειγμα είναι η υψηλή μετάδοση δεδομένων που έχει αναπτυχθεί στα κυψελωτά δίκτυα και ειδικά στην 4^η γενιά όπου λίγες εφαρμογές IoT απαιτούν κάτι αντίστοιχο. Ένα επίσης σημαντικό παράδειγμα είναι οι υπηρεσίες φωνής οι οποίες είναι αρκετά αναπτυγμένες σε αυτά τα δίκτυα, παρόλα αυτά όμως είναι ελάχιστες οι εφαρμογές του IoT οι οποίες απαιτούν αυτήν την υπηρεσία. Κατανοούμε λοιπόν ότι η πλειοψηφία των IoT εφαρμογών απαιτούν υπηρεσίες τις οποίες τα δίκτυα των κυψελοειδών δικτύων δεν μπορούν να προσφέρουν με βέλτιστο τρόπο αφού το μόνο που θα προσφέρουν είναι υπηρεσίες οι οποίες θα απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ισχύος που θα αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας στις τελικές συσκευές στο έπακρο. Επιπλέον το εύρος φάσματος που απαιτούν οι συσκευές IoT είναι αρκετά πιο μικρό από αυτό που απαιτούν οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας τελευταίας γενιάς. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τέτοια είδους προβλήματα δημιουργήθηκαν νέες προδιαγραφές για τα κυψελωτά IoT δίκτυα. Αυτές οι προδιαγραφές έχουν πολλές ομοιότητες με τις προδιαγραφές των δικτύων LPWAN χωρίς όμως να χάνουν την συμβατότητα τους με κυψελωτά κινητά δίκτυα. Τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν είναι



το EC-GSM, το LTE-M, και το NB-IoT και κάποιες λειτουργίες από το απερχόμενο δίκτυο της 5^{ης} γενιάς. Έτσι μπορούμε πλέον να λέμε ότι τα κυψελωτά δίκτυα μπορούν να εξυπηρετήσουν πλήρως συσκευές IoT[30].

1.3.4 EC-GSM-IoT

Το EC-GSM-IoT (εκτεταμένη κάλυψη για τα IoT πρότυπα), είναι μία τεχνολογία LPWAN η οποία βασίζεται στο υπάρχον κυψελωτό δίκτυο 2^{ης} γενιάς το οποίο είναι τροποποιημένο ώστε να δεσμεύει λιγότερους πόρους από όσους δέσμευε της 2^{ης} γενιάς κυψελωτό δίκτυο. Η ανάπτυξη του EC-GSM-IoT έγινε από την 3GPP και εκδόθηκε από αυτήν το 2016 στην έκδοση 13, μαζί με το LTE-M και το NB-IoT. Έχει την ίδια προοπτική με το LTE-M και το NB-IoT με την διαφορά ότι το EC-GSM-IoT χρησιμοποιεί παλιότερη τεχνολογία, της 2^{ης} γενιάς χωρίς να απαιτεί την εγκατάσταση νέου εξοπλισμού ή να βασίζεται στις υποδομές του υπάρχοντος LTE δικτύου. Έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων του GSM. Έτσι το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει την καλύτερη λήψη σήματος σε κλειστούς χώρους και την σύνδεση περισσότερων συσκευών χρηστών. Επιπλέον είναι λιγότερο απαιτητικό σε πόρους αφού από την φύση του το GSM είναι πολύ πιο αποδοτικό ενεργειακά σε σχέση με το LTE. Οι σταθμοί βάσης GSM μπορούν να αναβαθμιστούν για να υποστηρίξουν το EC-GSM-IoT. Ένα μειονέκτημα του EC-GSM-IoT είναι ότι οι παλιότερες γενιές δικτύων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς αρχίζουν να μην χρησιμοποιούνται από τους παρόχους.

1.3.5 LTE-M

Το LTE-M είναι ένα πρότυπο το οποίο και αυτό εκδόθηκε από την 3GPP το 2016 στην έκδοση 13. Συγκεκριμένα αναφέρεται στις συσκευές LTE CatM1 που είναι κατάλληλες για εφαρμογές IoT.

Ένα από τα χαρακτηριστικά του LTE-M είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και συγκεκριμένα διάρκεια ζωής μπαταριών περίπου 10 χρόνια. Επίσης οι συσκευές που θα ακολουθούν το συγκεκριμένο πρότυπο θα είναι ανταγωνιστικές ως προς το κόστος σε σχέση με αυτές που ακολουθούν το πρότυπο GPRS. Αξίζει να επισημανθεί πως το πρότυπο LTE-M έχει δυνατότητα να προσαρμόζει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σε διάφορες εφαρμογές ανάλογα με τις απαιτήσεις τους. Το LTE-M μπορεί να θεωρηθεί ως μία πιο απλοποιημένη έκδοση του LTE, όπου οι συσκευές είναι λιγότερο πολύπλοκες με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

Επιπρόσθετα το LTE-M δεν είναι το μοναδικό, υπάρχει αντίστοιχα και το NB-IoT (Narrowband-IoT) τα οποία χρησιμοποιούν και τα δύο το αδειοδοτούμενο φάσμα, με την διαφορά ότι το LTE-M μπορεί να εξυπηρετήσει μία μεγαλύτερη ποικιλία εφαρμογών και επιπλέον να συνυπάρξει με το Narrowband-IoT όπως και με άλλες τεχνολογίες όπως το Sigfox και το LoRa που δεν απαιτούν αδειοδοτούμενο φάσμα [18].



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης (Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

Οι βασικές διαφορές μεταξύ LTE-M και NB-IoT βρίσκονται στην ταχύτητα και στην καθυστέρηση.

Οι διαφορές μεταξύ των κυψελοειδών IoT προτύπων και δικτύων LPWAN για τις συσκευές IoT είναι πολύ λίγες, αφού το κυψελωτό IoT πρότυπο είναι ένα υποσύνολο του LPWAN. Παρόλα αυτά γνωρίζουμε ότι τα κυψελωτά IoT πρότυπα βασίζονται στα κυψελωτά δίκτυα τα οποία δεν είναι καθόλου ενεργειακά αποδοτικά σε σχέση με τα πρότυπα LPWAN.

Το πιο μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης του κυψελωτού IoT προτύπου είναι η εγκατάσταση του δικτύου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υπάρχον κυψελωτό δίκτυο (σταθμοί βάσης, υποδομή δικτύου κορμού), χωρίς να χρειάζεται εγκατάσταση νέου εξοπλισμού. Έτσι το κυψελωτό IoT μπορεί να λειτουργήσει στις υπάρχουσες αδειοδοτημένες μπάντες και να χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες υπηρεσίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση, το κόστος εγκατάστασης του κυψελωτού IoT συστήματος είναι αρκετά μικρότερο από την εγκατάσταση οποιουδήποτε άλλου συστήματος που μπορεί να υποστηρίξει την επικοινωνία IoT συσκευών.



Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στο NB-IoT μέσω Δορυφόρου

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επέκταση του IoT για διαστημικές εφαρμογές. Δημιουργείται λοιπόν ένα νέο κεφάλαιο στα συστήματα IoT τα οποία πλέον θα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες και εκτός του γήινου περιβάλλοντος. Οι προτάσεις που αφορούν το IoT στο διάστημα λαμβάνονται υπόψιν και από την Ευρωπαϊκή διαστημική υπηρεσία. Το IoT στο διάστημα δημιουργεί νέες προοπτικές η οποίες δίνουν την δυνατότητα στις δορυφορικές υπηρεσίες στο να έχουν πρόσβαση περισσότερο στο διαδίκτυο και σε υπηρεσίες νέφους. Οι κλασικές δορυφορικές επικοινωνίες λειτουργούν σε απομονωμένο περιβάλλον όπου παρουσιάζεται σαν ένας διαφανής τρόπος μεταγωγής δεδομένων σε μία υποδομή διαδικτύου. Οι δορυφόροι έχουν τη μοναδική δυνατότητα να παρέχουν κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών περιοχών και να διασυνδέουν μακρινούς και δυσπρόσιτους τηλεπικοινωνιακούς κόμβους και γι' αυτό τα δορυφορικά δίκτυα αποτελούν σήμερα αναπόσπαστο τμήμα των περισσότερων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων[28].

Οι εφαρμογές του IoT μπορούν να προσφέρουν μία πληθώρα δυνατοτήτων για το χώρο του διαστήματος. Κάποια παραδείγματα είναι: οι δορυφορικές επικοινωνίες, η πλοήγηση μέσω δορυφόρου και η επίβλεψη της γης μέσω δορυφόρου. Μία από τις πιο διαδεδομένες υπηρεσίες είναι, το παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης μέσω δορυφόρου (GNSS), όπως το Αμερικανικό GPS, το ευρωπαϊκό Galileo και το Ρωσικό GLONASS. Οι δέκτες του συστήματος GNSS έχουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος (κάποιες δεκάδες milliwatts) προσφέροντας παγκόσμια κάλυψη σε συνθήκες καθαρού ουρανού (απόκλιση 10 μέτρα στην χειρίστη περίπτωση). Επιπλέον το σύστημα GNSS είναι κατάλληλο για συγχρονισμό μεταξύ κόμβων που είναι απαραίτητο για ορισμένες εφαρμογές.

Το IoT μέσω δορυφόρου μπορεί να συλλέξει δεδομένα από τις τελικές συσκευές σε πραγματικό χρόνο προσφέροντας αρκετές δυνατότητες σε ερευνητές για την επίβλεψη της πανίδας και της χλωρίδας. Επιπλέον ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι το IoT μέσω δορυφόρου έχει την δυνατότητα να μεταδίδει δεδομένα επικοινωνίας σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η χρήση επίγειων αναμεταδοτών σε αυτές είναι εξαιρετικά δύσκολη π.χ. (δάση, ωκεανοί). Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να υπάρχει επικοινωνία σε οποιοδήποτε σημείο στον κόσμο, όπως για παράδειγμα ένα φορητό πλοίο το οποίο ταξιδεύει στον Ειρηνικό ωκεανό. Παρακάτω θα γίνει περιγραφή του προγράμματος (ICARUS) το οποίο αποσκοπεί στον εντοπισμό των ζώων μέσω του διεθνούς διαστημικού σταθμού (ISS) ο οποίος βρίσκεται 400 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης. Ο Διεθνής Διαστημικός Σταθμός είναι αναμφισβήτητα η πιο δαπανηρή ανθρώπινη κατασκευή που φτιάχτηκε ποτέ, ενώ η ύπαρξη και η λειτουργία του είναι αποτέλεσμα μιας από τις πιο σημαντικές διεθνείς συνεργασίες στη σύγχρονη ιστορία. Ο σκοπός λειτουργίας του σταθμού είναι καθαρά επιστημονικός. Στα πλήρως εξοπλισμένα εργαστήριά του εκτελούνται συνεχώς διάφορα πειράματα για λογαριασμό επιστημονικών ιδρυμάτων της γης που αφορούν την προστασία της χλωρίδας και της πανίδας αλλά και γενικά του περιβάλλοντος της γης. Κατανοούμε λοιπόν ότι σήμερα, η εξοικείωση των ηλεκτρονικών μηχανικών με τη δορυφορική τεχνολογία, τις δορυφορικές επικοινωνίες και τις δορυφορικές ζεύξεις καθίσταται αναγκαία, καθώς οι δορυφορικές τηλεπικοινωνίες αναμένεται να παίζουν συνεχώς μεγαλύτερο ρόλο στα σύγχρονα



τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Οι δορυφόροι έχουν προωθήσει σημαντικά την επικοινωνία με την δημιουργία παγκόσμιων τηλεφωνικών συνδέσεων, ενώ χάρη σε αυτούς γίνονται εφικτές ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές μεταδόσεις σε πραγματικό χρόνο.

2.1 ICARUS

Όπως προαναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα το ICARUS είναι μία εφαρμογή η οποία χρησιμοποιεί IoT χαμηλής ισχύος ώστε να μπορεί να εντοπίζει και να παρακολουθεί μέσω του διεθνούς διαστημικού σταθμού ζώα τα οποία φορούν ειδικούς πομπούς που ζυγίζουν περίπου 5 γραμμάρια. Οι πομποί αυτοί διαθέτουν GPS για τον εντοπισμό και άλλα αισθητήρια όπως θερμομέτρο, επιταχυνσιόμετρο και μετρητής υγρασίας. Ο πομπός αυτός περιλαμβάνει μπαταρία και ηλιακό συλλέκτη ώστε να φορτίζεται η μπαταρία.

Η επικοινωνία μεταξύ του πομπού που βρίσκεται στο ζώο και στο δορυφόρο γίνεται με κωδικοποίηση δεδομένων και σήματος CDMA η οποία έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να μεταδίδει με αργούς ρυθμούς τα δεδομένα για μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Η ισχύς μετάδοσης είναι μόλις 6 mW και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι περίπου 500 bits ανά δευτερόλεπτο. Κατανοούμε λοιπόν ότι σε μία τέτοια εφαρμογή το ποσό δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν είναι αρκετά εφικτό για τον διεθνή διαστημικό σταθμό. Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι ο διεθνής διαστημικός σταθμός έχει παγκόσμια επίγεια κάλυψη. Παρατηρείται λοιπόν ότι τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν την δορυφορική τεχνολογία, αφού εγγυάται παγκόσμια κάλυψη, χωρίς την ύπαρξη δαπανηρών εγκαταστάσεων επίγειων αναμεταδοτών.

2.2 Μία ματιά στο παρελθόν της δορυφορικής τεχνολογίας.

Μερικοί από τους πρώτους δορυφόρους επικοινωνιών σχεδιάστηκαν για να λειτουργήσουν με παθητικό τρόπο. Αντί να μεταδώσουν ενεργά τα ραδιοσήματα, χρησίμευσαν μόνο για να απεικονίσουν τα σήματα που εκπέμφθηκαν σε αυτούς με τη μετάδοση των σταθμών στο έδαφος, με λίγα λόγια λειτουργούσαν ως ανακλαστικές σημάτων. Τα σήματα ανακλάστηκαν προς όλες τις κατευθύνσεις, έτσι θα μπορούσαν να ληφθούν από τους σταθμούς λήψης σε όλο τον κόσμο. Τέτοιοι δορυφόροι ήταν ο ECHO 1 και 2. Ο πρώτος ενεργός δορυφόρος επικοινωνιών που εκτοξεύθηκε στο διάστημα ήταν ο TELSTAR το 1962 από τις ΗΠΑ. Ο TELSTAR κατάφερε να μεταδώσει ζωντανές τηλεοπτικές εικόνες μεταξύ Αμερικής και Ευρώπης. Αργότερα εκτοξεύθηκε ο δορυφόρος Syncom 4 ο οποίος πρόσφερε υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών. Αξίζει να σημειωθεί πως ο Syncom 4 ήταν ο πρώτος δορυφόρος ο οποίος εκτέλεσε γεωσύγχρονη τροχιά, η οποία δίνει την δυνατότητα στον δορυφόρο να παραμείνει σε μία σταθερή θέση



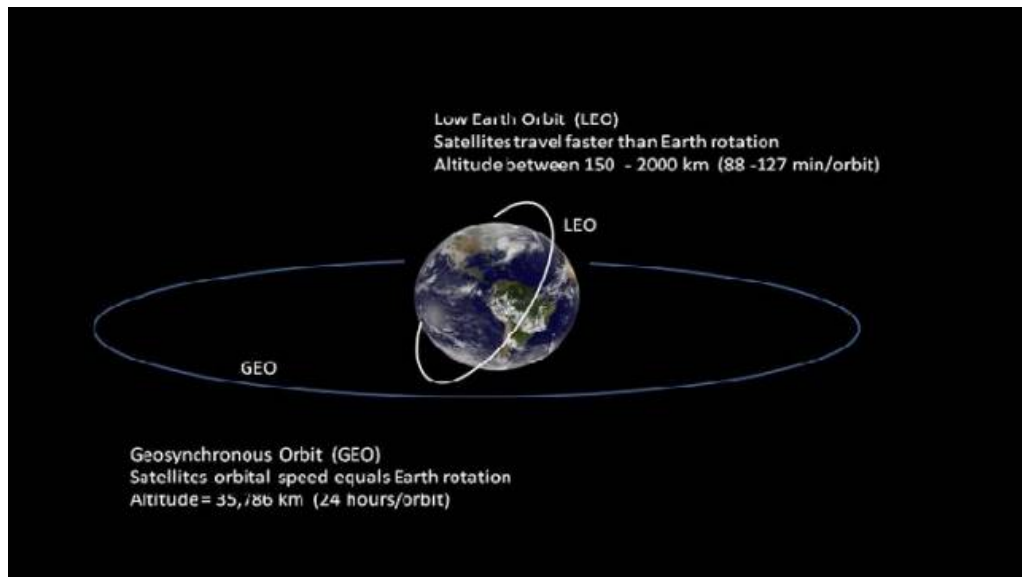
σε σχέση με την γη, έτσι οι επίγειοι σταθμοί αν στόχευαν σταθερά προς αυτόν δεν έχαναν ποτέ την ζεύξη με τον δορυφόρο.

Παρακάτω θα γίνει μία λεπτομερής περιγραφή της μηχανικής τροχιών καθώς και των προβλημάτων που προκύπτουν σε μία ζεύξη δορυφόρου με επίγειο σταθμό (φαινόμενο ολίσθησης συχνότητας Doppler, καθυστερήσεις, απώλειες λόγω βροχής) [19].

2.3 Μηχανική τροχιών.

Προκειμένου να μπορέσουμε να μελετήσουμε την κίνηση ενός δορυφόρου στο διάστημα, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε τις παραμέτρους που ορίζουν την κίνηση της τροχιάς. Το περίγειο είναι η παράμετρος που ορίζει το κοντινότερο σημείο της τροχιάς σε σχέση με την γη. Αντίθετα το απόγειο ορίζει το μακρινότερο σημείο της τροχιάς σε σχέση με την γη. Η έγκλιση εκφράζει την γωνία μεταξύ του ισημερινού επιπέδου της γης και του επιπέδου της τροχιάς. Η ορθή άνοδος του ανοδικού κόμβου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα που διέρχεται από το κέντρο της γης και του πρώτου σημείου του άξονα του Κριού και του άξονα τομής μεταξύ των εκλειπτικών και των τροχιακών επιπέδων, όπου η τροχιά περνά από το νότιο ημισφαίριο στο βόρειο ημισφαίριο. Ως όρισμα του περιγείου εκφράζουμε γωνία μεταξύ των κόμβων και τον άξονα που περνάει από το κέντρο της Γης και το περίγειο της τροχιάς.

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές τροχιές που χρησιμοποιούνται για διαφορετικές περιστάσεις. Ωστόσο 2 είδη τροχιών μπορούν καλύψουν τις ανάγκες για την επιτήρηση της γης και για τηλεπικοινωνιακές ανάγκες μέσω δορυφόρου. Μία από τις τροχιές αυτές είναι η Low Earth Orbit (LEO), όπου οι ο δορυφόροι που εκτελούν αυτήν την τροχιά βρίσκονται 400 έως και 2000 χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης. Επιπλέον η GEO (Geosynchronous Orbit) τις οποίας οι δορυφόροι βρίσκονται σε απόσταση 35786 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης. Στην περίπτωση της τροχιάς LEO ο δορυφόρος έχει την δυνατότητα να μπορεί να εξυπηρετήσει μία μικρή επιφάνεια της γης για περιορισμένο χρονικό διάστημα την φορά. Για να γίνει κάλυψη όλης της γης απαιτείται να υπάρχει ένα σύμπλεγμα από δορυφόρους οι οποίοι να λειτουργούν ταυτόχρονα ώστε ο ένας να καλύπτει τις περιοχές που δεν καλύπτει ο άλλος. Η κλίση της τροχιάς ορίζει το γεωγραφικό πλάτος που μπορούν να καλύψουν οι δορυφόροι με την τροχιακή τους κίνηση και έτσι επηρεάζει δραματικά την κάλυψη τους και τις φορές που επισκέπτονται το έκαστο σημείο. Οι κλίσεις της τροχιάς ποικίλλουν από κοντά σε ισημερινές και πολικές τροχιές με κλίση κοντά σε 90 μοίρες[26].



Εικόνα 3: Απεικόνιση των τροχιών LEO και GEO με τις βασικές διαφορές τους.[34]

Οι γεωστατικές ή γεωσύγχρονες (GSO ή GEO) τροχιές είναι δημοφιλείς για επικοινωνία και τους δορυφόρους παρατήρησης της γης. Και στις δύο τροχιές η τροχιακή περίοδος του δορυφόρου είναι ίσο με το ρυθμό περιστροφής της γης γύρω από το σώμα της. Ο δορυφόρος παραμένει στο ίδιο γεωγραφικό μήκος όλη την ώρα. Σε γεωσύγχρονη τροχιά, ανάλογα με την κλίση του δορυφόρου, το γεωγραφικό πλάτος στο έδαφος μπορεί να παραμείνει μηδέν. Η γεωστατική τροχιά είναι μια ειδική περίπτωση της γεωσύγχρονη τροχιάς που το τροχιακό επίπεδο είναι επίσης προσκολλημένο στο ισημερινό επίπεδο της Γης και η κλίση του είναι μηδέν. Αυτή η τροχιά δεν είναι σταθερή λόγω της κλίσης του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με το τροχιακό επίπεδο της Γης γύρω από τον Ήλιο. Αν δεν υπάρξουν οι διορθώσεις τροχιάς, η τροχιά θα αρχίσει να παρασύρεται και θα μετατραπεί σε γεωσύγχρονη τροχιά [26].



2.4 Προκλήσεις των ζεύξεων

Η δημιουργία ραδιοζεύξης μεταξύ γης και διαστήματος παρουσιάζει διαφορετικές προκλήσεις σε σχέση με την επίγεια ραδιοζεύξη επικοινωνίας. Η σύνδεση μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού είναι πολλές φορές ασύμμετρη εκ φύσεως. Ο αριθμός των άνω ζεύξεων (επίγειος σταθμός προς δορυφόρο) είναι αρκετά περιορισμένος σε σχέση με κάτω ζεύξεις (δορυφόρος προς επίγειο σταθμό) που είναι αμέτρητες, όπως για παράδειγμα τα δίκτυα GNSS.

Οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι συνήθως ασύμμετρες. Οι υπηρεσίες εκπομπής.. Μία τροχιά των 600 χιλιομέτρων σε διάμετρο μπορεί να εξυπηρετήσει μόλις το 4,3 τις εκατό της επιφάνειας της γης την φορά. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι οι συσκευές οι οποίες βρίσκονται στην γη και αναμένουν σύνδεση με τον δορυφόρο μπορεί να είναι πολυάριθμες και να μένουν για αρκετό διάστημα σε μη επιτυχημένη ζεύξη. Αξίζει λοιπόν να σημειωθεί εδώ ότι το είδος της τροχιάς παίζει ρόλο ζωτικής σημασίας για το μέγεθος της επιφάνειας της γης που μπορεί να εξυπηρετήσει. Από την άλλη πλευρά οι δορυφόροι που είναι τύπου LEO πραγματοποιούν μία κυκλική ζώνη με διάμετρο περίπου 2 χιλιομέτρων, επιπλέον ένας δορυφόρος σε γεωστατική τροχιά μπορεί να εξυπηρετήσει περίπου την μισή επιφάνεια της γης.

Οι επίγειοι δέκτες μπορεί να είναι συσκευές επικοινωνίας, που μπορούν να κάνουν ζεύξη με δορυφόρους που εκτελούν LEO και MEO (Medium Earth Orbit) τροχιές, οι οποίες μπορεί να είναι κινητά τηλέφωνα που χρησιμοποιούνται ως GPS. Παρόλα αυτά ο πομπός στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο πολύπλοκος και να διαθέτει μεγάλη ισχύ ώστε να μπορεί να δημιουργήσει μία σύνδεση με γεωστατικό δορυφόρο. Ο επίγειος δέκτης θα πρέπει να γνωρίζει με ακρίβεια την θέση του δορυφόρου και προς ποια κατεύθυνση. Εδώ μπορούμε να θέσουμε ως παράδειγμα το GPS. Παρατηρούμε λοιπόν ότι υπάρχουν 3 βασικές προκλήσεις οι οποίες επηρεάζουν σε τεράστιο βαθμό την ζεύξη μέσω δορυφόρου. Ο πρώτος παράγοντας είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου είναι απώλεια σήματος που προκύπτει λόγω εξαιρετικά μεγάλης απόστασης και όχι από εμπόδια ή παρεμβολές. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ο θόρυβος. Φαινόμενα όπως η βροχόπτωση, η χιονόπτωση, η μετάβαση από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας δημιουργούν θόρυβο ο οποίος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της ζεύξης. Τέλος ο τρίτος παράγοντας είναι η ολίσθηση συχνότητας που προκύπτει λόγω του φαινομένου Doppler. Σε σύγκριση με την επίγεια ζεύξη, η δορυφορική ζεύξη δεν πάσχει από ανακλάσεις σήματος, καθυστέρηση διάδοσης και ακαριαία πτώση σήματος λόγω μεγάλων εμποδίων. Τα επίπεδα θορύβου στη γη είναι πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά του ουρανού. Οι επίγειες ζεύξεις μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας τα μοντέλα διαλείψεων πολλαπλής διάδοσης σήματος Rayleigh στα οποία λαμβάνονται στο δέκτη πολλαπλά αντίγραφα του σήματος. Σε μία δορυφορική ζεύξη η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει με την χρήση ενός καναλιού που να περιέχει λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN Channel). Ο πρώτος αξιοσημείωτος παράγοντας για τα μοντέλα θορύβου είναι η απόσταση μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού. Η απόσταση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη και από την πιο μεγάλη απόσταση σε επίγεια



ζεύξη και έτσι προκαλεί στο σήμα καθυστέρηση και έλλειψη ισχύς. Η έλλειψη ισχύς του σήματος λόγω απόστασης όπως και αναφέρθηκε προηγουμένως, ονομάζεται απώλειες ελευθέρου χώρου διάδοσης (Free Space Path Loss) και μπορεί να περιγραφεί με τον τύπο (1):

$$FSPL(dB) = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε τις απώλειες ελευθέρου χώρου, θα πρέπει να γνωρίζουμε το d όπου εκφράζει την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, το c όπου εκφράζει την ταχύτητα του φωτός που ισούται με $c=3*10^8$ και το f που εκφράζει την συχνότητα με την οποία γίνεται η ζεύξη. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου λαμβάνουν επίσης υπόψη την απώλειες ισχύος λήψης από μία ισοτροπική κεραία. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως οι απώλειες ελευθέρου χώρου είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας απωλειών σε ένα link budget δορυφορικής ζεύξης.

Η ελάχιστη απόσταση των δορυφόρων LEO όταν περνούν πάνω από την γη είναι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα και περίπου 2000 χιλιόμετρα όταν είναι ορατός στον ορίζοντα. Υπάρχει μία διαφορά της τάξης των 20 dB μεταξύ των δύο αυτών περιπτώσεων. Η απόσταση σε μία γεωστατική τροχιά είναι περίπου στα 36000 χιλιόμετρα, στην λειτουργία των 2GHz υπάρχει εξασθένηση ισχύος της τάξης των 170 dB. Για την επίτευξη ζεύξης μεταξύ ενός επίγειου σταθμού από έναν γεωστατικού δορυφόρου με ένα ικανοποιητικό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) απαιτείται πάνω από 100 kilowatts σε ισοδύναμη ισοτροπική ακτινοβολία.

Προκειμένου να ξεπεραστεί η έλλειψη σήματος δεν είναι αναγκαίο να αυξήσουμε την ισχύ μετάδοσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθυντικές κεραίες υψηλής συγκέντρωσης η οποίες χρησιμοποιούνται για δορυφορική τηλεόραση όπου τα δορυφορικά κάτοπτρα στοχεύουν σε γεωστατικούς δορυφόρους.

Η ατμόσφαιρα δημιουργεί εξασθένηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ειδικά σε υψηλές συχνότητες (πάνω από 3 GHz). Ο κύριος παράγοντας εξασθένησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η υγρασία της ατμόσφαιρας, όπως για παράδειγμα τα σύννεφα. Επιπλέον υπάρχουν και άλλοι παράγοντες εξασθένησης όπως η ιονόσφαιρα και η τροπόσφαιρα που προκαλούν ελαφριά εξασθένηση του σήματος. Τα συγκεκριμένα φαινόμενα είναι πολύ πιο σημαντικά διότι στις δορυφορικές επικοινωνίες έχουμε ζεύξη με οπτική επαφή μεταξύ σταθμού βάσης και δορυφόρου και όσο ο δορυφόρος φτάνει πιο κοντά στον ορίζοντα το σήμα θα πρέπει να διαδοθεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αφού η απόσταση μεταξύ δορυφόρου και σταθμού βάσης αυξάνεται. Επιπλέον η ζεύξη σε αυτή την περίπτωση θα υποστεί παρεμβολές και θερμικό θόρυβο από άλλες επίγειες πηγές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Όπως γνωρίζουμε οι απώλειες ελευθέρου χώρου προκαλούνται από την μεγάλη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, το σήμα υφίσταται σε καθυστέρηση λόγω διάδοσης. Η καθυστέρηση της διάδοσης του σήματος από την επιφάνεια της γης προς



έναν γεωστατικό δορυφόρο ανέρχεται στα 125 ms, ενώ σε έναν δορυφόρο LEO ανέρχεται στα 2 μέχρι και 10 ms . Στην περίπτωση ενός LEO δορυφόρου η απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου μεταβάλλονται διότι ο δορυφόρος κινείται σε διαφορετική τροχιά από ότι η γη. Παρόλο που αναφερόμαστε στην τάξη των milliseconds για καθυστέρηση , είναι αρκετό για να δημιουργήσει προβλήματα μετάδοσης όπως για παράδειγμα στο επίπεδο MAC όπου και η παραμικρή καθυστέρηση πρέπει να ληφθεί υπόψιν αφού έτσι μπορούν να εξαλειφθούν οι ταυτόχρονες μεταδόσεις στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA) [32]. Η καθυστέρηση διάδοσης δίνεται από τον τύπο (2) :

$$t_{propagation} = \frac{d}{c} \quad (2)$$

Όπου d είναι η απόσταση που θα διανύσει το σήμα για να φτάσει στο δέκτη και c είναι η ταχύτητα του φωτός.

Ο επόμενος παράγοντας απωλειών ισχύος σήματος είναι η ολίσθηση συχνότητας η οποία προκαλείται από την ταχύτητα της τροχιάς . Έχει αποδειχθεί ότι όταν μία πηγή ηλεκτρομαγνητικού σήματος κινείται σχετικά με τον δέκτη, ο δέκτης θα λάβει το σήμα με μία ολίσθηση συχνότητας, η οποία είναι σχετική με την ταχύτητα που κινείται ο πομπός σε σχέση με τον δέκτη. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο Doppler. Στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών για έναν επίγειο σταθμό ο οποίος λαμβάνει σήμα από μία κινούμενη πηγή π.χ. (έναν σταθμό βάσης που λαμβάνει δεδομένα από ένα δορυφόρο και αντιστρόφως), είναι απαραίτητο να μπορεί να υπολογίσει την ολίσθηση της συχνότητας που μπορεί να έχει υποστεί το σήμα ώστε να γίνει με επιτυχία η αποκωδικοποίηση. Ο υπολογισμός της ολίσθησης της συχνότητας ονομάζεται μικρορύθμιση συχνότητας φέροντος σήματος (CFO) και απαιτείται να υπολογιστεί πιο πριν από την αποκωδικοποίηση του σήματος. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει υπολογίζοντας την σχετική ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει ο πομπός στην συγκεκριμένη τροχιά ή ανιχνεύοντας πιλοτικό σήμα. Το πλάτος της ολίσθησης βασίζεται γραμμικά στην ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη και στην συχνότητα του φέροντος σήματος όπως στον τύπο (3) :

$$f_{Doppler} (Hz) = \frac{U_r f_c}{c} \quad (3)$$



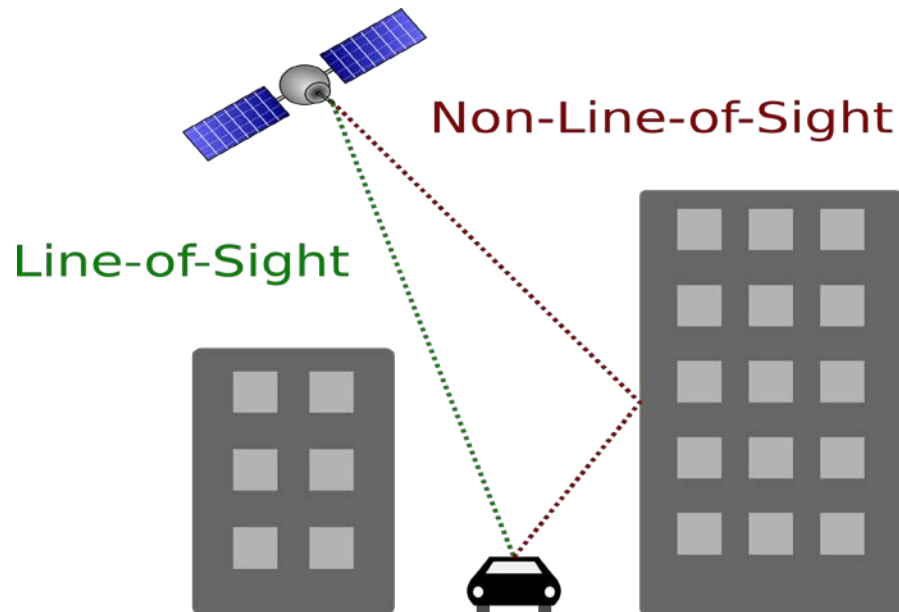
Όπου U_r είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται ο πομπός σε σχέση με τον δέκτη, f_c είναι η συχνότητα του φέροντος σήματος και c η ταχύτητα του φωτός.

Στην τροχιά LEO η ταχύτητα μεταξύ του δορυφόρου σε σχέση με τον επίγειο σταθμό μπορεί να ξεπεράσει τα 8 km/s, έτσι το φαινόμενο ολίσθησης συχνότητας του Doppler παίζει εξαιρετικά μεγάλο ρόλο. Σύμφωνα με την μηχανική τροχιών οι δορυφόροι που βρίσκονται σε μεγαλύτερο υψόμετρο κινούνται με μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με αυτούς που βρίσκονται πιο κοντά στην γη και σε αυτό οφείλεται η βαρυτικές δυνάμεις που έχουν την τάση να έλκουν αντικείμενα προς το κέντρο της γης. Έτσι καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι στην περίπτωση ενός γεωστατικού δορυφόρου που βρίσκεται αρκετά ψηλότερα από έναν δορυφόρο LEO, το φαινόμενο Doppler έχει μηδενική επίδραση [6].

Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος από τον δορυφόρο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο έδαφος. Σε περιοχές που δεν υπάρχουν μεγάλα και πολυάριθμα κτήρια τα οποία μπορεί να προκαλούν σκιάσεις ή ανακλάσεις του σήματος όπως για παράδειγμα σε αγροτικές περιοχές, χάρης την καθαρότητα του ουρανού λαμβάνουμε την καλύτερη δυνατή ποιότητα σήματος. Βέβαια η κατάσταση σε ένα αστικό περιβάλλον όπου υπάρχει μία πληθώρα από κτήρια και διάφορα εμπόδια καθιστούν την λήψη του σήματος αρκετά δύσκολη αφού υπάρχουν ανακλάσεις λόγω κτηρίων με λεία επιφάνεια ή ακόμα και μεγάλες σκιάσεις του σήματος λόγω του όγκου των εμποδίων. Για να καταλάβουμε την σοβαρότητα της κατάστασης που επικρατεί στα αστικά περιβάλλοντα μπορούμε να θέσουμε ως παράδειγμα το GPS όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση η πλοήγηση μέσω GPS σε ένα αστικό περιβάλλον με ψηλά και ογκώδη κτήρια καθιστούν τον εντοπισμό του στίγματος εξαιρετικά δύσκολο. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που το GPS δεν μπορεί να λειτουργήσει σε κλειστούς χώρους, αφού απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του γεωεντοπισμού είναι να υπάρχει άμεση οπτική επαφή του επίγειου εξοπλισμού π.χ. (κινητό τηλέφωνο) με τον ουρανό.



Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται η προκλήσεις που μπορεί να συναντήσει το λαμβανόμενο σήμα από δορυφόρο σε ένα αστικό περιβάλλον.



Εικόνα 4: Απεικόνιση των προκλήσεων του λαμβανόμενου σήματος από δορυφόρο σε αστικό περιβάλλον.[6]

Μία λύση που ίσως καταπολεμήσει το πρόβλημα των ανακλάσεων του λαμβανόμενου σήματος θα ήταν η χρήση κατευθυντικών με υψηλό κέρδος κεραιών (δορυφορικά κάτοπτρα), τα οποία όμως δεν θα εξυπηρετούσαν περιπτώσεις που απαιτείται κίνηση όπως η πλοήγηση.



2.5 Δορυφορική Μετάδοση

Η πιο κοινή μορφή δορυφορικής επικοινωνίας είναι η δορυφορική μετάδοση υπηρεσιών. Σε αυτή την περίπτωση ένα δορυφόρος μπορεί να μεταδώσει σήμα προς ένα υπέρογκο αριθμό από επίγειους χρήστες ταυτόχρονα. Το σήμα αυτό μπορεί να είναι ραδιόφωνο, τηλεόραση, πληροφορίες καιρού και άλλα δεδομένα χρήσιμα για τους χρήστες.

Η μετάδοση γίνεται από έναν γεωστατικό δορυφόρο όπου το σήμα που εκπέμπει λαμβάνεται από σταθερές κεραιές υψηλού κέρδους (δορυφορικά κάτοπτρα), οι οποίες πρέπει να βρίσκονται σε τέλεια στόχευση ώστε να λαμβάνουν το καλύτερο δυνατό σήμα. Η κεραία με την οποία εκπέμπει ο δορυφόρος μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να στοχεύει την ισχύ του σε συγκεκριμένες περιοχές της γης που ενδιαφέρει την εκάστοτε εταιρία παροχής υπηρεσιών. Επιπλέον η διαμόρφωση της δέσμης ακτίνας του σήματος δίνει την ιδιότητα της περιφερειακής ροής .

Αυτές οι αρχιτεκτονικές επιτρέπουν την εκπομπή σήματος σε ένα μεγάλο όγκο χρηστών το οποίο δεν είναι εξατομικευμένο για κάθε χρήστη και με αυτό τον τρόπο είναι εύκολο να διανεμηθεί.. Κάποια δορυφορικά συστήματα εκπομπής παρέχουν εξατομικευμένα δεδομένα για εκάστοτε χρήστη π.χ. (λήψη υπηρεσίας δορυφορικού Internet), όμως ο αριθμός των ταυτόχρονα διασυνδεδεμένων χρηστών μειώνεται σημαντικά καθιστώντας το μη-πρακτικό.

Εκ φύσεως οι αρχιτεκτονικές αυτές μπορούν να δημιουργήσουν μονόδρομη ζεύξη, διότι θα ήταν αδύνατο για ένα δορυφορικό σύστημα εκπομπής να λαμβάνει σήματα από εκατομμύρια συσκευές που βρίσκονται στη γη.

Οι περισσότερες δορυφορικές υπηρεσίες εκπομπής βρίσκονται στην γεωσύγχρονη τροχιά (GEO) σε ύψος περίπου 35786 χιλιόμετρα πάνω από τον ισημερινό της γης. Οι δορυφόροι που βρίσκονται στην γεωσύγχρονη τροχιά είναι σχεδόν σταθεροί από την οπτική πλευρά ενός παρατηρητή που βρίσκεται στη γη. Έτσι λοιπόν δεν υπάρχει ανάγκη για κινητή στόχευση του δορυφόρου από την γη. Οι κεραιές των επίγειων σταθμών μπορούν να είναι σταθερές και δεν απαιτείται να ρυθμίζονται συνεχώς ώστε να στοχεύουν προς τον εκάστοτε δορυφόρο.

Ένα μειονέκτημα της χρήσης γεωστατικού δορυφόρου είναι η μεγάλη απόσταση του από την γη που δημιουργεί μεγάλη καθυστέρηση και αλλοίωση του σήματος. Μελέτες έχουν δείξει ότι ένα σήμα προκειμένου να ταξιδέψει προς την τροχιά και πίσω στη γη θα χρειαστεί 250 ms .Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι αυτή η καθυστέρηση μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα σε επικοινωνία πραγματικού χρόνου. Η υψηλή καθυστέρηση και η αλλοίωση του σήματος καθιστά την αμφίδρομη επικοινωνία μέσω γεωστατικού δορυφόρου εξαιρετικά μη-πρακτικό.



Κεφάλαιο 3: Εισαγωγή στο LTE

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί η γενική αρχιτεκτονική του LTE δικτύου, θα γίνει μία πιο λεπτομερής περιγραφή του LTE στη διεπαφή αέρα και στο φυσικό στρώμα .

3.1 Λεπτομερής περιγραφή του LTE

Η ανάπτυξη του προτύπου LTE ξεκίνησε από την Nippon Telegraph και την Telephone DoCoMo (NTT DoCoMo) της Ιαπωνίας το 2005 ως ένα επαναστατικό βήμα από το GSM και το UMTS και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2007 [9].

Το LTE σχεδιάστηκε για να λάβει ένα μεγαλύτερο βήμα εξέλιξης των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών επικοινωνίας σε σύγκριση με τα 3 / 3.5G τεχνολογίες .Ο κλάδος ραδιοεπικοινωνιών της διεθνούς ένωσης τηλεπικοινωνιών (ITU-R) καθόρισε πρότυπα για τη συνδεσιμότητα 4G το Μάρτιο του 2008, απαιτώντας όλες τις υπηρεσίες που περιγράφεται ως 4G για να τηρούν ένα σύνολο προτύπων ταχύτητας και σύνδεσης.

Ενώ το LTE δεν πληρούσε αρχικά τις απαιτήσεις για το πρότυπο 4G, το ITU-R επέτρεψε να διατεθεί στην αγορά ως τεχνολογία 4G,εφόσον παρέχει σημαντική βελτίωση σε σχέση με την τεχνολογία 3G. Αργότερα με τη μορφή LTE-Advance (LTE-A) το πρότυπο αυτό έγινε συμβατό με τις αρχικές απαιτήσεις του προτύπου 4G.

Τελικά υποβλήθηκε ως υποψήφιο σύστημα το 4G στο ITU-T στα τέλη του 2009 και έγινε πρότυπο από την 3GPP (3rd Generation Partnership Project) στην έκδοση 10 τον Μάρτιο του 2011.

Τα πρότυπα των τηλεπικοινωνιών που ορίστηκαν από την ITU-R μπορούν να χωριστούν σε διαφορετικές γενιές, όπου η καθεμία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά .

- 1η Γενιά: Αναλογικές τεχνολογίες ασύρματων τηλεφώνων.
- 2η γενιά: Ψηφιακές κρυπτογραφημένες κινητές τεχνολογίες. GSM, EDGE;
- 3η γενιά: προδιαγραφές κινητής ευρυζωνικότητας. IMT.2000, UMTS, HSPA /eHSPA και τις πρώτες προδιαγραφές για LTE.
- 4η γενιά: LTE / LTE-Advance, WiMAX, MIMO συστήματα .
- 5η γενιά: Η επόμενη γενιά βελτιώσεων στα πρότυπα του 4G. Το 5G θα κυκλοφορήσει το 2020.

Σε σύγκριση με τα προγενέστερα πρότυπα, το LTE είναι προσανατολισμένο στα δεδομένα (data-oriented) σε σχέση με το 3G πρότυπο και εισάγει νέες τεχνολογίες οι οποίες προσφέρουν δυνατότητα εξέλιξης στο μέλλον . Ο σχεδιασμός των προτύπων 2G και 3G αποσκοπούσε κυρίως στην ανθρώπινη επικοινωνία . Το 4G και οι απόγονοί του στοχεύουν περισσότερο στην επικοινωνία μεταξύ μηχανών, όπου οι υπηρεσίες φωνής παίζουν λιγότερο σημαντικό ρόλο. Το LTE πρότυπο δεν βασίζεται στα κανάλια φωνητικής υπηρεσίας μέσω της εναλλαγής κυκλώματος (circuit switching), αλλά εξαρτάται ολοκληρωτικά από την μεταγωγή πακέτων (packet switching) .Εστιάζει με εξαιρετική προτεραιότητα στην μικρή καθυστέρηση, στον υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και στον επανασχεδιασμό του δικτύου κορμού (core network) για την μείωση των δεδομένων κεφαλίδας (data overhead).



Το LTE-Advanced ενσωματώνει πολλαπλές βελτιωμένες λειτουργίες μέσω του προτύπου LTE, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Συγκέντρωση φορέων (Carrier Aggregation), η τεχνική αυτή βοηθά στο να γίνει καλύτερη διαχείριση του φάσματος και αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.
- Προηγμένες τεχνικές στην σχεδίαση κεραιών (Multiple Input Multiple Output) που ενισχύουν την φασματική απόδοση.
- Κυψέλες Pico (PicoCells) οι οποίες ενισχύουν σημαντικά την χωρητικότητα σε μία περιοχή κάλυψης.

Το LTE επίσης παρέχει μια λειτουργία που ονομάζεται Sidelink, η οποία αποσκοπεί στην άμεση επικοινωνία συσκευής προς συσκευή (Device to Device).

3.2 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Το LTE βασίζεται σε αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου, όπως και τα προηγούμενα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας.

Στο κυψελωτό δίκτυο, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Network) χωρίζεται σε μικρά "κυψέλες" τα οποία ποικίλλουν από εκατοντάδες μέτρα έως δεκάδες χιλιόμετρα, σε σχέση με μία παραδοσιακή μετάδοση υπηρεσίας από έναν σταθμό βάσης ο οποίος καλύπτει εκατοντάδες χιλιόμετρα εξυπηρετώντας όλους τους χρήστες ταυτόχρονα.

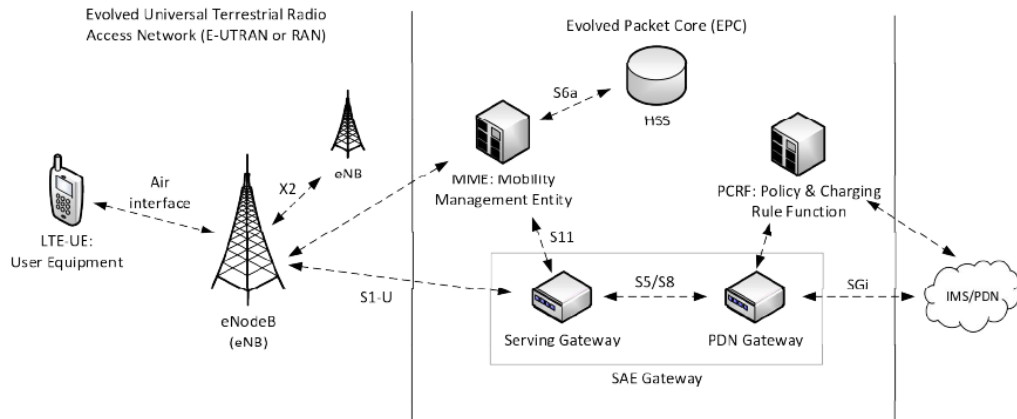
Στην κυψελωτή αρχιτεκτονική κάθε κελί είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο κορμού, το οποίο ελέγχει και καθιστά ολόκληρο το δίκτυο σαν μία οντότητα.

Στο κυψελωτό δίκτυο του LTE, το δίκτυο κορμού συνδέει μέσω επίγειων συνδέσεων μία σειρά από σταθμούς βάσης, στους οποίους ο καθένας από αυτούς δημιουργεί ένα ή και περισσότερα κυψέλες τα οποία αποσκοπούν στην κάλυψη της υπηρεσίας που προσφέρει στη γύρω περιοχή από αυτόν. Συλλογικά, οι σταθμοί βάσης και οι τελικοί χρήστες αποτελούν το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN) [17].

Στις προδιαγραφές του LTE ο σταθμός βάσης ονομάζεται ως eNodeB, το RAN αναφέρεται ως το εξελιγμένο επίγειο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. (E-UTRAN) και το CN ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC).



Η δομή του δικτύου LTE απεικονίζεται στην Εικόνα 5:



Εικόνα 5: LTE Evolved Packet System (EPS) Τοπολογία δικτύου και Αρχιτεκτονική.[5]

Τα κυψελωτά δίκτυα είναι κατάλληλα για κινητές επικοινωνίες λόγω ότι η σύνδεση της κινητής συσκευής με το δίκτυο γίνεται με τρόπο ασύρματο. Επίσης η σύνδεση έχει την δυνατότητα να δρομολογηθεί από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, όταν η συσκευή μετακινείται έξω από την κάλυψη του σταθμού βάσης που το εξυπηρετεί. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα να διαμοιραστεί η πολυπλοκότητα του δικτύου μοιράζοντας την σε ένα μεγάλο αριθμό από σταθμούς βάσης.

Το eNodeB είναι ένας μεμονωμένος σταθμός βάσης στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης ή στο εξελεγμένο επίγειο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. (E-UTRAN). Κάθε eNodeB είναι ο εξοπλισμός ο οποίος συνδέει ασύρματα τις συσκευές των τελικών χρηστών στον χώρο τον οποίο καλύπτει, αποτελεί ένα σημαντικό ρόλο στο δίκτυο του LTE. Το eNodeB εκτελεί διαμόρφωση σήματος καθώς και αποδιαμόρφωση, επίσης διαχειρίζεται την μπάντα συχνοτήτων η οποία έχει δεσμευτεί γ' αυτόν. Κάθε eNodeB μπορεί να εξυπηρετήσει πάνω από 256 λογικά κυψέλες τα οποία μπορεί να είναι συνδεδεμένα με άλλους σταθμούς βάσης και στο δίκτυο κορμού.

Το δίκτυο κορμού είναι μία δομή η οποία συνδέει τους σταθμούς βάσης μαζί. Στις προδιαγραφές του LTE το δίκτυο κορμού που συνδέεται με τον σταθμό βάσης ονομάζεται Evolved Packet System (EPS). Μέσω του EPS τα eNodeBs επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο που ονομάζεται X2. Το πρωτόκολλο αυτό επιτρέπει την ανταλλαγή των δεδομένων του χρήστη, δεδομένα κίνησης του δικτύου καθώς και εντολές μεταξύ διαφορετικών eNodeBs. Έτσι λοιπόν υπάρχει πιο αποδοτική διαχείριση του όγκου της κίνησης και να υπάρχει η δυνατότητα για περιπτώσεις επανασύνδεσης (hand-over), όταν ένας χρήστης μετακινείται από ένα κελί σε ένα άλλο.



MME ή αλλιώς Mobility Management Entity είναι το πρωτόκολλο που είναι υπεύθυνο για όλη την σηματοδότηση (signaling) ανάμεσα στα eNodeBs και στις τερματικές συσκευές. Το MME δεν επεξεργάζεται δεδομένα χρήστη αλλά ελέγχει τη φυσική δομή του δικτύου. Συνδεδεμένο με το MME είναι το Home Subscriber Service (HSS) το οποίο είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση και την αποστολή δεδομένων του συνδρομητή, για την αυθεντικοποίηση των δεδομένων και άλλων κρίσιμων πληροφοριών. Τα Serving Gateways (SGW) και τα Packet Data Network Gateways (PGW) είναι υπεύθυνα για τη δρομολόγηση των Control Plane Data και των User Plane Data (IP data) μέσω του EPC.

Το P-GW (Packet Data Network Gateway) διαμοιράζει IP διευθύνσεις και δρομολογεί τα πακέτα στο διαδίκτυο και στους παροχείς πολυμεσικών υπηρεσιών.

3.3 Στοιβά Πρωτοκόλλων

Το LTE καλύπτει τις προδιαγραφές από τις φυσικές διεπαφές του χαμηλού επιπέδου έως το υψηλό επίπεδο δικτύου καθώς και τη διαχείριση των πρωτοκόλλων. Η στοιβά μπορεί να χωριστεί σε 3 επίπεδα[7].

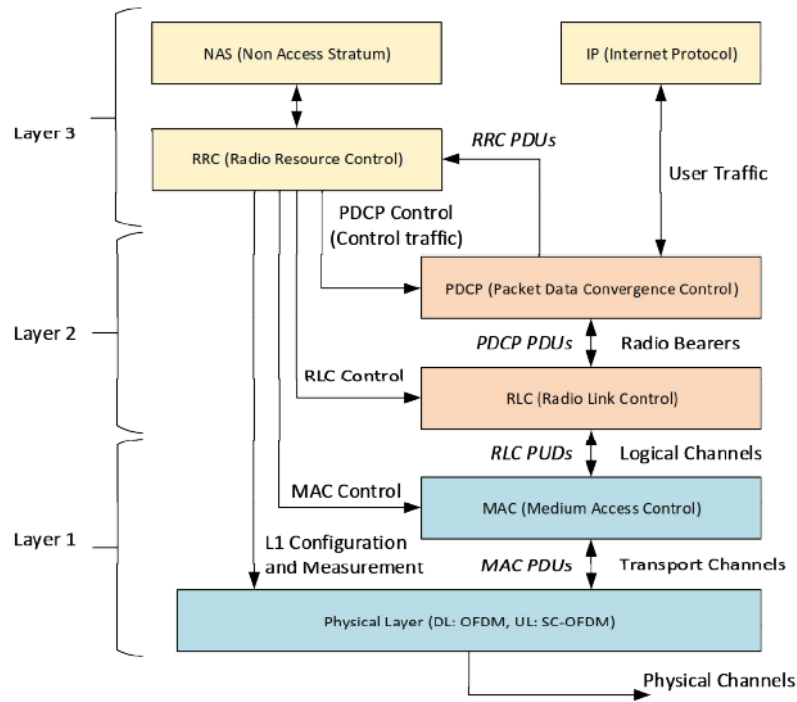
Το πρώτο επίπεδο της στοιβάς αφορά το χαμηλότερο επίπεδο το οποίο περιλαμβάνει τις τεχνικές πολυπλεξίας για την αποστολή και λήψη δεδομένων καθώς και το MAC (Medium Access Control). Το MAC ελέγχει την χρήση της φυσικής RF μπάντας στον χρόνο και στη συχνότητα. Υλοποιεί τα κανάλια μεταφοράς όπως το Broadcast Channel (BCH), Downlink Shared Channel (DL-SCH), Uplink Shared Channel (UL-SCH) και το Random Access Channel (RACH). Τα κανάλια μεταφοράς έχουν διαφορές μεταξύ τους λόγω ότι χρησιμοποιείται το καθένα για διαφορετικό σκοπό.

Το δεύτερο επίπεδο ορίζει το αμέσως υψηλότερο επίπεδο. Το Radio Link Control (RLC) πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για την μορφοποίηση του λογικού καναλιού και της σύνδεσης μεταξύ της συσκευής του χρήστη (UE) και του eNodeB. Το RLC υποστηρίζει υψηλού επιπέδου συγχώνευσης, κατάτμησης και επανασυναρμολόγησης πακέτων δεδομένων. Υψηλότερα από το RLC πρωτόκολλο βρίσκεται το πρωτόκολλο συγκέντρωσης πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol) ή με το ακρωνύμιο (PDCP) το οποίο είναι το βασικό πρωτόκολλο πακέτων που χρησιμοποιείται μέσα στο δίκτυο κορμού. Το PDCP επίσης υλοποιεί την ασφάλεια του user plane. Υψηλότερα από το PDPC βρίσκονται το RRC για τον έλεγχο και TCP/IP ροές δεδομένων για δεδομένα χρηστών.

Το τρίτο και υψηλότερο επίπεδο πρωτοκόλλων που ορίζεται στην στοιβά πρωτοκόλλων του LTE δικτύου περιέχει το Radio Resource Control (RRC), το Non-Access-Stratum (NAS) και γενικά δεδομένα του Internet Protocol (IP). Το Radio Resource Control (RRC) ορίζει το γενικό πλαίσιο ελέγχου των ραδιοπόρων μεταξύ των κελιών και των σταθμών βάσης (eNodeB). Το Non-Access-Stratum (NAS) control-plane είναι το πρωτόκολλο διαχείρισης υψηλότερου επιπέδου που χρησιμοποιείται μεταξύ του UE και MME στη ραδιοδιεπαφή (radio interface) για να ελέγχει την κινητικότητα, την ταυτότητα και την διαχείριση ελέγχου κλήσεων (call control management).



Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται η στοίβα των πρωτοκόλλων του LTE δικτύου και οι user plane συνδέσεις.



Εικόνα 6: Η στοίβα των πρωτοκόλλων του LTE δικτύου και οι user plane συνδέσεις.[8]



3.4 Διεπαφή Αέρα

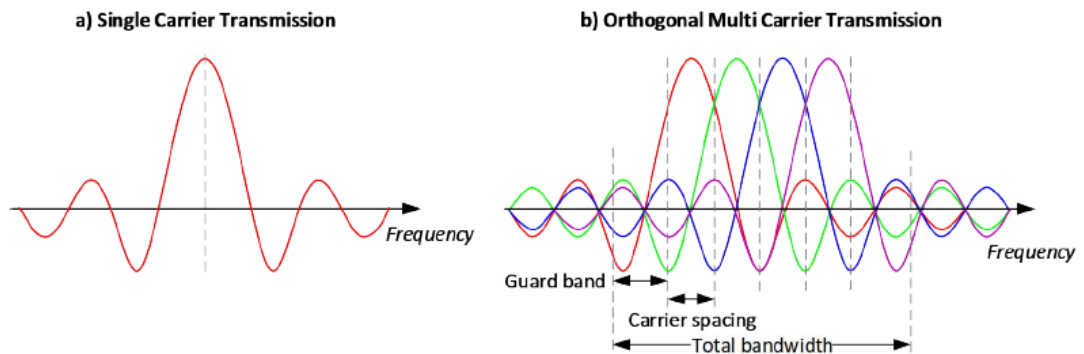
Η διεπαφή αέρα LTE ορίζεται ως το φυσικό στρώμα της στοίβας πρωτοκόλλου και είναι η πιο αξιοσημείωτη αλλαγή στο LTE δίκτυο σε σύγκριση με τα υπάρχοντα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας. Η διεπαφή αέρα προσφέρει μια ευελιξία στην διαμόρφωση της που επιτρέπει την βέλτιστη απόδοση σε ποικίλα περιβάλλοντα και ειδικά στο αστικό περιβάλλον όπου η ασύρματη επικοινωνία πάσχει από καθυστερήσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών του σήματος από διάφορα εμπόδια π.χ. (κτίρια), επίσης επιτρέπει υψηλό φασματικό εύρος ζώνης του χρήστη .

Το LTE μπορεί να λειτουργήσει είτε με Frequency Division Duplex (FDD) δηλαδή το downlink και το uplink κανάλι διαιρούνται με βάση την συχνότητα, έτσι κάθε σήμα έχει την δική του συχνότητα και το resource block του.

Στη διεπαφή αέρα το LTE χρησιμοποιεί την Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)) και την Πολλαπλή πρόσβαση με Διαίρεση Συχνότητας με έναν Φορέα (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)) ως τεχνικές για την πολυπλεξία στο downlink και uplink κανάλι.

3.4.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Η Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDM) είναι μία τεχνική πολυπλεξίας που βασίζεται στην διαμόρφωση πολλαπλών φορέων (Multi-Carrier Modulation (MDM)) και στην πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (FDM). Η βασική ιδέα του OFDM είναι να ομαδοποιήσει πολλές σχεδόν ανεξάρτητες υποφέρουσες σε ένα μόνο μεταδιδόμενο φορέα δίπλα δίπλα, με ελάχιστη παρεμβολή μεταξύ των φορέων. Αυτές οι υποφέρουσες αναφέρονται και ως τόνοι, σχηματίζονται με τέτοιο τρόπο ως ώστε το σύστημα να είναι μαθηματικά ορθογώνιο και κάθε υποφέρουσα τοποθετείται στο ελάχιστο της άλλης υποφέρουσας ώστε να αποφευχθούν παρεμβολές μεταξύ υποφερουσών. Τα κωδικοποιημένα δεδομένα ή κανάλια μπορούν να πολυπλεχθούν σε μία ή περισσότερες υποφέρουσες. Η ορθογωνική ομαδοποίηση των φορέων θα παρουσιαστεί στο σχήμα 3. Κάθε υποφέρουσα μπορεί να διαμορφωθεί με πολλούς τύπους διαμόρφωσης όπως η PSK (διαμόρφωση με βάση την φάση) ή με QAM (διαμόρφωση με βάση τη φάση και το πλάτος) [29].



Εικόνα 7: Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων (OFDM).[11]

Δύο σήματα προκειμένου να είναι ορθογώνια μεταξύ τους θα πρέπει ο χρόνος μετάδοσης του συμβόλου τους να είναι πλήρως συγχρονισμένος διότι εάν δεν συμβαίνει αυτό υπάρχει κίνδυνος να εμφανιστεί παρεμβολή ανάμεσα στις υποφέρουσες (ICI inter-carrier interference).

Το OFDM θεωρείται και ως τεχνική διαμόρφωσης εκτός και από τεχνική μετάδοσης, όπου το σήμα για να μεταδοθεί χωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό από μικρού ρυθμού μετάδοσης φέροντα σήματα τα οποία καλύπτουν όλο το διαθέσιμο φάσμα. Κατανοούμε λοιπόν ότι ο ρόλος του OFDM στο κανάλι της κάτω ζεύξης του LTE (downlink channel) είναι ζωτικής σημασίας .

Το OFDM ως σύστημα πολύπλεξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλή πρόσβαση ως προς την συχνότητα .Σε αυτή την περίπτωση η τεχνική ονομάζεται Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA). Το OFDMA είναι παρόμοιο με το FDMA (Frequency Domain Multiple Access), με το οποίο απλά χωρίζουμε τις συχνότητες ώστε να τις αποδώσουμε σε διαφορετικούς χρήστες . Στο OFDMA απόσταση των συχνοτήτων που αποδίδεται σε διαφορετικούς χρήστες είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με άλλες τεχνικές διαμοιρασμού του φάσματος αλλά προκειμένου να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι συχνότητες να είναι «ορθογώνιες» μεταξύ τους. Για να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα μεταξύ των φορέων, θα πρέπει να υπάρχει ακρίβεια στην συχνότητα και αυστηρός συγχρονισμός. Λόγω λοιπόν της ανάγκης αυστηρού συγχρονισμού συχνότητας, η τεχνική αυτή είναι επιρρεπής στην μετατόπιση συχνότητας των φερουσών (Carrier Frequency Offset (CFO)), επομένως έχουμε φαινόμενο ολίσθησης συχνότητας όπου αυτό ονομάζεται φαινόμενο Doppler. Ωστόσο σε περιπτώσεις που έχουμε μόνο έναν πομπό και το φαινόμενο Doppler επηρεάζει όλες τις υποφέρουσες στον ίδιο βαθμό τότε η ορθογωνικότητα διατηρείται.



Το βασικό πλεονέκτημα του OFDM είναι η αντοχή του στις επιδράσεις του πολλαπλών διαδρομών (Multipath Fading), χάρη στη μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου. Είναι καλά προσαρμοσμένο για αστικά περιβάλλοντα, όπου μπορεί να υπάρχουν διαφορετικοί φορείς σημάτων που διατίθενται για διαφορετικούς σκοπούς (για παράδειγμα σήματα ελέγχου και πιλοτικά σήματα), ο δέκτης μπορεί πλέον να αποδιαμορφώνει επιλεκτικά τους φορείς των σημάτων. Στην περίπτωση του OFDMA πολλοί πομποί μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων και με αυτό τον τρόπο να αυξηθεί η φασματική απόδοση. Επίσης ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η σχετικά φθηνή αποδιαμόρφωση όταν όλοι οι φορείς αποδιαμορφώνονται παράλληλα χάρη στην τεχνική Fast Fourier Transform (FFT). Αυτή η τεχνική επιτρέπει το εύρος ζώνης δεδομένων να κλιμακωθεί με μια μικρή θυσία σε υπολογιστικό φορτίο. Ο δέκτης μπορεί επίσης να αποδιαμορφώνει επιλεκτικά τους φορείς, έτσι όλες οι ληφθείσες πληροφορίες δεν χρειάζεται να επεξεργαστούν.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα του OFDM σε σύγκριση με άλλες τεχνικές με υψηλό ρυθμό μετάδοσης συμβόλων και παρόμοια φασματική απόδοση είναι ο υψηλός λόγος Peak to Average Power (PAPR), ο οποίος εκφράζει πόσο μεγάλο είναι το πλάτος κορυφής του σήματος σε σχέση με το μέσο πλάτος του. Στο OFDM, το μεταδιδόμενο σήμα βρίσκεται κοντά στο λευκό θόρυβο και το πλάτος κορυφής του σήματος μπορεί να είναι σημαντικό στην περίπτωση παρεμβολής μεταξύ των υποφερουσών. Για τη μετάδοση ενός υψηλού PAPR σήματος χωρίς παραμόρφωση, ο ενισχυτής του πομπού πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί γραμμικά σε όλο το εύρος των πλατών του σήματος. Από την αύξηση του εύρους γραμμικότητας ενός ενισχυτή μειώνεται η αποδοτικότητά του, έτσι απαιτείται περισσότερη ισχύς για να έχει παρόμοια ισχύ μετάδοσης σε σύγκριση με τις διαμορφώσεις με χαμηλό PAPR. Ως αποτέλεσμα το OFDM δεν θεωρείται κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ μετάδοσης.

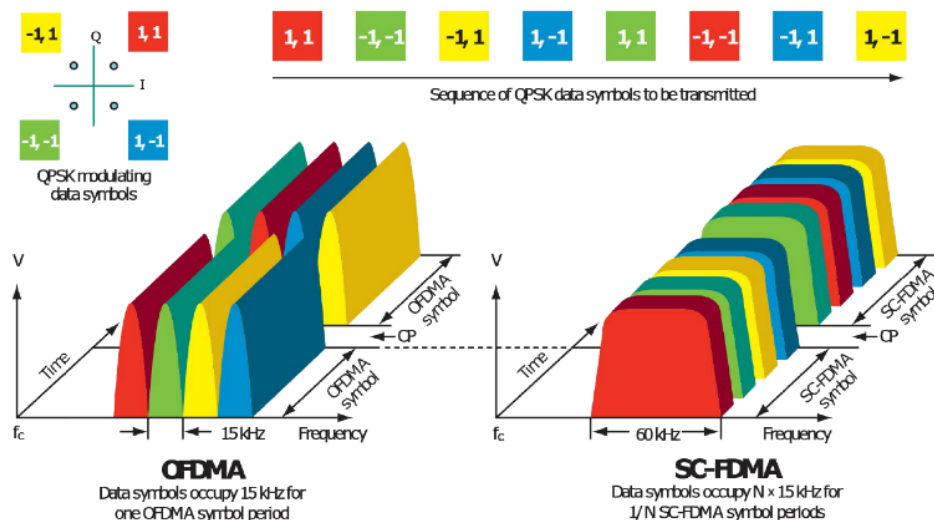
Ένα άλλο μειονέκτημα της τεχνικής OFDM είναι η απαίτηση ορθογωνικότητας, και ιδιαίτερα στην περίπτωση του OFDMA. Όταν πολλαπλοί πομποί λειτουργούν στην ίδια περιοχή πρέπει να συγχρονιστούν μεταξύ τους ως προς τις συχνότητες για να αποφευχθούν παρεμβολές. Ο συγχρονισμός αυτός μπορεί και επιτυγχάνεται με τα πιλοτικά σήματα τα οποία καθορίζουν την συχνότητα και τον χρονισμό στα οποία θα κλειδώσει πάνω ο δέκτης. Κατανοούμε λοιπόν ότι θα πρέπει να γίνεται ένας συνεχής έλεγχος συγχρονισμού, ειδικά σε περιβάλλοντα με μεταβαλλόμενους παράγοντες (αυτοκίνητα, κίνηση χρήστη), ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρεμβολές. Κάτι τέτοιο λοιπόν απαιτεί αρκετή ενέργεια και προηγμένο υλικολογισμικό στον δέκτη[13].



3.4.2 Single Carrier Frequency Division Multiple Access

Αντί της χρήσης μεθόδων OFDM ή OFDMA στο uplink κανάλι, το LTE χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του OFDM και του OFDMA που ονομάζεται Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας με ένα φέρον σήμα (SC-FDMA), για εκπομπές από την τερματική συσκευή προς τον σταθμό βάσης. Το SC-FDMA μπορεί να λειτουργεί τόσο ως πολλαπλή πρόσβαση όσο και ως τεχνική πολυπλεξίας. Βασίζεται στις ίδιες ιδιότητες των ορθογώνιων συχνοτήτων όπως στο OFDM.

Ως βασικές διαφορές μεταξύ OFDMA και SC-FDMA μπορούμε να παρατηρήσουμε την δομή των συμβόλων και πως διαμοιράζονται σε διαφορετικά φέροντα σήματα. Στην τεχνική OFDMA στην περίοδο ενός συμβόλου πολλαπλά φέροντα σήματα χρησιμοποιούνται για να μεταδώσουν κάθε σύμβολο ταυτόχρονα. Κάθε υποφέρων σήμα χρησιμοποιεί ένα κομμάτι του διαθέσιμου φάσματος. Αντίθετα στο SC-FDMA κάθε υποφέρων σήμα μεταδίδει ένα σύμβολο χρησιμοποιώντας όλο το διαθέσιμο φάσμα με τη διαφορά ότι η περίοδος του συμβόλου χωρίζεται σε υποπεριόδους, όπου κάθε υποπερίοδος ανήκει σε διαφορετικό υποφέρων σήμα. Τα υποφέροντα σήματα λοιπόν μεταδίδουν τα σύμβολά τους το ένα μετά το άλλο. Οι βασικές διαφορές μεταξύ OFDMA και SC-FDMA περιγράφονται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Οι διαφορές μεταξύ OFDMA και SC-FDMA όταν μεταδίδουν μία σειρά από σύμβολα.[21]



Ο λόγος λοιπόν που χρησιμοποιούμε SC-FDMA στο κανάλι του uplink στο LTE είναι ότι έχει μικρότερο Peak to Average Power Ratio (PAPR) σε σχέση με το OFDMA και έτσι είναι ιδιαίτερα συμφέρον για συσκευές που χρησιμοποιούν μπαταρία (εξοικονόμηση ενέργειας). Γενικά το SC-FDMA διαθέτει τα πλεονεκτήματα του OFDMA μαζί με τα υστερήματα του (multipath, fading) . Είναι λιγότερο ευαίσθητο στις ολισθήσεις συχνότητας και στη μη-γραμμική παραμόρφωση και ως εκ τούτου επιτρέπει τη χρήση λιγότερο δαπανηρών ενισχυτών ισχύος.

Οι φορείς που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των συμβόλων στο SC-FDMA δεν απαιτείται να συγκεντρώνονται μαζί. Στις προδιαγραφές του LTE αναφέρεται ότι τα Physical Resource Block μπορούν να εξυπηρετήσουν 2-3 ενεργούς χρήστες ταυτοχρόνως. Στο OFDMA οι τελικές συσκευές UEs πολυπλέκονται στο χρόνο διαθέτοντας διαφορετικά Resource Blocks για διαφορετικούς χρήστες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ανάλογα με το φορτίο.

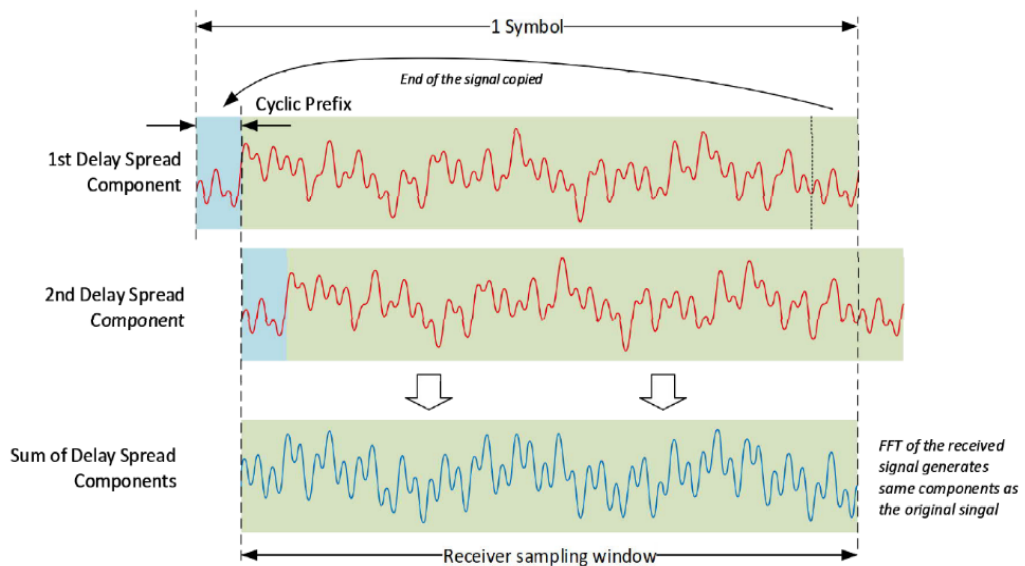
Στο LTE, η τεχνική SC-FDMA χρησιμοποιείται ως πολλαπλής πρόσβασης τεχνική (όπως και το OFDMA), το φέρον σήμα πρέπει να συμμορφώνεται με τις αρχές της ορθογωνικότητας. Η ορθογωνικότητα μπορεί να μην υφίσταται όταν υπάρχει μία ελαφρώς ολίσθηση στην συχνότητα του φορέα (Frequency Offset (CFO)) ή ολίσθηση στον χρόνο και αυτό μπορεί να δημιουργήσει παρεμβολή μεταξύ των φορέων (Inter-Carrier Interference (ICI))και παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple-Access Interference). Το OFDMA και το SC-FDMA είναι πολύ ευαίσθητα στην ολίσθηση στην συχνότητα του φορέα, μετατοπίσεις συχνότητας (φαινόμενο Doppler) και διαφορές χρονισμού που προκαλείται από καθυστέρηση μετάδοσης σήματος είναι παράγοντες που πρέπει να διορθώνονται άμεσα.

Στο LTE, το eNodeB παρακολουθεί ενεργά τον χρονισμό και τον συγχρονισμό συχνότητας των ληφθέντων frames άνω ζεύξης (uplink) και δίνει εντολή στις τερματικές συσκευές να εφαρμόσουν νέο χρονισμό και νέα συχνότητα, έτσι λοιπόν διορθώνει τους παραπάνω παράγοντες που αναφέρθηκαν ώστε να μην παραβιαστεί η ορθογωνικότητα. Διόρθωση χρονισμού και συχνότητας περιορίζουν συνολικά την ανοχή του συστήματος. Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος περιορίζει το μέγεθος της κυψέλης στα 100 χιλιόμετρα και τα όρια της μετατόπισης της συχνότητας (Frequency Offset) επιτρέπουν σε μία τερματική συσκευή να κινείται με πάνω από 500 χλμ/ώρα λόγω του φαινομένου Doppler.



3.4.3 Cyclic Prefixing

Για να μειωθούν οι διασυμβολικές παρεμβολές (ISI) που προκαλούνται από πολλαπλές διαδρομές του σήματος, χρησιμοποιούμε τόσο στο uplink όσο και στο downlink το λεγόμενο κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix (CP)). Το Cyclic Prefix πραγματοποιείται παίρνοντας ένα αντίγραφο από το τέλος του συμβόλου και το προσθέτουμε στην αρχή κάθε συμβόλου.



Εικόνα 9: Παράδειγμα πρόσθεσης κυκλικού προθέματος στο σήμα[12].

Από την Εικόνα 9 μπορούμε να δούμε την επίδραση που υπάρχει στο σύστημα λόγω της παρεμβολής που μπορεί να προκαλέσει το προηγούμενο σύμβολο στο επόμενο. Έτσι λοιπόν το κυκλικό πρόθεμα εμποδίζει τις πληροφορίες του προηγούμενου συμβόλου να παρεμβάλουν τις πληροφορίες του επόμενου. Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται συνήθως στο OFDM συστήματα αλλά είναι εφαρμόσιμο και στο SC-FDMA. Στην περίπτωση του SC-FDMA που χρησιμοποιείται στην άνω ζεύξη, το κυκλικό πρόθεμα μπορεί να διορθώσει προβλήματα χρονισμού μεταξύ των φορέων.

Παρόλα αυτά το κυκλικό πρόθεμα δημιουργεί επιβάρυνση στο σήμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για ανάκτηση πληροφορίας. Το LTE καθορίζει δύο διαφορετικά μήκη των Cycle Prefix, που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις



περιβαλλοντικές συνθήκες γύρω από την κυψέλη και στην επιθυμητή ακτίνα της. Το κανονικό μήκος του κυκλικού προθέματος είναι 4,7 μ .second - που αντιπροσωπεύει το 7% του συνολικού μήκους του συμβόλου και επεκτείνεται σε μήκος (16,67 μ .second) συνολικά το οποίο προκαλεί 25% επιβάρυνση. Το βέλτιστο μήκος του κυκλικού προθέματος εξαρτάται από το μέγεθος της κυψέλης και θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερο μέσα στην κυψέλη. Στην χειρότερη περίπτωση θα πρέπει το μέγεθος του κυκλικού προθέματος να είναι ίσο με χρονική διάρκεια που απαιτείται για να μεταδοθεί ένα σήμα από τον αποστολέα στον παραλήπτη, συν την χρονική διάρκεια που απαιτείται για να σταλεί πίσω στον αποστολέα η επιβεβαίωση της λήψης του σήματος από τον παραλήπτη (round-trip time (RTT)) το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος της κυψέλης. Το εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια με ιδιαίτερα μεγάλη καθυστέρηση.

Το Cycling Prefixing λοιπόν είναι απαραίτητο για το σύστημα OFDMA διότι δημιουργεί μία περίοδο ασφάλειας (guard period). Κατά την διάρκεια της περιόδου ασφάλειας οι φορείς που μεταδίδονται από διαφορετικούς πομπούς μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολή λόγω μικρού ασυγχρονισμού. Κατανοούμε λοιπόν ότι με την απουσία του κυκλικού προθέματος η ορθογωνικότητα των σημάτων θα κλονιζόταν [27].

3.4.4 Δομή πρωτοκόλλων και πλαισίων

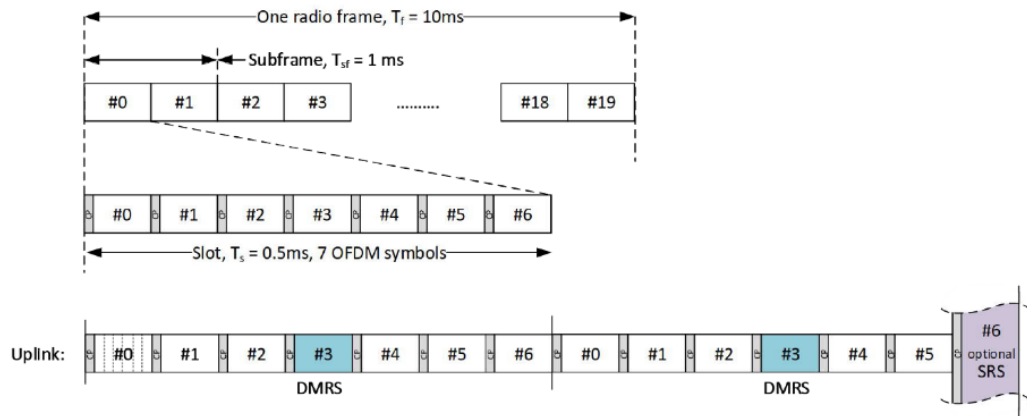
Το LTE βασίζεται καθαντού στο πρωτόκολλο μεταφοράς πακέτων. Η μετάδοση των πακέτων γίνεται με Radio Frames, Subframes και slots, όπου το καθένα από αυτά έχει την δική του δομή και σκοπό. Ένα Radio Frame του LTE διαρκεί 10 ms και αποτελείται από 20 slot των 0.5 ms. Ένα Subframe αποτελείται από 2 συνεχόμενα slots.

Στον άξονα των συχνοτήτων το LTE κανάλι χωρίζεται σε blocks τα οποία ονομάζονται Physical Resource Blocks (PRB), το καθένα από αυτά καλύπτει ένα εύρος ζώνης 180 KHz και διαθέτουν 12 υποφέροντα σήματα (12 OFDM Subcarriers). Ένα κανάλι LTE διαθέτει τουλάχιστον 6 Physical Resource Blocks με εύρος ζώνης καναλιού 1.4 MHz. Πρακτικά ένα μόνο κελί καλύπτει εύρος ζώνης 20 MHz. Στο FDD (Frequency Division Duplex), τόσο το uplink όσο και το downlink έχουν τα δικά τους ξεχωριστά καταναεμημένα Resource Blocks. Στο λογικό επίπεδο το κανάλι σχηματίζει ένα δισδιάστατο πλέγμα όπου ο ένας άξονας αντιπροσωπεύει την συχνότητα και ο άλλος την μονάδα του χρόνου.

Κάθε Subframe μπορεί να αναπαρασταθεί και ως ένα μεταδιδόμενο πακέτο και συγκεκριμένες θέσεις σε ένα πλαίσιο μπορούν να υποδηλώσουν συγκεκριμένες λειτουργίες. Για παράδειγμα τα πρώτα Subframes σε ένα Radio Frame είναι δεσμευμένα για το κανάλι μετάδοσης (Broadcast Channel (BCH)), το οποίο περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες για την ταυτότητα του κελιού. Όσο αφορά το uplink το σύμβολο #3 περιέχει το σήμα αναφοράς αποδιαμόρφωσης που περιλαμβάνει πληροφορίες χρήσιμες προς τον σταθμό βάσης όπως μικρορύθμιση χρονισμού και



συχνότητας του subframe. Επιπρόσθετα το τελευταίο σύμβολο του slot μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως Sounding Reference Signal (SRS), το οποίο χρησιμοποιείται για να ελέγξει την ποιότητα του καναλιού. Το Sounding Reference Signal (SRS) μεταδίδεται από την συσκευή στον σταθμό βάσης.



Εικόνα 10: Τα ραδιοπλαίσια (radio frames) τα οποία αποτελούνται από 2 slots και 14 σύμβολα.[16]

3.4.5 Τυχαία Πρόσβαση

Προκειμένου να γίνει μία σύνδεση RRC (Radio Resource Control) πρωτοκόλλου, η οποία είναι απαραίτητη για την επικοινωνία μεταξύ τελικής συσκευής και σταθμού βάσης, είναι απαραίτητο στην τελική συσκευή να αρχικοποιηθεί η συχνότητα και ο χρονισμός. Αυτός ο αρχικός συγχρονισμός γίνεται από μία διεργασία της τυχαίας πρόσβασης, η οποία ελέγχεται από το επίπεδο MAC (Medium Access Control). Ο σταθμός βάσης αναγνωρίζει την τελική συσκευή και αναθέτει κανάλια τα οποία θα χρησιμοποιηθούν από αυτήν (Scheduling). Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως RACH (Random Access Channel).

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία RACH θα πρέπει πρώτα η τελική συσκευή (UE) να συγχρονιστεί με της κάτω ζεύξης ροής του σταθμού βάσης (eNodeB's downlink stream) χρησιμοποιώντας συγχρονισμένα πλαίσια PSS και SSS (Primary synchronization signal και Secondary synchronization signal). Έτσι λοιπόν λαμβάνοντας τον συγχρονισμό της κάτω ζεύξης, η τελική συσκευή μπορεί να λάβει το Master Information Block (MIB), το οποίο μεταδίδεται μέσω το φυσικού επιπέδου από το κανάλι PBCH (Physical Broadcast Channel) και περιλαμβάνει πληροφορίες ζωτικής σημασίας προκειμένου να εδραιωθεί η σύνδεση μεταξύ τελικής συσκευής και σταθμού βάσης.



Όταν λοιπόν η διαδικασία RACH αρχικοποιηθεί, η τελική συσκευή δεν έχει συγχρονιστεί στην άνω ζεύξη με τον σταθμό βάσης. Έτσι το πρώτο κομμάτι ενός RACH σήματος χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό της άνω ζεύξης (Uplink Synchronization) και το δεύτερο κομμάτι το οποίο ταυτοποιεί την διασυνδεδεμένη συσκευή. Έτσι ο σταθμός βάσης αναθέτει μία προσωρινή ταυτότητα στο στην τελική συσκευή και της παραχωρείται η σύνδεση της άνω ζεύξης.

Η φυσική δομή του RACH σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην παρεμβαίνει σε άλλες μεταδόσεις. Γ'αυτό το λόγο, το χρονοδιάγραμμα της διαδικασίας RACH δεν είναι εντελώς τυχαίο, αλλά στοχεύει σε συγκεκριμένα υποπλάισια ανάλογα με τον προγραμματισμό που έχει γίνει στην διαδικασία RACH, όπως υποδεικνύεται από το Master Information Block της κυψέλης.

Για να γίνει επιτυχώς ο συγχρονισμός μεταξύ πολλών τελικών συσκευών στην άνω ζεύξη του LTE χρησιμοποιείται η μέθοδος Timing Advance-method, όπου ο σταθμός βάσης ενημερώνει κάθε τελική συσκευή πόσο νωρίτερα πρέπει να στείλει το πακέτο της έτσι ώστε το σήμα που λαμβάνεται από τον σταθμό βάσης να τοποθετείται στο σωστό time slot. Η μέθοδος Timing Advance έχει ομοιότητα με τον συγχρονισμό πλαισίου κάτω ζεύξης και είναι διαφορετικό για κάθε τελική συσκευή ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους. Αρχικά μίας τελικής συσκευής το Timing Advance υπολογίζεται από τον σταθμό βάσης από τον χρόνο του σήματος RACH και από τον χρόνο της διόρθωσης σφάλματος το οποίο αποστέλλεται πίσω στο πακέτο δεδομένων RAR (Random Access Response). Έπειτα από τον αρχικό συγχρονισμό ο σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει τα σήματα αναφοράς της άνω ζεύξης, όπως για παράδειγμα το σήμα αναφοράς αποδιαμόρφωσης (Demodulation Reference Signal (DMRS)) το οποίο μεταδίδεται ανάμεσα από κάθε slot, για να προσαρμόσει το Timing Advance της τελικής συσκευής. Το μέγιστο αρχικοποιημένο Timing Advance που μπορεί να οριστεί στην περίπτωση αυτή είναι 667 μ s, το οποίο αντιστοιχεί σε μία κυψέλη ακτίνας 100 χιλιομέτρων. Μετά την αρχικοποίηση το Timing Advance μπορεί να προσαρμοστεί για μεγαλύτερες ακτίνες κυψελών[35].

3.5 Narrowband Internet of Things

Σε αυτή την ενότητα εισάγεται η έννοια του Narrowband Internet of Things (NB-IoT) και η σχέση του με το LTE. Η ανάλυση θα επικεντρωθεί στο φυσικό επίπεδο της άνω και κάτω ζεύξης και στο επίπεδο MAC.

Η πρώτη αναφορά στο NB-IoT κυκλοφόρησε τον Αύγουστο του 2016 ως μέρος του 3GPP της έκδοσης 13 και αργότερα επεκτάθηκε στην έκδοση 14. Η εργασία για τις προδιαγραφές του NB-IoT αρχικά ξεκίνησαν στο φόρουμ GSMA NB-IoT με καθοδήγηση του οργανισμού της 3GPP και των εταιριών όπως η NOKIA, η Alcatel-Lucent και η Ericsson. Η προδιαγραφή του NB-IoT αρχικά αναφέρθηκε ως LTE Cat-M2 ή LTE τύπου 2 προδιαγραφή για κυψελοειδείς IoT συσκευές επικοινωνίας οι οποίες προέρχονται από την προδιαγραφή του LTE Cat-M1 το οποίο αναφέρεται σε χαμηλή ισχύ. Το LTE-MTC (LTE Cat-M1) ορίστηκε στην προηγούμενη έκδοση της 3GPP την 12.

Η βασική προοπτική πίσω από την αρχιτεκτονική του NB-IoT είναι να γίνει χρήση του LTE δικτύου με λιγότερη ισχύ από αυτή που χρησιμοποιείται στα κυψελωτά δίκτυα και



υιοθετώντας τις ίδιες τεχνολογίες για την προσάρτηση του NB-IoT στο υπάρχον δίκτυο. Το δίκτυο του NB-IoT μπορεί να συνυπάρξει με το LTE και να χρησιμοποιήσει τη δομή του και άλλα στοιχεία όπως το hardware των σταθμών βάσης και του δικτύου κορμού. Χαρακτηρίζεται από μία αρκετά «ελαφριά» διεπαφή αέρα η οποία έχει εγκατασταθεί στην κορυφή του LTE δικτύου. Παρόλα αυτά στο NB-IoT για χάρη της απλούστευσης του σχεδιασμού των modem, η συμβατότητα με παλαιότερα συστήματα δεν καθίσταται δυνατή (No backward compatibility). Έτσι λοιπόν οι περισσότερες δυνατότητες του LTE-Advanced δεν υποστηρίζονται στο NB-IoT όπως η συνάθροιση φορέων (carrier aggregation), διπλή συνδεσιμότητα και υπηρεσίες συσκευής προς συσκευή.

Οι περισσότερες από τις τεχνικές αλλαγές που εφαρμόζονται στο NB-IoT από τις προδιαγραφές του προτύπου του LTE μπορούν να προκύψουν από την ανάγκη για χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και απλούστερες απαιτήσεις υλικού. Κάθε σταθμός βάσης θα μπορεί να εξυπηρετεί γύρω στις 55000 συσκευές. Θα έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει αποδοτικά συσκευές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (π.χ. μέγιστο throughput κάποιες εκατοντάδες kilobits/sec) με ως αντάλλαγμα την απλότητα και το χαμηλό κόστος. Οι σταθμοί βάσης του NB-IoT παραμένουν με την ονομασία eNodeB και το δίκτυο αυτό μπορεί να υπάρξει ως μεμονωμένο (standalone) ή να χρησιμοποιεί στοιχεία από το υπάρχον LTE δίκτυο.

Η ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στην άνω ζεύξη μιας NB-IoT σύνδεσης βασίζεται στον αριθμό των χρησιμοποιούμενων υποφερουσών. Στην περίπτωση πολλών υποφερουσών (multi-tone), ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να φτάσει πάνω από 50 kbps και στην περίπτωση μίας υποφέρουσας (single-tone) πάνω από 20 kbps. Ο αριθμός των υποφερουσών εξαρτάται από τις δυνατότητες που έχει η IoT συσκευή (UE). Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στην κάτω ζεύξη έως και 200 kbps χρησιμοποιώντας ένα resource block (PRB).

Το NB-IoT απαιτεί μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας έτσι ώστε η μπαταρία της συσκευής (5 Wh) να διαρκεί έως και 10 χρόνια και αναφερόμαστε για συσκευές οι οποίες θα μεταδίδουν μέσα στην μέρα κάποια bytes πληροφορίας. Η σύνδεση του NB-IoT συμπεριφέρεται ως half-duplex, απλοποιώντας τον σχεδιασμό του RF front-end. Από πλευράς του σταθμού βάσης η επικοινωνία χαρακτηρίζεται ως full duplex έτσι ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική η εκμετάλλευση του φάσματος. Η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς της τελικής συσκευής είναι 23 dBm (200 mW). Επιπλέον η τεχνολογία του NB-IoT προσφέρει βελτιωμένη κάλυψη στους κλειστούς χώρους, χαμηλή ευασθησία στην καθυστέρηση και λιγότερες απαιτήσεις υλικού που σημαίνει χαμηλό κόστος παραγωγής. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία NB-IoT είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφοριών και χαμηλή ενεργειακή απαίτηση. Η κάλυψη της κυψέλης μπορεί να φτάσει πάνω από 100km με μέγιστη απώλεια σύζευξης της τάξης των 164 dB. Η απλούστευση του πρωτοκόλλου αυτού δημιουργεί κάποια θέματα όπως η δυνατότητα της μεταλλαγής σταθμών βάσης όταν μία συσκευή «βγαίνει» από την κάλυψη του ενός σταθμού βάσης και «μπαίνει» στην κάλυψη ενός άλλου, το λεγόμενο handover. Έτσι λοιπόν το handover είναι αδύνατον να λειτουργήσει στο NB-IoT και αντί αυτού η συσκευή όταν χάσει την σύνδεση από τον σταθμό βάσης θα πρέπει να κάνει εκ νέου αναζήτηση προκειμένου να συνδεθεί σε ένα νέο σταθμό βάσης. Γενικά λοιπόν η έννοια της κινητικότητας των συσκευών σε συνδέσεις IoT και M2M (Machine to Machine) δεν αποτελεί προτεραιότητα αφού σε πολλές εφαρμογές οι συσκευές αυτές παραμένουν στάσιμες (π.χ. μετρητές Η/Μ ακτινοβολίας).



3.6 Εφαρμογή

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των κυψελωτών IoT δικτύων είναι ότι έχουν την δυνατότητα να μπορούν να συνυπάρξουν με τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και με την ελάχιστη παρεμβολή. Το πρωτόκολλο του NB-IoT έχει αναπτυχθεί σε 3 διαφορετικές λειτουργίες, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του υπάρχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αυτά είναι το In-band, Guard-band και το Standalone. Στο παρακάτω σχήμα αναφέρονται επεξηγηματικά οι 3 λειτουργίες .

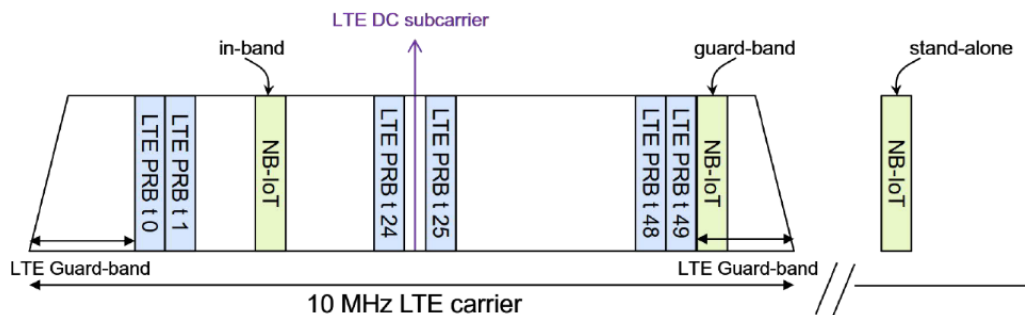
Στις 2 πρώτες λειτουργίες (In-band,Guard-band) το δίκτυο του IoT λειτουργεί στις αδειοδοτημένες μπάντες του GSM και του LTE. Επίσης έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί τον ίδιο σταθμό βάσης καθώς και την υπάρχουσα κυψέλη. Το NB-IoT μπορεί να συνυπάρξει επίσης με τις κυψέλες του LTE, του GSM και του UMTS στην ίδια μπάντα συχνοτήτων.

Στην In-band λειτουργία ένα ή περισσότερα resource blocks μεταξύ των φορέων του LTE είναι δεσμευμένα για το δίκτυο του IoT. Παρόλα αυτά η δέσμευση των resource blocks που αφορούν το NB-IoT και το υπάρχον δίκτυο δεν είναι προκαθορισμένη διότι αρκετές φορές σύγκρουση με τα σήματα συγχρονισμού του LTE.

Στην λειτουργία Guard-band το δίκτυο του IoT έχει προκαθορισμένες θέσεις για δέσμευση των resource blocks. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις θα πρέπει οι φορείς του NB-IoT να είναι ορθογωνικοί με τα υπάρχοντα Physical Resource Blocks του LTE.

Ως συμπέρασμα κατανοούμε ότι στις λειτουργίες In-band και Guard-band γίνεται προσπάθεια μείωσης της χρήσης συχνοτήτων και επαναχρησιμοποίηση του υπάρχοντος διαθέσιμου φάσματος. Κατανοούμε λοιπόν ότι έτσι οι φορείς που θέλουν να εισάγουν την τεχνολογία NB-IoT στο υπάρχον δίκτυο LTE δεν είναι δαπανηρό. Συχνότητες του GSM (700MHz,800MHz,900MHz) και μπάντες συχνοτήτων του LTE περίπου 1-2 GHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης.

Στην λειτουργία του Standalone το δίκτυο του NB-IoT μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα δίκτυα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα LPWAN (Low Power Wide Area Network) όπου υπάρχει μόνο το τοπικό IoT δίκτυο. Για την λειτουργία Standalone το ελάχιστο φάσμα που απαιτείται είναι 180 kHz και 2* 10 kHz μπάντα προστασίας (Guard-band) μία στην κάθε πλευρά για να αποφευχθούν παρεμβολές από τα γειτονικά σήματα. Στην λειτουργία FDD (Frequency Division Duplex), η άνω και η κάτω ζεύξη χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες και η τελική συσκευή άλλοτε λαμβάνει και άλλοτε στέλνει δεδομένα (λειτουργία Half Duplex)[18].



Εικόνα 11: Η εφαρμογή του NB-IoT στο φάσμα του LTE (In-band,Guard-band) καθώς και η λειτουργία του Standalone. [14]

Το NB-IoT λοιπόν χρησιμοποιεί ένα PRB (Physical Resource Block) το οποίο καλύπτει 180kHz φάσματος που είναι απαραίτητο για την επικοινωνία. Στην λειτουργία πολλαπλών φορέων (Multi-Carrier-Configuration), ο σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλαπλά Physical Resource Blocks αν εάν του παραχωρηθούν. Παρόλα αυτά όμως κάθε τελική συσκευή (UE) λειτουργεί σε ένα Resource Block κάθε φορά. Ο σταθμός βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα επιπλέον κανάλι φορέα για τον φορέα τύπου άγκυρα ο οποίος να μπορεί να καθοδηγήσει τις συσκευές σε μία λιγότερο χρησιμοποιημένη μπάντα συχνοτήτων εάν χρειαστεί. Μετά τον επαναπροσδιορισμό η τελική συσκευή λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα φορέα για άνω ζεύξη και έναν για κάτω ζεύξη.



3.7 Κάτω Ζεύξη

Παρομοίως με το LTE το NB-IoT χρησιμοποιεί την τεχνική OFDM για να χωρίσει την μπάντα συχνοτήτων σε πολλαπλά υποφέροντα σήματα. Κάθε OFDM σύμβολο μεταδίδεται με το κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix) έτσι ώστε τα σύμβολα να προστατευθούν από το Multipath Fading και απόκλιση χρονισμού συμβόλων. Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στο LTE. Το σύστημα του NB-IoT αναφέρεται ως half-duplex FDD σύνδεσμος από την πλευρά της τελικής συσκευής αφού δεν είναι απαραίτητο όπως γνωρίζουμε η τελική συσκευή στην προκειμένη περίπτωση να μεταδίδει και να λαμβάνει ταυτόχρονα.

Αντίθετα ο σταθμός βάσης θα πρέπει να υποστηρίζει σύνδεσμο full-duplex διότι θα πρέπει να είναι σε φάση να μπορεί να εξυπηρετήσει και άλλες τελικές συσκευές (UEs). Το Duplexing μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης γίνεται υπό τον έλεγχο του σταθμού βάσης, έτσι λοιπόν την στιγμή που μπορεί να υπάρξει σύνδεση άνω ζεύξης στην τελική συσκευή αποκλείεται να υπάρξει σύνδεση κάτω ζεύξης. Μεταξύ κάθε εναλλαγής από άνω σε κάτω ζεύξη, υπάρχει ένα subframe προστασίας ώστε να μπορεί η τελική συσκευή να κάνει την απαραίτητη επεξεργασία και εναλλαγή. Το NB-IoT προσφέρει 2 επιλογές, 15 kHz υποφερουσών με κανονικό ή επαυξημένο κυκλικό πρόθεμα ή 3,75 kHz υποφερουσών. Στην λειτουργία 3,75 kHz ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων μειώνεται αρκετά ώστε να αποκτήσουμε πιο στενό φάσμα. Οι παράμετροι των καναλιών στο NB-IoT είναι ίδιοι με αυτές στο LTE. Στην λειτουργία των 15kHz το φάσμα των 180 kHz χωρίζεται σε 12 υποφέροντα σήματα. Για την διαμόρφωση των υποφερόντων σημάτων χρησιμοποιούμε χαμηλής τάξης τεχνική διαμόρφωσης όπως BPSK ή QPSK. Το NB-IoT χρησιμοποιεί Tail-Biting Convolutional Coding (TBCC) για διόρθωση σφαλμάτων αντί για Turbo Code που χρησιμοποιείται στο LTE διότι είναι υψηλής πολυπλοκότητας κώδικας ο οποίος δεν μπορεί να χρησιμοποιείται από συσκευές που είναι περιορισμένες σε υπολογιστικούς πόρους.

Τα κανάλια της άνω και κάτω ζεύξης για το Narrow-Band IoT χωρίζονται σε 5 φυσικά κανάλια για την κάτω και 2 για την άνω ζεύξη[15].

Αυτά είναι τα:

- NPBCH: Narrowband Physical Broadcast Channel (Φυσικό κανάλι μετάδοσης στενής ζώνης)
- NPDSCH: Narrowband Physical Downlink Shared Channel (Φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι κάτω ζεύξης στην στενή ζώνη)
- NPDCCH: Narrowband Physical Downlink Control Channel (Φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης)



- NPSS: Narrowband Primary Synchronization Signal (Πρωτεύον σήμα συγχρονισμού στενής ζώνης)
- NSSS: Narrowband Secondary Synchronization Signal (Δευτερεύον σήμα συγχρονισμού στενής ζώνης)
- NPUSCH: Narrowband Physical Uplink Shared Channel (Φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι άνω ζεύξης στην στενή ζώνη)
- NPRACH: Narrowband Physical Random Access Channel (Φυσικό κανάλι τυχαίας πρόσβασης στενής ζώνης)

Παρόλα αυτά στο LTE διαθέτουμε άλλα 3 κανάλια κάτω και άλλο 1 κανάλι άνω ζεύξης τα οποία αφαιρέθηκαν από την τεχνολογία του NB-IoT για λόγους απλότητας.

Παρακάτω θα γίνει αναλυτική επεξήγηση των φυσικών καναλιών που προαναφέρθηκαν:

- Narrowband Physical Broadcast Channel : Το φυσικό κανάλι μετάδοσης στενής ζώνης είναι το βασικότερο κανάλι της κάτω ζεύξης, το οποίο χρησιμοποιείται για να στέλνει πληροφορίες ευρέος φάσματος στις κινητές ή τελικές συσκευές. Για παράδειγμα μπορεί να μεταδώσει πληροφορίες στην τελική συσκευή όπως τις ρυθμίσεις δικτύου που έχουν εφαρμοστεί ώστε να καθίσταται δυνατή η σύνδεση της κινητής συσκευής με τον σταθμό βάσης .
- Narrowband Physical Downlink Shared Channel : Το Φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι κάτω ζεύξης στην στενή ζώνη είναι το κύριο κανάλι κάτω ζεύξης κίνησης πακέτων προς τον χρήστη. Το φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι κάτω ζεύξης στην στενή ζώνη περιλαμβάνει το διαμοιραζόμενο και το κανάλι σελιδοποίησης της κάτω ζεύξης για τις NB-IoT συσκευές. Το μπλοκ μεταφοράς (Transport Block Size) του NPDSCH φτάνει το μέγιστο μέγεθος των 680 bits.
- Narrowband Physical Downlink Control Channel: Το Φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης είναι υπεύθυνο για να ενημερώνει το UE (τελική συσκευή) για δέσμευση πηγών των καναλιών κάτω ζεύξης και της σελιδοποίησης. Επιπλέον το φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης περιλαμβάνει το δείκτη ελέγχου κάτω ζεύξης (Downlink Control Indicator), το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες για την δέσμευση πηγών στην άνω και στην κάτω ζεύξη.
- NSS (Narrowband Synchronization Signals): Προκειμένου να αρχικοποιηθεί συγχρονισμός συχνότητας και χρονισμού, χρησιμοποιούνται 3 σήματα τα οποία είναι, Narrowband Primary Synchronization Signal NPSS (Πρωτεύοντα σήματα συγχρονισμού στενής ζώνης), Narrowband Secondary Synchronization Signal NSSS (Δευτερεύοντα σήματα συγχρονισμού στενής ζώνης) και Narrowband Reference Signal NRS (Σήματα αναφοράς στενής ζώνης).



3.8 Άνω ζεύξη

Όσο αφορά την άνω ζεύξη το NB-IoT χρησιμοποιεί 2 λειτουργίες μετάδοσης, την μονοτονική και πολυτονική η οποία βασίζεται στον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων στην άνω ζεύξη και στις δυνατότητες της τελικής συσκευής UE. Η πολυτονική μετάδοση βασίζεται στο SC-FDMA παρομοίως με το LTE, περιλαμβάνει 15 KHz υποφερόντων σημάτων, 0.5ms slot, και 1ms υποπλαίσιο όπως ακριβώς συμβαίνει και στο LTE. Αυτή η διαμόρφωση ονομάζεται και ως διαμόρφωση κλάσης 1. Αντίθετα στην μονοτονική μετάδοση, η τελική συσκευή μπορεί να μεταδώσει μόνο με την βοήθεια ενός υποφέροντος σήματος. Επιπλέον η μονοτονική μετάδοση υποστηρίζει υποφέροντα σήματα των 15KHz και των 3.75KHz χρησιμοποιώντας τάξη διαμόρφωσης BPSK. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για την άνω ζεύξη μπορεί να είναι πάνω από 50kbps για την πολυτονική και περίπου 20 kbps για την μονοτονική. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται είδη διαμόρφωσης PSK (Phase Shift Keying) όπως BPSK, QPSK, 8-PSK. Αντιθέτως στο LTE γνωρίζουμε ότι χρησιμοποιείται υψηλής απόδοσης διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

Ομοίως με τη διεπαφή αέρα LTE, ο συγχρονισμός σήματος στην άνω ζεύξη παρέχεται μέσα σε κάθε slot. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός συχνότητας το NB-IoT στην άνω ζεύξη χρησιμοποιεί δύο σήματα αναφοράς: το σήμα αναφοράς αποδιαμορφώσεως (DMRS) και το Σήμα Αναφοράς (SRS). Το DMRS είναι ένα σήμα συγχρονισμού που υπάρχει στο κάθε slot, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη μεμονωμένης μετάδοσης. Το DMRS μεταδίδεται στο 4ο ή στο 5ο μπλοκ του slot, ανάλογα με το εύρος συχνότητας του φέροντος σήματος. Παρόμοια σήματα αναφοράς χρησιμοποιούνται και στο LTE στην διεπαφή αέρα. Το σήμα αναφοράς DMRS χρησιμοποιεί την ακολουθία Zadoff-Chu για ασφαλή λήψη. Ο δεύτερος τύπος του σήματος αναφοράς είναι το σήμα αναφοράς SRS (Sounding Reference Signal), το οποίο μπορεί να μεταδοθεί από οποιαδήποτε τελική συσκευή UE κατόπιν αιτήματος του σταθμού βάσης eNodeB και καλύπτει ολόκληρο το φυσικό μπλοκ πόρων. Αφού λοιπόν το SRS εκπέμπεται σε όλο το διαθέσιμο φάσμα ο σταθμός βάσης μπορεί πλέον να αναθέσει άλλα υποφέροντα σήματα για την τελική συσκευή προκειμένου να καλυτερεύσει η επικοινωνία[22].

Προκειμένου να λειτουργήσει αποδοτικά το NB-IoT στην άνω ζεύξη απαιτούνται 3 συγχρονισμοί:

- Timing acquisition (λειτουργία με την οποία προσδιορίζεται ο σωστός χρόνος για την έναρξη του συμβόλου).
- Συγχρονισμός συχνότητας (λειτουργία με την οποία εξασφαλίζεται η αδιάκοπη επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη και αποφεύγονται σφάλματα λόγω του φαινομένου Doppler και αστοχίας υλικού).
- Συγχρονισμός δειγματοληψίας ρολογιού.



3.8.1 Φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι άνω ζεύξης στενής ζώνης.

Το φυσικό επίπεδο του δικτύου NB-IoT αποτελείται από 2 τύπους καναλιών, το φυσικό διαμοιραζόμενο κανάλι άνω ζεύξης στενής ζώνης (NPUSCH) και το φυσικό κανάλι τυχαίας πρόσβασης στενής ζώνης (NPRACH) τα οποία μεταδίδουν δεδομένα χρήστη και ελέγχου μεταξύ τελικής συσκευής και σταθμού βάσης.

Το NPUSCH χρησιμοποιείται για την μεταφορά πληροφοριών μέσω του διαμοιραζόμενου καναλιού άνω ζεύξης (UL-SCH) στο ανώτερο επίπεδο, καθώς και υβριδικά αυτοματοποιημένα και επαναλαμβανόμενα αιτήματα (HARQ) για αναγνώριση ή μη-αναγνώριση (ACKS / NACKS) για την απόκριση της μετάδοσης των δεδομένων στην τελική συσκευή UE. Το μέγιστο μέγεθος μπλοκ μεταφοράς ενός πακέτου του καναλιού NPUSCH είναι 1000bits.

Στο πιο υψηλό επίπεδο τα πακέτα του καναλιού NPUSCH μπορούν να χωριστούν σε 2 τύπους, Format 1 και Format 2 . Τα πακέτα τύπου Format1 χρησιμοποιούνται για μετάδοση στην άνω ζεύξη γενικών δεδομένων και μπορούν να εξυπηρετήσουν την πολυτονική λειτουργία που προαναφέρθηκε παραπάνω. Στο Format 2 τα πακέτα του καναλιού NPUSCH χρησιμοποιούνται για την μέθοδο HARQ και στο επίπεδο MAC για τον έλεγχο καναλιών το οποίο περιέχει πακέτα από αναγνωρίσεις (acknowledgements) και άλλες πληροφορίες ελέγχου. Το Format 2 χρησιμοποιεί μόνο μονοτονική λειτουργία και χρησιμοποιεί επαναλαμβανόμενους κώδικες για αυξημένη εμπιστευτικότητα.

3.8.2 Κανάλι τυχαίας πρόσβασης στενής ζώνης.

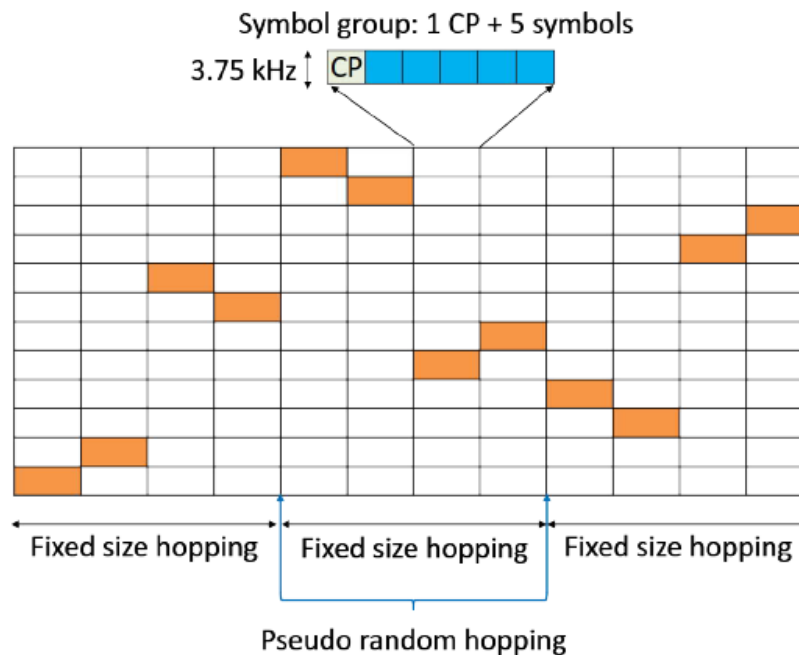
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύνδεση με τον σταθμό βάσης, η τελική συσκευή χρησιμοποιεί μία διαδικασία τυχαίας πρόσβασης η οποία ονομάζεται φυσικό κανάλι τυχαίας πρόσβασης στενής ζώνης (NPRACH). Η τελική συσκευή μεταδίδει το NPRACH αφού αρχικοποιηθεί ο συγχρονισμός μέσω σήματος συγχρονισμού της κινητής μετάδοσης και ληφθούν οι πληροφορίες που αφορούν την αρχικοποίηση της σύνδεσης. Η διεργασία της τυχαίας πρόσβασης έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να προκαλεί την λιγότερη δυνατή παρεμβολή μεταξύ των άλλων χρηστών που μπορεί να προκληθεί λόγω κακού συγχρονισμού συχνότητας και κακού χρονισμού άνω ζεύξης.

Η διεργασία του NB-RACH έχει αρκετές διαφορές σε σχέση με του PRACH που χρησιμοποιείται στο LTE, το οποίο είναι σχεδιασμένο να δεσμεύει 6 μπλοκ πόρων (resource blocks) στα υποπλάισια της άνω ζεύξης τα οποία μεταφράζονται σε 1.08 MHz εύρους φάσματος. Λόγω των 180 KHz του συνολικού εύρους φάσματος για τα NB-IoT συστήματα, η χρησιμοποίηση του LTE PRACH είναι αδύνατη.

Επιπρόσθετα λόγω ότι μπορεί να υπάρξει κακός συγχρονισμός χρόνου, το NB-RACH χρησιμοποιεί τις ακολουθίες Zadoff-Chu (ZC). Αυτά τα σήματα (σταθερού πλάτους μηδενικής συσχέτισης) ή αλλιώς CAZAC ακολουθίες, έχουν πολύ χαμηλό PAPR (Peak to Average Power Ratio) το οποίο το καθιστά δυνατό να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες μεταδόσεις και να επεκταθεί η κάλυψη της κυψέλης. Οι ακολουθίες Zadoff-Chu προσφέρουν πολύ καλή αυτοσυσχέτιση και επίσης διασταυρωμένη συσχέτιση. Έτσι τις κάνει κατάλληλες για την διαδικασία PRACH. Το NPRACH βασίζεται στο PRACH του



LTE, με τη διαφορά ότι αντί να μεταδίδει ένα μεγάλο κομμάτι μία φορά, το NPRACH χρησιμοποιεί μετάδοση ευρείας συχρότητας με ένα υποφέρον σήμα. Το μοτίβο hopping αποτελείται από 2 στρώματα, το εσωτερικό με σταθερό μέγεθος και την εξωτερική ψευδοτυχαία ακολουθία. Κάθε μεταδιδόμενη ακολουθία Zadoff-Chu είναι ορθογωνική με τα γειτονικά υποφέροντα σήματα.



Εικόνα 12: Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την άνω ζεύξη του NB-IoT που χρησιμοποιεί το μοτίβο τυχαίας πρόσβασης συχνότητας για χαμηλό εύρος ζώνης για σύνδεση στον σταθμό βάσης.[18]

Ένας από τους σκοπούς της διαδικασίας της τυχαίας πρόσβασης είναι ο συγχρονισμός με την συσκευή του χρήστη. Χωρίς τον συγχρονισμό η ορθογωνικότητα του καναλιού της άνω ζεύξης δεν θα ήταν δυνατή. Η αρχική διόρθωση χρονισμού που καθορίζεται στη διαδικασία RACH (ορίζεται στο πλαίσιο MAC RAR) μπορεί να φτάσει τα 667,7 μ s, και η μέγιστη διόρθωση ανά πλαίσιο είναι μέχρι 16,7 μ s. Αυτοί οι χρόνοι αντιστοιχούν σε 200 km και 5 km αντίστοιχα, ως αποτέλεσμα το μέγιστο εύρος της κυψέλης μειώνεται στα 100 km.



3.8.3 Προγραμματισμός και Medium Access Control

Ο σκοπός του Medium Access Control ή αλλιώς MAC είναι να ελέγχει τη χρήση στο μέσο κοινό μεταφοράς έτσι ώστε να βεβαιωθεί ότι κάθε συσκευή έχει πρόσβαση στο κοινό μέσο μεταφοράς τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθούν συγκρούσεις μεταδόσεων. Έτσι λοιπόν δίνεται η δυνατότητα στην κάθε συσκευή να μπορεί να χρησιμοποιήσει για κάποιο χρονικό διάστημα το μέσο. Στο NB-IoT και στο LTE κάθε κυψέλη έχει ένα πλέγμα πόρων συχνότητας-χρόνου για άνω και κάτω ζεύξη, από τα οποία οι κυψέλες μπορούν να προορίζονται για διάφορες ανάγκες. Χρησιμοποιώντας το φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης στενής ζώνης, ο σταθμός βάσης μπορεί δείξει ποια υποφέροντα σήματα είναι δεσμευμένα για την τελική συσκευή η οποία θα τα χρησιμοποιήσει για πιθανή άνω μετάδοση.

Το NB-IoT χρησιμοποιεί την ασύγχρονη προσαρμοστική Υβριδική Αυτόματη Επαναλαμβανόμενη Αίτηση (HARQ) τόσο για κάτω όσο και για άνω ζεύξη. Η τεχνολογία HARQ έχει δύο κύριες μεθόδους, την ARQ (αυτόματη επανάληψη αιτήματος) και την FEC (εμπρόσθια διόρθωση σφαλμάτων) χρησιμοποιώντας την Tail-Biting Convolution Coding (TBCC)[24].

3.8.4 Συσκευή Χρήστη (UE)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο σχεδιασμός του εξοπλισμού χρήστη (UE) βρίσκεται στο επίκεντρο της προδιαγραφής του NB-IoT. Ο σταθμός βάσης (eNodeB) δεν περιμένει από τον εξοπλισμό χρήστη να λάβει δεδομένα όταν είναι προγραμματισμένη μετάδοση ή λιγότερο από ένα υποπλάισιο μετά το τέλος της αναμενόμενης μετάδοσης (λειτουργία half-duplex). Η μέγιστη ισχύς μετάδοσης της συσκευής χρήστη οριοθετείται στα 100mw δηλαδή 20 dBm. Έχοντας μικρότερο απαιτούμενο εύρος ζώνης για την συσκευή χρήση, το NB-IoT επιτρέπει στο υλισμικό της συσκευής να λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα δειγματοληψίας. Μία κεραία της τελικής συσκευής χρήστη είναι δυνατόν να παρακολουθεί μόνο ένα σήμα αναφοράς και μία μονή HARQ διαδικασία σε σχέση με τις προδιαγραφές του LTE.

Για να γίνει δυνατή η μέγιστη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της τελικής συσκευής (UE), δηλαδή διάρκεια περίπου 10 ετών, το NB-IoT εισάγει πολλές λειτουργίες που βοηθούν στην εξοικονόμηση ενέργειας, σε σημείο τέτοιο ώστε μία συσκευή να μεταδίδει μέχρι 200 bytes ημερησίως. Η προδιαγραφή του NB-IoT εισάγει επίσης μία λειτουργία, την ενισχυμένη μη-συνεχόμενη λήψη (enhanced Discontinuous Reception (eDRX)), όπου η συσκευή χρήστη μπορεί να «πέσει» σε λειτουργία βαθιάς αδράνειας κλείνοντας την ραδιοεκπομπή για περισσότερο από 40 λεπτά. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του eDRX, ο σταθμός βάσης αποτρέπει την τελική συσκευή να παραμείνει μέσα στην κυψέλη και να διευθετήσει τα μηνυμάτα του. Αφότου λήξει η λειτουργία του eDRX, η συσκευή χρήστη ενεργοποιεί την λειτουργία Listening για περιορισμένο χρόνο ώστε να λάβει τα



Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)**

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

απαραίτητα μηνύματα σελιδοποίησης από τον σταθμό βάσης. Μετά από αυτό η συσκευή χρήστη θα ξεκινήσει πάλι μία νέα συνεδρία eDRX. Η πλήρης προδιαγραφή του LTE περιορίζει τον κύκλο του eDRX στα 2,26 δευτερόλεπτα[23].



Κεφάλαιο 4: Μελέτη επικοινωνίας NB-IoT μέσω δορυφόρου

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η μελέτη της επικοινωνίας μίας συσκευής NB-IoT με τον σταθμό βάσης καθώς και η επικοινωνία του σταθμού βάσης με τον δορυφόρο. Να σημειωθεί πως η μελέτη επικοινωνίας που αφορά την ζεύξη μεταξύ NB-IoT συσκευής-σταθμού βάσης καθώς και η ζεύξη μεταξύ σταθμού βάσης-δορυφόρου, γίνεται για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Προκειμένου η μελέτη επικοινωνίας να γίνει με ορθό και ρεαλιστικό τρόπο ώστε να πάρουμε πραγματικά δεδομένα ακολουθούμε μία διαδικασία που ονομάζεται προϋπολογισμός ζεύξης (Link Budget). Ο προϋπολογισμός ζεύξης είναι μία καταγραφή όλων των κερδών και των απωλειών που παρουσιάζονται από τον πομπό, μέσω ενός μέσου μεταφοράς (καλώδιο, αέρας, κυματοδηγός), στον δέκτη ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Ο προϋπολογισμός ζεύξης υπολογίζει την εξασθένιση του μεταδιδόμενου σήματος λόγω της διάδοσης, καθώς και τα κέρδη της κεραίας και άλλες απώλειες. Τα τυχαία μεταβαλλόμενα κέρδη του καναλιού, όπως η εξασθένιση, λαμβάνονται υπόψη με την προσθήκη κάποιου περιθωρίου (link margin) ανάλογα με την αναμενόμενη σοβαρότητα των επιπτώσεών του [13]. Μία απλουστευμένη μορφή εξίσωσης προϋπολογισμού ζεύξης είναι ο τύπος (4) :

$$P_{Receive} (dB) = P_{Transmit}(dB) + Gains(dB) - Losses (dB) \quad (4)$$



4.2 Προϋπολογισμός ζεύξης για δορυφόρο LEO

4.2.1 Πληροφορίες για τον δορυφόρο LEO

Πριν προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό της ζεύξης για το δορυφόρο LEO ας αναφέρουμε επιγραμματικά κάποια βασικά στοιχεία για τον δορυφόρο αυτό. Ο δορυφόρος LEO εκτελεί κυκλική τροχιά γύρω από τη γη σε υψόμετρο από 500 έως και 2500 [34] χιλιόμετρα πάνω από αυτή. Οι δορυφόροι LEO χρησιμοποιούνται κυρίως για τις ανάγκες των τηλεπικοινωνιών. Ο λόγος που οι δορυφόροι LEO εξυπηρετούν περισσότερο από κάθε άλλο τύπου δορυφόρο τις ανάγκες των τηλεπικοινωνιών είναι η σχετικά κοντινή απόσταση από τη γη όπως προαναφέρθηκε παραπάνω (Κεφάλαιο 2). Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένας δορυφόρος στη γη τόσο πιο μικρή καθυστέρηση διάδοσης του σήματος έχουμε. Πέρα όμως από το πλεονέκτημα αυτό, ο LEO δορυφόρος όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 λόγω της κοντινής απόστασης σε σχέση με την γη, αναπτύσσει εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες (7,5 km/h) λόγω της επίδρασης της βαρύτητας της γης στον δορυφόρο, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο ολίσθησης συχνότητας (φαινόμενο Doppler)[19]. Επομένως θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν στον προϋπολογισμό ζεύξης.

Αξίζει να σημειωθεί πως η άνω με την κάτω ζεύξη διαφέρουν ως προς το ποιος εκπέμπει και ποιος λαμβάνει. Στην περίπτωση της κάτω ζεύξης, θεωρούμε ως πομπό τον δορυφόρο και ως δέκτη τον σταθμό βάσης. Στην περίπτωση της άνω ζεύξης θεωρούμε πομπό τον σταθμό βάσης και δέκτη τον δορυφόρο[25].

Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιούμε τις χαμηλότερες συχνότητες της ζώνης συχνοτήτων για την κάτω ζεύξη και τις υψηλότερες για την άνω. Αυτό συμβαίνει διότι ο δορυφόρος έχει περιορισμένο εύρος δυνατοτήτων από πλευράς ισχύος λόγω ότι λειτουργεί με μπαταρίες, έτσι είναι πολύ πιο εύκολο ο δορυφόρος να παράγει το φέρον σήμα σε μία χαμηλότερη συχνότητα παρά σε υψηλότερη. Κατανοούμε λοιπόν ότι οι παραγωγή φέροντος σήματος στις υψηλές συχνότητες μίας ζώνης συχνοτήτων απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με την παραγωγή στις χαμηλές αυτής[20].

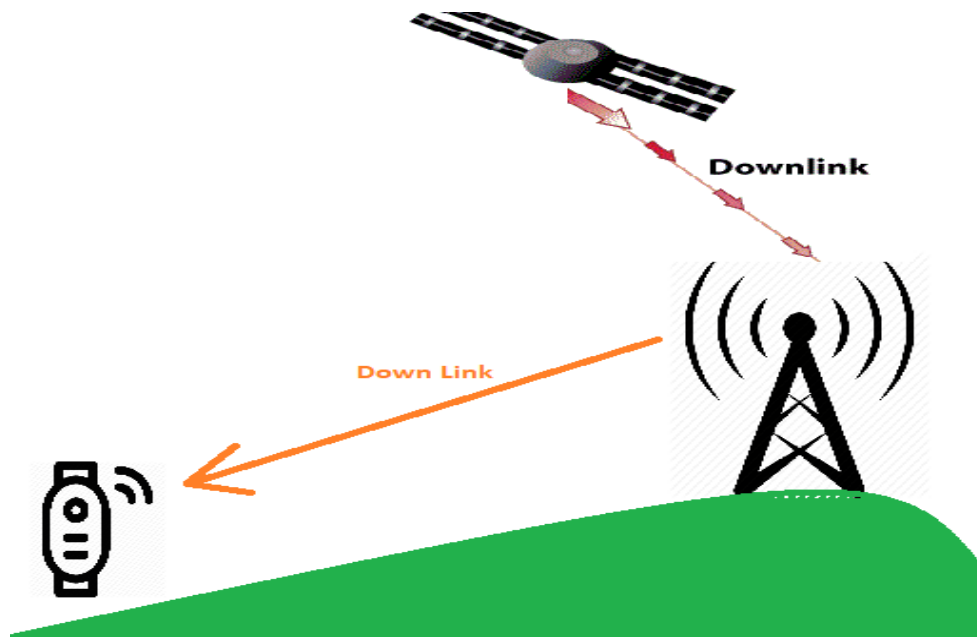
Σημειώνεται επίσης ότι στις ενότητες 4.2 και 4.3 θα γίνει ο προϋπολογισμός άνω και κάτω ζεύξης που αφορά το σταθμό βάσης και τον δορυφόρο. Ο προϋπολογισμός άνω και κάτω ζεύξης που αφορά την IoT συσκευή και τον σταθμό βάσης θα πραγματοποιηθεί στις ενότητες 4.4 και 4.5.



4.2.2 Προϋπολογισμός κάτω ζεύξης για δορυφόρο LEO

Προκειμένου να προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό ζεύξης για τον δορυφόρο LEO και συγκεκριμένα για την κάτω ζεύξη έχουμε δημιουργήσει το εξής σενάριο.

Ένας δορυφόρος LEO που εκτελεί κυκλική τροχιά γύρω από την γη, επικοινωνεί με έναν σταθμό βάσης που βρίσκεται στην γη. Έπειτα ο σταθμός βάσης αφού επικοινωνήσει επιτυχώς με τον δορυφόρο, θα επικοινωνήσει με την IoT συσκευή (Εικόνα 13). Η Εικόνα 13 περιγράφει σχηματικά την επικοινωνία της κάτω ζεύξης για το σενάριο που μόλις αναφέρθηκε.



Εικόνα 13: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας κάτω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου

Στην συνέχεια θα πρέπει να εισάγουμε τα δεδομένα μας που είναι απαραίτητα για την επικοινωνία μεταξύ Δορυφόρου και σταθμού βάσης (Πίνακας 1).



Πίνακας 1: Παράμετροι εισόδου για Προϋπολογισμό κάτω ζεύξης δορυφόρου LEO

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Απόσταση μεταξύ δορυφόρου-γης (d)	500-2300 Km
Απόδοση Στόχευσης (η)	0.55
Συχνότητα λειτουργίας (f)	2060 MHz
Διάμετρος Παραβολικού Κατόπτρου (D)	0.4 m
Ισχύς εκπομπής (Δορυφόρος) (Pt)	0.5 Watt
Κέρδος κεραίας εκπομπής (Gt)	5 dBi
Σταθερά Kerpler (m)	$3.986004418 * 10^5$
Απώλειες (Losses)	1dB (ατμόσφαιρα), 0.5 dB (βροχή), 0.03dB (ομίχλη) 0.2dB (ατμοσφαιρική ανάκλαση), 0.6dB (ιονόσφαιρα), 0.3dB (πόλωση), Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)
Θερμοκρασία Συστήματος (Ts)	139 K
Θερμοκρασία δωματίου (To)	298.15K (17°C)
Σταθερά Boltzmann (K)	$-228.6 J * K^{-1}$
Ρυθμός μετάδοσης (R)	250 Kbit/s
Maximum BER (QPSK)	10^{-6}
Minimum (SNR)	11.3 dB



Ο Πίνακας 1 περιέχει την απαραίτητη πληροφορία προκειμένου να προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό ζεύξης. Πριν προχωρήσουμε όμως στην εμφάνιση των αποτελεσμάτων ας αναφέρουμε τις εξισώσεις που πρόκειται να μας οδηγήσουν στα αποτελέσματα.

Για τον υπολογισμό του κέρδους λήψης της κεραίας του σταθμού βάσης (G_r), θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο (5):

$$G_r \text{ (dBi)} = n * \left(\frac{(f * 10^6) * \pi * D}{c} \right)^2 \text{ (5)}$$

Για τον υπολογισμό της τροχιακής ταχύτητας του δορυφόρου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο υπολογισμός της απόστασης της τροχιάς από το κέντρο της γης. Υπολογίζεται από τον τύπο (6):

$$r \text{ (Km)} = d + 6371 \text{ (6)}$$

Αφού υπολογίσαμε την απόσταση της τροχιάς από το κέντρο της γης, μπορούμε να υπολογίσουμε την τροχιακή ταχύτητα, η οποία υπολογίζεται από τον τύπο (7):

$$U \text{ (km/s)} = \sqrt{\frac{m}{r}} \text{ (7)}$$

Συνεχίζουμε με τον υπολογισμό των απωλειών (8) οι οποίες περιλαμβάνουν τις απώλειες ελεύθερου χώρου FSL (1) και τις διάφορες απώλειες οι οποίες θεωρούνται δεδομένες από τον Πίνακα 1.

$$Loss \text{ (dB)} = FSL + Losses \text{ (8)}$$



Για τον υπολογισμό της ισχύος λήψης θα πρέπει να υπολογίσουμε το EIRP (EFFECTIVE ISOTROPIC RADIATED POWER), που υπολογίζεται στον τύπο (9):

$$EIRP (dBW) = G_t + P_t \quad (9)$$

Πρέπει να αναφερθεί ότι προκειμένου να γίνουν οι πράξεις πιο εύκολες στις παρακάτω εξισώσεις, έχουμε μετατρέψει όλες τις τιμές από Watt σε λογαριθμική κλίμακα (dB). Η μετατροπή αυτή γίνεται με τον τύπο (10):

$$Value(dB) = 10 * \log_{10} (Value (W)) \quad (10)$$

Η ισχύς λήψης προκύπτει από τον τύπο (11):

$$P_r (dB) = EIRP + G_r - Loss \quad (11)$$

Προκειμένου να υπολογίσουμε τον λόγο του σήματος προς θόρυβο (SNR) θα χρειαστούμε τον τύπο (14), επιπλέον θα πρέπει να υπολογίσουμε τον λόγο της ισχύος λήψης ως προς τον θόρυβο που προκύπτει από τον τύπο (13) καθώς και τον λόγο κέρδους προς θερμοκρασία θορύβου, μέσω του τύπου (12) [26].

$$G_{OT} (dBk^{-1}) = G_r - T_s \quad (12)$$

$$P_{roNo} (dB) = EIRP + G_{OT} - Loss - K \quad (13)$$

$$SNR (dB) = P_{roNo} - R \quad (14)$$



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων (BER) χρησιμοποιούμε τον τύπο (15):

$$BER = qfunc(\sqrt{2 * SNR}) \quad (15)$$

Για τον υπολογισμό της ολίσθησης συχνότητας (Doppler Shift) χρησιμοποιούμε τον τύπο (16):

$$Dopplershift \text{ (Hz)} = speed2dop((U * 10^3), wavelength) \quad (16)$$

Για το περιθώριο ζεύξης χρησιμοποιούμε (Link Margin) χρησιμοποιούμε τον τύπο (17):

$$LinkMargin \text{ (dB)} = SNR - minimum_SNR \quad (17)$$

Προκειμένου λοιπόν να έχουμε μία σταθερή και αδιάκοπη ζεύξη θέτουμε το Link Margin να είναι μεγαλύτερο από 2 dB ώστε σε περίπτωση που υπάρξει μία τυχαία και μη αναμενόμενη απώλεια, να μην διακοπεί η δορυφορική ζεύξη[33].

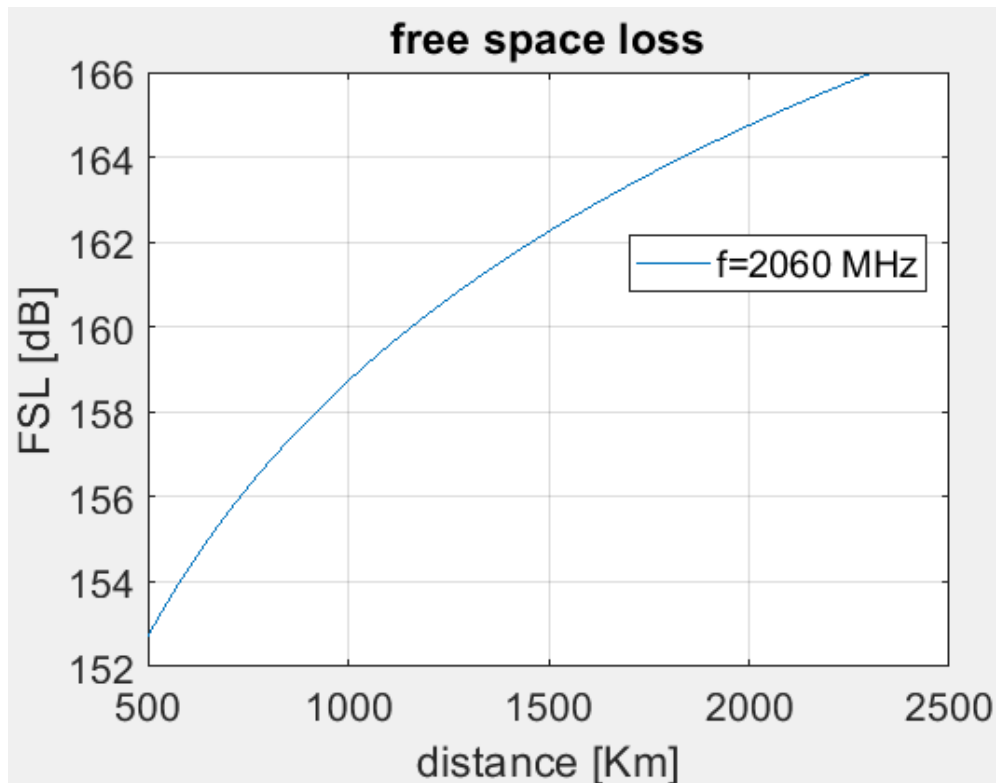


Έχοντας λοιπόν συγκεντρώσει όλες τις απαραίτητες εξισώσεις που αφορούν τον προϋπολογισμό ζεύξης εκτελώντας το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε, μας τυπώνει τα αποτελέσματα που βρίσκονται στον Πίνακα 2 :

Πίνακας 2: Παράμετροι εξόδου για Προϋπολογισμό κάτω ζεύξης δορυφόρου LEO

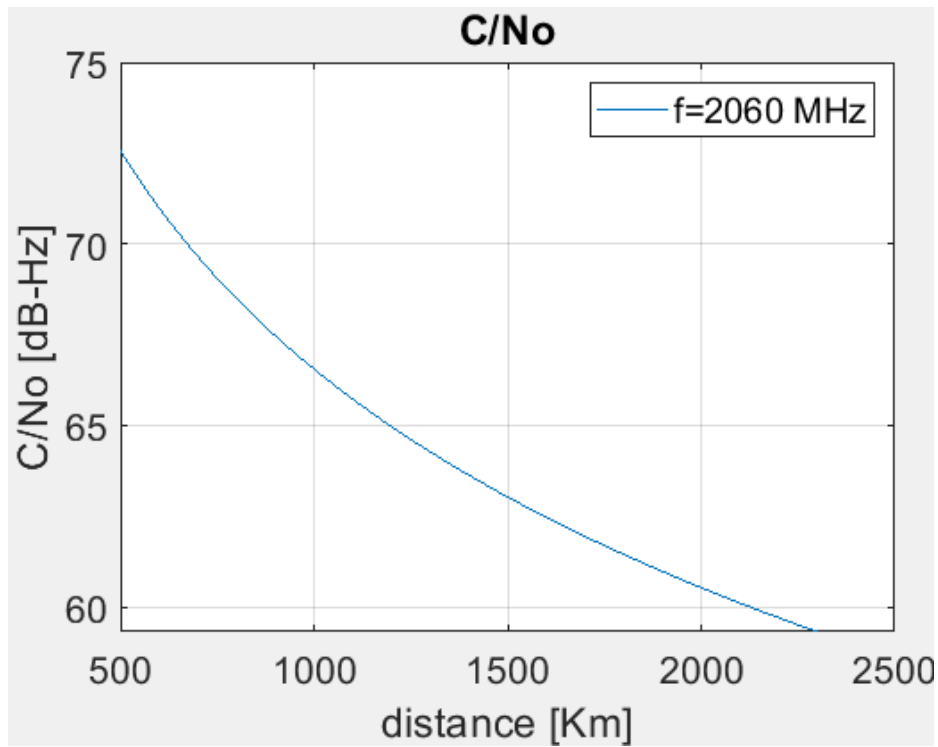
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Κέρδος Ισχύος λήψης (Gr)	16.12 dBi
Τροχιακή ταχύτητα (U)	7.6166 έως 6.7801 Km/s
Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)	152.7 έως 165.9 dB
SNR	15.9662 έως 2.7110 dB
Ισχύς λήψης (Pr)	-137.2243 έως -150.4795 dBm
BER	$7.9820 \cdot 10^{-9}$ έως $0.99 \cdot 10^{-2}$
Ολίσθηση Doppler (Doppler shift)	56.8703 έως 50.6245 KHz
Περιθώριο ζεύξης (Link margin)	4.662 έως -8.5890 dB
Χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT)	$3.3333 \cdot 10^{-6}$ έως $1.5333 \cdot 10^{-5}$ s

Ακολουθούν οι εικόνες που εκφράζουν τα διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε στη έξοδο του προγράμματος. Είναι εμφανές ότι από τον Πίνακα 2 παρατηρείται σταδιακή μείωση της ταχύτητας του δορυφόρου, όσο αυξάνεται το ύψος της τροχιάς του. Αυτό συμβαίνει διότι οι ελκτικές δυνάμεις της γης γίνονται πιο ασθενείς όσο απομακρυνόμαστε από εκείνη με αποτέλεσμα η ταχύτητα και προφανώς το φαινόμενο Doppler να εξασθενούν. Επιπλέον είναι εμφανές πως ο λόγος σήματος προς τον θόρυβο μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου. Αυτό συμβαίνει διότι το σήμα διανύει πιο μεγάλη απόσταση για να φτάσει στον δέκτη με αποτέλεσμα να εξασθενεί περισσότερο. Ως αποτέλεσμα αυτού μειώνεται το περιθώριο ζεύξης και επίσης αυξάνεται ο χρόνος διάδοσης του σήματος.



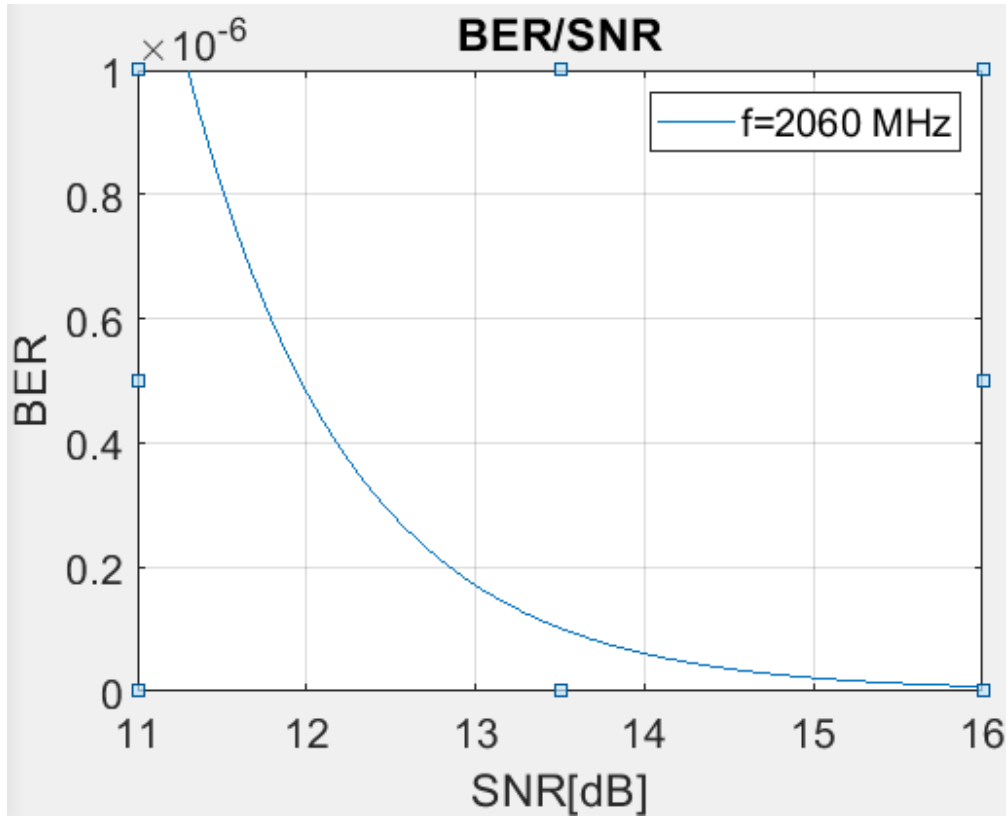
Εικόνα 14: Απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 14 οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου αυξάνονται καθώς αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO .



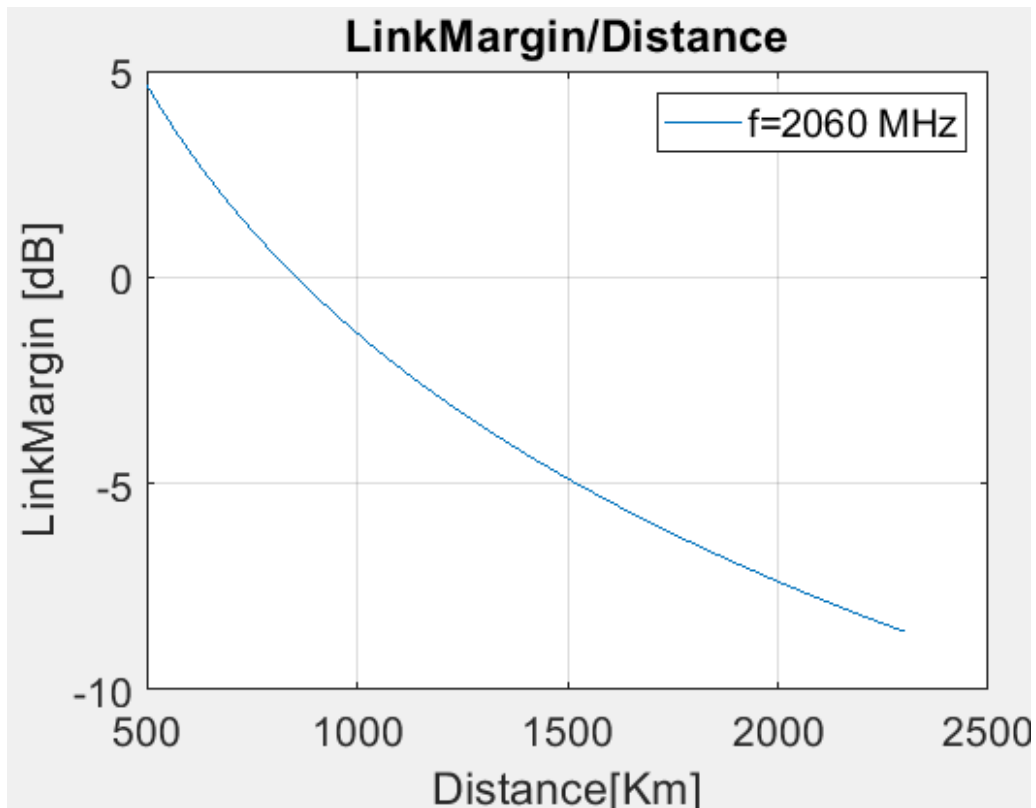
Εικόνα 15: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 15 η Ισχύς φέροντος σήματος προς την πυκνότητα θορύβου μειώνεται όσο αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO.



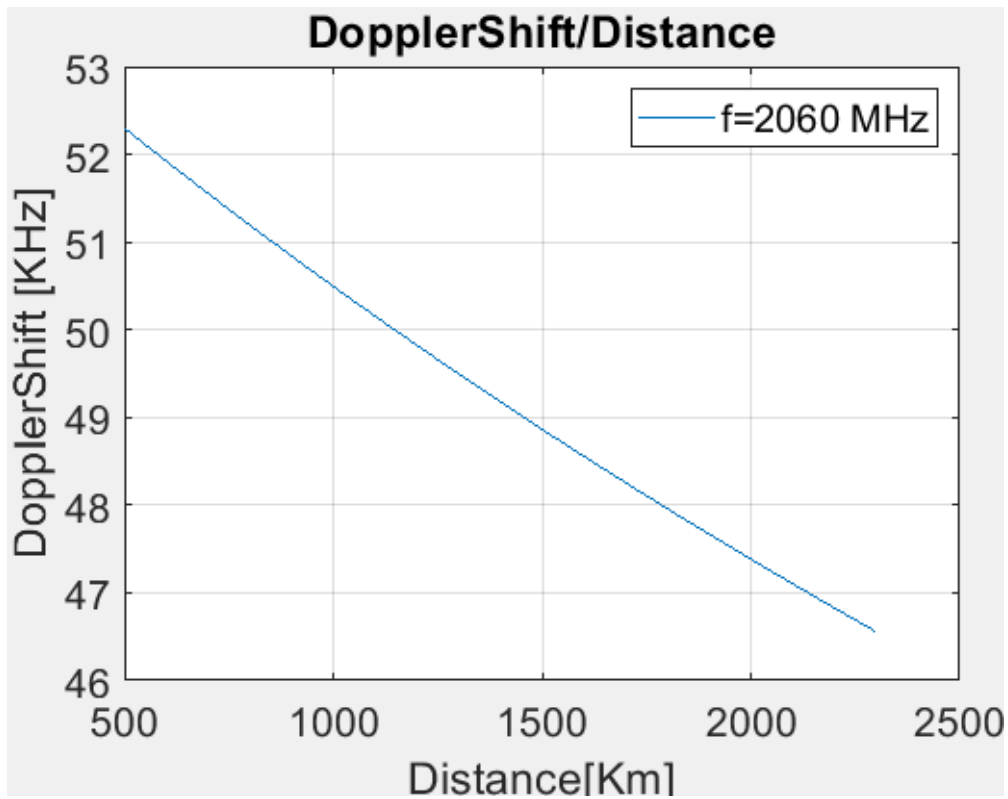
Εικόνα 16: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με το SNR

Από την Εικόνα 16 παρατηρείται ότι προκειμένου να μειωθεί ο ρυθμός εσφαλμένων bit θα πρέπει να αυξηθεί το SNR.



Εικόνα 17: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.

Από την Εικόνα 17 καταλαβαίνουμε ότι το περιθώριο ζεύξης μειώνεται όσο αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO.



Εικόνα 18: Ολίσθηση συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler σε συνάρτηση το ύψος της τροχιάς που βρίσκεται ο δορυφόρος LEO.

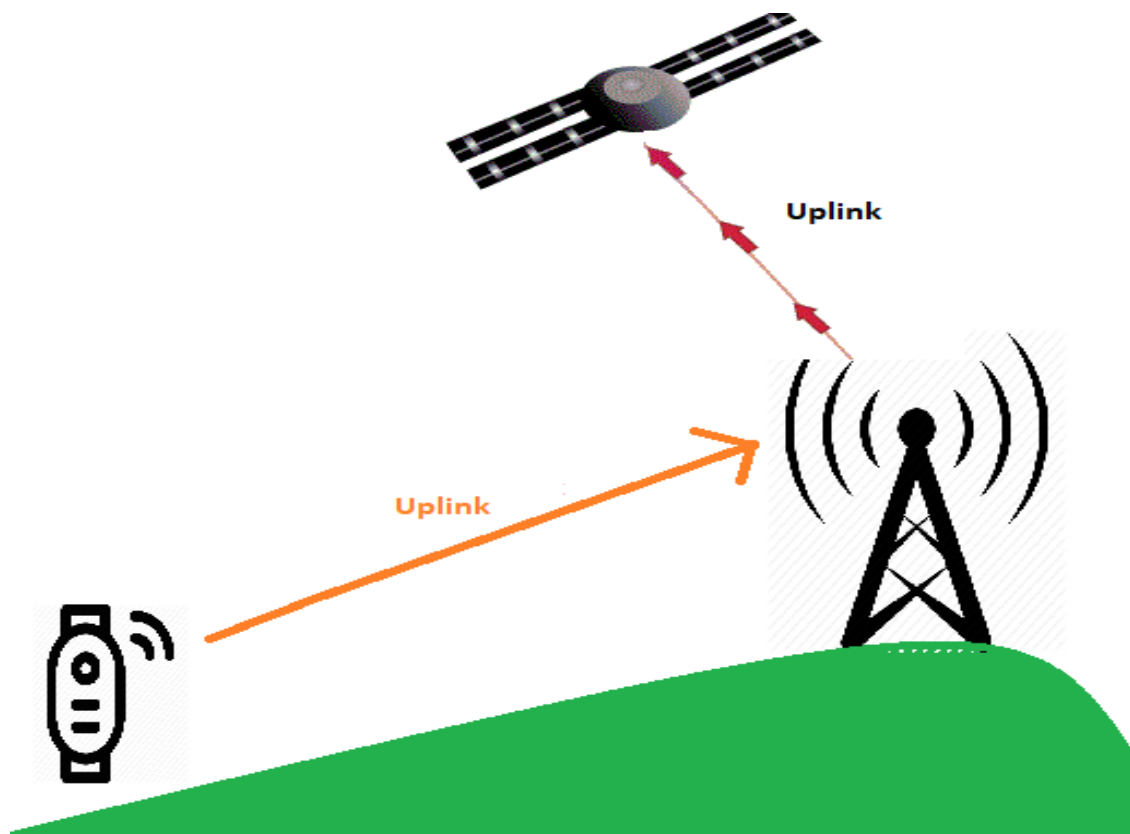
Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 18 όσο αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO , τόσο μειώνεται η ολίσθηση συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler.



4.2.3 Προϋπολογισμός άνω ζεύξης για δορυφόρο LEO.

Προκειμένου να προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό ζεύξης για τον δορυφόρο LEO και συγκεκριμένα για την άνω ζεύξη έχουμε δημιουργήσει το εξής σενάριο.

Μία IoT συσκευή που βρίσκεται εγκατεστημένη στη γη και επικοινωνεί με τον επίγειο σταθμό βάσης. Η Εικόνα 19 περιγράφει σχηματικά την επικοινωνία της άνω ζεύξης για το σενάριο που μόλις αναφέρθηκε.



Εικόνα 19: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας άνω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου



Στην συνέχεια θα πρέπει να εισάγουμε τα δεδομένα μας που είναι απαραίτητα για την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και δορυφόρου (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Παράμετροι εισόδου για Προϋπολογισμό άνω ζεύξης δορυφόρου LEO

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Απόσταση μεταξύ δορυφόρου-γης (d)	500-2300 Km
Απόδοση Στόχευσης (η)	0.55
Συχνότητα λειτουργίας (f)	2240 MHz
Διάμετρος Παραβολικού Κατόπτρου (D)	0.4 m
Ισχύς εκπομπής (Επίγειος σταθμός) (Pt)	10 Watt
Κέρδος κεραίας λήψης (δορυφόρο) (Gr)	6 dBi
Σταθερά Kerpler (m)	$3.986004418 * 10^5$
Απώλειες (Losses)	1dB (ατμόσφαιρα), 1 dB (βροχή), 0.03dB (ομίχλη) 0.2dB (ατμοσφαιρική ανάκλαση), 0.6dB (ιονόσφαιρα), 0.3dB (πόλωση), Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)
Θερμοκρασία Συστήματος (Ts)	139 K
Θερμοκρασία δωματίου (To)	298.15K (17°C)
Σταθερά Boltzmann (K)	$-228.6 J * K^{-1}$
Ρυθμός μετάδοσης (R)	100 Kbit/s
Maximum BER (QPSK)	10^{-6}
Minimum (SNR)	11.3 dB

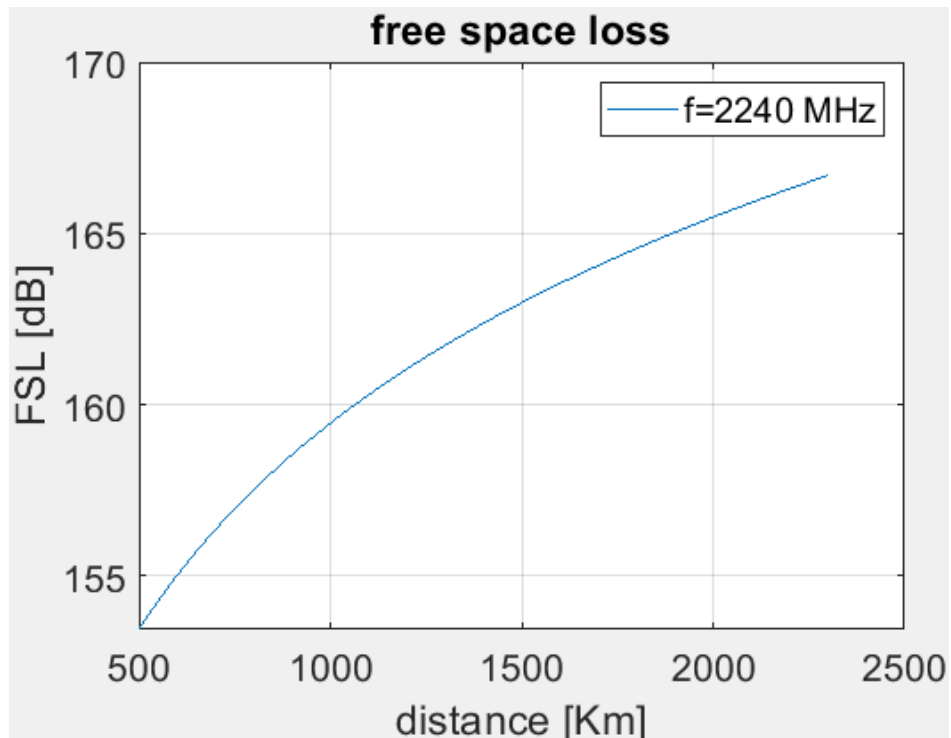


Χρησιμοποιώντας τους τύπους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να προχωρήσουμε στα αποτελέσματα του προϋπολογισμού άνω ζεύξης για τον LEO δορυφόρο.

Πίνακας 4: Παράμετροι εξόδου για την άνω ζεύξη του Δορυφόρου LEO

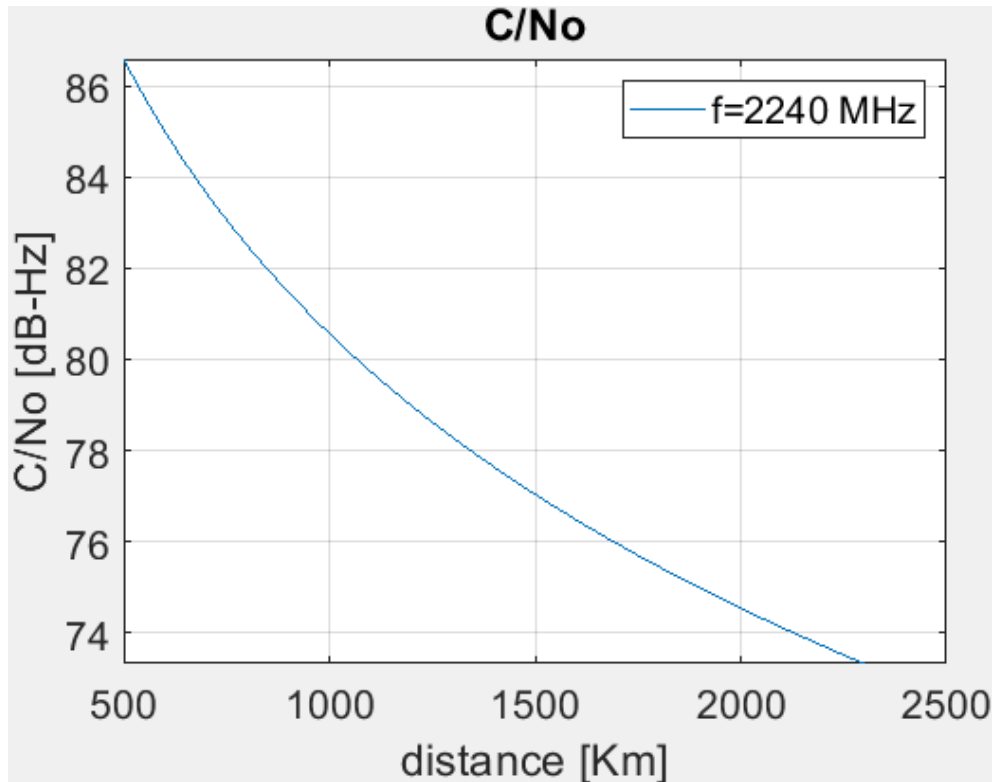
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Κέρδος Ισχύος εκπομπής (Gt)	16.85 dBi
Τροχιακή ταχύτητα (U)	7.6166 έως 6.7801 Km/s
Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)	153.43 έως 166.6 dB
SNR	33.4559 έως 20.2007 dB
Ισχύς λήψης (Pr)	-123.7140 έως -136.9692 dBm
BER	$1.4197 \cdot 10^{-16}$ έως $1.0340 \cdot 10^{-10}$
Ολίσθηση Doppler (Doppler shift)	56.87 έως 50.62 KHz
Περιθώριο ζεύξης (Link margin)	22.1559 έως 8.9007 dB
Χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT)	$3.3333 \cdot 10^{-6}$ έως $1.5333 \cdot 10^{-5}$ s

Ακολουθούν οι εικόνες που εκφράζουν τα διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε στη έξοδο του προγράμματος. Είναι εμφανές ότι από τον Πίνακα 4 παρατηρείται σταδιακή μείωση της ταχύτητας του δορυφόρου, όσο αυξάνεται το ύψος της τροχιάς του. Αυτό συμβαίνει διότι οι ελκτικές δυνάμεις της γης γίνονται πιο ασθενείς όσο απομακρυνόμαστε από εκείνη με αποτέλεσμα η ταχύτητα και προφανώς το φαινόμενο Doppler να εξασθενούν. Επιπλέον είναι εμφανές πως ο λόγος σήματος προς τον θόρυβο μειώνεται όσο αυξάνεται το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου. Αυτό συμβαίνει διότι το σήμα διανύει πιο μεγάλη απόσταση για να φτάσει στον δέκτη με αποτέλεσμα να εξασθενεί περισσότερο. Ως αποτέλεσμα αυτού μειώνεται το περιθώριο ζεύξης και επίσης αυξάνεται ο χρόνος διάδοσης του σήματος.



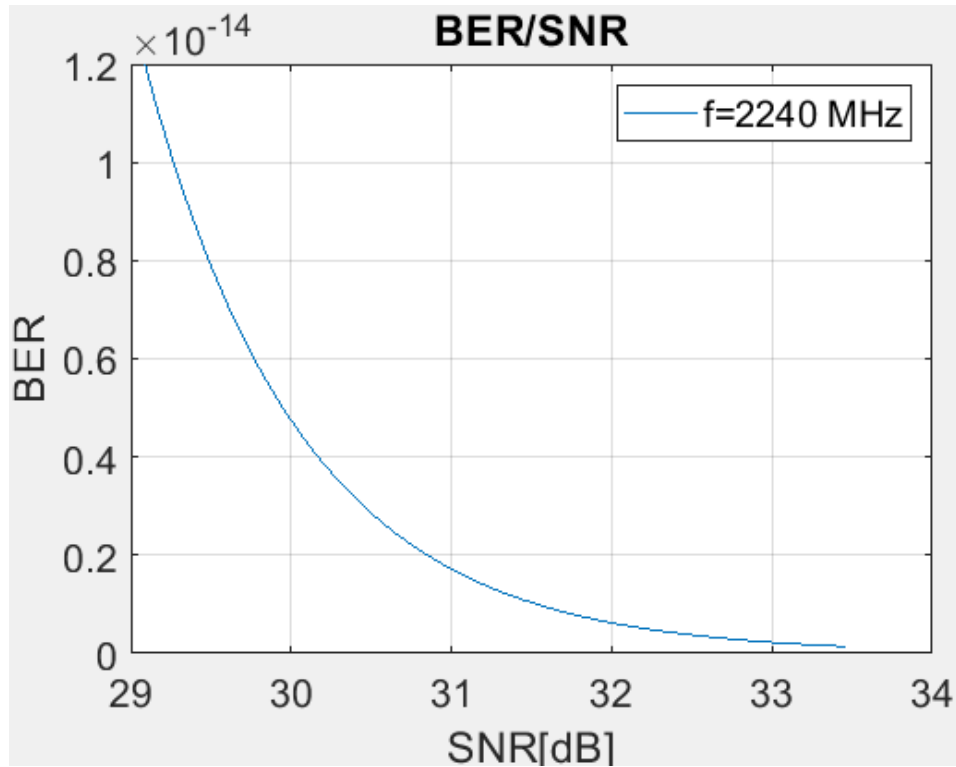
Εικόνα 20: Απώλειες ελευθέρου χώρου.

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 20 οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου αυξάνονται καθώς αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO .



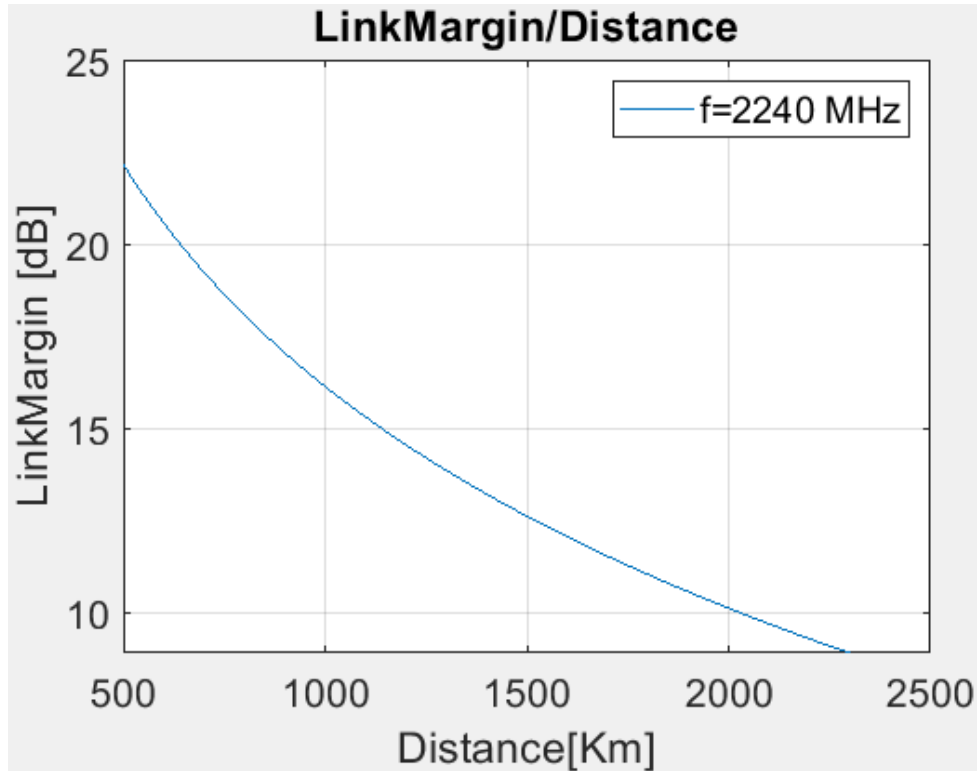
Εικόνα 21: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 21 η Ισχύς φέροντος σήματος προς την πυκνότητα θορύβου μειώνεται όσο αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO.



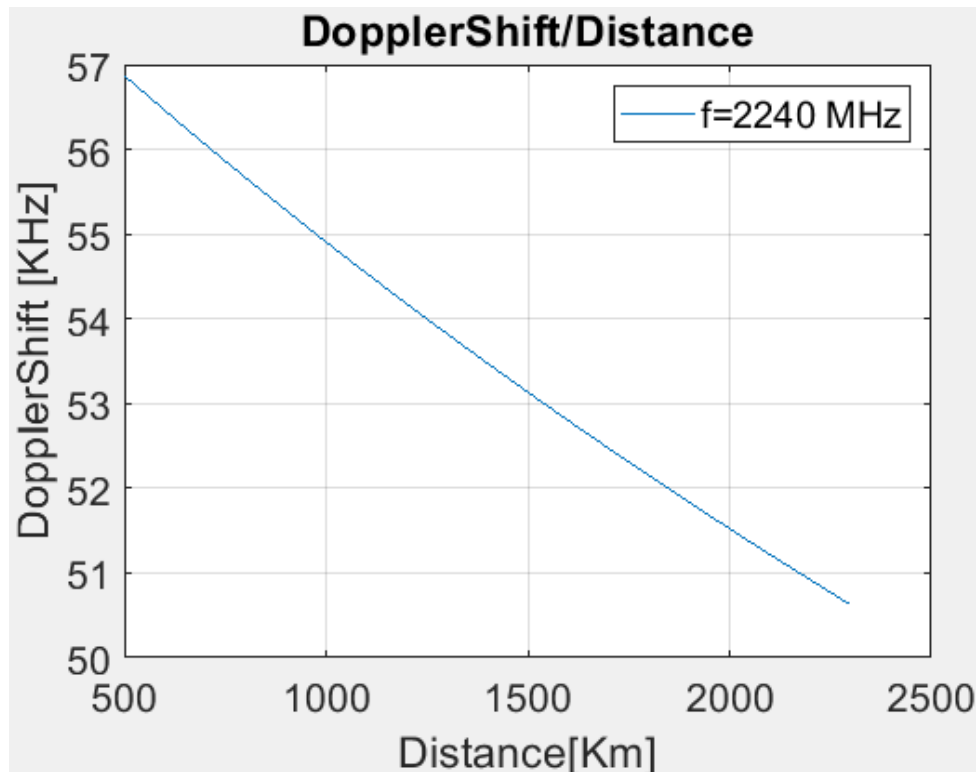
Εικόνα 22: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με το SNR

Από την Εικόνα 22 παρατηρείται ότι προκειμένου να μειωθεί ο ρυθμός εσφαλμένων bit θα πρέπει να αυξηθεί το SNR.



Εικόνα 23: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με το ύψος τροχιάς του δορυφόρου LEO.

Από την Εικόνα 23 καταλαβαίνουμε ότι το περιθώριο ζεύξης μειώνεται όσο αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO.



Εικόνα 24: Ολίσθηση συχνότητας λόγω φαινομένου Doppler σε συνάρτηση το ύψος της τροχιάς που βρίσκεται ο δορυφόρος LEO.

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 24 όσο αυξάνουμε το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου LEO , τόσο μειώνεται η ολίσθηση συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler.



4.3 Προϋπολογισμός ζεύξης για δορυφόρο GEO

4.3.1 Πληροφορίες για τον δορυφόρο GEO

Πριν προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό της ζεύξης για τον δορυφόρο GEO αξίζει να αναφέρουμε κάποιες σημαντικές πληροφορίες γ' αυτόν.

Ο γεωστατικός δορυφόρος βρίσκεται σε ύψος τροχιάς πάνω από τη γη στα 35.786 χιλιόμετρα και ακολουθεί την περιστροφή της γης. Οι δορυφόροι αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε υπηρεσίες συνδρομητικής τηλεόρασης λόγω ότι μπορούν να καλύψουν μία σχετικά μεγάλη επιφάνεια της γης αφού βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από αυτή. Επιπλέον δεν απαιτείται να υπάρχουν στην επιφάνεια της γης κεραιές οι οποίες να είναι κατευθυνόμενες αφού όταν ο παρατηρητής βρίσκεται στη γη, ο δορυφόρος φαίνεται σταθερός. Το φαινόμενο Doppler είναι ελάχιστο, οπότε το θεωρούμε αμελητέο. Επισημαίνεται ότι οι δορυφόροι GEO απαιτούν μεγάλη ισχύ σήματος λόγω ότι βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την γη. Ως αποτέλεσμα ο χρόνος διάδοσης του σήματος είναι αρκετά μεγαλύτερος από ότι των δορυφόρων LEO που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Αξίζει να σημειωθεί πως η άνω με την κάτω ζεύξη διαφέρουν ως προς το ποιος εκπέμπει και ποιος λαμβάνει. Στην περίπτωση της κάτω ζεύξης, θεωρούμε ως πομπό τον δορυφόρο και ως δέκτη τον σταθμό βάσης. Στην περίπτωση της άνω ζεύξης θεωρούμε πομπό τον σταθμό βάσης και δέκτη τον δορυφόρο.

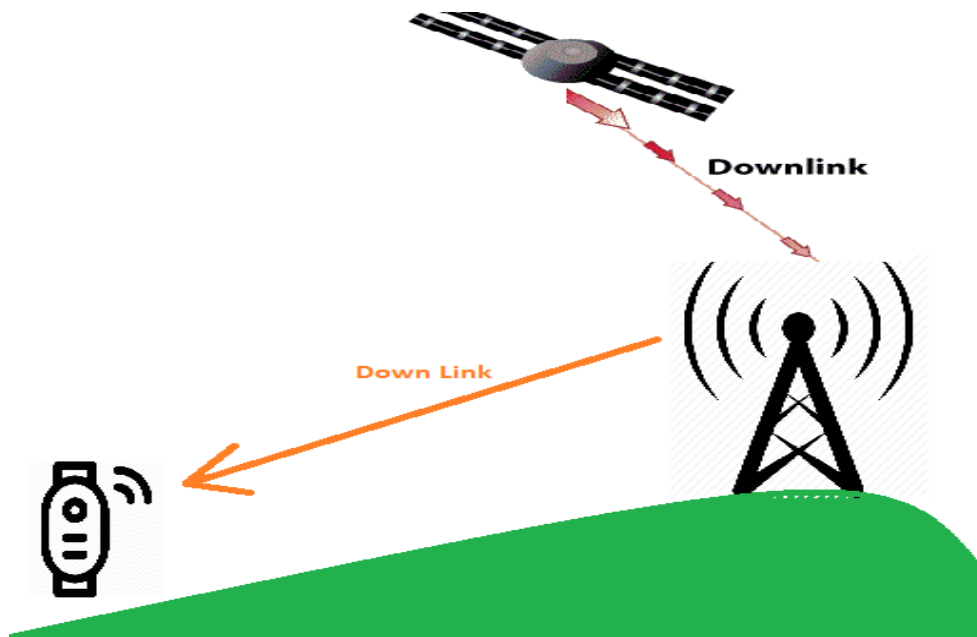
Επιπρόσθετα πρέπει να σημειωθεί ότι στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιούμε τις χαμηλότερες συχνότητες της ζώνης συχνοτήτων για την κάτω ζεύξη και τις υψηλότερες για την άνω. Αυτό συμβαίνει διότι ο δορυφόρος έχει περιορισμένο εύρος δυνατοτήτων από πλευράς ισχύος λόγω ότι λειτουργεί με μπαταρίες, έτσι είναι πολύ πιο εύκολο ο δορυφόρος να παράγει το φέρον σήμα σε μία χαμηλότερη συχνότητα παρά σε υψηλότερη. Κατανοούμε λοιπόν ότι οι παραγωγή φέροντος σήματος στις υψηλές συχνότητες μίας ζώνης συχνοτήτων απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με την παραγωγή στις χαμηλές αυτής.



4.3.2 Προϋπολογισμός κάτω ζεύξης για δορυφόρο GEO

Προκειμένου να προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό ζεύξης για τον δορυφόρο GEO και συγκεκριμένα για την κάτω ζεύξη έχουμε δημιουργήσει το εξής σενάριο.

Ένας δορυφόρος GEO που εκτελεί ελλειπτική τροχιά γύρω από την γη, επικοινωνεί με έναν σταθμό βάσης που βρίσκεται στην γη. Έπειτα ο σταθμός βάσης αφού επικοινωνήσει επιτυχώς με τον δορυφόρο, θα επικοινωνήσει με την IoT συσκευή (Εικόνα 25). Η Εικόνα 25 περιγράφει σχηματικά την επικοινωνία της κάτω ζεύξης για το σενάριο που μόλις αναφέρθηκε.



Εικόνα 25: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας κάτω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου

Στην συνέχεια θα πρέπει να εισάγουμε τα δεδομένα μας που είναι απαραίτητα για την επικοινωνία μεταξύ Δορυφόρου και σταθμού βάσης (Πίνακας 1).



Πίνακας 5: Παράμετροι εισόδου για προϋπολογισμό κάτω ζεύξης δορυφόρου GEO

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Απόσταση μεταξύ δορυφόρου-γης (d)	35786 Km
Απόδοση Στόχευσης (η)	0.55
Συχνότητα λειτουργίας (f)	11000 MHz
Εύρος Ζώνης (B)	180 KHz
Διάμετρος Παραβολικού Κατόπτρου (D)	1.2 έως 5 m (βήμα 10 εκ)
Ισχύς εκπομπής (Δορυφόρος) (Pt)	10 Watt
Κέρδος κεραίας εκπομπής (Gt)	10 dBi
Σταθερά Kerpler (m)	$3.986004418 * 10^5$
Απώλειες (Losses)	1dB (ατμόσφαιρα), 6 dB (βροχή), 0.03dB (ομίχλη) 0.2dB (ατμοσφαιρική ανάκλαση), 0.6dB (ιονόσφαιρα), 0.3dB (πόλωση), Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)
Θερμοκρασία Συστήματος (Ts)	140 K
Θερμοκρασία δωματίου (To)	298.15K (17°C)
Σταθερά Boltzmann (K)	$-228.6 \text{ J} * \text{K}^{-1}$
Ρυθμός μετάδοσης (R)	250 Kbit/s
Maximum BER (QPSK)	10^{-6}
Minimum (SNR)	11.3 dB

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να προχωρήσουμε στα αποτελέσματα του προϋπολογισμού κάτω ζεύξης για τον GEO δορυφόρο.

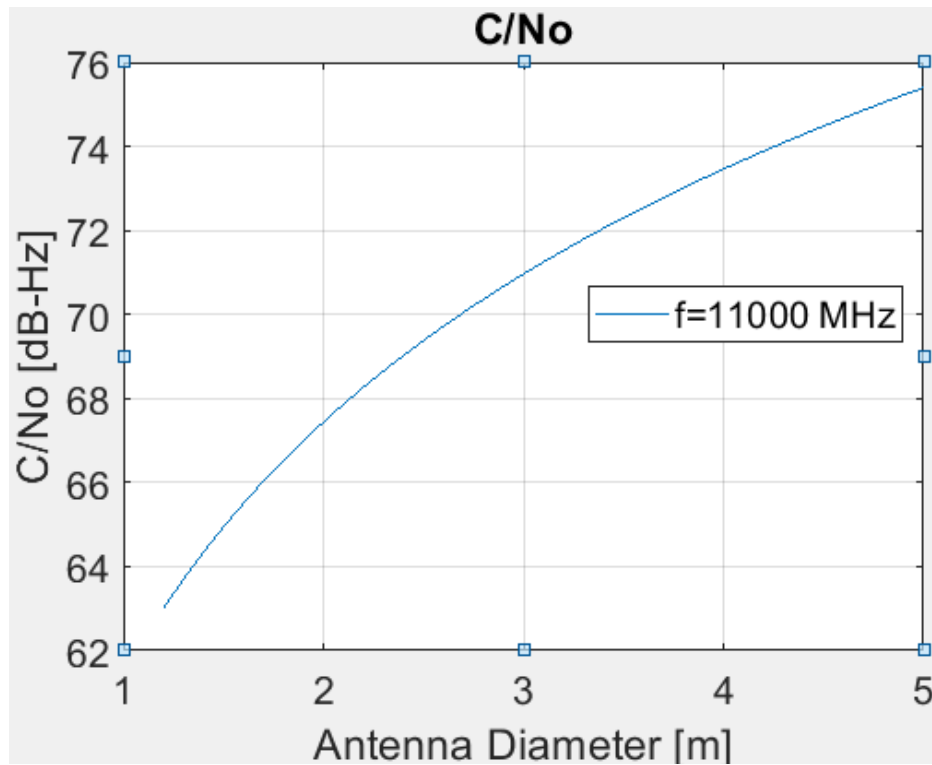
Έχοντας λοιπόν συγκεντρώσει όλες τις απαραίτητες εξισώσεις που αφορούν τον προϋπολογισμό ζεύξης εκτελώντας το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε, μας τυπώνει τα αποτελέσματα που βρίσκονται στον Πίνακα 6:



Πίνακας 6: Παράμετροι εξόδου προϋπολογισμού κάτω ζεύξης σε δορυφόρο GEO

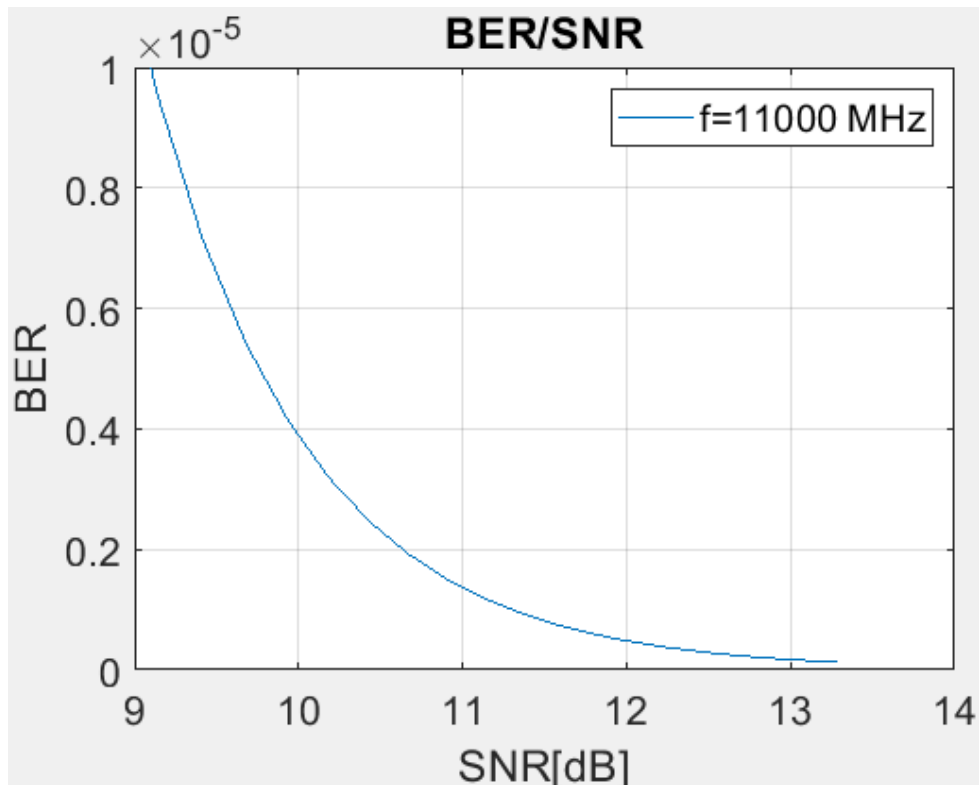
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Κέρδος Ισχύος λήψης (G_r)	40.2157 έως 52.6115 dBi
Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)	204.3521 dB
SNR	0.08929 έως 13.2887 dB
Ισχύς λήψης (P_r)	-152.26 έως -139.87 dBm
BER	0.0907 έως $1.26 \cdot 10^{-7}$
Περιθώριο ζεύξης (Link margin)	-10.4071 έως 2.00 dB
Χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT)	$2.3857 \cdot 10^{-4}$ s

Ακολουθούν οι εικόνες που εκφράζουν τα διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε στη έξοδο του προγράμματος. Είναι εμφανές ότι από τον Πίνακα 6 παρατηρείται σταδιακή αύξηση του κέρδους ισχύος λήψης στον επίγειο σταθμό, όσο αυξάνεται η διάμετρος της κεραίας. Επιπλέον οι απώλειες διάδοσης παρατηρούμε ότι είναι πού μεγαλύτερες από ότι του δορυφόρου LEO, αυτό συμβαίνει διότι ο δορυφόρος GEO λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων KU (υψηλότερες συχνότητες) και βρίσκεται αρκετά μακριά από την γη. Το SNR παρατηρούμε ότι αυξάνεται όσο αυξάνουμε την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού, ενώ ο ρυθμός σφαλμάτων αντίστοιχα μειώνεται. Αρκετά αξιοσημείωτο είναι ο χρόνος μετάδοσης του σήματος όπου είναι σχεδόν 5πλάσιος σε διάρκεια από ότι του δορυφόρου LEO.



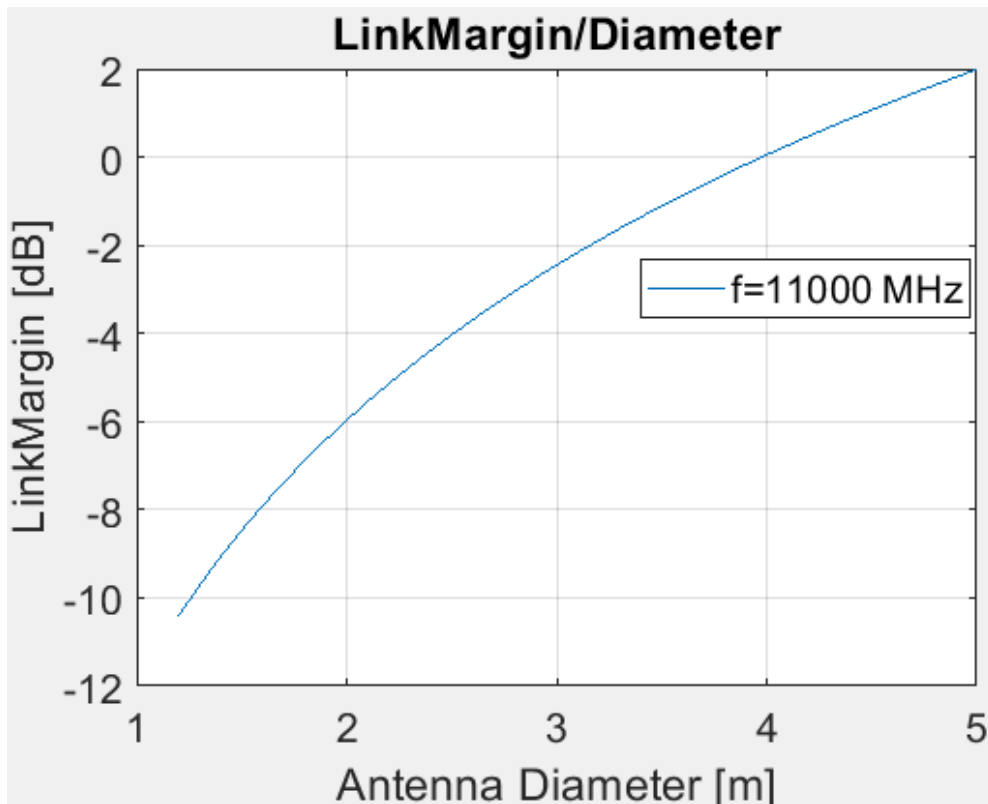
Εικόνα 26: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.

Από την Εικόνα 26 παρατηρούμε ότι η ισχύς του φέροντος σήματος προς την πυκνότητα θορύβου αυξάνεται όσο αυξάνουμε την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.



Εικόνα 27: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με λόγο σήματος προς θόρυβο

Παρατηρείται ότι στην Εικόνα 27 όσο αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο μειώνεται ο ρυθμός εσφαλμένων bit.



Εικόνα 28: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.

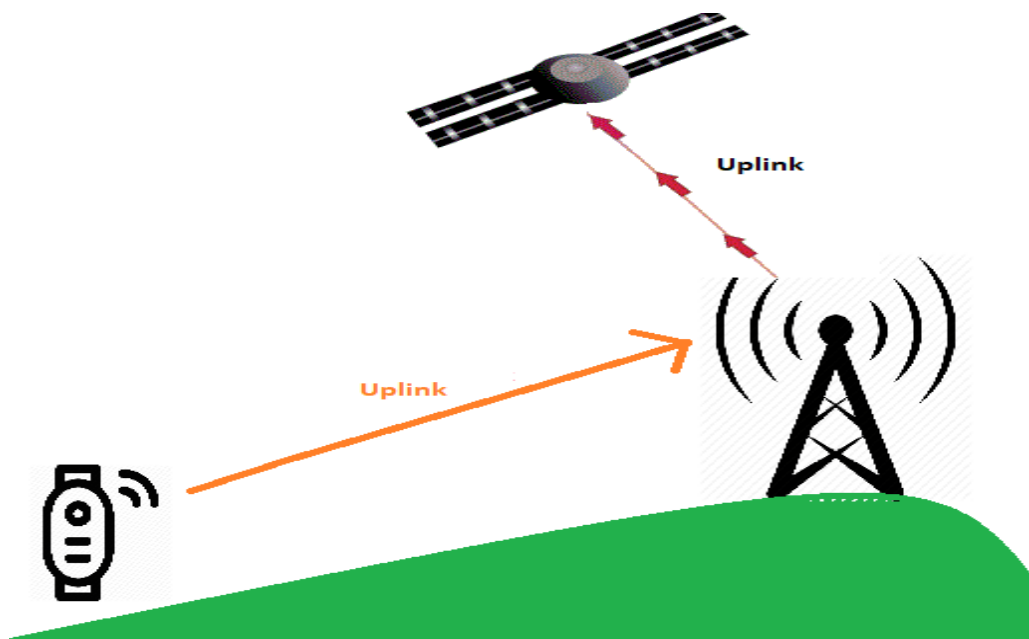
Από την Εικόνα 28 παρατηρείται ότι το περιθώριο ζεύξης αυξάνεται όσο αυξάνουμε την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.



4.3.3 Προϋπολογισμός άνω ζεύξης για δορυφόρο GEO.

Προκειμένου να προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό ζεύξης για τον δορυφόρο GEO και συγκεκριμένα για την άνω ζεύξη έχουμε δημιουργήσει το εξής σενάριο.

Μία συσκευή IoT που βρίσκεται στη γη επικοινωνεί με τον επίγειο σταθμό βάσης. Αν η ζεύξη μεταξύ τους γίνει με επιτυχία τότε ο σταθμός βάσης επικοινωνεί με τον δορυφόρο GEO ο οποίος εκτελεί ελλειπτική τροχιά γύρω από την γη. Η Εικόνα 29 περιγράφει σχηματικά το σενάριο που μόλις αναφέρθηκε.



Εικόνα 29: Περιγραφή του σεναρίου επικοινωνίας άνω ζεύξης IoT συσκευής-Σταθμού βάσης-Δορυφόρου



Στην συνέχεια θα πρέπει να εισάγουμε τα δεδομένα μας που είναι απαραίτητα για την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και δορυφόρου (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: Παράμετροι εισόδου για Προϋπολογισμό άνω ζεύξης Δορυφόρου GEO.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Απόσταση μεταξύ δορυφόρου-γης (d)	35786 Km
Απόδοση Στόχευσης (η)	0.55
Συχνότητα λειτουργίας (f)	14000 MHz
Εύρος Ζώνης (B)	180 KHz
Διάμετρος Παραβολικού Κατόπτρου (D)	1.2 έως 5 m (βήμα 10 εκ)
Ισχύς εκπομπής (σταθμό) (Pt)	20 Watt
Κέρδος κεραίας λήψης (Gr)	6 dBi
Σταθερά Kerpler (m)	$3.986004418 * 10^5$
Απώλειες (Losses)	1dB (ατμόσφαιρα), 6 dB (βροχή), 0.03dB (ομίχλη) 0.2dB (ατμοσφαιρική ανάκλαση), 0.6dB (ιονόσφαιρα), 0.3dB (πόλωση), Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)
Θερμοκρασία Συστήματος (Ts)	140 K
Θερμοκρασία δωματίου (To)	298.15K (17°C)
Σταθερά Boltzmann (K)	$-228.6 J * K^{-1}$
Ρυθμός μετάδοσης (R)	100 Kbit/s
Maximum BER (QPSK)	10^{-6}
Minimum (SNR)	11.3 dB



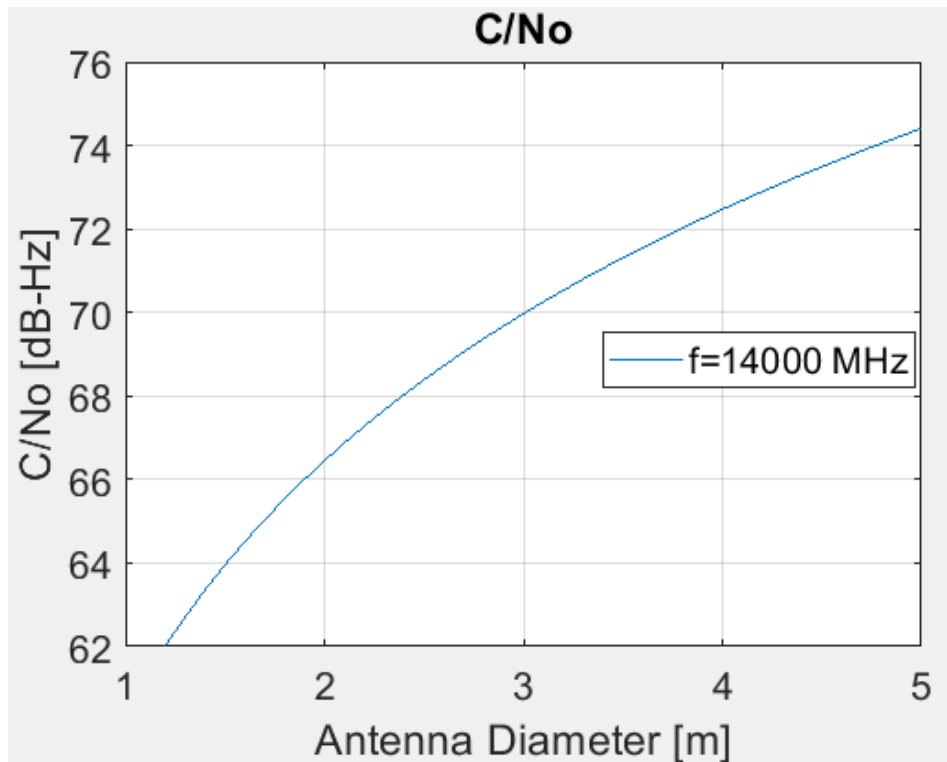
Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να προχωρήσουμε στα αποτελέσματα του προϋπολογισμού άνω ζεύξης για τον GEO δορυφόρο.

Έχοντας λοιπόν συγκεντρώσει όλες τις απαραίτητες εξισώσεις που αφορούν τον προϋπολογισμό ζεύξης εκτελώντας το πρόγραμμα που δημιουργήσαμε, μας τυπώνει τα αποτελέσματα που βρίσκονται στον Πίνακα 8:

Πίνακας 8: Παράμετροι εξόδου προϋπολογισμού άνω ζεύξης σε δορυφόρο GEO

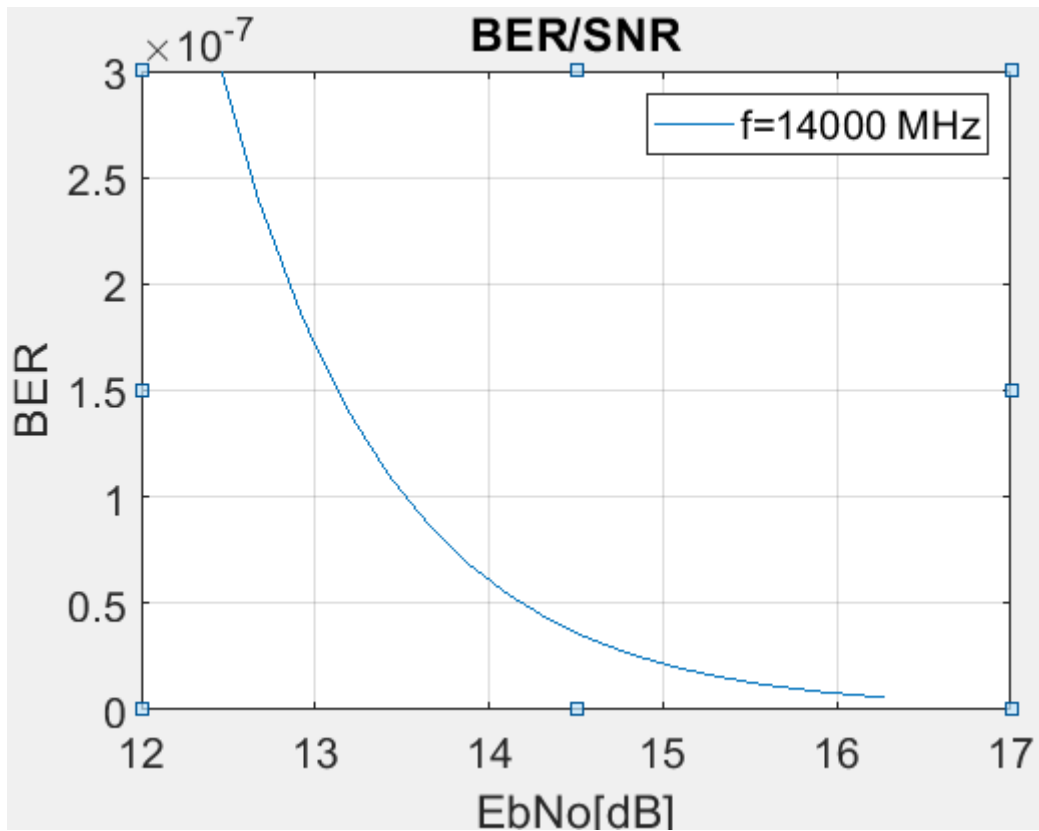
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Κέρδος Ισχύος εκπομπής (Gt)	42.31 έως 54.71 dBi
Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)	206.44 dB
SNR	3.88 έως 16.27 dB
Ισχύς λήψης (Pr)	-153.26 έως -140.86 dBm
BER	0.0027 έως $5.7882 \cdot 10^{-9}$
Περιθώριο ζεύξης (Link margin)	-7.4174 έως 4.9784 dB
Χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (RTT)	$2.3857 \cdot 10^{-4}$ s

Ακολουθούν οι εικόνες που εκφράζουν τα διαγράμματα με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε στη έξοδο του προγράμματος. Είναι εμφανές ότι από τον Πίνακα 8 παρατηρείται σταδιακή αύξηση του κέρδους ισχύος εκπομπής στον επίγειο σταθμό, όσο αυξάνεται η διάμετρος της κεραίας στον επίγειο σταθμό. Επιπλέον οι απώλειες διάδοσης παρατηρούμε ότι είναι πού μεγαλύτερες από ότι του δορυφόρου LEO, αυτό συμβαίνει διότι ο δορυφόρος GEO λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων KU (υψηλότερες συχνότητες) και βρίσκεται αρκετά μακριά από την γη. Το SNR παρατηρούμε ότι αυξάνεται όσο αυξάνουμε την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού, ενώ ο ρυθμός σφαλμάτων αντίστοιχα μειώνεται. Αρκετά αξιοσημείωτο είναι ο χρόνος μετάδοσης του σήματος όπου είναι σχεδόν 5πλάσιος σε διάρκεια από ότι του δορυφόρου LEO.



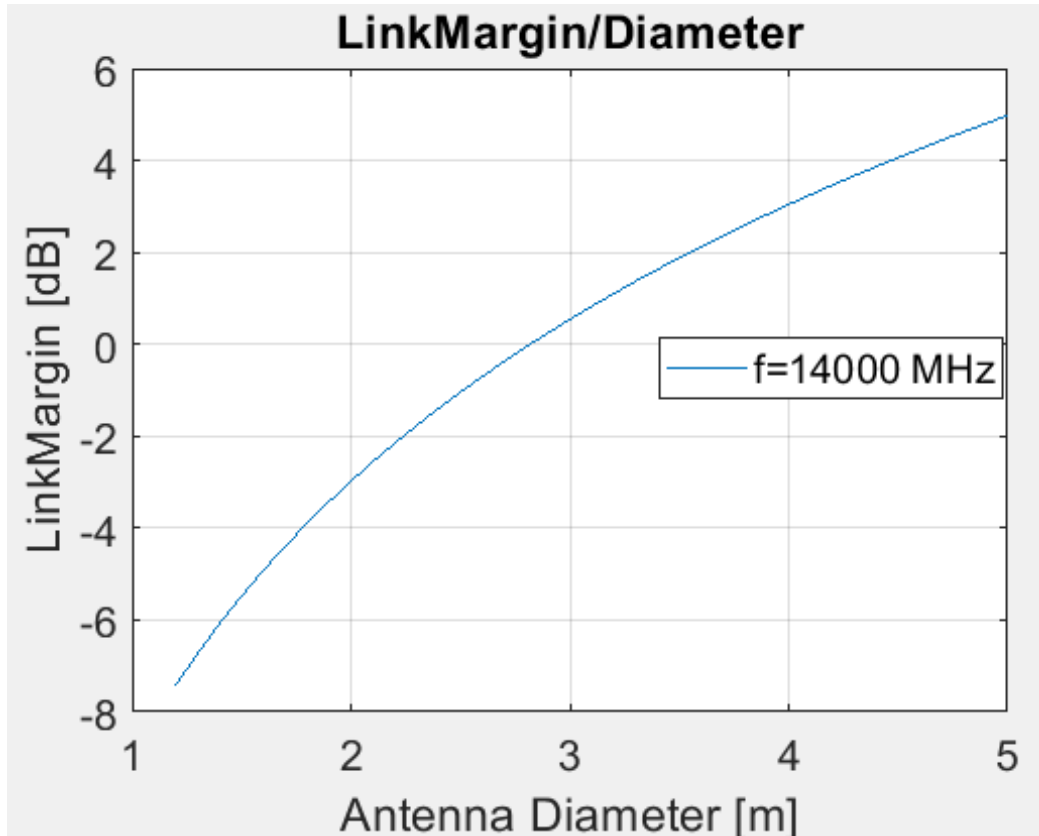
Εικόνα 30: Ισχύς φέροντος σήματος προς πυκνότητα θορύβου σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.

Από την Εικόνα 30 παρατηρούμε ότι η ισχύς του φέροντος σήματος προς την πυκνότητα θορύβου αυξάνεται όσο αυξάνουμε την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.



Εικόνα 31: Ρυθμός σφαλμάτων σε συνάρτηση με λόγο σήματος προς θόρυβο

Παρατηρείται ότι στην Εικόνα 31 όσο αυξάνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο μειώνεται ο ρυθμός εσφαλμένων bit.



Εικόνα 32: Περιθώριο ζεύξης σε συνάρτηση με την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.

Από την Εικόνα 32 παρατηρείται ότι το περιθώριο ζεύξης αυξάνεται όσο αυξάνουμε την διάμετρο της κεραίας του επίγειου σταθμού.



4.3.4 Συμπεράσματα για τους προϋπολογισμούς ζεύξεων Δορυφόρων GEO και LEO

Πριν προχωρήσουμε στην επόμενη ενότητα, έχουμε στη κατοχή μας πλέον ορισμένα στοιχεία που μας οδηγούν σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τους προϋπολογισμούς ζεύξεων που πραγματοποιήσαμε στις παραπάνω ενότητες. Ο Πίνακας 9 αναφέρει τις βασικές διαφορές μεταξύ GEO και LEO δορυφόρου, που επηρεάζουν άμεσα την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και δορυφόρου.

Πίνακας 9: Διαφορές μεταξύ GEO και LEO δορυφόρου

Παράμετροι	Δορυφόρος LEO	Δορυφόρος GEO
Χρόνος μετάδοσης μετ'επιστροφής	3.33μs	15.3μs
Φαινόμενο Doppler	56.8-50.6 KHz	OXI

Παρατηρούμε λοιπόν από τον Πίνακα 9 ότι όσο αφορά τον δορυφόρο LEO προκειμένου να γίνει μία ζεύξη επιτυχής, θα πρέπει να υλοποιηθεί αλγόριθμος ο οποίος μέσω του σήματος πληροφορίας να λαμβάνει ο σταθμός βάσης την ταχύτητα του δορυφόρου και να υπολογίζει την αναμενόμενη ολίσθηση, ώστε να διατηρείται η συνεχής επικοινωνία. Επιπλέον ο δορυφόρος LEO έχει μικρή καθυστέρηση στη διάδοση του σήματος αφού βρίσκεται πιο κοντά στην γη σε σχέση με τον δορυφόρο GEO. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν απαιτείται μεγάλη ισχύ σε πομπούς και δέκτες λόγω της σχετικά μικρής απόστασης από την επιφάνεια της γης.

Όσο αφορά τον δορυφόρο GEO είναι εμφανές πως δεν παρατηρείται το φαινόμενο Doppler, όμως απαιτείται μεγάλη ισχύ σε πομπούς και δέκτες ώστε να καλύψουν τις μεγάλες απώλειες σήματος λόγω της απόστασης. Επιπλέον παρατηρείται σχεδόν 5πλάσια καθυστέρηση σε χρόνο μετάδοσης του σήματος σε σχέση με ένα δορυφόρο LEO.

Επομένως κατανοούμε ότι ένας δορυφόρος LEO θα ήταν μία καλή λύση για το σενάριο μας αφού από οικονομικής πλευράς θα ήταν πιο φτηνός σε σχέση με ένα δορυφόρο GEO λόγω καυσίμων που απαιτούνται ώστε ο δορυφόρος να μπει στην γεωστατική τροχιά καθώς και για το λόγο της μικρής απαίτησης ισχύος σε πομπούς και δέκτες λόγω της κοντινής απόστασης από την γη. Το μόνο που θα έπρεπε να λάβουμε υπόψιν ήταν να προσαρμόσουμε στο σύστημά μας έναν αλγόριθμο που θα υπολογίζει την αναμενόμενη ολίσθηση και θα προσαρμόζει τον πομπό και δέκτη του σταθμού βάσης στην κατάλληλη συχνότητα ώστε να μην διακόπτεται η ζεύξη.



Στην επόμενη ενότητα συνεχίζεται ο προϋπολογισμός ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης.

4.4 Προϋπολογισμός ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης

Πριν προχωρήσουμε στον προϋπολογισμό της ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης αξίζει να αναφέρουμε κάποιες σημαντικές πληροφορίες.

Η διάδοση του σήματος σε επίγειες ζεύξεις είναι πολύ πιο πολύπλοκες από ότι φανταζόμαστε. Υπάρχουν πολυάριθμοι παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψιν ώστε να με σιγουριά να πούμε ότι έχουμε έναν προϋπολογισμό ζεύξης οποίος ανταπεξέρχεται στην πραγματικότητα. Παράγοντες όπως δέντρα, βουνά, κτήρια, προκαλούν μεγάλες επιδράσεις στην διάδοση του σήματος, άλλοτε με σκεδάσεις ή σκιάσεις και άλλοτε με ανακλάσεις του σήματος. Κατανοούμε λοιπόν ότι πρέπει να επιλέξουμε ένα αξιόπιστο μοντέλο απωλειών το οποίο θα λάβει υπόψιν όλους αυτούς τους παράγοντες που θα επιδρά αρνητικά στο εκπεμπόμενο σήμα.

Για τον προϋπολογισμό της κάτω ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο απωλειών Free Space. Το μοντέλο Free Space αποτελεί το βασικό θεωρητικό μοντέλο για τον υπολογισμό της εξασθένησης των ραδιοσημάτων που οφείλεται στην απομάκρυνση του δέκτη από τον πομπό. Στο σενάριο μας η συσκευή IoT βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή όπου δεν υπάρχουν κτήρια η μεγάλα εμπόδια, έτσι το μοντέλο αυτό μας καλύπτει για τις ανάγκες της μελέτης μας.

Η απώλεια διάδοσης υπολογίζεται από τον τύπο (18) :

$$PL(dB) = 10 * \log_{10}(f) + 20 * \log_{10}(d) - 10 * \log_{10}(G_r) - 10 * \log_{10}(G_R) - k \quad (18)$$

Το k είναι σταθερά και ισούται με 147.6.



4.4.1 Προϋπολογισμός κάτω ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης.

Τα δεδομένα που θα εισάγουμε στο πρόγραμμα μας ώστε να υπολογίσουμε τον προϋπολογισμό ζεύξης βρίσκονται στον Πίνακα 10:

Πίνακας 10: Δεδομένα εισόδου για προϋπολογισμό ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και Σταθμού βάσης

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Απόσταση μεταξύ ΣΒ-IoT συσκευής (d)	0.1 έως 15 Km
Συχνότητα λειτουργίας (f)	791,925,1805 MHz
Εύρος Ζώνης (B)	180 KHz
Resource block	1
Ισχύς εκπομπής (σταθμού) (eNB)	45 dBmW
Resource Element / ms	168
Bit/Resource Element (BPSK)	1
Bit/ Resource Element (QPSK)	2
Θόρυβος (Noise)	-73.7675 dB

Με βάση τις τιμές του Πίνακα 10 μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ λήψης μέσω του τύπου (19), τον λόγο σήματος προς θόρυβο μέσω του τύπου (20) και τον ρυθμό μετάδοσης bit μέσω των τύπων (21) και (22).

$$P_{RECEIVE} (dB) = eNB.power - PL \quad (19)$$

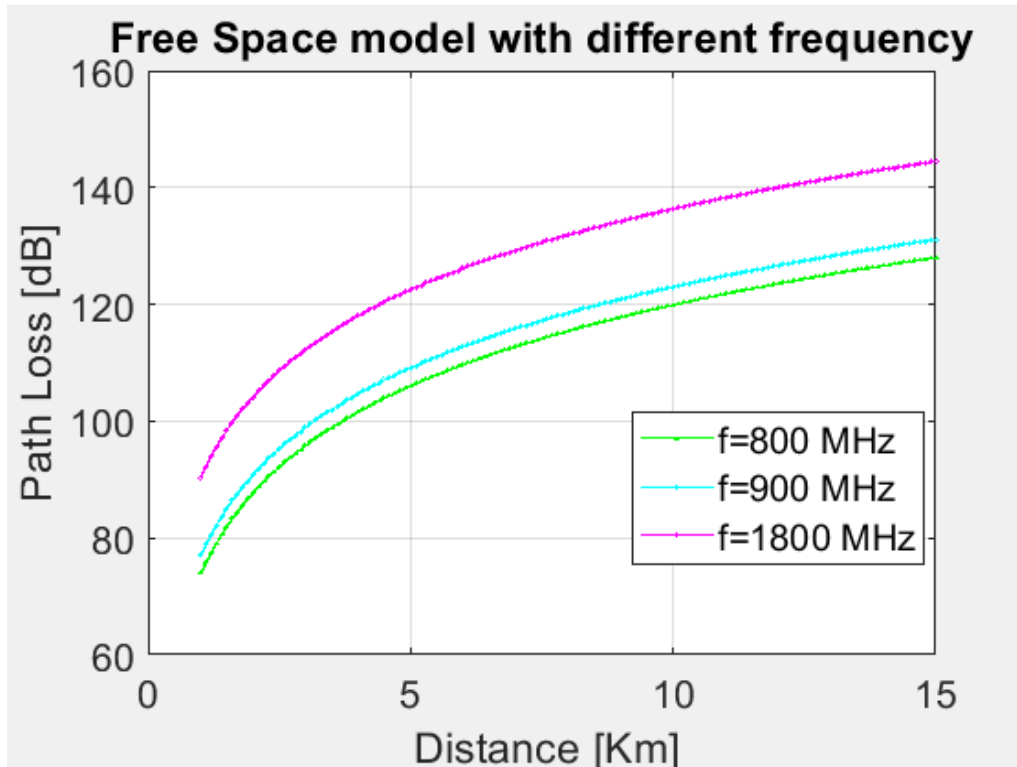
$$SNR(dB) = P_{RECEIVE} - Noise \quad (20)$$

$$Bitrate (bit/sec) = resource Element * 1000 * 1 \quad (21)$$

$$Bitrate (bit/sec) = resource Element * 1000 * 2 \quad (22)$$

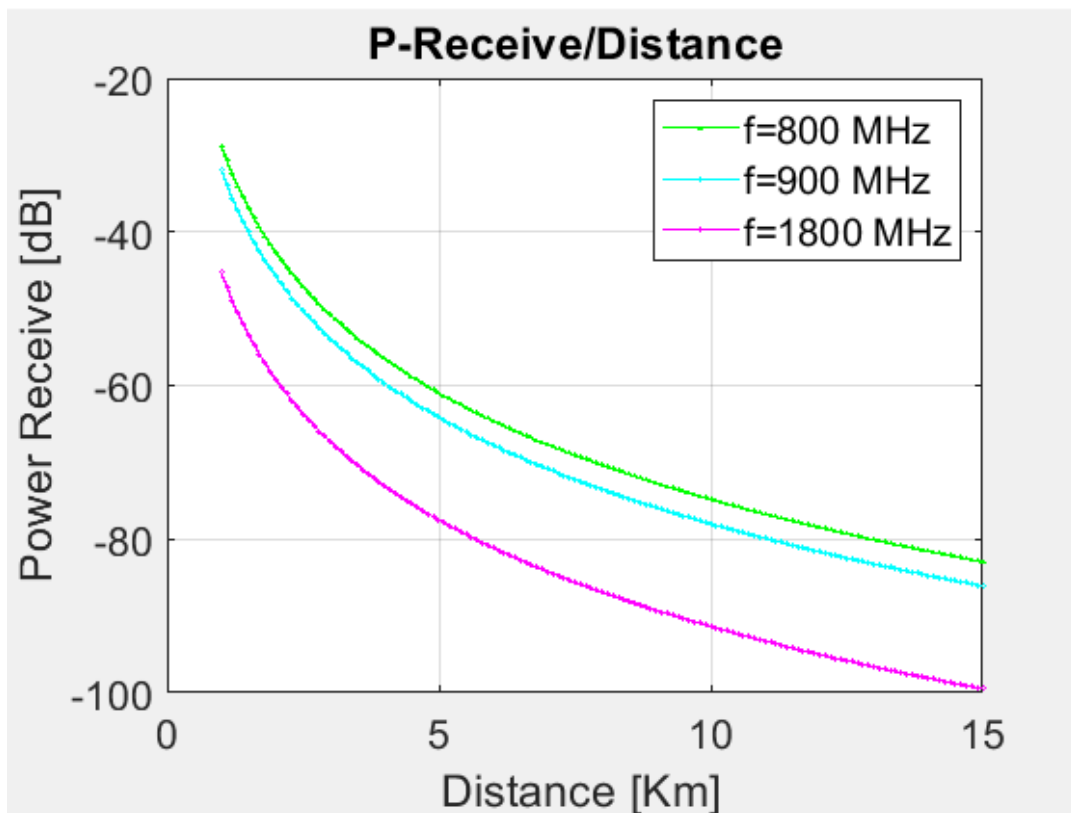


Βάσει τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν δημιουργούμε τα παρακάτω διαγράμματα:



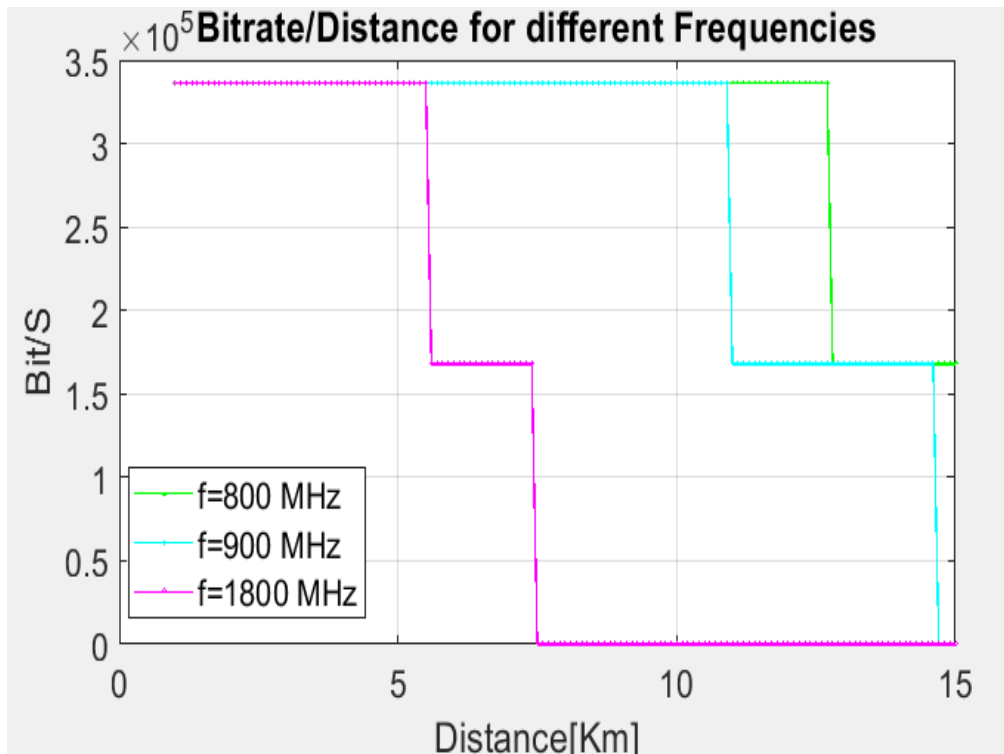
Εικόνα 33: Απώλειες διάδοσης με μοντέλο Free Space

Από την Εικόνα 33 παρατηρούμε ότι η ζώνη συχνοτήτων 800 MHz και 900 MHz έχει μικρότερο pathloss σε σχέση με την ζώνη συχνοτήτων 1800 MHz, σε συνάρτηση με την αύξηση της απόστασης μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT. Αυτό συμβαίνει διότι με βάση την Εξίσωση 18 όσο μεγαλύτερη συχνότητα έχουμε τόσο μεγαλύτερο και το pathloss σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT.



Εικόνα 34: Διάγραμμα ισχύος λήψης σε συνάρτηση με την απόσταση.

Από την Εικόνα 34 κατανοούμε ότι η ισχύ λήψης μειώνεται και για τις 3 ζώνες συχνοτήτων, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT. Αξίζει να σημειωθεί πως και εδώ παρατηρείται μεγαλύτερος βαθμός μείωσης της ισχύος λήψης στις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων σε σχέση με τις χαμηλότερες.



Εικόνα 35: Διάγραμμα ρυθμού μετάδοσης σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT

Από την Εικόνα 35 κατανοούμε ο ρυθμός μετάδοσης bit μειώνεται σε αρκετά σε σχέση με την απόσταση. Μεγάλη επίδραση στον ρυθμό μετάδοσης παρατηρούμε στις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων (1800 MHz) και μικρότερη στις χαμηλότερες ζώνες (900 MHz και 800 MHz). Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων έχουν την τάση να είναι πιο ευαίσθητες στην αύξηση της απόστασης μεταξύ σταθμού βάσης και IoT συσκευής.

Αξίζει να σημειωθεί πως όσο αυξάνουμε την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και IoT συσκευής η διαμόρφωση μειώνεται σε επίπεδο, δηλαδή υποβιβάζεται από QPSK (2bit/symbol) σε BPSK (1bit/symbol). Από το σημείο όπου το bitrate γίνεται 0 καταλαβαίνουμε ότι έχουμε λιγότερο από το ελάχιστο λόγο σήματος προς θόρυβο για να υπάρξει μετάδοση δεδομένων.

Σημειώνεται πως τα κατώφλια των λόγων σήματος προς θόρυβο βρέθηκαν από τα πρότυπα του LTE.



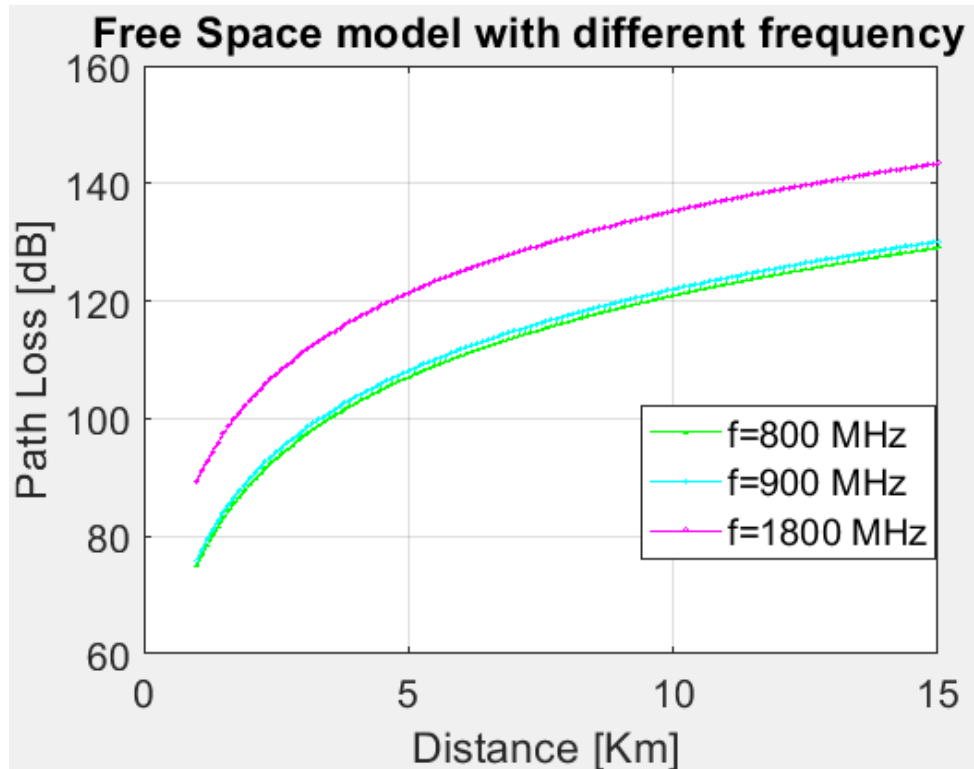
4.4.2 Προϋπολογισμός άνω ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης.

Τα δεδομένα που θα εισάγουμε στο πρόγραμμα μας ώστε να υπολογίσουμε τον προϋπολογισμό ζεύξης βρίσκονται στον Πίνακα 11:

Πίνακας 11: Δεδομένα εισόδου για προϋπολογισμό άνω ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και Σταθμού βάσης

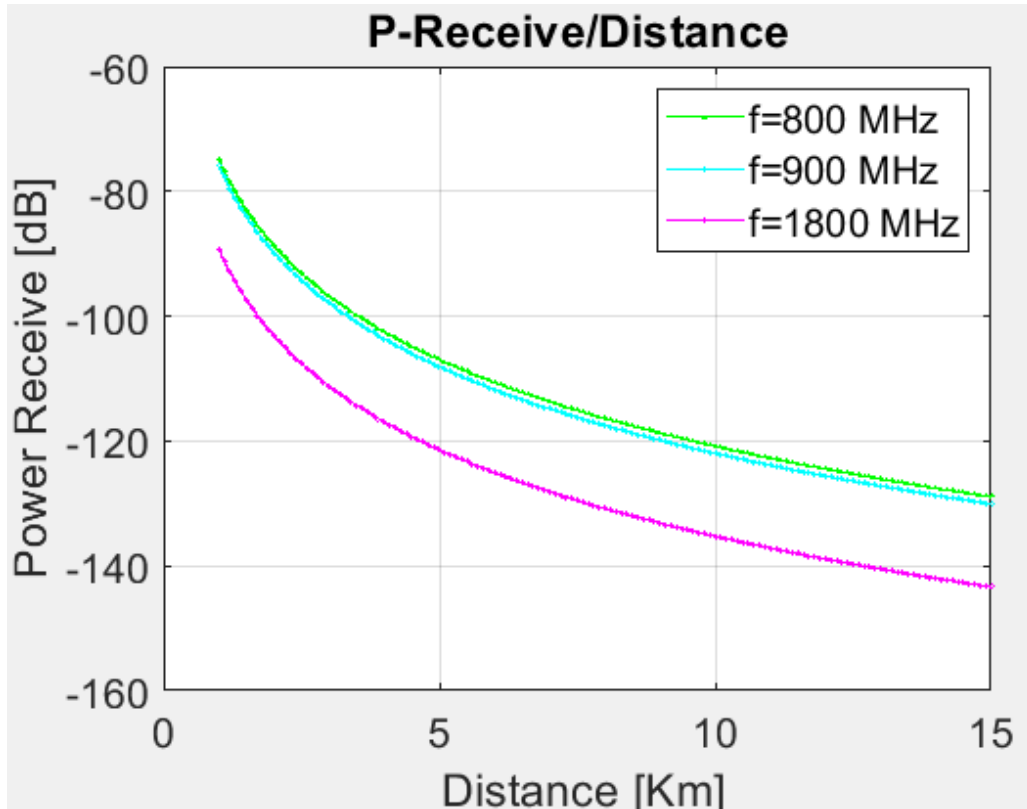
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΙΜΕΣ
Απόσταση μεταξύ ΣΒ-IoT συσκευής (d)	0.1 έως 15 Km
Συχνότητα λειτουργίας (f)	832,880,1710 MHz
Εύρος Ζώνης (B)	180 KHz
Resource block	1
Ισχύς εκπομπής (συσκευής IoT)	23 dBmW
Resource Element / ms	168
Bit/re (BPSK)	1
Bit/re (QPSK)	2
Θόρυβος	-73.7675 dB

Χρησιμοποιώντας τους τύπους της προηγούμενης ενότητας (19), (20), (21), (22) μπορούμε να προχωρήσουμε στην δημιουργία των γραφημάτων για την άνω ζεύξη μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης.



Εικόνα 36: Απώλειες διάδοσης με μοντέλο Free Space

Από την Εικόνα 36 παρατηρούμε ότι η ζώνη συχνοτήτων 800 MHz και 900 MHz έχει μικρότερο pathloss σε σχέση με την ζώνη συχνοτήτων 1800 MHz, σε συνάρτηση με την αύξηση της απόστασης μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT. Αυτό συμβαίνει διότι με βάση την Εξίσωση 18 όσο μεγαλύτερη συχνότητα έχουμε τόσο μεγαλύτερο και το pathloss σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT.



Εικόνα 37: Διάγραμμα ισχύος λήψης σε συνάρτηση με την απόσταση.

Από την Εικόνα 37 κατανοούμε ότι η ισχύ λήψης μειώνεται και για τις 3 ζώνες συχνοτήτων, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και συσκευής IoT. Αξίζει να σημειωθεί πως και εδώ παρατηρείται μεγαλύτερος βαθμός μείωσης της ισχύος λήψης στις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων σε σχέση με τις χαμηλότερες.



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

4.4.3 Συμπεράσματα των προϋπολογισμών ζεύξης μεταξύ IoT συσκευής και σταθμού βάσης

Από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων που εμφανίστηκαν στην κάτω αλλά και άνω ζεύξη και πιο συγκεκριμένα (Εικόνα 33, Εικόνα 34, Εικόνα 35, Εικόνα 36, Εικόνα 37) παρατηρούμε πως η ζώνη συχνοτήτων που είναι πιο ανθεκτική σε μεγάλες αποστάσεις, είναι η ζώνη συχνοτήτων των 800 MHz. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί πως η διαμόρφωση που είναι επιθυμητή να χρησιμοποιηθεί στο σενάριο μας είναι η BPSK διότι προσφέρει ακόμα περισσότερη οικονομία στις μπαταρίες της συσκευής μας.



Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επικοινωνία μίας IoT συσκευής με τον σταθμό βάσης και έπειτα η επικοινωνία του σταθμού βάσης με τον δορυφόρο. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη έγινε για τους δορυφόρους GEO και LEO οι οποίοι είναι χρήσιμοι για παροχή υπηρεσιών που αφορούν τις τηλεπικοινωνίες. Από πλευράς σταθμού βάσης και συσκευής IoT έγινε η μελέτη επικοινωνίας με βάση το πρωτόκολλο του NB-IoT το οποίο διακρίνεται για την οικονομία που προσφέρει από μεριάς ισχύος και για την καταλληλότητά του για εφαρμογή στις IoT συσκευές.

Αρχικά έγινε μία εισαγωγή στην τεχνολογία IoT. Αναφέρθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά μιας IoT συσκευής καθώς και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως το (NB-IoT, LoRa, Sigfox, EC-GSM-IoT και LTE-M). Έπειτα έγινε αναφορά ως προς την συνεισφορά της τεχνολογίας IoT στην σύγχρονη κοινωνία, καθώς και την περιγραφή του τεχνικού της μέρους. Ακολούθησε η ανάλυση της τεχνολογίας NB-IoT μέσω δορυφορικής ζεύξης που περιέλαβε θεωρητικό και τεχνικό μέρος σε επίπεδο μελέτης. Επιπλέον, έγινε ανάλυση των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν σε μία τέτοια ζεύξη, όπως οι απώλειες λόγω βροχής. Ως κύριο πρόβλημα σε μία ζεύξη με LEO δορυφόρο αναφέρθηκε το φαινόμενο Doppler. Στη συνέχεια, έγινε ανάλυση της τεχνικής OFDM και της SC-OFDM για την άνω και κάτω ζεύξη στο LTE που χρησιμοποιείται και στο NB-IoT. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση Link Budget για το NB-IoT μέσω δορυφόρου το οποίο θα περιλαμβάνει το φαινόμενο Doppler, Path-loss, απώλειες λόγω βροχής και τυχόν άλλες απώλειες. Η Μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Matlab εργαλείου, και έγινε τροποποίηση του μοντέλου LTE τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, ώστε να φτιάξουμε το μοντέλο NB-IoT το οποίο μας έδωσε πραγματικά δεδομένα (υπολογισμός ισχύς σήματος λήψης-εκπομπής, υπολογισμός σφαλμάτων), για 2 σενάρια: 1) δορυφόρο LEO και 2) δορυφόρο GEO.

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε πως ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου NB-IoT το οποίο υπολογίζει την ισχύ λήψης και εκπομπής, καθώς και τα σφάλματα τα οποία μπορεί να προκύψουν από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν.



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

5.2 Μελλοντική έρευνα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αποτελούν την βάση για την επικοινωνία μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού καθώς και για την επικοινωνία μεταξύ σταθμού βάσης και IoT συσκευής. Ως μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να δημιουργηθούν διάφορα σενάρια, όπως για παράδειγμα η IoT συσκευή να αποτελεί συσκευή χρήστη και να κινείται στο χώρο (wearables), έτσι θα πρέπει να μελετηθούν και άλλοι παράγοντες όπως η οπτική επαφή ή όχι της IoT συσκευής, (Line Of Sight , No Line Of Sight) με τον σταθμό βάσης καθώς και διάφορες παρεμβολές από κοντινές συσκευές IoT οι οποίες θα χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα χαμηλής ισχύος. Επιπλέον όσον αφορά την επικοινωνία του σταθμού βάσης και του δορυφόρου LEO, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη του αλγορίθμου υπολογισμού της ολίσθησης Doppler ο οποίος να προσαρμόζοταν κατάλληλα στο πρωτόκολλο NB-IoT έτσι ώστε να είναι διαθέσιμο το πρωτόκολλο και για χρήση μέσω δορυφορικής ζεύξης για τον δορυφόρο LEO.



6 Βιβλιογραφία

- [1] "Nb-pss and nb-sss design (revised)," Qualcomm, 3GPP RAN WG1 NB-IoT Ad-Hoc Meeting, Mar. 22-24, 2016.
- [2] Y.-H. Nam, Y. Akimoto, Y. Kim, M.-i. Lee, K. Bhattad, and A. Ekpenyong, "Evolution of reference signals for lte-advanced systems," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, 2012.
- [3] J. Bradley, J. Barbier, and D. Handler, "Embracing the internet of everything to capture your share of \$ 14.4 trillion," White Paper, Cisco, 2013.
- [4] Y.-P. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grönvlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H. S. Razaghi, "A primer on 3gpp narrowband internet of things (nb-iot)," arXiv preprint arXiv:1606.04171, 2016.
- [5] R. Ratasuk, B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe, and A. Ghosh, "Nb-iot system for m2m communication," in Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016 IEEE. IEEE, 2016.
- [6] Narrowband LTE in Machine to Machine Satellite Communication (Petri Niemelä), 2018
- [7] D. Tse and P. Viswanath, Fundamentals of wireless communication. Cambridge university press, 2005.
- [8] R. v. Nee and R. Prasad, OFDM for wireless multimedia communications. Artech House, Inc., 2000.
- [9] B. Furht and S. A. Ahson, Long Term Evolution: 3GPP LTE radio and cellular technology. Crc Press, 2016.
- [10] Digital Communications - Fundamentals and Applications 2E (Bernard Sklar), Prentice Hall PTR
- [11] 3GPP, Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT), Technical Report 45.820, Release 13.1, 2015.
- [12] Ericsson, Cellular networks for massive IoT, Whitepaper, January 2016
- [13] Agilent, "3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges," June 2009.
- [14] H. Zarrinkoub, "Understanding LTE with MATLAB : from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation," Wiley, 2014.
- [15] International Telecommunication Union-Telecommunications Standardization Sector (ITU). (2001). ITU-T Recommendation G983.3: A Broadband Optical Access System with n Increased Service Capability by Wavelength Allocation. Geneva Switzerland: ITU-T.



- [16] Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura and H. Ishii, "Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 12-18, February 2013.
- [17] Spyros Louvros "Το δίκτυο LTE", 2014.
- [18] Low-power Physical-layer Design for LTE Based Very NarrowBand IoT (VNB - IoT) Communication (Prashant Sharma), 2017.
- [19] Δορυφορικές Επικοινωνίες Τεχνολογίες, Συστήματα και Εφαρμογές (ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΣ), 2015.
- [20] *Satellite Communications 2nd version* (Pratt-Bostian-Allnut), 2009
- [21] "Design principles of nb-iot sync channel," Qualcomm, 3GPP RAN1 Meeting 83, Nov. 15-22, 2015.
- [22] 3GPP, "RP-151621 - 3GPP Work Item Description: Converged-NB IoT", version 15, 2016.
- [23] 3GPP, "TS 36.211: Physical channels and modulation", Technical Specification 36.211, version 13.2.0, 2016.
- [24] 3GPP, "TS 36.321: Medium Access Control (MAC) protocol specification", version 13.2.0, 2016.
- [25] European Telecommunications Standards Institute, "Satellite Earth Stations and Systems (SES), Evaluation of the OFDM as a Satellite Radio Interface", Technical Report TR-102.443, Version 1.1.1, 2008.
- [26] E. Gündüzhan and K. Brown, "Narrowband Satellite Communications: Challenges and Emerging Solutions", *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Volume 33, Number 1, 2015.
- [27] Zhenyu Na, Qinyang Guan, Ce Fu, Yang Cui and Qing Guo, "Channel Model and Throughput Analysis for LEO OFDM Satellite Communication System", *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2013.
- [28] B. Evans, "The role of Satellites in 5G", University of Surrey, 2014.
- [29] C. Angelis and S. Louvros, "Performance Analysis and Optimization of Downlink Multi-User MIMO LTE for Satellite Communications", 2012.
- [30] Machina Research, "LPWA Forecasts".
- [31] G. Dregvaite and R. Damasevicius, "SIGFOX at a Glance". *Information and Software Technologies: 22nd International Conference, ICIST 2016*.
- [32] B. Elbert, "Introduction to Satellite Communication", Third Edition, Artech House, 2008, ISBN-978-1-59693-210-4.
- [33] C. Fossa, R. Raines, G. Gunsch, M.A. Temple, "An overview of the IRIDIUM (R) low Earth



Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη επικοινωνίας Narrow-Band IoT συσκευών μέσω Δορυφορικής ζεύξης
(Communication Study in Narrow-Band IoT over Satellite)**

Παπαϊωάννου Γρηγόριος

orbit (LEO) satellite system", Proceedings of the IEEE 1998 National Aerospace and Electronics Conference, 1998.

[34] Iridium, "IoT solutions", website, Available: <https://www.iridium.com/solutions/iot>.

[35] Qualcomm, "Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT)", July 2016.