

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή **Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**



**Μελέτη Συστήματος Στενής Ζώνης IoT (NB-IoT) Διαμέσου
Δορυφόρου**

Ευθύμιος Τσερέπας

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας

Μάιος 2019

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μελέτη Συστήματος Στενής Ζώνης IoT (NB-IoT) Διαμέσου Δορυφόρου

Ευθύμιος Τσερέπας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση
μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας
από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2019

Περίληψη

Οι ασύρματες επικοινωνίες εξελίσσονται με ραγδαίους ρυθμούς φέρνοντας συνεχώς στο προσκήνιο νέες τεχνολογίες όπως το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Το όραμα του IoT είναι να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο σε οποιαδήποτε συσκευή που διαθέτει πομποδέκτη κάθε στιγμή και σε κάθε μέρος. Ωστόσο υπάρχουν περιοχές όπου το επίγειο δίκτυο δεν μπορεί να καλύψει ορισμένες απομακρυσμένες περιοχές όπως για παράδειγμα έρημος, παράκτιες περιοχές.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη συστήματος στενής ζώνης IoT (NB-IoT) διαμέσου δορυφόρου. Οι συσκευές NB-IoT είναι σε απομακρυσμένες περιοχές όπου υπάρχει περιορισμένη ή καθόλου επικοινωνιακή υποδομή. Η χρήση δορυφόρων μπορεί να δώσει μια εφικτή λύση για την επικοινωνία των συσκευών που βρίσκονται στις συγκεκριμένες περιοχές. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα εξεταστεί το link budget, η καθυστέρηση διάδοσης για τους δορυφόρους GEO και LEO, καθώς και το doppler shift.

Στην αρχή της διατριβής γίνεται αναφορά για το IoT καθώς και για τα δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής (LPWAN). Το NB-IoT έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα δίκτυα LPWAN. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει σταθμούς βάσης και υποδομές πυρήνα LTE αντί να αναπτύξει νέο εξοπλισμό, και επομένως να χρησιμοποιήσει ήδη υπάρχουσες άδειες φάσματος και λειτουργικές υπηρεσίες και μελλοντικά θα μπορεί να χρησιμοποιήσει τις υποδομές των ανερχόμενων δικτύων πέμπτης γενιάς 5G.

Στην συνέχεια γίνεται θεωρητική μελέτη για το δίκτυο NB-IoT σύμφωνα με το 3GPP για την έκδοση 13 και 14. Μετά ακολουθεί θεωρητική μελέτη για τις δορυφορικές επικοινωνίες ώστε στην συνέχεια να γίνει μελέτη για την χρήση δορυφόρου για επικοινωνίες NB-IoT.

Ο GEO ή ο LEO δορυφόρος είναι ένας απλός επαναλήπτης OFDM ενός επιπέδου με κάποια ειδικά χαρακτηριστικά, όπως κέρδη κεραίας και / ή λειτουργικούς ενισχυτές UL / DL για την παροχή του κατάλληλου προϋπολογισμού ζεύξης (Link Budget). Γίνεται υπολογισμός Link Budget για δορυφόρους GEO και LEO και μελέτη προβλημάτων του δορυφορικού καναλιού όπως καθυστερήσεις και μετατόπιση doppler.

Οι καθυστερήσεις και η μετατόπιση doppler δημιουργούν προβλήματα στην επικοινωνία δορυφόρου-τερματικών συσκευών, αλλά μπορούν να αντιμετωπιστούν από τροποποίηση των προδιαγραφών και από άλλες υπάρχουσες τεχνικές που καθιστούν ελάχιστες αλλαγές στο πρότυπο.

Summary

Wireless communications are evolving rapidly, bringing new technologies to the forefront, such as the Internet of Things (IoT). The IoT vision is to provide access to the internet on any device that has a transceiver at any time and at every place. However, there are areas where the terrestrial network cannot cover some remote areas such as desert or coastal areas.

The purpose of this M.Sc. dissertation is to research the Narrowband IoT (NB-IoT) through a satellite. NB-IoT devices are in remote areas where there is limited or no communication infrastructure. Using satellites can provide a feasible solution for communicating devices in these areas. In the M.Sc. dissertation we will examine the link budget, the spread delay for the GEO and LEO satellites as well as the Doppler shift.

At the beginning of the dissertation reference is made to the IoT and to the low-power wideband networks (LPWAN). NB-IoT has many advantages over other LPWAN networks. One key advantage is that it can use base stations and LTE core infrastructures instead of deploying new equipment, and therefore use existing spectrum licenses and operational services, and in the future will be able to use the upgraded fifth-generation 5G generation infrastructure.

Next, a theoretical study for the NB-IoT network according to 3GPP for the 13th and 14th editions are made. Then follow a theoretical study on satellite communications to study the use of satellite for NB-IoT communications.

The GEO or LEO satellite is a single level OFDM repeater with some special features such as antenna gains and / or UL / DL functional amplifiers to provide the appropriate Link Budget. Link Budget calculation for GEO and LEO satellites and satellite channel problem study such as doppler delays and shifting.

Doppler delays and displacement pose problems in satellite-terminal communication but can be addressed by modifying specifications and other existing techniques that make little change to the standard.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Δημήτριο που με έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με τις ασύρματες επικοινωνίες από μικρή ηλικία. Όταν πήγα στην πρώτη γυμνασίου μου έκανε δώρο έναν RF δέκτη όπου είχε την δυνατότητα να λαμβάνει τις συχνότητες της μπάντας των CB. Λαμβάνοντας συνομιλίες της μπάντας των CB ήμουν ενθουσιασμένος και στην συνέχεια μου αγόρασε έναν πομποδέκτη CB. Με αυτό τον τρόπο έκανα τα πρώτα μου βήματα στις ασύρματες επικοινωνίες, καθώς επίσης εξοικειώθηκα και με τις βασικές ορολογίες.

Στην συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δημοσθένη Βουγιούκα για το ενδιαφέρον θέμα που μου πρότεινε να ασχοληθώ καθώς και για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου όπου ήταν απαραίτητη ώστε να ολοκληρωθεί.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Σκοπός έρευνας	2
1.2	Αναγκαιότητα και σπουδαιότητα έρευνας.....	3
1.3	Βασικά ερευνητικά ερωτήματα.....	3
1.4	Προτεινόμενη μεθοδολογία	4
2	Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)	5
2.1	Ορισμός του IoT	6
2.2	Στοιχεία του IoT	7
2.2.1	Αισθητήρες – Sensors	8
2.2.2	Τοπική επεξεργασία και αποθήκευση.....	9
2.2.3	Δίκτυο και διαδίκτυο.....	10
2.2.4	Cloud (Νέφος)	11
2.3	Πρωτόκολλα IoT	11
2.4	Επικοινωνία μηχανή προς μηχανή	14
2.5	Δίκτυα Χαμηλής Ισχύος Ευρείας Περιοχής (LPWAN)	16
2.5.1	Sigfox	18
2.5.2	LoRa	20
2.5.3	Κυψελωτό IoT (CIoT)	22
3	NB-IoT	25
3.1	Εισαγωγή	26
3.1.1	Επιλογές ανάπτυξης	28
3.1.2	Δομή δικτύου.....	30
3.1.3	Βασικά Χαρακτηριστικά του NB IoT	31
3.1.4	Ζώνες συχνοτήτων για το NB-IoT	32
3.1.5	Στοιβά Πρωτοκόλλων	33
3.2	PDCP Layer	34
3.2.1	Λειτουργίες του PDCP	35
3.2.2	Αλλαγές στο επίπεδο NB IoT PDCP σε σχέση με το επίπεδο LTE PDCP.....	36

3.3	RRC layer	36
3.3.1	Φορέας RF σηματοδότησης και δεδομένων	37
3.3.2	Μπλοκ πληροφοριών συστήματος	38
3.3.3	Τρόποι λειτουργίας RRC	39
3.3.4	Διαδικασία UE σε IDLE mode	39
3.3.4.1	Επιλογή PLNM	39
3.3.4.2	Επιλογή κυψέλης και κινητικότητα	40
3.3.5	Διαδικασία UE σε CONNECTED mode	41
3.3.5.1	Δημιουργία σύνδεσης RRC (RRC Connection Establishment	41
3.3.5.2	RRC Connection Release	43
3.3.5.3	Ικανότητα Μεταφοράς UE (UE Capability Transfer).....	44
3.4	RLC Layer	45
3.4.1	Τρόπου λειτουργίας του RLC	45
3.5	MAC Layer	45
3.5.1	Διαδικασία τυχαίας προσπέλασης.....	46
3.5.2	Προγραμματισμός και λειτουργία HARQ	48
3.5.4	Timing Advance Command	50
3.6	Φυσικό Στρώμα PHY	51
3.6.1	Κάτω ζεύξη (Downlink)	52
3.6.1.1	Δομή πλαισίου(frame) και θέσεις-σχισμής(slot) για την κάτω ζεύξη	52
3.6.1.2	Κανάλια και σήματα κάτω ζεύξης	53
3.6.1.3	Σήματα κάτω ζεύξης	54
3.6.1.4	Φυσικά Κανάλια	56
3.6.2	Άνω ζεύξη (Uplink)	60
3.6.2.1	Δομή πλαισίου(frame) και θέσεις-σχισμής(slot) άνω ζεύξης	60
3.6.2.2	Κανάλια και σήματα άνω ζεύξης	61
3.6.3	Απεικόνιση Πόρων	63
3.6.4	Έλεγχος Ισχύος	64
3.6.4.1	Άνω Ζεύξη (Uplink)	64
3.6.4.2	Κάτω Ζεύξη (Downlink)	65
3.7	Μεταφορά Δεδομένων	66
3.7.1	Βελτιστοποίηση του CIoT EPS στο επίπεδο ελέγχου	66
3.7.2	Βελτιστοποίηση του CIoT EPS στο επίπεδο χρήστη	67
3.7.2.1	Εγκατάσταση και διαμόρφωση σύνδεσης δεδομένων	67

3.7.2.2 Διαμόρφωση πολλαπλών φορέων (Multi Carrier Configuration)	68
3.7.2.3 Λήψη του καναλιού ελέγχου	69
3.7.2.4 Μετάδοση του καναλιού δεδομένων στο uplink	70
3.7.2.5 Λήψη του καναλιού δεδομένων downlink	72
3.8.1 3GPP LTE Έκδοση 14 για NB-IoT	73
3.8.1 Τοποθέτηση (positioning)	73
3.8.2 Πολυεκπομπή(Multicast)	75
3.8.3 Χαμηλή Ισχύς UE	76
3.8.4 Βελτιωμένοι πολλαπλοί φορείς	77
3.8.5 Αύξηση Ρυθμού δεδομένων	79
3.8.6 Ενισχυμένη συνδεσιμότητα κινητικότητας	80
3.8.7 Διαδικασία ένδειξης βοήθειας απελευθέρωσης	81
3.8.8 Περιορισμός στη χρήση βελτιώσεων κάλυψης	81
4 Δορυφορικές επικοινωνίες	83
4.1 Εισαγωγή	84
4.2 Τροχιές	85
4.3 Κατανομή φάσματος συχνοτήτων	89
4.4 Δορυφορικές Υπηρεσίες Κινητής	90
4.5 Απώλειες διάδοσης δορυφορικών ζεύξεων	91
4.5.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου (Free Space Loss – FSL)	92
4.5.2 Απώλειες Ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας (La)	92
4.5.3 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων	93
4.5.4 Απώλειες λόγω αποπόλωσης (L_{DEPOL})	93
4.5.5 Απώλειες λόγω ασυμφωνίας πόλωσης	94
4.5.6 Απώλειες λόγω σκόπευσης	94
4.5.7 Απώλειες λόγω ανωμαλιών της επιφάνειας κατόπτρου	96
4.5.8 Εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής και του συστήματος λήψης	96
4.5.9 Υπολογισμός συνολικών απωλειών διάδοσης	96
4.6 Βασικοί όροι για τον υπολογισμό Link Budget	97
4.7 Φαινόμενο Doppler	102
5 Χρήση δορυφόρου για επικοινωνίες IoT με έμφαση στο NB-IoT	105

5.1	Αρχιτεκτονικές Δορυφορικών Υπηρεσιών IoT	106
5.2	NB-IoT διαμέσου δορυφόρου	111
5.2.1	Επιλογή ανάπτυξης NB-IoT και συχνότητας δορυφόρου	111
5.2.2	Υπολογισμός Link Budget	112
5.2.2.1	Περίπτωση δορυφόρων LEO στα 600 χλμ	113
5.2.2.2	Περίπτωση δορυφόρων LEO στα 1500 χλμ	118
5.2.2.2	Περίπτωση δορυφόρων GEO	123
5.3	Προβλήματα δορυφορικού καναλιού	128
5.3.1	Καθυστέρηση	128
5.5.2	Μετατόπιση Doppler	133
6	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις	136
	Βιβλιογραφία	138

Ευρετήριο Συντμήσεων - Ακρωνυμίων

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AM	Acknowledged Mode
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
BW	Bandwidth
CCCH	Common Control Channel
CIoT	Cellular Internet of Things
CoAP	Constrained Application Protocol
CP	Cyclic Prefix
DBPSK	Differential phase shift keying
DCCH	Dedicated Control Channel
DMRS	Demodulation Reference Signal
DSS	Data Distribution Service
eNodeB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
GEO	Geostationary Earth Orbit
GFSK	Gaussian frequency shift keying
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HEO	High Elliptical Orbit
HTTP	Hypertext Transfer Protocol Secure
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LEO	Low Earth Orbit
LPWAN	Low Power Wide Area Network
M2M	Machine to machine
MAC	Media Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MCL	Maximum Coupling Loss
MEO	Medium Earth Orbit
MIB	Master Information Block
MME	Mobility Management Entity
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MTC	Machine Type Communication
NAS	Non Access Stratum
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
NPBCH	Narrowband Physical Broadcast Channel
NPDCCH	Narrowband Physical Downlink Control Channel
NPDSCH	Narrowband Physical Downlink Shared Channel
NPRACH	Narrowband Physical Random Access Channel

NPRACH	Narrowband Physical Random Access Channel
NPSS	Narrowband Primary Synchronization Signal
NPUSCH	Narrowband Physical Uplink Shared Channel
NSSS	Narrowband Secondary Synchronization Signal
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
OTDOA	Observed Time Difference Of Arrival
PAPR	Peak To Average Power Ratio
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PGW	Packet Data Network Gateway
PHY	Physical Layer
PLMN	Public Land Mobile Network
QoS	Quality of service
RAR	Random Access Response
RLC	Radio link control
RRC	Radio Resource Control
RSRP	Reference Signals Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSTD	Reference Signal Time Difference
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SGW	Serving Gateway
SIM	Subscriber Identity Module
SRB	Signaling Radio Bearer
TAU	Tracking Area Update
UNB	Ultra-Narrow Band
XMPP	Extensible Messaging and Presence Protocol

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι τηλεπικοινωνίες είναι ένας κλάδος που αναπτύσσεται ραγδαία, εισάγει νέες τεχνολογίες όπου βελτιώνει το επίπεδο ζωής. Από την αρχαιότητα υπάρχει οικονομική σχέση μεταξύ του εμπορίου και των μεταφορών από την μια μεριά και της ανταλλαγής πληροφορίας από την άλλη. Με την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών, η σχέση μεταξύ των διαδρομών μεταφοράς της πληροφορίας και των διαδρομών των φυσικών μεταφορών άλλαξε ραγδαία. Οι ασύρματες επικοινωνίες, βασική εφαρμογή των οποίων αποτελούν και οι κινητές επικοινωνίες, διαφοροποίησαν περαιτέρω την χωρική σχέση μεταξύ της τηλεπικοινωνιακής υποδομής και την υποδομή φυσικής μεταφοράς των αγαθών. [01]

Τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών θα επιτρέπουν την επικοινωνία ανθρώπου που μετακινείται με οποιονδήποτε συνδρομητή του ίδιου η διαφορετικού συστήματος, οπουδήποτε και αν βρίσκεται αυτός, οποιαδήποτε στιγμή παρέχοντας υπηρεσίες πολυμέσων. Η τεράστια ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων, σε συνδυασμό με τη μεγάλη ανάπτυξη των φορητών υπολογιστών, των tablets, των smartphones αποτελούν μια ισχυρή ένδειξη για την ταχύτατη εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων στο μέλλον. Το 2015 υπήρχαν περισσότερες από 8.5 δις ασύρματες συσκευές παγκόσμιος όπου συνδέονται στο διαδίκτυο και

αναμένετε ο διπλασιασμός τους μέχρι το 2020. Επιπλέον αναμένεται δεκαπλασιασμός στον αριθμό χρηστών και αύξηση κατά 100 φορές στις απαιτήσεις τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέχρι το 2020 [02].

Το όραμα και η εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών ενόψει της 4^{ης} βιομηχανικής επανάστασης, έτος ορόσημο το 2020 είναι η υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υψηλής ποιότητας μεταξύ φορητών τερματικών συσκευών που μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε, οποτεδήποτε. Η εξέλιξη αυτή θα επιτρέπει την υποστήριξη πολλαπλών δραστηριοτήτων από τους χρήστες, τόσο για την εργασία τους όσο και για τη διασκέδαση τους, χρησιμοποιώντας μικρές συσκευές χειρός, με λειτουργίες τηλεφώνου και επικοινωνία δεδομένων, όπως και την επικοινωνία μηχανής με μηχανή (M2M communication). Με την συνεχώς αυξανόμενη εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών εισέρχονται νέες τεχνολογίες όπως για παράδειγμα το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things – IoT).

Ο στόχος του IoT είναι να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο σε οποιαδήποτε συσκευή που διαθέτει πομποδέκτη κάθε στιγμή και σε κάθε μέρος. Ωστόσο υπάρχουν περιοχές όπου το επίγειο δίκτυο δεν μπορεί να καλύψει ορισμένες απομακρυσμένες περιοχές όπως για παράδειγμα έρημος, παράκτιες περιοχές. Η χρήση δορυφόρων μπορεί να δώσει μια εφικτή λύση για την επικοινωνία των συσκευών που βρίσκονται στις συγκεκριμένες περιοχές. Ως συμπλήρωμα και επέκταση των επίγειων IoT συστημάτων, τα δορυφορικά IoT συστήματα είναι μοναδική προσέγγιση ώστε να επιτευχθεί παγκόσμια κάλυψη IoT υπηρεσιών.

1.1 Σκοπός έρευνας

Ο σκοπός της έρευνας είναι η μελέτη και η διερεύνηση, σύμφωνα με το 3GPP, λειτουργικά εφικτής λύσης για τη σύνδεση των αισθητήρων LTE NB-IoT και των συσκευών επικοινωνίας τύπου μηχανής (M2M) σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές, όπου υπάρχει περιορισμένη ή καθόλου επικοινωνιακή υποδομή. Η χρήση δορυφόρων μπορεί να δώσει μια εφικτή λύση για την επικοινωνία των συσκευών που βρίσκονται στις συγκεκριμένες περιοχές. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις στη δορυφορική συνδεσιμότητα, ωστόσο η απλούστερη, η φθηνότερη, η πιο εύκολα εφαρμοζόμενη και η πιο συμβατή με την υπάρχουσα αρχιτεκτονική LTE-A NB-IoT (3GPP έκδοση 13 και 14) είναι η LTE-A διεπαφή διαμέσου δορυφόρου. Ο

αισθητήρας ή ο εξοπλισμός LTE-A NB-IoT βρίσκεται σε απομακρυσμένη ή αγροτική περιοχή (έρημος, απομονωμένη αγροτική περιοχή ή ωκεάνια νησίδα ή πλατφόρμα ωκεανών) με περιορισμένη ή καθόλου σύνδεση με οποιοδήποτε επίγειο δίκτυο. Ο GEO ή ο LEO δορυφόρος είναι ένας απλός επαναλήπτης OFDM 1 επιπέδου με κάποια ειδικά χαρακτηριστικά, όπως κέρδη κεραίας και / ή λειτουργικούς ενισχυτές UL / DL για την παροχή του κατάλληλου προϋπολογισμού ζεύξης (Link Budget).

1.2 Αναγκαιότητα και σπουδαιότητα έρευνας

Οι δορυφορικές επικοινωνίες προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις LTE-A και 5G, τόσο από πλευράς μεγάλης απόδοσης όσο και παγκόσμιας συνδεσιμότητας, παρέχουν έναν πολύτιμο πόρο για την επέκταση και συμπλήρωση επίγειων δικτύων που εξασφαλίζουν τη συνδεσιμότητα, καθώς και την ακεραιότητα και την απόδοση. Η τεχνολογία NB-IoT αποτελεί μία νέα τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, για δίκτυα μεγάλων αποστάσεων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, η οποία σχεδιάστηκε από την 3GPP, όπως τα δίκτυα LTE-A / 5G. Χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με το LTE, το οποίο καθιστά απαραίτητη την άδεια για τη χρήση του, χρησιμοποιώντας το υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Ο συνδυασμός NB-IoT και δορυφορικών επικοινωνιών αποτελεί καινοτόμο εγχείρημα στη σχεδίαση τόσο του φυσικού επιπέδου όσο και του επιπέδου MAC, εξετάζοντας τις καθυστερήσεις, τις μετατοπίσεις doppler και τις επιπτώσεις που έχουν κατά την επικοινωνία δορυφόρου και τερματικών συσκευών.

1.3 Βασικά ερευνητικά ερωτήματα

- Το NB-IoT σε σχέση με τα άλλα δίκτυα LPWAN είναι το πιο κατάλληλο για να επιτευχθεί μεγάλη κάλυψη και να αξιοποιηθεί το δορυφορικό κανάλι για απομακρυσμένες περιοχές;
- Οι δορυφόροι LEO ή GEO είναι πιο ιδανική για χρήση του NB-IoT ;
- Ποια επιλογή ανάπτυξης του NB-IoT και συχνότητα δορυφόρου είναι κατάλληλη για χρήση του NB-IoT στο δορυφορικό κανάλι ;
- Τι προβλήματα δημιουργεί η καθυστέρηση στην επικοινωνία δορυφόρου-τερματικών συσκευών ;

- Τι προβλήματα δημιουργεί η μετατόπιση doppler στην επικοινωνία δορυφόρου-τερματικών συσκευών ;
- Υπάρχουν τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων των καθυστερήσεων και των μετατοπίσεων doppler ;

1.4 Προτεινόμενη μεθοδολογία

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα εξεταστεί το link budget, η καθυστέρηση διάδοσης για τους δορυφόρους GEO και LEO, καθώς και το doppler shift. Η τεχνική ανάλυση ενός τέτοιου δικτύου θα πρέπει να επικεντρώνεται τόσο σε φυσικό όσο και σε επίπεδο MAC, συμπεριλαμβανομένης μιας τεχνικής ανάλυσης σκοπιμότητας.

Κεφάλαιο 2

Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)

Το διαδίκτυο των πραγμάτων είναι το δίκτυο των φυσικών αντικειμένων - συσκευών, οχημάτων, κτιρίων και άλλων αντικειμένων που είναι ενσωματωμένα με ηλεκτρονικούς αισθητήρες λογισμικού και συνδεσιμότητα δικτύου - που επιτρέπει σε αυτά τα αντικείμενα να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα. Η επέκταση του τρέχοντος διαδικτύου και η παροχή σύνδεσης, επικοινωνίας και δικτύωσης μεταξύ συσκευών και φυσικών αντικειμένων, ή των “Πραγμάτων”, είναι μια αυξανόμενη τάση που συχνά αναφέρεται ως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην τεχνολογία IoT καθώς και στα Δίκτυα Χαμηλής Ισχύος Ευρείας Περιοχής (LPWAN).

2.1 Ορισμός του IoT

Ο όρος διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things – IoT) προτάθηκε για πρώτη φορά από τον βρετανό τεχνολόγο Kevin Ashton το 1999 και αναφέρεται στις συσκευές, ενεργοποιητές, αισθητήρες όπου θα έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο και θα έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν και να ανταλλάζουν πληροφορίες μεταξύ τους. Μέχρι το 2020 αναμένεται να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο των πραγμάτων 50 δισεκατομμύρια συσκευές. Το IoT αναμένεται να έχει πολλά οφέλη σε διάφορους τομείς όπως για παράδειγμα στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσω των έξυπνων δικτύων (smart grid), την βελτίωση της καθημερινότητας των δημοτών μέσω των έξυπνων πόλεων (smart cities), παρακολούθηση και ασφάλεια στα σπίτια μέσω των έξυπνων σπιτιών (smart homes), στην υγειονομική περίθαλψη, τις μεταφορές από εταιρείες logistics και σε πολλούς άλλους τομείς. Οι εξοπλισμοί του IoT είναι πιο ψηφιοποιημένοι και πιο συνδεδεμένοι, δημιουργώντας δίκτυα μεταξύ μηχανών, ανθρώπων και Διαδικτύου, οδηγώντας στη δημιουργία νέων οικοσυστημάτων που επιτρέπουν υψηλότερη παραγωγικότητα, καλύτερη ενεργειακή απόδοση και υψηλότερη κερδοφορία. Οι αισθητήρες συμβάλλουν στην αναγνώριση της κατάστασης των πραγμάτων, με την οποία αποκτούν το πλεονέκτημα της πρόβλεψης ανθρωπίνων αναγκών βάσει των πληροφοριών που συλλέγονται ανά πλαίσιο. Αυτές οι έξυπνες συσκευές όχι μόνο συγκεντρώνουν πληροφορίες από το περιβάλλον τους αλλά είναι επίσης σε θέση να λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση [03,04]. Στο σχήμα 2.1 απεικονίζονται μερικές εφαρμογές του IoT σε διάφορους τομείς.



Σχήμα 2.1: Εφαρμογές του IoT

2.2 Στοιχεία του IoT

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων αποτελεί μια ιδέα όπου πολλές συσκευές (πράγματα) επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο (Διαδίκτυο). Αυτό επιτρέπει στις συσκευές να λαμβάνουν πιο έξυπνες ενέργειες με βάση τα δεδομένα που έχουν λάβει και αποστέλλει. Εκτός από την άμεση επικοινωνία, η δύναμη επεξεργασίας του cloud είναι μοχλευμένη για να πραγματοποιήσει ενέργειες που απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ επεξεργασίας. Ας πάρουμε τους αισθητήρες ως παράδειγμα, συλλέγουν τα δεδομένα και τα στέλνουν σε μια συσκευή επεξεργασίας (που ονομάζεται επίσης ενσωματωμένη), η οποία στη συνέχεια το στέλνει στο cloud (νέφος). Το πρόβλημα εδώ είναι ότι τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο cloud δεν είναι μερικές φορές χρήσιμα. Για παράδειγμα έχουμε ένα σταθμό παρακολούθησης καιρού που θα στείλει τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο cloud κάθε λεπτό. Καθώς δεν υπάρχει τρόπος να έχουμε διαφορετικές τιμές κάθε λεπτό, θα ήταν πολύ πιο αποτελεσματικό να στέλνουμε μόνο διαφορετικές μετρήσεις στο cloud. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν υπάρχει αρκετή τοπική επεξεργασία που συμβαίνει πριν από την αποθήκευση των δεδομένων στο cloud.

Το ιδανικό σενάριο στο οποίο κατευθύνεται το IoT θα ήταν να έχει μια συσκευή ερμηνεία δεδομένων τοπικά, να ελέγχει ανωμαλίες ή να αναζητά σχετικά τμήματα και να ανεβάζει μόνο αυτές τις πληροφορίες στο νέφος.

Ένα βασικό σύστημα IoT αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2: Στοιχεία του IoT [05]

2.2.1 Αισθητήρες - Sensors

Οι αισθητήρες μετράνε τιμές, στέλνουν raw δεδομένα (χωρίς επεξεργασία και είναι χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Στο σχήμα 2.3 δίνονται αισθητήρες του IoT.



Σχήμα 2.3: Αισθητήρες IoT [5]

2.2.2 Τοπική επεξεργασία και αποθήκευση

Συλλέγουν δεδομένα από τους αισθητήρες στην συνέχεια επεξεργάζονται τα δεδομένα. Μερικά δεδομένα στέλνονται στο cloud για υπολογισμό (computing). Επίσης αποθηκεύουν δεδομένα τοπικά εάν χρειάζεται debugging.



Σχήμα 2.4: Τοπική επεξεργασία και αποθήκευση [05]

2.2.3 Δίκτυο και διαδίκτυο

Είναι το hardware (IoT gateway) όπου συνδέεται με τις συσκευές που αναφέραμε προηγούμενος, γίνεται συλλογή επεξεργασμένων δεδομένων από την IoT gateway και τα στέλνει στο cloud. Χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα CoAP, MQTT, HTTP, XMPP όπου θα αναλύσουμε στην ενότητα 2.3. Στο σχήμα 2.5 δίνεται μια συσκευή IoT gateway.



Σχήμα 2.5: IoT Gateway [05]

2.2.4 Cloud (Νέφος)

Στο cloud, που έρχεται στη συνέχεια, συλλέγονται τα δεδομένα και ο κύριος στόχος είναι να γίνονται προβλέψεις με βάση τις αποθηκευμένες πληροφορίες. Το cloud έχει ως κύριο πλεονέκτημα την υψηλή ικανότητα επεξεργασίας που επιτρέπει την ερμηνεία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων.



Σχήμα 2.6: Cloud [05]

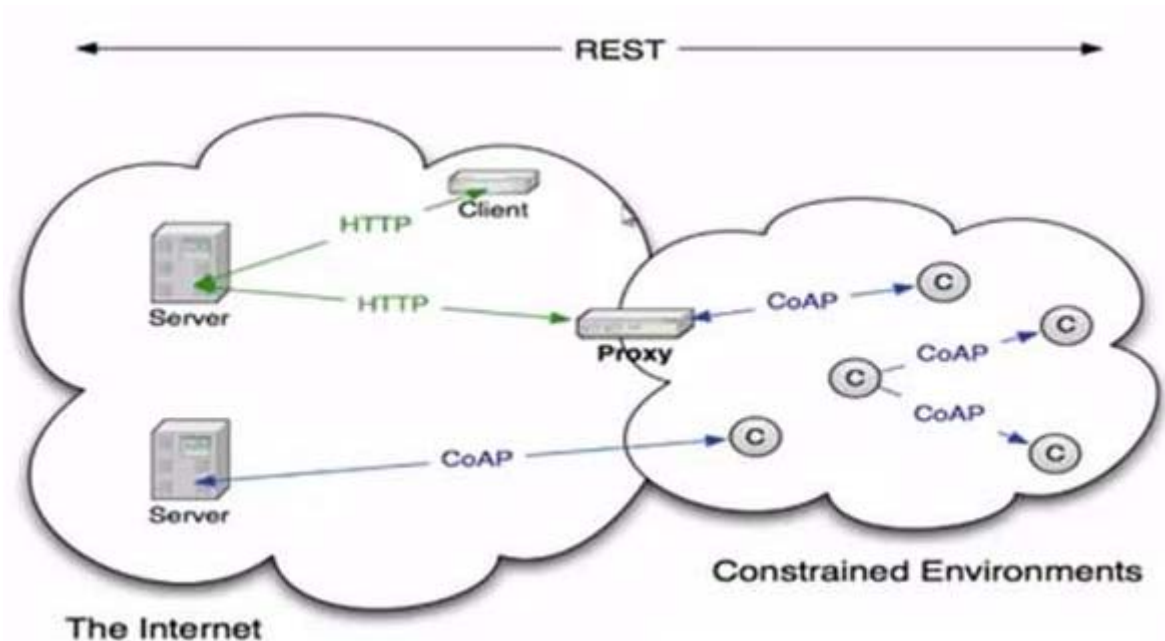
2.3 Πρωτόκολλα ΙοΤ

Για εξοικονόμηση ενέργειας και περιορισμό ισχύος χρειάστηκε να σχεδιαστούν καινούργια πρωτόκολλα (πέρα του TCP/IP) για την διασύνδεση των πραγμάτων με το διαδίκτυο. Με την χρήση των πρωτοκόλλων COAP, MQTT, XMPP οι αισθητήρες των συσκευών όπου έχουν περιορισμένος πόρους (μνήμη, επεξεργαστική ισχύ) μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο και να επιτευχθεί χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

Πρωτόκολλο COAP : Το πρωτόκολλο COAP (Constrained Application Protocol) βασίζεται στο πρωτόκολλο του HTTP. Έχει πολλές ομοιότητες με το HTTP αλλά έχει σχεδιαστεί ώστε να επικοινωνεί μηχανή προς μηχανή (M2M), μια συσκευή λειτουργεί σαν client ή σαν server.

Όπως και στο HTTP μια αίτηση (request) στέλνεται προς ένα διακομιστή (server), αναφερόμενη σε ένα αντικείμενο, με μια μέθοδο αίτησης (request method). Η απάντηση (response) εμπεριέχει την αναπαράσταση του αντικειμένου που ζητήθηκε και τον κωδικό απάντησης (response code). Στο COAP η επικοινωνία είναι ασύγχρονη χωρίς την δημιουργία κάποιας σύνδεσης και βασίζεται στο UDP. Το UDP δεν είναι τόσο αξιόπιστο στην μετάδοση δεδομένων οπότε το COAP περιλαμβάνει ειδικά μηνύματα και τρόποι ελέγχου ώστε να παρέχει αξιοπιστία στην επικοινωνία. Τα μηνύματα αυτά είναι : Confirmable (CON), Non-Confirmable (NON), Acknowledgement (ACK), Reset (RST) και σε

συνδυασμό με την μέθοδο αίτησης ή τον κωδικό απάντησης που συμπεριλαμβάνονται σε κάποια από τα παραπάνω μηνύματα δηλώνουν αν είναι αίτηση ή απάντηση).

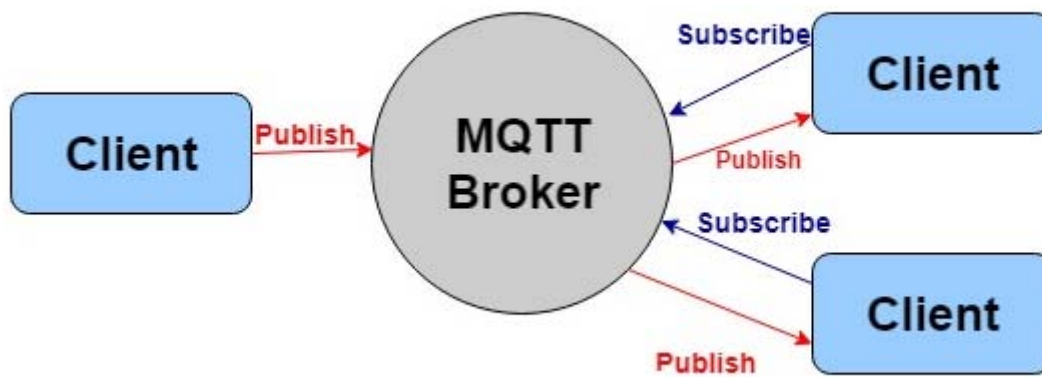


Σχήμα 2.7: Πρωτόκολλο CoAP [06]

Πρωτόκολλο MQTT: Το πρωτόκολλο MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) είναι διαφορετικό από τον τρόπο λειτουργίας του HTTP. Το MQTT υλοποιεί το μοντέλο Publish/Subscribe για την ανταλλαγή μηνυμάτων όπου ένας κόμβος του δικτύου (Publisher) μπορεί να στέλνει μηνύματα σε έναν άλλο κόμβο ή και περισσότερους (subscriber) με την χρήση ενός ενδιάμεσου διακομιστή (broker). Ο broker φιλτράρει τα μηνύματα και τα αποστέλλει στους ενδιαφερόμενους κόμβους.

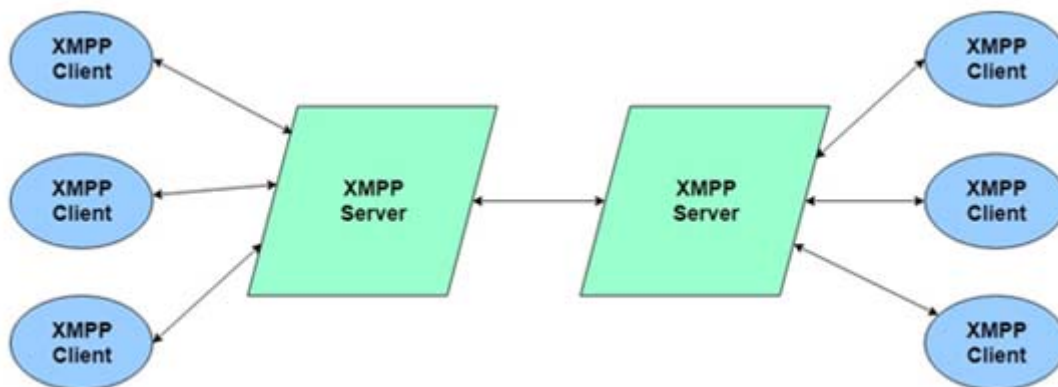
Οπότε ο publisher και ο subscriber για να πραγματοποιήσουν επικοινωνία δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο ένας τον άλλον αλλά πρέπει να γνωρίζουν τον broker. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ασύγχρονος όπως και στο πρωτόκολλο COAP.

Το MQTT είναι ελαφρύ, ανοιχτού κώδικα και εύκολο στην υλοποίηση. Είναι το επικρατέστερο πρωτόκολλο για ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ ενός κόμβου και ενός IoT δικτύου.



Σχήμα 2.8: Πρωτόκολλο CoAP

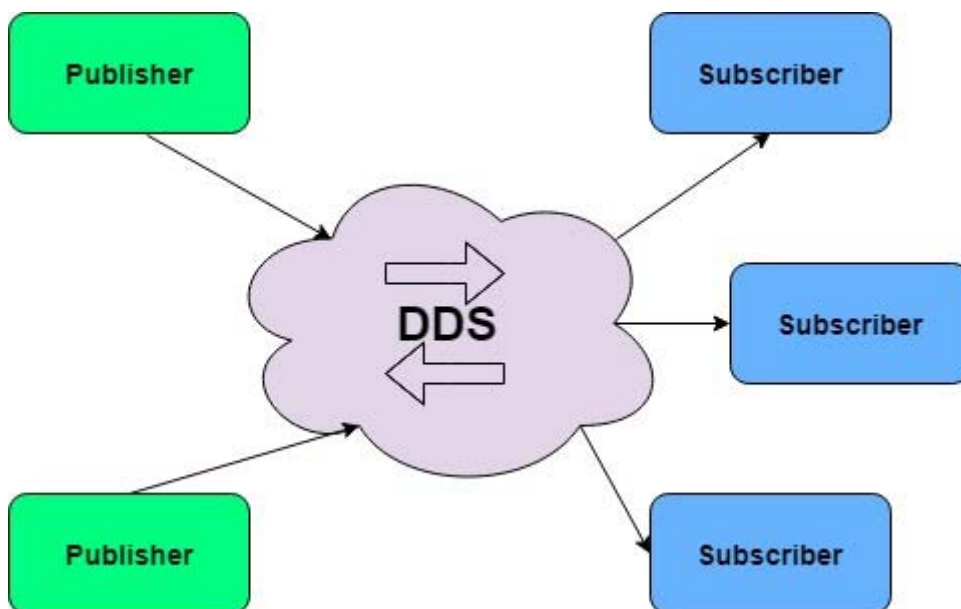
Πρωτόκολλο XMPP: Το πρωτόκολλο XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol) είναι πρότυπο IETF άμεσων μηνυμάτων (IM) και χρησιμοποιείται για συνομιλία με πολλούς συμμετέχοντες, φωνητικές κλήσεις, βιντεοκλήσεις και τηλεπικοινωνίες. Το XMPP αναπτύχθηκε από την κοινότητα ανοιχτού κώδικα Jabber για να υποστηρίξει ένα ανοικτό, ασφαλές, χωρίς sram και αποκεντρωμένο πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων. Το XMPP επιτρέπει στους χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους στέλνοντας άμεσα μηνύματα στο Διαδίκτυο ανεξάρτητα από το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιούν. Το XMPP επιτρέπει στις εφαρμογές άμεσων μηνυμάτων να επιτυγχάνουν έλεγχο ταυτότητας, έλεγχο πρόσβασης, μέτρηση της ιδιωτικής ζωής, κρυπτογράφηση hop-by-hop και κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο και συμβατότητα με άλλα πρωτόκολλα. Ορισμένες από τις εφαρμογές XMPP περιλαμβάνουν τις Gtalk και Whatsapp.



Σχήμα 1.9: Πρωτόκολλο XMPP

Πρωτόκολλο DDS: Το DSS (Data Distribution Service) είναι ένα πρωτόκολλο δημοσίευσης-εγγραφής (publish-subscribe) για επικοινωνίες M2M σε πραγματικό χρόνο, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την ομάδα διαχείρισης αντικειμένων (Object Management Group - OMG). Σε αντίθεση με άλλα πρωτόκολλα εφαρμογών

δημοσίευσης-εγγραφής, όπως το MQTT ή το AMQP, το DDS βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική χωρίς μεσάζοντα και χρησιμοποιεί multicasting για να προσφέρει εξαιρετική ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και υψηλή αξιοπιστία στις εφαρμογές της. Η αρχιτεκτονική δημοσίευσης-εγγραφής χωρίς μεσάζοντα ταιριάζει με τους περιορισμούς σε πραγματικό χρόνο για τις επικοινωνίες IoT και M2M. [07]



Σχήμα 2.10: Πρωτόκολλο CoAP

2.4 Επικοινωνία μηχανή προς μηχανή

Οι έννοιες πίσω από την IoT επικοινωνία είναι γνωστές ως Μηχανή προς Μηχανή (M2M) επικοινωνία ή Επικοινωνία Τύπου Μηχανής (MTC). Η Επικοινωνία Τύπου Μηχανής (MTC) είναι γενικά διαχωρισμένη από τις παραδοσιακές τεχνολογίες επικοινωνίας, παρά το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιεί τις ίδιες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, τα παραδοσιακά δίκτυα κινητής, τα οποία έχουν κατασκευαστεί μόνο για χρήση κινητών τηλεφώνων, έχουν βελτιστοποιηθεί για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση μεταφοράς, και έχουν ειδικά κανάλια αφιερωμένα μόνο σε επικοινωνία φωνής. Μόνο λίγες εφαρμογές IoT μπορούν να επωφεληθούν από αυτά τα χαρακτηριστικά. Η MTC επικοινωνία συμβαίνει μεταξύ μηχανών χωρίς την παρέμβαση του χρήστη, επομένως ένα διαφορετικό σύνολο απαιτήσεων μπορεί να προκύψει για αυτό. Διαφορετικοί συμβιβασμοί μπορούν να γίνουν σε τεχνικό επίπεδο και να μπορέσουν ακόμα να επιτύχουν εφικτή Ποιότητα υπηρεσιών για την εφαρμογή. Δεν απαιτούν όλες οι MTC άμεση συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο, και μερικές φορές μπορούν ακόμα και να αποφευχθούν

λόγω πολυπλοκότητας ή ασφάλειας. Σε πολλές εφαρμογές, μόνο ένα μικρό ποσό δεδομένων μεταφέρεται, και αυτά τα δεδομένα δεν απαιτούν μικρές καθυστερήσεις μετάδοσης.

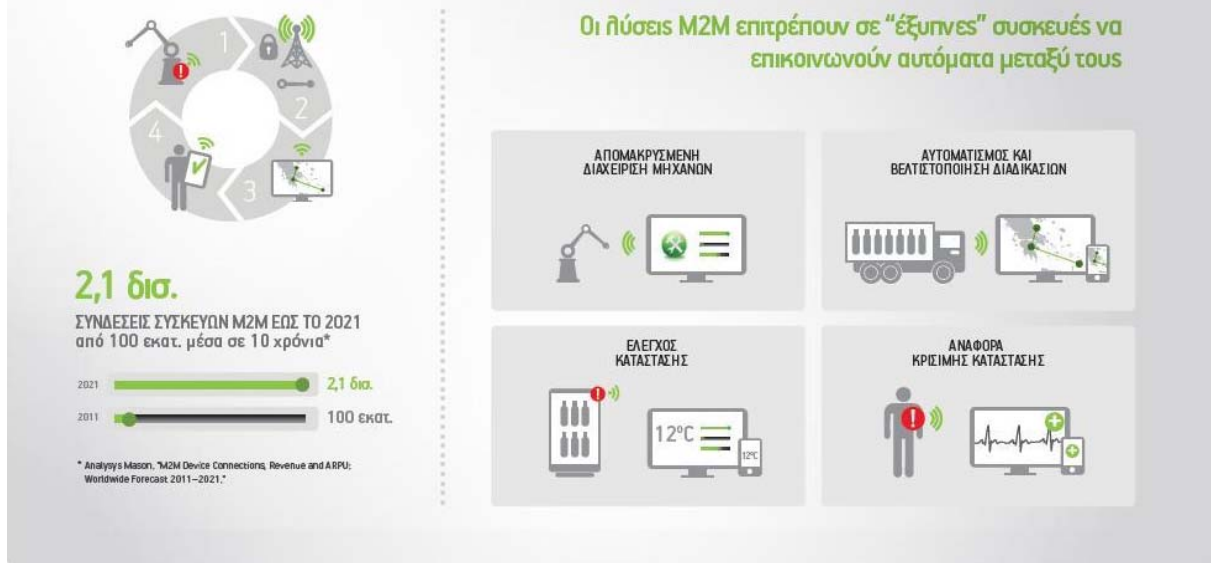
Ως κύρια χαρακτηριστικά της MTC θεωρούνται κοινώς:

- Χαμηλότερες ανάγκες για χαμηλή-καθυστέρηση μεταφοράς, υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων
- Συστήματος-κρίσιμη επικοινωνία
- Ταυτόχρονα αφοσιωμένα δίκτυα υποδομών και ad-hoc
- Προτεραιότητα σε δεδομένα
- Μεγάλες διαφορές σε πυκνότητες συσκευών μεταξύ αστικών και επαρχιακών περιοχών
- Ευρύτερη κάλυψη για να φτάσει σε απόμακρες και εντός οικίας συσκευές

Πολλά διαφορετικά στάνταρ ασύρματης έχουν προσαρμοστεί για την M2M επικοινωνία. Μη εξουσιοδοτημένες χαμηλού-εύρους εφαρμογές όπως οι ZigBee, Z-Wave ή Bluetooth υπάρχουν, οι οποίες δημιουργούν point-to-point ή mesh δίκτυα. Οι περισσότερες συσκευές καταναλωτών IoT συνδέονται στο Διαδίκτυο μέσω τοπικού δικτύου Wi-Fi, ή σε κινητά τηλέφωνα μέσω Bluetooth χάρη στην κοινή τους διαθεσιμότητα εντός των νοικοκυριών. Η χρήση του Wi-Fi και του Bluetooth μπορούν να ιδωθούν ως ένας συμβιβασμός λόγω έλλειψης ενός υπάρχοντος μεγάλης κλίμακας IoT δικτύου. Οι παραδοσιακές συνδέσεις κινητής θα απαιτούσαν εξωτερική SIM (Subscriber Identity Module) –κάρτες για κάθε συσκευή, και η απαιτούμενη κατανάλωση ισχύος δε θα ήταν ιδανική για συσκευές που τροφοδοτούνται με μπαταρία. Μερικές χαμηλής-ισχύος προσαρμογές των ασύρματων τεχνολογιών έχουν στόχο τις IoT εφαρμογές, όπως το Bluetooth Low Energy (BLE), που προσφέρει σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος. [07]

Τεχνολογίες Machine to Machine (M2M):

Η «τεχνολογία των πραγμάτων» φέρνει στις σημερινές επιχειρήσεις ατελείωτες ευκαιρίες προόδου και ανάπτυξης



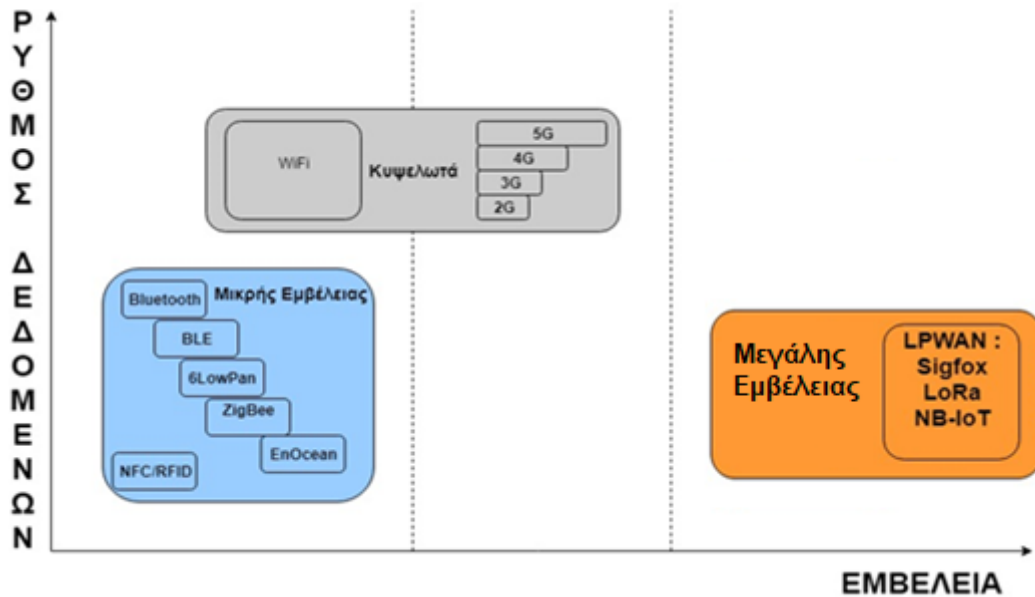
Σχήμα 2.11 : Επικοινωνία M2M [08]

2.5 Δίκτυα Χαμηλής Ισχύος Ευρείας Περιοχής (LPWAN)

Το LPWAN αντιπροσωπεύει μια νέα τάση στην εξέλιξη των τεχνολογιών IoT. Σε αντίθεση με τα 3G / 4G ή WiFi, αυτά τα συστήματα δεν επικεντρώνονται στους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ανά συσκευή ή την μείωση της καθυστέρησης. Αντίθετα, οι βασικές μετρήσεις απόδοσης που ορίζονται για το LPWAN είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα, η επεκτασιμότητα και η κάλυψη. [03]

Το LPWAN κερδίζει ολοένα και περισσότερο δημοτικότητα στις βιομηχανικές και ερευνητικές κοινότητες λόγω των χαρακτηριστικών επικοινωνίας χαμηλής ισχύος, μεγάλης εμβέλειας και χαμηλού κόστους. Παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας από 10 έως 40 χλμ. σε αγροτικές ζώνες και από 1 έως 5 χλμ. σε αστικές ζώνες. Επίσης είναι εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικό (διάρκεια ζωής της μπαταρίας 10+ χρόνια) και φθινό, με το κόστος ενός ράδιο chip να είναι κάτω από 5 € και ένα λειτουργικό κόστος 1 € ανά έτος για κάθε συσκευή. Το LPWAN είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές IoT που χρειάζονται την μετάδοση μικρών δεδομένων σε μεγάλο εύρος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Πολλές τεχνολογίες LPWAN έχουν προκύψει στο

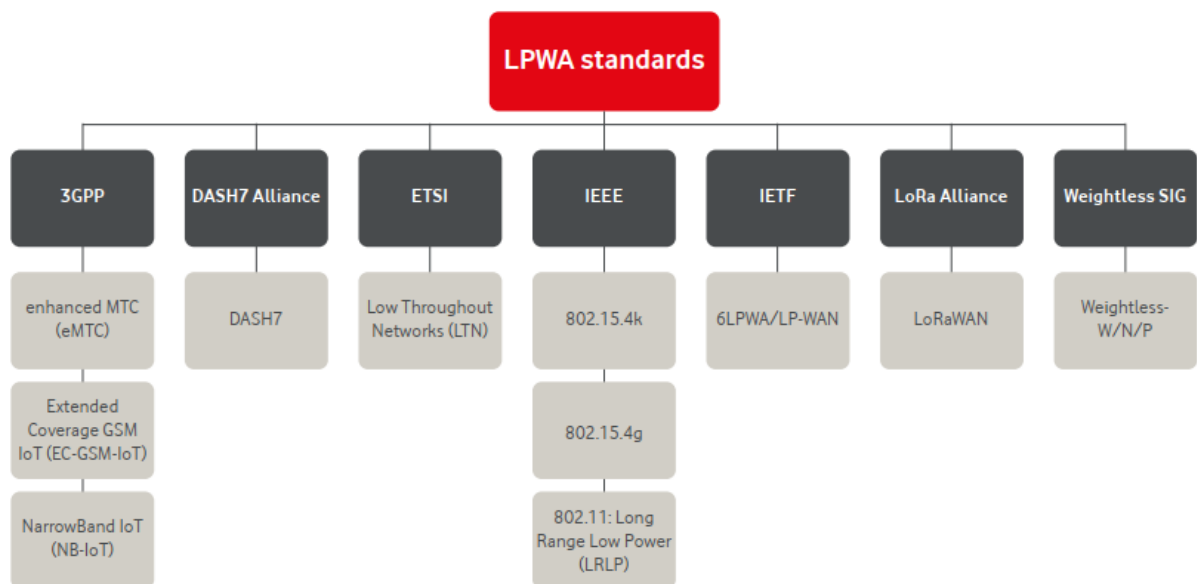
αδειοδοτημένο αλλά και μη επιτρεπόμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Μεταξύ αυτών, οι Sigfox, LoRa και NB-IoT είναι σήμερα πρωτοποριακές τεχνολογίες που περιλαμβάνουν πολλές τεχνικές.



Σχήμα 2.12: Ρυθμός Δεδομένων VS Εμβέλεια

Τα περισσότερα δίκτυα LWPA λειτουργούν χωρίς άδεια ή με ελαφρώς εξουσιοδοτημένα εύρη συχνοτήτων όπως η ISM (Industrial, Scientific and Medical) εύρος συχνοτήτων και άλλα sub-gigahertz εύρη συχνοτήτων. [07,09,10]

Στο Σχήμα 2.13 δίνονται τα πρότυπα των δικτύων LPWA.



Σχήμα 2.13 : Πρότυπα των δικτύων LPWA [11]

Τα περισσότερα δίκτυα LWPA λειτουργούν χωρίς άδεια ή με ελαφρώς εξουσιοδοτημένα εύρη συχνοτήτων όπως η ISM (Industrial, Scientific and Medical) εύρος συχνοτήτων και άλλα sub-gigahertz εύρη συχνοτήτων. [07,09,10]

2.5.1 Sigfox

Το Sigfox έχει καταστεί μία από τις κύριες τεχνολογίες δικτύου χαμηλής ισχύος (LPWAN), καθώς έχει προσελκύσει την προσοχή των βιομηχανιών, των ακαδημιών και των οργανισμών ανάπτυξης προτύπων τα τελευταία χρόνια. Οι συσκευές Sigfox, όπως αισθητήρες ή ενεργοποιητές λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Αυτή η τεχνολογία αναπτύχθηκε το 2009 από την εταιρεία Sigfox (Labège, Γαλλία). Η Sigfox προσφέρει κάλυψη δικτύου που επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία για συσκευές IoT σε περισσότερες από 50 χώρες, καλύπτοντας πληθυσμό 1 δισεκατομμυρίων κατοίκων. Υποστηρίζει την επικοινωνία μονής κατεύθυνσης και την αμφίδρομη επικοινωνία μέσω φάσματος χωρίς άδεια. Στην Ευρώπη, οι ζώνες 868.00 MHz-868.60 MHz χρησιμοποιούνται για την μετάδοση στην άνω ζεύξη και 869.40 MHz έως 869.65 MHz χρησιμοποιούνται για μετάδοση στην κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Στις ΗΠΑ, χρησιμοποιείται η ζώνη των 902 MHz. Η εμβέλεια ενός σταθμού βάσης μπορεί να έχει ακτίνα πάνω από 20 χιλιόμετρα. Για να εξασφαλιστεί μεγάλη εμβέλεια χρησιμοποιεί ασύρματη μετάδοση Ultra-Narrow Band (UNB) τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη. Το εύρος ζώνης ενός καναλιού άνω ζεύξης εξαρτάται από την περιοχή (π.χ. είναι 100 Hz στην Ευρώπη και 600 Hz στις Ηνωμένες Πολιτείες), ενώ το εύρος ζώνης καναλιού κάτω ζεύξης είναι 1,5 kHz. Η μέγιστη ισχύς μετάδοσης άνω ζεύξης είναι 25 mW στην Ευρώπη (158 mW στις ΗΠΑ), ενώ η μέγιστη ισχύς εκπομπής στη κάτω ζεύξη είναι 500 mW στην Ευρώπη (4 W στις ΗΠΑ). Οι διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται για την άνω ζεύξη και την κάτω ζεύξη είναι η διαμόρφωση δυαδικής διαφορικής ολίσθησης φάσης (DBPSK) και την Gaussian διαμόρφωση ολίσθησης συχνότητας (GFSK), αντίστοιχα. Η DBPSK είναι πιο αποδοτική με σχέση την GFSK παρέχοντας αυξημένη εμβέλεια στην άνω ζεύξη (αντισταθμίζοντας την χαμηλότερη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής στη άνω ζεύξη). Επιπλέον η DBPSK αποδίδει καλή προστασία από παρεμβολές (π.χ. jamming), καθώς η λαμβανόμενη ισχύς συγκεντρώνεται σε πολύ στενό εύρος ζώνης και φτάνει σε ένα υψηλό λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος οδηγώντας σε πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το φυσικό επίπεδο στην άνω ζεύξη έχει ρυθμό δεδομένων 100 bit/s (στην Ευρώπη) ή 600 bit/s (στην Αμερική) ενώ ο ρυθμός στο φυσικό επίπεδο για την κάτω ζεύξη έχει ρυθμό δεδομένων 600 bit / s παγκοσμίως.

Ο αριθμός των μηνυμάτων μέσω της άνω ζεύξης περιορίζεται σε 140 μηνύματα την ημέρα. Το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου για κάθε μήνυμα άνω ζεύξης είναι 12 byte. Ωστόσο, ο αριθμός των μηνυμάτων στην κάτω ζεύξη περιορίζεται σε τέσσερα μηνύματα την ημέρα, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υποστηρίζεται η αναγνώριση κάθε μηνύματος άνω ζεύξης. Το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου για κάθε μήνυμα κάτω ζεύξης είναι οκτώ byte. Χωρίς την επαρκή υποστήριξη των αναγνωρίσεων, η αξιοπιστία της επικοινωνίας άνω ζεύξης εξασφαλίζεται χρησιμοποιώντας διαφορισμό χρόνου και συχνότητας, καθώς και επανάληψη της μετάδοσης. Κάθε μήνυμα τελικής συσκευής μεταδίδεται πολλές φορές (τρεις εξ ορισμού) σε διαφορετικά κανάλια συχνότητας. Για το σκοπό αυτό, στην Ευρώπη, για παράδειγμα, η ζώνη μεταξύ 868.180 MHz και 868.220 MHz χωρίζεται σε 400 ορθογώνια κανάλια 100 Hz (μεταξύ των οποίων 40 κανάλια διατηρούνται και δεν χρησιμοποιούνται). Καθώς οι σταθμοί βάσης μπορούν να λαμβάνουν ταυτόχρονα μηνύματα σε όλα τα κανάλια, η τελική συσκευή μπορεί να επιλέξει τυχαία ένα κανάλι συχνότητας για να μεταδώσει τα μηνυμάτά τους. Αυτό απλοποιεί τον σχεδιασμό της τελικής συσκευής και μειώνει το κόστος της. Η κατανάλωση ισχύος των συσκευών που χρησιμοποιούν την επικοινωνία Sigfox θα επέτρεπε ένα χρόνο ζωής μπαταρίας της τάξης μιας δεκαετίας με μία μόνο AA μπαταρία.



Σχήμα 2.14: SigFox Network Architecture [12]

Τα πλεονεκτήματα του Sigfox είναι :

- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος

- Λειτουργεί καλά για απλές συσκευές που μεταδίδουν σπάνια, επειδή στέλνει πολύ μικρές ποσότητες δεδομένων πολύ αργά.
- Υποστηρίζει μια ευρεία περιοχή κάλυψης στις περιοχές όπου βρίσκεται.

Τα μειονεκτήματα του Sigfox είναι :

- Δεν αναπτύσσεται παντού, επομένως δεν θα λειτουργήσει για μια μεγάλη γκάμα περιπτώσεων χρήσης προς το παρών
- Η επικοινωνία κατευθύνεται καλύτερα από το τελικό σημείο στο σταθμό βάσης. Έχει αμφίδρομη λειτουργικότητα αλλά η χωρητικότητα του από το σταθμό βάσης προς το τελικό σημείο είναι περιορισμένη.
- Η κινητικότητα είναι δύσκολη με τις συσκευές Sigfox
- Χαμηλό ρυθμό δεδομένων (Σε σχέση με το NB-IoT)
- Μεγαλύτερη καθυστέρηση (Σε σχέση με το NB-IoT)

2.5.2 LoRa

Το LoRa είναι ένα από τα πιο ευρέως υιοθετημένα LPWAN στάνταρ στον κόσμο. Το όνομα LoRa προέκυψε από το Δίκτυο Ευρέως φάσματος, χαμηλής ισχύος, η προδιαγραφή του αρχικά αναπτύχθηκε από την Cycleo ξεκινώντας το 2009, αποκτήθηκε από την SEMTECH το 2012, και έθεσε υπό έλεγχο την LoRa Alliance το 2014. Πάνω από 76 πάροχοι παρέχουν LoRa LPWAN δίκτυα σε πάνω από 40 χώρες από τον Απρίλιο του 2018. Το LoRa στοχεύει στην εγκατάσταση χαμηλής ισχύος δικτύου επικοινωνίας για IoT και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τα δίκτυα κινητής. Το LoRa ρυθμίζει τα σήματα στη ζώνη ISM sub-GHZ χρησιμοποιώντας μια ιδιόκτητη

τεχνική κατανεμημένου φάσματος. Όπως και το Sigfox, το LoRa χρησιμοποιεί μη εξουσιοδοτημένες ζώνες ISM, δηλαδή 868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 433 MHz στην Ασία. Εξασφαλίζεται αμφίδρομη επικοινωνία μέσω της διαμόρφωσης διάχυτου φάσματος (Chirp Spread Spectrum – CSS) όπου ένα σήμα στενής ζώνης το εξαπλώνει σε ένα ευρύτερο εύρος ζώνης καναλιού. Το σήμα που προκύπτει έχει χαμηλά επίπεδα θορύβου επιτρέποντας επαρκή προστασία παρεμβολών.

Το LoRa χρησιμοποιεί έξι συντελεστές διάδοσης (SF7 έως SF12) για να προσαρμόσει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και την εμβέλεια. Ο υψηλότερος παράγοντας εξάπλωσης επιτρέπει μεγαλύτερη απόσταση σε βάρος του χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και αντίστροφα. Ο ρυθμός δεδομένων LoRa είναι μεταξύ 300 bps - 50 kbps ανάλογα με τον συντελεστή διάδοσης και το εύρος ζώνης καναλιού σε ακτίνα 22-45 χιλιομέτρων γύρω από το σταθμό βάσης. Επιπλέον, τα μηνύματα που μεταδίδονται με τη χρήση διαφορετικών συντελεστών εξάπλωσης μπορούν να ληφθούν ταυτόχρονα από σταθμούς βάσης LoRa. Το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου για κάθε μήνυμα είναι 243 byte. Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας βασισμένο σε LoRa που ονομάζεται LoRaWAN τυποποιήθηκε από την LoRa-Alliance (πρώτη έκδοση το 2015). Χρησιμοποιώντας το LoRaWAN, κάθε μήνυμα που μεταδίδεται από μια τελική συσκευή λαμβάνεται από όλους τους σταθμούς βάσης της περιοχής. Το LoRaWAN αξιοποιώντας το πλεονέκτημα της λήψης βελτιώνει την αναλογία επιτυχώς ληφθέντων μηνυμάτων. Ένας σταθμό βάσης μπορεί να χειριστεί πάνω από 60000 συσκευές στο εύρος του. Το LoRaWAN περιλαμβάνει το πρωτόκολλο Media Access Control (MAC) για δίκτυα ευρείας περιοχής, παρέχοντας συνεχόμενη ασφάλεια, κινητικότητα και υπηρεσίες εύρεσης τοποθεσίας και μοντέλο αρχιτεκτονικής υπηρεσιών, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά δεδομένων από IoT κόμβους πίσω σε back-end network servers.

Τα πλεονεκτήματα του LoRa είναι :

- Είναι ιδανικό για εφαρμογές κτιρίου
- Είναι εφικτό να γίνει ρύθμιση και διαχείριση ενός δικτύου από τον χρήστη

- Οι συσκευές LoRa λειτουργούν καλά όταν βρίσκονται σε κίνηση, γεγονός που τις καθιστά χρήσιμες για την παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων σε κίνηση, όπως αποστολές.

- Μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταριών.

Τα μειονεκτήματα του LoRa είναι :

- Χαμηλό ρυθμό δεδομένων (Σε σχέση με το NB-IoT)

- Μεγαλύτερη καθυστέρηση (Σε σχέση με το NB-IoT)

[13,14,15,16]

2.5.3 Κυψελωτό IoT (CIoT)

Το CIoT, αναφέρεται στην έννοια της χρήσης των τεχνολογιών δικτύου κινητής σε IoT εφαρμογές, αντί να βασίζεται σε νέες τεχνολογίες. Οι εφαρμογές CIoT μπορούν να χρησιμοποιήσουν 2G, 3G και 4G τεχνολογίες δικτύου. Επειδή στις συσκευές IoT μας ενδιαφέρει η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η μεγάλη εμβέλεια κάλυψης και όχι οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης έχουν αναπτυχθεί οι IoT κυψελωτές προδιαγραφές δικτύου. Αυτές οι τροποποιήσεις των στάνταρ της κινητής για το IoT υιοθετούν πολλά τύπου LPWAN χαρακτηριστικά, ενώ παραμένουν ακόμα συμβατά με τα κυψελωτά κινητά δίκτυα. Τα κύρια στάνταρ είναι τα EC-GSM, LTE-M, NB-IoT και είναι μια εξέλιξη της κινητής τεχνολογίας προς το IoT.

Το EC-GSM IoT είναι μία LPWAN τεχνολογία που βασίζεται σε ήδη υπάρχουσα τεχνολογία κινητής 2G κινητή, η οποία εκτείνει την κάλυψη του δικτύου της σε σύγκριση με την προηγούμενη 2G τεχνολογία και επιτρέπει την άμεση τροποποίηση του GSM πρωτοκόλλου, βασιζόμενη σε τεχνολογίες GSM (Global System for Mobile Communications) και GPRS (General Packet Radio Service). Η ανάπτυξη της EC-GSM-IoT πραγματοποιήθηκε από τον οργανισμό 3GPP όπως και κάθε άλλη εμπορική κυψελωτή προδιαγραφή και εκδόθηκε αρχικά το 2016 στην 3GPP

Έκδοση 13 όπως και οι LTE-M και NB-IoT προδιαγραφές. Το EC-GSM χρησιμοποιεί GSM τεχνολογία και υποδομή αντί για την ανάπτυξη νέας υποδομής, και ένα πιθανό μειονέκτημα είναι η απαρχαίωση της παλαιότερης υποδομής, καθώς τα παλαιότερα 2G δίκτυα αρχίζουν ήδη να αφαιρούνται από πολλούς παρόχους. [17,18]

Η LTE-M προδιαγραφή, γνωστή και ως LTE Cat-M1, Cat-M και eMTC (Evolved MTC), εκδόθηκε από το 3GPP στην Έκδοση 13 για να καλύψει την Μηχανή προς Μηχανή(M2M) επικοινωνία. Η πιο σημαντική διαφορά της LTE-M με την κανονική LTE είναι οι απαιτήσεις του σε στενότερο εύρος ζώνης (το κανάλι εκτείνεται 1.4 MHz αντί για 20 MHz) ενώ παραμένει συμβατό με παλαιότερες εκδόσεις. Το δίκτυο μπορεί να αναπτυχθεί εντός ζώνης χρησιμοποιώντας υπάρχοντα δίκτυα, καθιστώντας την ανάπτυξη του ως νέα προδιαγραφή πολύ απλούστερη. [18]

Μία δεύτερη προσαρμογή της προδιαγραφής LTE για M2M επικοινωνία είναι το NB-IoT, αρχικά γνωστό ως LTE Cat-M2. Το NB-IoT μειώνει την πολυπλοκότητα της διεπαφής αέρα ακόμα περισσότερο σε σύγκριση με το LTE-M, οδηγώντας σε αυξημένη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού που λειτουργεί με μπαταρία.

Τα πιο σημαντικά οφέλη στα κυψελωτά IoT στάνταρ είναι η ανάπτυξη του δικτύου. Όταν ένα κυψελωτό IoT δίκτυο αναπτύσσεται, μπορεί να χρησιμοποιήσει σταθμούς βάσης και υποδομές πυρήνα αντί να αναπτύξει νέο εξοπλισμό, και επομένως να χρησιμοποιήσει ήδη υπάρχουσες άδειες φάσματος και λειτουργικές υπηρεσίες. Όταν ενσωματώνεται σε υπάρχοντα δίκτυα σταθμών βάσης κινητής, η ανάπτυξη και τα κόστη λειτουργίας του IoT δικτύου μειώνονται σημαντικά. [17,18]

Ο σκοπός του IoT είναι να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο σε οποιαδήποτε συσκευή που διαθέτει πομποδέκτη κάθε στιγμή και σε κάθε μέρος. Το NB-IoT φαίνεται το ιδανικότερο ώστε να επιτευχθεί μεγάλη κάλυψη και να αξιοποιηθεί το δορυφορικό κανάλι για απομακρυσμένες περιοχές. Η διάρκεια ζωής μπαταριών των συσκευών NB-IoT είναι αυξημένη σε σχέση με το LTE-M και ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι έχει ταχύτερους χρόνους απόκρισης από το Sigfox και LoRa και μπορεί να εγγυηθεί καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Επίσης ο οργανισμός 3GPP προσφέρει αναβαθμίσεις και βελτιώσεις σε κάθε έκδοση και παρέχει ετερογένεια. Στα ανερχόμενα δίκτυα πέμπτης γενιάς 5G το NB-IoT θα μπορεί να επωφεληθεί από τις υποδομές.

Όλα αυτά τα σημαντικά πλεονεκτήματα καθιστούν το NB-IoT από τους ισχυρούς κυρίαρχους στο IoT. Το δίκτυο NB-IoT θα αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3.

	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Κάλυψη	160 dB	157 dB	164 dB
Τεχνολογία	Ιδιόκτητο	Ιδιόκτητο	Open LTE
Φάσμα	Χωρίς άδεια	Χωρίς άδεια	Άδεια χρήσης (LTE / οποιαδήποτε)
Περιορισμοί κύκλου εργασιών	NAI	NAI	OXI
Περιορισμοί ισχύος εξόδου	Yes (14dBm = 25mW)	Yes (14dBm = 25mW)	No (23dBm=200mW)
Ρυθμός δεδομένων για το Downlink	0.1 kbps	0.3 – 50 kbps	0.5 – 200 kbps
Ρυθμός δεδομένων για το uplink	0.1 kbps	0.3 – 50 kbps	0.5 – 180 kbps
Διάρκεια ζωής μπαταρίας (200h / ημέρα)	10 + χρόνια	10 + χρόνια	15+ χρόνια
Κόστος chip	<\$10 (2016)	<\$10 (2016)	\$7 (2017) to <\$2 (2020)
Ασφάλεια	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή

Πίνακας 2.1: Βασικές τεχνικές προδιαγραφές για Sigfox, LoRa, NB-IoT [11]

Κεφάλαιο 3

NB-IoT

Το NB-IoT είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN) που έχει αναπτυχθεί ώστε να επιτρέπει τη σύνδεση μιας ευρείας γκάμας συσκευών και υπηρεσιών χρησιμοποιώντας ζώνες συχνοτήτων κυψελοειδών δικτύων. Από τεχνική άποψη, το NB-IoT έχει σχεδιαστεί για συσκευές χαμηλού κόστους που λειτουργούν σε εύρος ζώνης χαμηλής συχνότητας 180 KHz για να προσφέρουν κάλυψη δικτύου άνω των 160 dB με latency περίπου 10 δευτερόλεπτα. Με αυτά τα χαρακτηριστικά, το NB-IoT μπορεί να στοχεύσει σε συσκευές IoT που είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση ή βρίσκονται σε περιοχές όπου η μετάδοση σήματος είναι κακή. Η πρώτη έκδοση του NB-IoT κυκλοφόρησε το 2016 με την παρουσία της 13 έκδοσης της προδιαγραφής 3GPP και στην συνέχεια επεκτάθηκε στην έκδοση 14 με βελτιώσεις. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το δίκτυο NB-IoT.

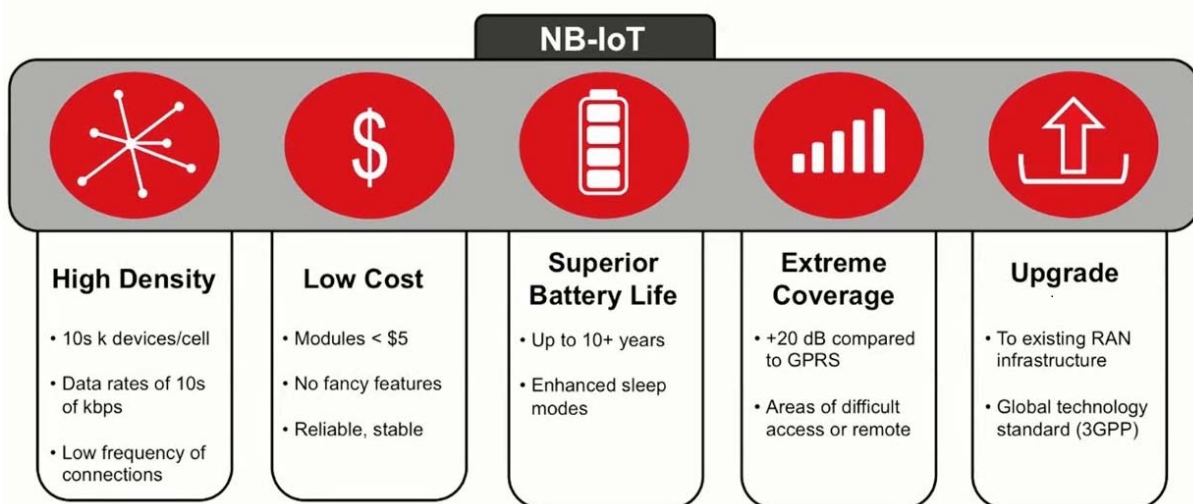
3.1 Εισαγωγή

Οι κυψελοειδές τεχνολογίες έχουν διαδραματίσει ένα καθοριστικό ρόλο στην διασύνδεση και την ανταλλαγή πληροφορίας στο κόσμο. Τα δίκτυα 1G και 2G συνδέουν τους ανθρώπους μεταξύ τους μέσω φωνής, ενώ τα 3G και τα 4G παρέχουν συνδεσιμότητα με το κινητό διαδίκτυο, παρέχοντας γρήγορες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες. Τα κυψελοειδή δίκτυα εκτός από την εκτεταμένη κάλυψη προσφέρουν υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, ασφάλειας και απόδοσης που απαιτούνται από τις πιο απαιτητικές εφαρμογές του IoT. Οι τεχνολογίες του 3GPP, όπως το 4G LTE, μπορούν να παρέχουν συνδεσιμότητα IoT σε ευρεία κάλυψη. Η LTE καθιερώθηκε παγκοσμίως ως το ταχύτερα αναπτυσσόμενο πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας, που ήδη παρέχει πάνω από δύο δισεκατομμύρια συνδέσεις παγκοσμίως. Θα συνεχίσει να κερδίζει δυναμική και να πολλαπλασιάζεται ακόμη περισσότερο κατά τη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας. Το LTE υποστηρίζεται επίσης από ένα κοινό, παγκόσμιο πρότυπο 3GPP με υποστήριξη ενός ισχυρού, διαλειτουργικού, ολοκληρωμένου οικοσυστήματος. Συνολικά το LTE παρέχει μια σταθερή βάση για τη μελλοντική ανάπτυξη του διαδικτύου, προσφέροντας σημαντικά οφέλη έναντι των μη-3GPP / ιδιόκτητων λύσεων.

Το 3GPP εισήγαγε μια σουίτα δύο συμπληρωματικών τεχνολογιών στενής ζώνης στην έκδοση 13, την eMTC (ενισχυμένη επικοινωνία τύπου μηχανής) και NB-IoT (narrowband IoT) ή συλλογικά αναφερόμενη ως LTE IoT. Τόσο το eMTC όσο και το NB-IoT είναι βελτιστοποιημένα για χαμηλότερη πολυπλοκότητα ώστε να έχουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος, βαθύτερη κάλυψη και υψηλότερη πυκνότητα συσκευών, ενώ παράλληλα συνυπάρχουν με άλλες υπηρεσίες LTE. [13]

Το NB-IoT είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN) που έχει αναπτυχθεί ώστε να επιτρέπει τη σύνδεση μιας ευρείας γκάμας συσκευών και υπηρεσιών χρησιμοποιώντας ζώνες συχνοτήτων κυψελοειδών δικτύων. Από τεχνική άποψη, το NB-IoT έχει σχεδιαστεί για συσκευές χαμηλού κόστους που λειτουργούν σε εύρος ζώνης χαμηλής συχνότητας 180 KHz για να προσφέρουν κάλυψη δικτύου άνω των 160 dB με latency περίπου 10 δευτερόλεπτα. Με αυτά τα χαρακτηριστικά, το NB-IoT μπορεί να στοχεύσει σε συσκευές IoT που είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση ή βρίσκονται σε περιοχές όπου η μετάδοση σήματος είναι κακή. Η πρώτη έκδοση του NB-IoT κυκλοφόρησε το 2016 με την παρουσία της 13 έκδοσης της προδιαγραφής 3GPP και στην συνέχεια επεκτάθηκε στην έκδοση 14 με βελτιώσεις. Το NB-IoT μπορεί να αξιοποιήσει το υπάρχον δίκτυο του LTE, οπότε και τις τεχνικές του LTE όπως OFDMA

για το κανάλι καθόδου, SC-FDMA για το κανάλι ανόδου, κωδικοποίηση καναλιού, προσαρμογή ρυθμού. Η ιδέα πίσω από το NB-IoT είναι να προσαρμοστεί το LTE πρωτόκολλο για να χρησιμοποιεί λιγότερη ισχύ από αυτή που χρειάζεται σε ένα κυψελωτό δίκτυο κινητής, ενώ παράλληλα διατηρεί τη χρήση παρόμοιων τεχνολογιών για ευκολότερη ενσωμάτωση με την ήδη υπάρχουσα υποδομή. Ένα NB-IoT δίκτυο μπορεί να συνυπάρχει με το LTE δίκτυο, και πιθανώς να χρησιμοποιεί μέρη από την υποδομή, περιλαμβανομένου του eNodeB hardware και του Δικτύου κορμού. [19,20,21]



Σχήμα 3.1: Βασικοί Στόχοι του NB-IoT [22]

Οι βασικοί στόχοι του NB-IoT είναι :

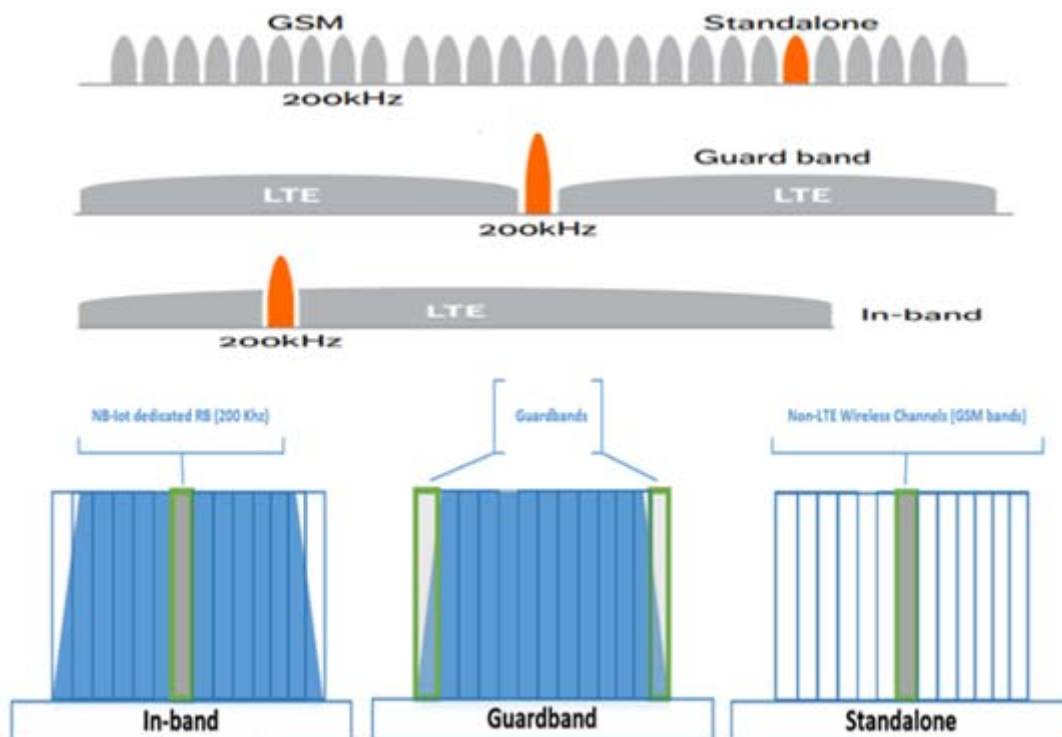
- Επέκταση της κάλυψης : 164 dB , 20 dB αυξημένη σε σχέση με το GPRS
- Μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους των UE's : μικρότερη από 5 E ανά μονάδα
- μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας: Μεγαλύτερη από 10 χρόνια
- αυξημένη χωρητικότητα : 40 συσκευές ανά νοικοκυριό, και περίπου 55 χιλιάδες συσκευές ανά κυψέλη
- η ετερογένεια (συμβατότητα με άλλα δίκτυα)
- αξιοπιστία
- ασφάλεια [23]

3.1.1 Επιλογές ανάπτυξης

Το NB-IoT καταλαμβάνει ένα εύρος ζώνης (BW) 180 KHz τόσο για την κάτω ζεύξη (Downlink) όσο και για την άνω ζεύξη (Uplink) η οποία αντιστοιχεί σε ένα μπλοκ πόρων στην μετάδοση του LTE και μπορεί να αναπτυχθεί με τρεις τρόπους:

- Αυτόνομη λειτουργία (Stand Alone Operation): Αξιοποίηση των συχνοτήτων του GSM που χρησιμοποιούνται σήμερα, διαθέτοντας ένα BW 200 KHz υπάρχει διαθέσιμο ένα διάστημα προστασίας (guard interval) 10 KHz που παραμένει και στις δύο πλευρές του φάσματος.
- Λειτουργία ζώνης προστασίας (Guard Band Operation) : Αξιοποίηση των μπλοκ πόρων που δεν χρησιμοποιούνται μέσα σε μια ζώνη ασφαλείας του φορέα LTE.
- Λειτουργία εντός της ζώνης (In-band operation): Χρήση μπλοκ πόρων που χρησιμοποιούνται από ένα φορέα LTE για την επικοινωνία του eNodeB.

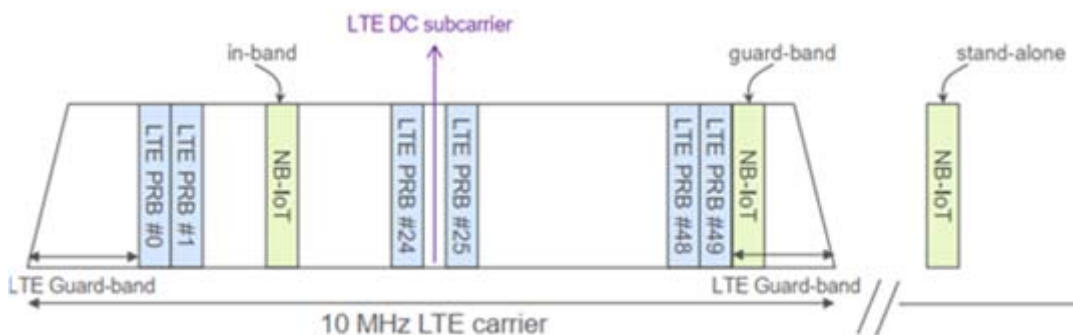
Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται οι επιλογές ανάπτυξης NB-IoT.



Σχήμα 2.2: Επιλογές ανάπτυξης NB-IoT [24]

Ο τρόπος ανάπτυξης θα πρέπει να είναι ξεκάθαρος στην τερματική συσκευή (UE) όταν ενεργοποιείται για πρώτη φορά και αναζητά ένα NB-IoT φορέα. Παρόμοια με τις υπάρχων τερματικές συσκευές LTE, οι τερματικές συσκευές NB-IoT απαιτούν για την αναζήτηση ενός φορέα, ένα ράστερ (πλέγμα) των 100 KHz. Ένας φορέας NB-IoT που προορίζεται για τη διευκόλυνση του αρχικού συγχρονισμού του UE αναφέρεται ως φορέας σταθεροποίησης (anchor carrier). Το raster αναζήτησης των 100 kHz από το UE υποδηλώνει ότι για την ανάπτυξη εντός της ζώνης, ένας φορέας σταθεροποίησης μπορεί να τοποθετηθεί μόνο σε ορισμένα PRBs. Για παράδειγμα, σε ένα φορέα LTE 10 MHz, οι δείκτες των PRB που συμβαδίζουν καλύτερα με το δίκτυο 100 kHz και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορέας σταθεροποίησης NB-IoT είναι 4, 9, 14, 19, 30, 35, 40, 45. Ο συντελεστής PRB ξεκινά από το δείκτη 0 για το PRB που καταλαμβάνει τη χαμηλότερη συχνότητα στο εύρος ζώνης του συστήματος LTE.

Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι επιλογές ανάπτυξης του NB-IoT με φορέα LTE 10 MHz.



Σχήμα 3.3: Επιλογές ανάπτυξης του NB-IoT με φορέα LTE 10 MHz [21]

Το PRB ακριβώς επάνω από τον υποφορέα (subcarrier) DC, δηλ. Το PRB # 25, είναι κεντραρισμένο στα 97,5 KHz (δηλ. Μια απόσταση 6,5 subcarriers) πάνω από τον υποφορέα (subcarrier) DC. Δεδομένου ότι ο υποφορέας (subcarrier) LTE DC είναι τοποθετημένος σε 100 KHz raster, το κέντρο του PRB # 25 είναι 2,5 KHz από το πλησιέστερο πλέγμα 100 kHz. Η απόσταση μεταξύ των δύο γειτονικών κέντρων PRB πάνω από τον υποφορέα DC είναι 180 KHz. Έτσι, τα PRB # 30, # 35, # 40 και # 45 είναι όλα κεντραρισμένα στα 2,5 KHz από το πλησιέστερο δίκτυο 100 KHz. Μπορεί να φανεί ότι για τους φορείς LTE 10 MHz και 20 MHz, υπάρχει ένα σύνολο δεικτών PRB που συγκεντρώνουν όλα τα δεδομένα σε 2,5 KHz από το πλησιέστερο δίκτυο 100 KHz, ενώ για φορείς LTE των 3 MHz, 5 MHz και 15 MHz bandwidth, οι δείκτες PRB έχουν κέντρο τουλάχιστον 7,5 KHz μακριά από το raster των 100 KHz. Επιπλέον, ένας φορέας σταθεροποιητής NB-IoT δεν θα πρέπει να είναι οποιοδήποτε από τα μεσαία 6 PRB του φορέα LTE (π. X. PRB # 25 του 10 MHz LTE, αν και το κέντρο του είναι 2,5 KHz από το πλησιέστερο

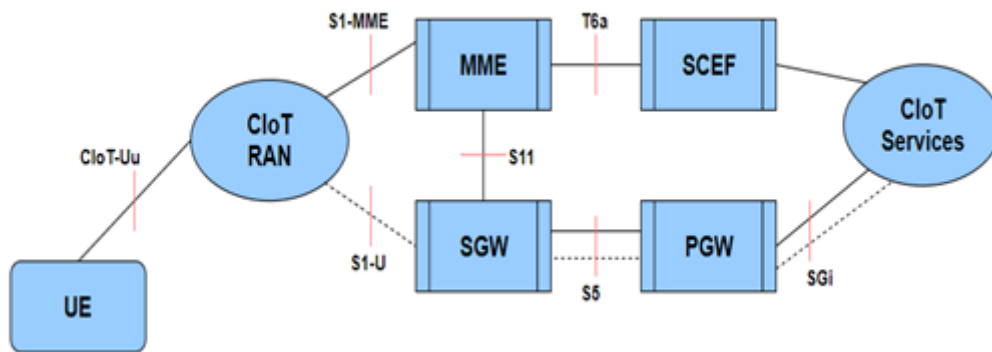
raster των 100 KHz. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για το συγχρονισμό LTE και τα κανάλια εκπομπής καταλαμβάνουν πολλά στοιχεία πόρων στα μέσα 6 PRBs, καθιστώντας δύσκολη τη χρήση αυτών των PRB για NB-IoT.

Παρόμοια με την ανάπτυξη εντός ζώνης, ένας φορέας σταθεροποιητής NB-IoT στην ανάπτυξη της ζώνης ασφαλείας πρέπει να έχει κεντρική συχνότητα όχι μεγαλύτερη από 7,5 KHz από το raster των 100 KHz. Η αναζήτηση κυψέλης και η αρχική απόκτηση NB-IoT έχουν σχεδιαστεί για ένα UE για να είναι σε θέση να συγχρονιστεί με το δίκτυο παρουσία μίας μετατόπισης raster μέχρι 7,5 KHz.

Υποστηρίζεται λειτουργία πολλαπλών φορέων (multi-carrier) του NB-IoT. Δεδομένου ότι αρκεί να υπάρχει ένας φορέας σταθεροποίησης NB-IoT για τη διευκόλυνση του αρχικού συγχρονισμού του UE, οι πρόσθετοι φορείς δεν χρειάζεται να βρίσκονται κοντά στο κανάλι δικτύου 100 KHz. Αυτοί οι πρόσθετοι φορείς είναι που αναφέρονται ως δευτερεύοντες φορείς (secondary carriers). [11,21,24]

3.1.2 Δομή δικτύου

Το δίκτυο κορμού του NB-IoT βασίζεται στο εξελιγμένο σύστημα πακέτων (EPS) και καθορίστηκαν δύο βελτιστοποιήσεις για το κυψελοειδές διαδίκτυο των πραγμάτων (CIoT). Η πρώτη βελτιστοποίηση αφορά στο επιπέδου χρήστη CIoT EPS και η δεύτερη στο επιπέδου ελέγχου CIoT EPS. Και τα δύο επίπεδα επιλέγουν την καλύτερη διαδρομή για τα πακέτα δεδομένων ελέγχου και χρήστη, για την άνω και κάτω ζεύξη. Η διαδρομή βελτιστοποίησης για το επιλεγμένο επίπεδο είναι ευέλικτη για το πακέτο δεδομένων που παράγεται από το κινητό σύνολο. Η διαδικασία πρόσβασης κυψέλης μιας τερματική συσκευής NB-IoT είναι παρόμοια με αυτή του LTE. Στο επίπεδο ελέγχου CIoT EPS, το εξελιγμένο δίκτυο επίγειας ραδιοεπικοινωνίας UMTS (E-UTRAN) χειρίζεται τις ραδιοεπικοινωνίες μεταξύ UE και MME και αποτελείται από τους εξελιγμένους σταθμούς βάσης που ονομάζονται eNodeB ή eNB. Το MME διαχειρίζεται την σηματοδότηση ελέγχου που σχετίζεται με την κινητικότητα και την ασφάλεια του UE. Αυτό συμπεριλαμβάνει τη διαχείριση της πρόσβασης του UE και στις συνδέσεις και τους πόρους του δικτύου. Όταν το UE απαιτεί μια μεταπομπή (handover) σε μια κυψέλη νέας περιοχής, το MME εκκινεί τη μεταφορά.



Σχήμα 3.4: Δομή Δικτύου NB-IoT

Στη συνέχεια, τα δεδομένα μεταβιβάζονται στην πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων (PGW) μέσω μιας κεντρικής πύλης εξυπηρέτησης (SGW). Η PGW εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ του EPC και των εξωτερικών δικτύων IP, όπως το internet μέσω της διεπαφής SGI. Η SGW είναι το σημείο διασύνδεσης μεταξύ του ραδιοδικτύου και του EPC. Εξυπηρετεί κάθε UE λειτουργώντας ως δρομολογητής, αναλαμβάνει την δρομολόγηση στα πακέτα δεδομένων της συσκευής από το σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη κεντρική πύλη του αντίστοιχου PGW.

Για πακέτα δεδομένων που δεν είναι IP, θα μεταφερθούν σε ένα νέο κόμβο, τον service capability exposure function (SCEF), ο οποίος μπορεί να παραδώσει δεδομένα τύπου μηχανής πάνω από το επίπεδο ελέγχου και να παρέχει μια «θεωρητική» διεπαφή για τις υπηρεσίες δικτύου (authentication and authorization, discovery and access network capabilities). Με τη βελτιστοποίηση επιπέδου χρήστη EPS Clot, τόσο τα πακέτα IP όσο και τα μη IP μπορούν να μεταδοθούν μέσω RF φορέων (radio bearers) διαμέσου του SGW και PGW στο διακομιστή εφαρμογών. Συνοπτικά, για την NB-IoT, η υπάρχουσα αρχιτεκτονική δικτύου E-UTRAN μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί [09,24,25].

3.1.3 Βασικά Χαρακτηριστικά του NB IoT

Στον Πίνακα 3.1 δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του NB-IoT όπως μέθοδος ανάπτυξης, μέγιστη απώλεια διάδοσης, εύρος, μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης, μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, μέθοδοι πολυπλεξίας, ισχύς πομπού.

Μέθοδος Ανάπτυξης	In-Band LTE, Guard Band LTE, Standalone
Μέγιστη απώλεια διάδοσης	164 dB
Εύρος (Bandwidth)	180 KHz
Κάτω Ζεύξη (Downlink)	OFDMA (15 KHz), 1 Rx, 1 or 2 TX antenna
Άνω Ζεύξη (Uplink)	SC-FDMA (15 KHz subcarrier spacing) Turbo Code or Single Tone (15kHz and 3,5 kHz spacing)
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (peak rate)	Downlink: 227 kbps Uplink: 250 kbps Uplink single tone: 20 kbps
Duplex	HD FDD, TDD
Ισχύς πομπού (Transmit Power)	23 dBm
Εξοικονόμηση ενέργειας	PSM, ext I-DRX, C-DRX

Πίνακας 3.1: Βασικά Χαρακτηριστικά του NB IoT

3.1.4 Ζώνες συχνοτήτων για το NB-IoT

Για τις ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται οι ίδιες συχνότητες του LTE με ένα υποσύνολο για την χρήση στο NB-IoT. Για την έκδοση 13 του 3GPP οι ζώνες συχνοτήτων δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Αριθμός Μπάντας	Εύρος συχνοτήτων για την άνω ζεύξη σε MHz	Εύρος συχνοτήτων για την Κάτω ζεύξη σε MHz
1	1920 - 1980	2110 - 2170
2	1850 - 1910	1930 - 1990
3	1710 - 1785	1805 - 1880
5	824-849	869 - 894
8	880 - 915	925 - 960
12	699 - 716	729 - 746
13	777 - 787	746 - 756
17	704 - 716	734 - 746
18	815 - 830	860 - 875
19	830 - 845	875 - 890
20	832 - 862	791 - 821

26	814 - 849	859 - 894
28	703 - 748	758 - 803
66	1710 - 1780	2110 - 2200

Πίνακας 3.2: Ζώνες συχνοτήτων για το NB-IoT 3GPP έκδοση 13 [28]

Στην έκδοση 14 του 3GPP προστέθηκαν οι παρακάτω μπάντες

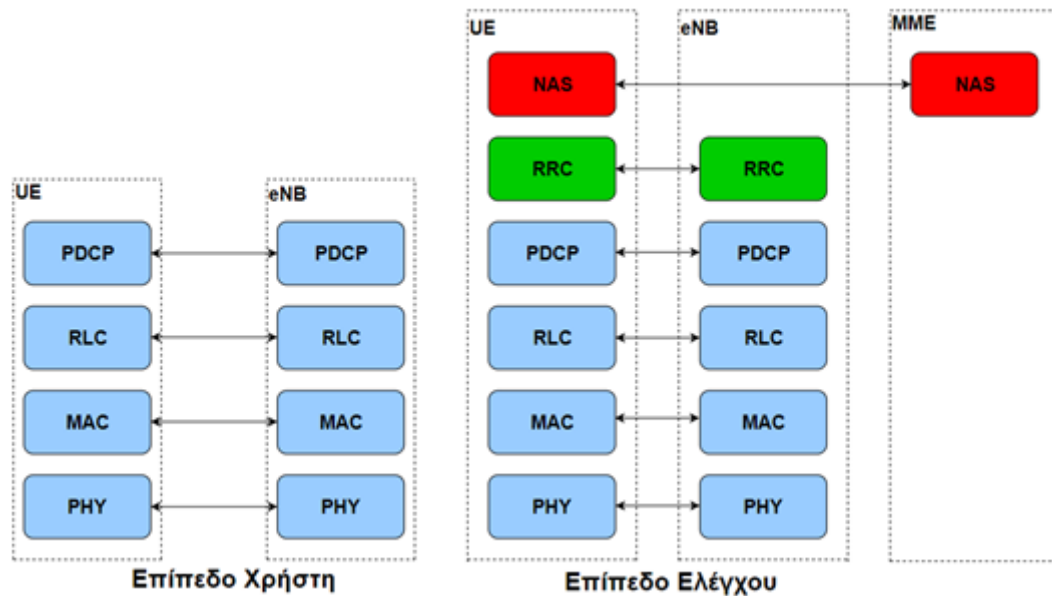
Αριθμός Μπάντας	Εύρος συχνοτήτων για την άνω ζεύξη σε MHz	Εύρος συχνοτήτων για την Κάτω ζεύξη σε MHz
11	1427.9 - 1447.9	1475.9 – 1495.9
25	1850 - 1915	1930 - 1995
31	452.5 – 457.5	462.5 – 467.5
70	1695 - 1710	1995 - 2020

Πίνακας 3.3: Ζώνες συχνοτήτων για το NB-IoT 3GPP έκδοση 14 [29]

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες συχνότητες βρίσκονται στο χαμηλότερο εύρος των υφιστάμενων LTE ζώνες. Αυτό είναι πιο ιδανικό για τις επικοινωνίες τύπου μηχανής διότι υπάρχουν πολλές συσκευές που αναμένεται να λειτουργούν υπό δύσκολες RF συνθήκες.

3.1.5 Στοιβά Πρωτοκόλλων

Η θεμελιώδης αρχή για την στοιβά πρωτοκόλλων στο NB-IoT είναι να αρχίσουν με την χρήση των υπαρχών πρωτοκόλλων του LTE, να τα μειώσουν στο ελάχιστο και να γίνει βελτίωση σύμφωνα με τις απαιτήσεις το NB-IoT. Η στοιβά πρωτοκόλλου NB-IoT εξετάζεται ως νέα διεπαφή αέρα για LTE και η δομή των πρωτοκόλλων κατηγοριοποιείται σε δυο επίπεδα, επίπεδο ελέγχου και επίπεδο χρήστη όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 .



Σχήμα 3.5: Στοίβα Πρωτοκόλλων

Τα πρωτόκολλα στο επίπεδο χρήστη είναι μέρος του στρώματος πρόσβασης (access stratum) που μεταφέρει δεδομένα σε όλο το ασύρματο μέρος του δικτύου. Το επίπεδο χρήστη μεταφέρει πακέτα IP μεταξύ του UE και του eNB. Τα πακέτα παραδίδονται στο UE από το eNB χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο σύγκλισης πακέτων δεδομένων (PDCP) με μέγεθος 1600 byte.

Στην κορυφή του επιπέδου ελέγχου το πρωτόκολλο NAS αντιστοιχεί στο στρώμα μη πρόσβασης, χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του UE και του κεντρικού δικτύου. Το NAS αναλαμβάνει έλεγχο ταυτότητας, έλεγχο ασφάλειας, διαχείριση φορέων, την διαχείριση του QoS και την διαχείριση της κινητικότητας.

Το RRC εκτελεί λειτουργίες στο επίπεδο ελέγχου για αξιόπιστο και αποτελεσματικό έλεγχο των ραδιο-πόρων. Οι λειτουργίες του RRC περιλαμβάνουν την αναζήτηση (paging), την εκπομπή πληροφοριών συστήματος, τον έλεγχο ραδιο-πόρων, τη διαχείριση των συνδέσεων RRC, την αναφορά μετρήσεων από το UE και λειτουργίες κινητικότητας. [11,25]

Στις επόμενες ενότητες που ακολουθούν θα γίνει ανάλυση για κάθε πρωτόκολλο ξεχωριστά.

3.2 PDCP Layer

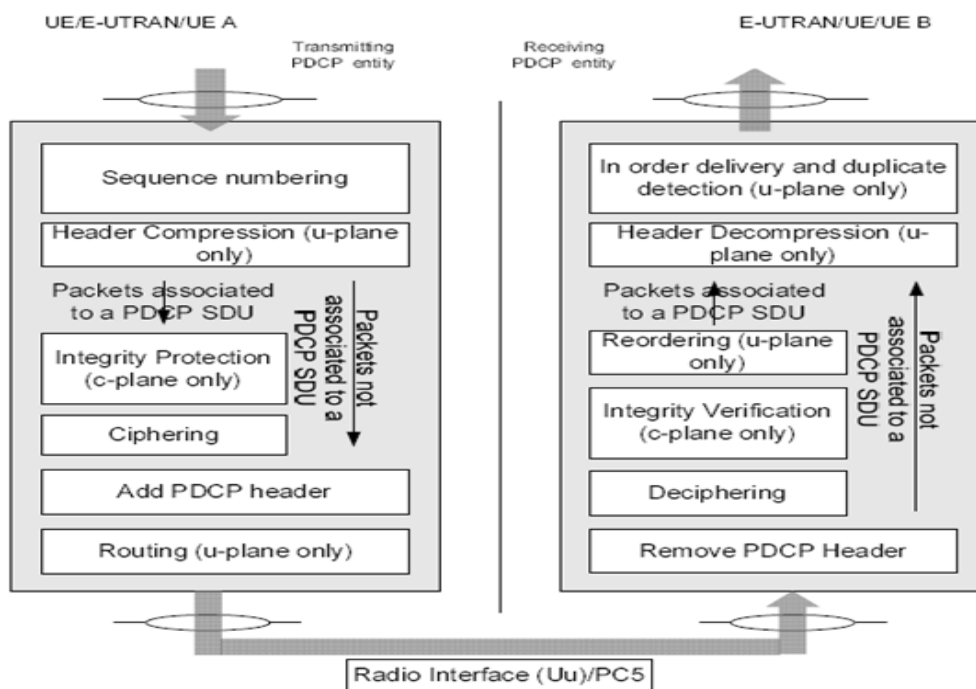
Τα πακέτα που παραδίδονται από το eNodeB στην τερματική συσκευή χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο σύγκλισης πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol – PDCP) και

έχει μέγεθος 1600 byte. Το PDCP χρησιμοποιείται στο επίπεδο χρήστη και στο επίπεδο ελέγχου. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια αναφορά για το PDCP.

3.2.1 Λειτουργίες του PDCP

Τα πακέτα που παραδίδονται από το eNodeB στο UE χρησιμοποιούν το PDCP. Το PDCP εκτελεί τις εξής λειτουργίες :

- Συμπίεση κεφαλίδας.
- κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων στο επίπεδο χρήστη και ελέγχου.
- προστασία ακεραιότητας και επαλήθευση δεδομένων στο επίπεδο ελέγχου
- παράδοση σε ακολουθία.
- αποθήκευση σε προσωρινή μνήμη και προώθηση των πακέτων δεδομένων σε εξυπηρετούντο eNodeB's κατά την διάρκεια μεταπομπών. [25]



Σχήμα 3.6: Λειτουργίες πρωτοκόλλου PDCP

3.2.2 Αλλαγές στο επίπεδο NB IoT PDCP σε σχέση με το επίπεδο LTE PDCP

Το μέγιστο υποστηριζόμενο μέγεθος ενός PDCP SDU για το LTE είναι 8188 Octets, για το NB-IoT το μέγιστο υποστηριζόμενο μέγεθος SDU είναι 1600 Octets. Η αναφορά λήψης της κατάστασης PDCP δεν είναι εφαρμόσιμη στο NB-IoT. Στο PDCP, τα δεδομένα που μεταφέρουν στο PDU από το DRB χαρτογραφημένα σε RLC UM αλλά στην περίπτωση των DRBs NB-IoT χαρτογραφούνται σε RLC AM. Για το LTE το Μήκος των bits είναι : 5,7,12,16 ή 18 bits που χρησιμοποιούνται στο PDCP SN για DRB, αλλά σε NB-IoT μόνο 7 bit PDCP SN χρησιμοποιείται για DRB.

3.3 RRC Layer

Η προδιαγραφή για το στρώμα RRC ορίζεται στο TS 36.331 και για το NB-IoT. Οι προδιαγραφές του στρώματος RRC είναι ελαφρώς διαφορετικές από αυτές του LTE. Το UE πρέπει να κάνει τη μετάβαση στη λειτουργία RRC Connected πριν, μεταφέροντας οποιαδήποτε δεδομένα εφαρμογής ή ολοκληρώνοντας οποιαδήποτε διαδικασίες σηματοδότησης. Η δημιουργία συνδέσεων RRC είναι μια χειραψία τριών κατευθύνσεων (3 way handshake) μεταξύ UE και eNodeB, η οποία χρησιμοποιείται για να κάνει τη μετάβαση του UE από RRC Idle mode σε λειτουργία RRC Connected. Η διαδικασία δημιουργίας σύνδεσης RRC αποτελείται κυρίως από 3 βήματα.

- 1) Μήνυμα αίτησης σύνδεσης RRC (RRC connection request message) που αποστέλλεται από την UE.
- 2) Ρύθμιση σύνδεσης RRC (RRC connection setup) που αποστέλλεται από το eNodeB.
- 3) Μήνυμα ολοκλήρωσης εγκατάστασης RRC (RRC setup complete message) που αποστέλλεται από την UE.

Η διαδικασία δημιουργίας σύνδεσης RRC ξεκινά πάντα από την UE, αλλά μπορεί να ενεργοποιηθεί είτε από την UE είτε από το δίκτυο. Για παράδειγμα, το UE ενεργοποιεί τη δημιουργία σύνδεσης RRC εάν ο τελικός χρήστης ξεκινήσει μια εφαρμογή για περιήγηση στο Internet ή για να στείλει ένα μήνυμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Το UE ενεργοποιεί τη σύνδεση RRC εάν η UE μετακινηθεί σε μια νέα περιοχή παρακολούθησης και πρέπει να ολοκληρώσει τη διαδικασία αναβάθμισης σηματοδότησης της περιοχής παρακολούθησης. Το δίκτυο ενεργοποιεί τη διαδικασία δημιουργίας σύνδεσης RRC στέλνοντας ένα μήνυμα paging. Αυτό θα μπορούσε να

χρησιμοποιηθεί για να επιτρέψει την παράδοση εισερχόμενου SMS ή την ειδοποίηση εισερχόμενης φωνητικής κλήσης. Το αρχικό μήνυμα Μη Πρόσβασης (NAS) μεταφέρεται ως μέρος της διαδικασίας δημιουργίας σύνδεσης RRC για τη μείωση της καθυστέρησης της εγκατάστασης σύνδεσης. Η δημιουργία συνδέσεων RRC ρυθμίζει το RF φορέα σηματοδοσίας (SRB) 1 και το (SRB1 bis) επιτρέποντας την σηματοδότηση που έπεται ώστε να χρησιμοποιεί το αποκλειστικό κανάλι ελέγχου (DCCH) και όχι το κοινό κανάλι ελέγχου (CCCH) που χρησιμοποιείται από το SRB 0.

3.3.1 Φορέας RF σηματοδότησης και δεδομένων

Οι φορείς RF σηματοδοσίας (SRB) είναι οι φορείς RF (RBs) που χρησιμοποιούνται από το UE για τη μετάδοση και λήψη μηνυμάτων RRC με το eNodeB. Για το NB-IoT UE, ορίζονται οι ακόλουθοι RF φορείς:

- SRB0: Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνύματος σηματοδοσίας RRC κατά την διάρκεια εκπομπής και λήψης. Χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή μηνυμάτων με το eNodeB με τα μηνύματα RRCConceptRequest, RRCConnectionSetup, RRCConnectionResumeRequest, RRCConnectionReject, RRCConnectionReestablishmentRequest και RRCConnectionReestablishment
- SRB1bis: Εγκαθίσταται κατά την εγκατάσταση του SRB1 μετά την λήψη του RRCConnectionSetup από τον UE. Το SRB1bis είναι το ίδιο με το SRB1 εκτός από το ότι παρακάμπτει το επίπεδο PDCP. Το SRB1bis χρησιμοποιείται όσο δεν ενεργοποιείται η ασφάλεια. Εάν είναι ενεργοποιημένη η ασφάλεια, το SRB1bis δεν χρησιμοποιείται, αλλά χρησιμοποιείται μόνο το SRB1.
- SRB01: Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων σηματοδοσίας RRC μετά την ενεργοποίηση της ασφάλειας. Το SRB0 χρησιμοποιείται πριν ενεργοποιηθεί η ασφάλεια του στρώματος πρόσβασης (AS) και υποστηρίζεται μόνο το SRB1 μετά την ενεργοποίηση της ασφάλειας AS.
- DRB0 και DRB1: Για την ανταλλαγή μηνυμάτων δεδομένων με το eNodeB χρησιμοποιούνται μέχρι δύο RF φορείς δεδομένων. Για να υποστηρίξει ένα UE για δύο DRBs, πρέπει να έχει τη δυνατότητα πολλαπλών DRB. διαφορετικά, το UE υποστηρίζει μόνο ένα DRB. [23,33]

3.3.2 Μπλοκ πληροφοριών συστήματος

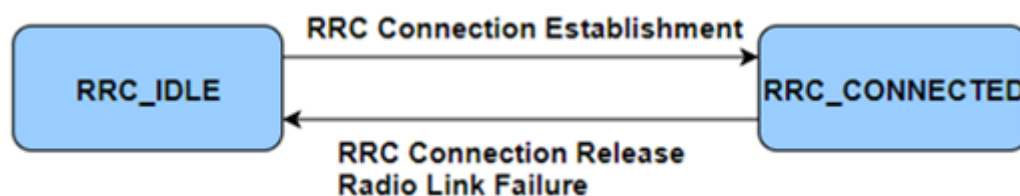
Οι πληροφορίες του συστήματος χρησιμοποιούνται για την μετάδοση πληροφοριών που ισχύουν για όλες τις τερματικές συσκευές σε μια κυψέλη. Το LTE χρησιμοποιεί το κύριο μπλοκ πληροφοριών (master information block, MIB) και το μπλοκ πληροφοριών συστήματος (system information block). Το MIB εξασφαλίζει τις βασικές πληροφορίες και τις παραμέτρους που χρειάζεται να γνωρίζει το UE για μια κυψέλη και πώς να πραγματοποιήσει αποδιαμόρφωση το SIB. Το SIB περιέχει περισσότερες παραμέτρους για να καθορίσει εάν μια κυψέλη είναι κατάλληλη για να επιλεγεί. Το SIB αποτελείται από υποσύνολα SIBS και φαίνονται στον Πίνακα 3.4.[26]

Μπλοκ πληροφοριών συστήματος	Περιεχόμενο
MIB-NB	Βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για τη λήψη περαιτέρω πληροφοριών συστήματος
SIBType1-NB	Πρόσβαση και επιλογή κυψέλης, άλλος προγραμματισμός SIB
SIBType2-NB	Πληροφορίες ρυθμίσεων πόρων ραδιοσυχνοτήτων
SIBType3-NB	Πληροφορίες επανεπιλογής κυψέλης για μεταπομπή Intra Cell, Inter Cell
SIBType4-NB	Πληροφορίες που σχετίζονται με γειτονική κυψέλη για μεταπομπή Intra Cell και επανεπιλογή κυψέλης
SIBType5-NB	Πληροφορίες που σχετίζονται με γειτονική κυψέλη για μεταπομπή Inter Cell και επανεπιλογή κυψέλης
SIBType14-NB	Παράμετροι αποκλεισμού πρόσβασης
SIBType16-NB	Πληροφορίες σχετικά με το χρόνο GPS και την Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα (UTC)

Πίνακας 3.4: Μπλοκ Πληροφοριών Συστήματος [24,34]

3.3.3 Τρόποι λειτουργίας RRC

Υπάρχουν δυο καταστάσεις συνδέσεις για μια τερματική συσκευή, η κατάσταση RRC_IDLE και η RRC_CONNECTED. Στην κατάσταση RRC_IDLE τα UE ελέγχουν την κινητικότητα τους εκτελώντας μετρήσεις των γειτονικών κυψελών και την επιλογή κυψέλης (cell selection). Στην συνέχεια αποκτούν το βασικό μπλοκ πληροφοριών (MIB-NB) και τα μπλοκ πληροφοριών συστήματος (SIBs). Τα UE παρακολουθούν το κανάλι PDCCH για τον εντοπισμό εισερχόμενων κλήσεων ή την αλλαγή πληροφοριών του συστήματος. Στην κατάσταση RRC_CONNECTED το UE έχει μια σύνδεση και μπορεί να μεταδώσει και να λάβει δεδομένα με το eNodeB. Το UE παρακολουθεί το κανάλι PDCCH για να δει αν τα δεδομένα είναι έτοιμα για να αποσταλούν σε αυτό.



Σχήμα 3.7: Τρόποι λειτουργίας RRC

Δεν υπάρχουν μεταπομπές στις συσχετιζόμενες καταστάσεις UTRA και GSM, επειδή οι μεταπομπές σε αυτές τις τεχνολογίες δεν υποστηρίζονται. Δεν υπάρχει επίσης μεταπομπή στο LTE, επειδή το LTE θεωρείται ως διαφορετικό RAT.

3.3.4 Διαδικασία UE σε IDLE mode

Στην κατάσταση RRC_IDLE τα UE ελέγχουν την κινητικότητα τους εκτελώντας μετρήσεις των γειτονικών κυψελών και την επιλογή κυψέλης (cell selection). Στην συνέχεια αποκτούν το βασικό μπλοκ πληροφοριών (MIB-NB) και τα μπλοκ πληροφοριών συστήματος (SIBs). Τα UE παρακολουθούν το κανάλι PDCCH για τον εντοπισμό εισερχόμενων κλήσεων ή την αλλαγή πληροφοριών του συστήματος.

3.3.4.1 Επιλογή PLMN

Το NAS μπορεί να διατηρεί μια λίστα με PLMNs κατά σειρά προτεραιότητας. Το PLMN αντιπροσωπεύει έναν φορέα κινητής τηλεφωνίας σε μια γεωγραφική περιοχή. Ένα από τα

PLMN επιλέγεται είτε χειροκίνητα από τον χρήστη είτε αυτόματα ως το PLMN στόχος. Στη συνέχεια, ζητείται από το RRC να αναζητήσει μια κυψέλη που ανήκει σε αυτό το PLMN και ανακτά όλες τις πληροφορίες συστήματος από αυτήν την κυψέλη. Αν η κυψέλη διαπιστωθεί ότι είναι κατάλληλη τότε το UE επιλέγει αυτήν την κυψέλη, παρακολουθεί συνεχώς και αποκτά τα MIB και SIB1. Η κυψέλη αναγνωρίζεται ως κυψέλη που εξυπηρετεί το UE. Το UE πρέπει να στρατοπεδεύσει σε μία κυψέλη που ανήκει στο στόχο PLMN. Οι ταυτότητες PLMN μεταδίδονται κατά τη διάρκεια του SIB1 και η UE πρέπει να συντονιστεί με το κανάλι εκπομπής και να αποκτήσει τα MIB και SIB1 της κυψέλης ώστε να αναγνωρίσει το PLMN κάθε ανιχνεύσιμης κυψέλης. Ένα μόνο PLMN μπορεί να έχει μια ή περισσότερες κυψέλες και κάθε κυψέλη μπορεί να ανήκει σε ένα ή περισσότερα PLMN. Το UE μπορεί να σαρώσει όλα τα κανάλια RF στις ζώνες που υποστηρίζονται από το UE για να βρει μια κυψέλη που ανήκει στο PLMN στόχο ή να επιλέξει οποιοδήποτε κυψέλη εάν δεν ικανοποιεί το στόχο PLMN. Κατά τη σάρωση όλων των καναλιών RF, κάθε ανιχνευόμενο PLMN αναφέρεται στο NAS υπό την προϋπόθεση ότι η ληφθέν τιμή RSRP στο UE υπερβαίνει τα -110 dBm. Οι κυψέλες που έχουν λάβει την RSRP τους στη UE μεγαλύτερο από -110 dBm σημειώνονται ως κυψέλες υψηλής ποιότητας. Οι κυψέλες που είναι μικρότερα από -110 dBm μπορούν επίσης να αναφέρονται στο NAS αλλά δεν σημειώνονται ως κυψέλες υψηλής ποιότητας. Μεταξύ αυτών των PLMN κυψελών που αναφέρθηκαν στο NAS, είτε υψηλής ποιότητας είτε όχι, το NAS μπορεί να επιλέξει ένα PLMN στόχο είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα. Στη συνέχεια, ζητείται από το RRC να βρει, να επιλέξει μια κυψέλη που ανήκει στο PLMN στόχο. [24,33]

3.3.4.2 Επιλογή κυψέλης και κινητικότητα

Στο NB-IoT η επικοινωνία μεταξύ του UE και του δικτύου γίνεται με σύντομα μηνύματα. Το UE μπορεί να ανταλλάξει αυτά τα μηνύματα ενώ εξυπηρετείται από μια κυψέλη, επομένως δεν απαιτείται διαδικασία μεταπομπής κατά τη διάρκεια της κατάστασης RRC_CONNECTED. Αν χρειάζεται να γίνει αλλαγή κυψέλης η τερματική συσκευή πηγαίνει στην κατάσταση RRC_IDLE και επιλέγει διαφορετική κυψέλη. Η ενδιάμεση συχνότητα αναφέρεται εδώ στον φορέα 180 kHz, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμα και αν δύο φορείς χρησιμοποιούνται στη λειτουργία εντός της ζώνης που είναι ενσωματωμένη στον ίδιο φορέα LTE, αυτό εξακολουθεί να αναφέρεται ως επανεπιλογή μεταξύ συχνοτήτων. Για την κατάσταση RRC_IDLE, η επανεπιλογή κυψέλης ορίζεται και για την intra και την inter συχνότητα κυψέλης. Η inter συχνότητα αναφέρεται στον φορέα 180 KHz.

Για να βρεθεί μία κυψέλη, το UE μετρά πρώτα την λαμβανόμενη ισχύ και ποιότητα της NRS. Αυτές οι τιμές στη συνέχεια συγκρίνονται με ειδικά κατώφλια που παρέχονται από το SIB-NB. Σύμφωνα με τα κριτήρια S, εάν και οι δύο τιμές είναι υψηλότερες από αυτά τα όρια, το UE θεωρεί ότι καλύπτεται από την κυψέλη. Εάν όχι μεταπηδά στην άλλη κυψέλη.

Ανάλογα με την λαμβανόμενη ισχύ NRS, το UE ίσως χρειαστεί να ξεκινήσει μια επανεπιλογή της κυψέλης. Το UE συγκρίνει αυτή την ισχύ με ένα όριο επανελέγχου, το οποίο μπορεί να διαφέρει για την περίπτωση της intra και της inter συχνότητας. Όλες οι απαιτούμενες παράμετροι λαμβάνονται από το την κυψέλη εξυπηρέτησης, δεν υπάρχει ανάγκη ανάγνωσης των SIB-NB από άλλες κυψέλες.

Μεταξύ όλων των κυψελών που πληρούν τα κριτήρια S, το UE ταξινομεί τις κυψέλες σε σχέση με την υπέρβαση ισχύος πέρα από ένα άλλο κατώφλι. Σε αυτή τη διαδικασία προστίθεται μια καθυστέρηση ώστε να αποφευχθεί η τακτική επανεπιλογή κυψέλης και μπορεί να εφαρμοστεί μια ειδική αντιστάθμιση της κυψέλης για την περίπτωση intra συχνότητας. Σε αντίθεση με το LTE, δεν υπάρχουν προτεραιότητες για τις διάφορες συχνότητες. Το UE επιλέγει την πιο κατάλληλη κυψέλη από την υψηλότερη κατάταξη για να εξασφαλίσει κανονική υπηρεσία.

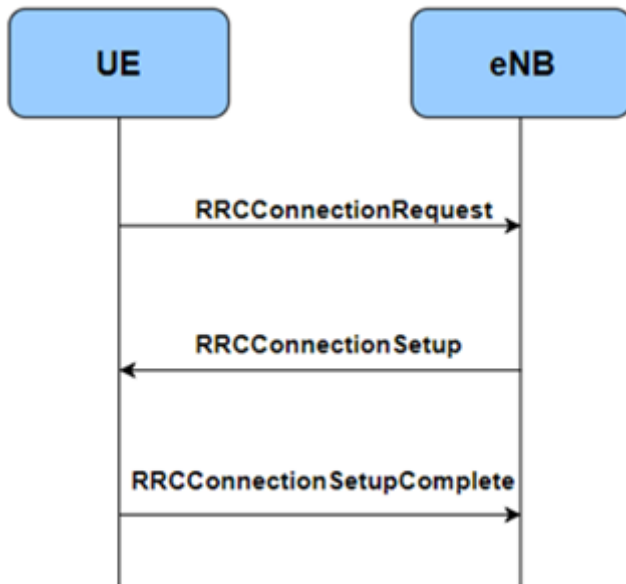
Όταν το UE φύγει από την κατάσταση RRC_CONNECTED, δεν επιλέγει απαραίτητως τον ίδιο φορέα για μεταπηδήσει σε μια κυψέλη. Το μήνυμα του RRCConnectionRelease μπορεί να υποδεικνύει τη συχνότητα κατά την οποία το UE αρχικά προσπαθεί να βρει μια κατάλληλη κυψέλη. Μόνο εάν το UE δεν βρει μια κατάλληλη κυψέλη σε αυτή τη συχνότητα, μπορεί επίσης να προσπαθήσει να βρει κυψέλη σε διαφορετικές συχνότητες. [23,24,33]

3.3.5 Διαδικασία UE σε CONNECTED mode

Στην κατάσταση RRC_CONNECTED το UE έχει μια σύνδεση και μπορεί να μεταδώσει και να λάβει δεδομένα με το eNodeB. Το UE παρακολουθεί το κανάλι PDCCH για να δει αν τα δεδομένα είναι έτοιμα για να αποσταλούν σε αυτό.

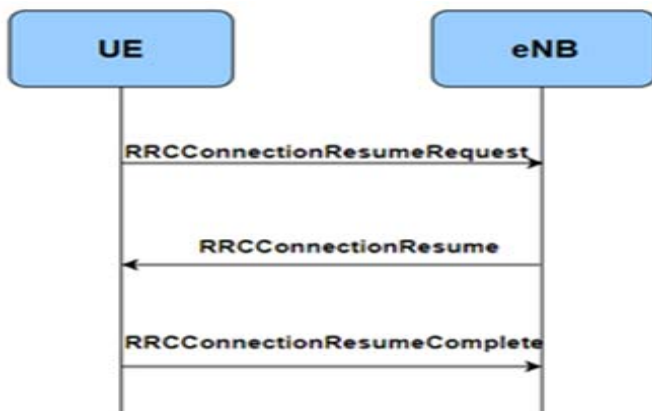
3.3.5.1 Δημιουργία σύνδεσης RRC (RRC Connection Establishment)

Στο NB-IoT για την δημιουργία σύνδεσης RRC ακολουθείται η ίδια ακολουθία μηνυμάτων όπως και στο LTE και φαίνεται στο Σχήμα 3.8:



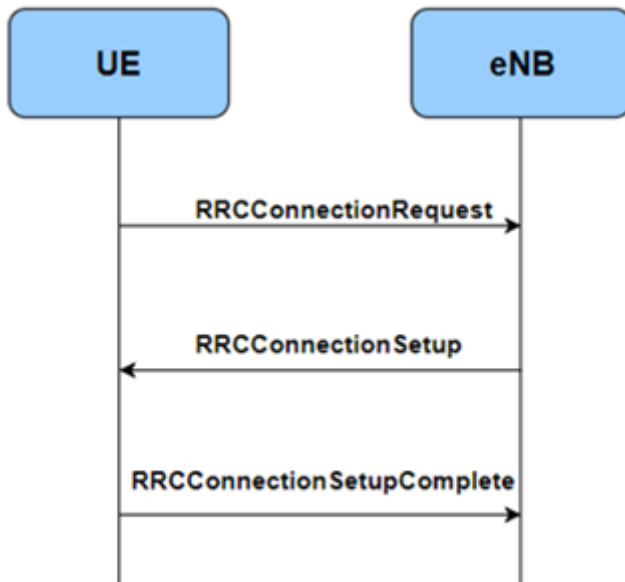
Σχήμα 3.8: Δημιουργία σύνδεσης RRC

Με το μήνυμα RRCConnectionRequest το UE δηλώνει ότι θέλει να συνδεθεί στο δίκτυο. Η eNB απαντάει με το μήνυμα RRCConnectionSetup και εξασφαλίζει ρυθμίσεις του RF φορέα (SRB1). Στην συνέχεια το UE απαντάει με το μήνυμα RRCConnectionSetupComplete που εμπεριέχει τα επιλεγμένα PLMN και MME. Όταν το eNB αποδεσμεύσει την σύνδεση έχει την δυνατότητα να διακόψει προσωρινά το UE. Σε αυτήν την περίπτωση το UE μεταβαίνει στην κατάσταση RRC_IDLE αποθηκεύοντας τις τρέχων συνθήκες δημιουργώντας ένα πλαίσιο. Ενδέχεται να επαναληφθεί αργότερα η κατάσταση RRC_CONNECTED με αυτές τις συνθήκες που είναι αποθηκευμένος στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Η συνέχιση της RRC (RRC Connection Resume) απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9



Σχήμα 2.9: RRC Connection Resume

Το UE στέλνει ένα μήνυμα RRCConnectionResumeRequest και το eNB αποφασίζει αν αποδεχτεί το αίτημα ή εάν θα ξεκινήσει μια τυπική ρύθμιση σύνδεσης RRC (RRC Connection Setup). Στην περίπτωση που το eNB δεν αποδεχτεί το αίτημα επανασύνδεσης αλλάζει ξανά στο αίτημα σύνδεσης.

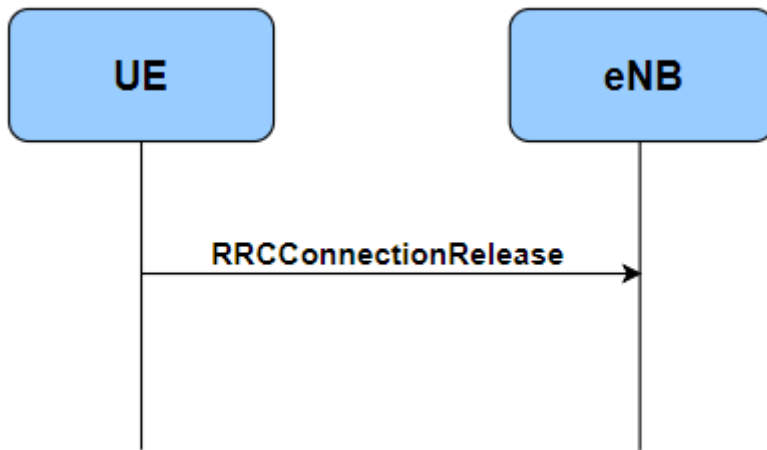


Σχήμα 3.10: Δημιουργία σύνδεσης RRC

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το UE αποδεσμεύει τις αποθηκευμένες συνθήκες και δεν είναι πλέον εφικτή η συνέχιση αυτών των συνθηκών για μελλοντική σύνδεση.

3.3.5.2 RRC Connection Release

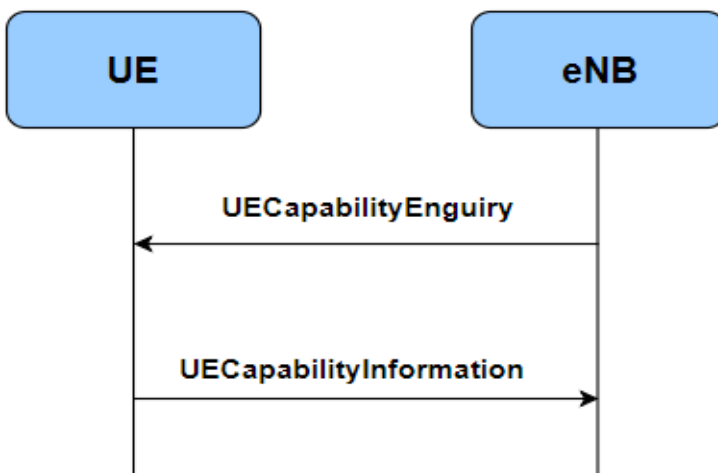
Σε αυτήν τη κατάσταση το UE αποθηκεύει το πλαίσιο και μπορεί να ζητήσει την επανασύνδεση της σύνδεσης RRC όπως περιγράφεται παραπάνω, διαφορετικά το πλαίσιο διαγράφεται και το UE μπορεί να πάρει μόνο μια άλλη σύνδεση RRC χρησιμοποιώντας την πλήρη ρύθμιση σύνδεσης RRC. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, η UE εισέρχεται στην κατάσταση RRC_IDLE.



Σχήμα 3.11: RRC Connection Release

3.3.5.3 Ικανότητα Μεταφοράς UE (UE Capability Transfer)

Όταν το UE συνδέεται με το δίκτυο, το eNB δεν γνωρίζει το πλαίσιο που έχει αποθηκεύσει το UE. Προκειμένου να αποκτηθεί αυτή η πληροφορία, καθορίζεται το UE Capability Transfer όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12



Σχήμα 3.12: UE Capability Transfer

Το UE Capability Transfer αρχίζει πάντα από το eNB, επειδή το UE δεν μπορεί να γνωρίζει εάν το eNB έχει ήδη τις πληροφορίες αυτές από το δίκτυο ή από μια προηγούμενη σύνδεση. Οι δυνατότητες περιλαμβάνουν την αποδέσμευση της UE, την κατηγορία UE, τον κατάλογο των υποστηριζόμενων ζωνών και την δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών φορέων. Επιπλέον, το UE μπορεί να υποδείξει αν υποστηρίζει λειτουργία πολλαπλών φερουσών και την μετάδοση πολλαπλών τόνων στην άνω ζεύξη. [23,24,33]

3.4 RLC Layer

Το πρωτόκολλο ραδιοζεύξης (Radio Link Control – RLC) κατακερματίζει ή διασυνδέει μονάδες δεδομένων. Ο κατακερματισμός (segmentation) είναι απαραίτητος όταν οι μονάδες δεδομένων υπηρεσιών (service data units, SDUs) από τα ανώτερα επίπεδα είναι πολύ μεγάλες για το επίπεδο MAC. Η διασύνδεση επιτρέπει σε πολλαπλά μικρότερα πακέτα να συνδυαστούν και να μοιραστούν τις πληροφορίες κεφαλίδας για να μειωθεί η επιβάρυνση του συστήματος. Το RLC εκτελεί επίσης λειτουργίες επανεκπομπής ARQ για την διόρθωση λαθών, όταν το H-ARQ στο επίπεδο MAC έχει αποτύχει. Το RLC παραδίδει πακέτα με τη σειρά στα υψηλότερα επίπεδα του δέκτη.

3.4.1 Τρόπου λειτουργίας του RLC

Μια οντότητα RLC μπορεί να λειτουργήσει με έναν από τους τρεις τρόπους :

- Διαφανής λειτουργία (transparent mode, TM) : Απλός τρόπος λειτουργίας χωρίς κεφαλίδα και χωρίς λειτουργίες RLC για κατακερματισμό ή διασύνδεση του συστήματος και των μηνυμάτων αναζήτησης, όχι για μετάδοση δεδομένων στο επίπεδο χρήστη.
- Λειτουργία χωρίς επιβεβαίωση (unacknowledged mode, UM) : Παρέχει παράδοση των δεδομένων με τη σειρά, αλλά όχι επανεκπομπές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστέρηση που μπορούν να ανεχτούν κάποιες απώλειες δεδομένων.
- Λειτουργία με επιβεβαίωση (acknowledged mode, AM) : Είναι ο πιο πολύπλοκος τρόπος που έχει τις ίδιες λειτουργίες με το UM και επιπρόσθετα επανεκπέμπει τα χαμένα PDUs. Αυτή η λειτουργία είναι καλύτερη για τις ευαίσθητες σε λάθη, αλλά ανεκτικές σε καθυστέρηση, εφαρμογές. [25]

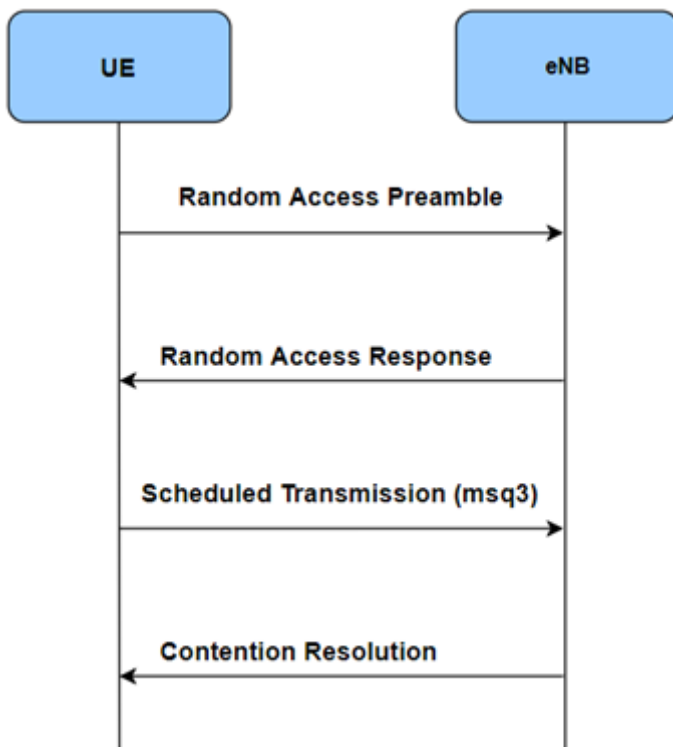
3.5 MAC Layer

Το επίπεδο MAC είναι το χαμηλότερο επίπεδο που διασυνδέεται απευθείας με το επίπεδο PHY. Το επίπεδο MAC εκτελεί τη λειτουργικότητά του σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Οι λειτουργίες έχουν ως εξής :

- Διαδικασίες τυχαίας προσπέλασης και επίλυσης διαφορών.
- Πολυπλεξία και αποπολυπλεξία RLC PDU σε ένα ενιαίο MAC PDU.
- Υβριδική λειτουργία HARQ.
- Προγραμματισμός προτεραιότητας για σηματοδότηση και RB δεδομένων.
- Χαρτογράφηση λογικών καναλιών σε κανάλια μεταφοράς.
- Αναφορά της κατάστασης buffer, όγκου δεδομένων και αιτήσεων προγραμματισμού.
- Διαδικασία ασυνεχούς λήψης για τη διατήρηση της ισχύος της μπαταρίας. Το επίπεδο MAC του eNodeB δίνει προτεραιότητες και αποφασίζει ποιο UE και ποιοι ραδιοφορείς θα στείλουν ή θα λάβουν δεδομένα και με ποιους φυσικούς πόρους. Επίσης αποφασίζει για το μορφότυπο μετάδοσης, πχ σχήμα διαμόρφωσης, ρυθμό κωδικοποίησης, το επίπεδο ισχύος.

3.5.1 Διαδικασία τυχαίας προσπέλασης

Στο NB-IoT η τυχαία προσπέλαση εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς, όπως η αρχική πρόσβαση κατά την δημιουργία μιας ραδιοζεύξης και η αίτηση προγραμματισμού. Μεταξύ άλλων, ένας κύριος στόχος της τυχαίας πρόσβασης είναι η επίτευξη συγχρονισμού uplink ζεύξης, η οποία είναι σημαντική για τη διατήρηση της ορθογωνικότητας των uplink ζεύξεων στο NB-IoT. Παρόμοια με το LTE είναι η διαδικασία τυχαίας προσπέλασης που στο NB-IoT αποτελείται από τέσσερα βήματα:



Σχήμα 3.13: Random Access Procedure

1) Το UE μεταδίδει ένα προοίμιο τυχαίας προσπέλασης.

2) Το eNB εκπέμπει μια απάντηση τυχαίας προσπέλασης που περιέχει εντολή εκκίνησης χρονισμού και προγραμματισμό πόρων για το UE για να γίνει χρήση στο τρίτο βήμα.

3) Το UE μεταδίδει την ταυτότητά του στο eNB χρησιμοποιώντας τους προγραμματισμένους πόρους.

4) Το δίκτυο εκπέμπει ένα μήνυμα επίλυσης, για επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος λόγω πολλαπλών UE που μεταδίδουν το ίδιο προοίμιο τυχαίας προσπέλασης. Για την εξυπηρέτηση των UEs σε διαφορετικές κλάσεις κάλυψης που έχουν διαφορετικές περιοχές απώλειας διάδοσης, το δίκτυο μπορεί να ρυθμίσει έως και τρεις NPRACH πόρους σε μία κυψέλη. Σε κάθε ρύθμιση παραμέτρων, καθορίζεται μια τιμή επανάληψης για την επανάληψη μιας βασικής εισαγωγής τυχαίας προσπέλασης. Το UE μετρά τη δύναμη του σήματος λήψης της κάτω ζεύξης για να εκτιμήσει το επίπεδο κάλυψης του και μεταδίδει την εισαγωγή τυχαίας προσπέλασης στους πόρους NPRACH διαμορφωμένο για το εκτιμώμενο επίπεδο κάλυψης. Για να διευκολυνθεί η ανάπτυξη της NB-IoT σε διαφορετικά σενάρια, το NB-IoT επιτρέπει την ευέλικτη ρύθμιση των πόρων NPRACH σε χρόνο-συχνότητα δικτύου πόρων με τις εξής παραμέτρους.

- Πεδίο χρόνου: περιοδικότητα του πόρου NPRACH και χρόνος εκκίνησης του πόρου NPRACH σε μια περίοδο.
- Τομέας συχνοτήτων: θέση συχνότητας (από την άποψη της μετατόπισης των subcarriers) και αριθμός υποφορέων.

Το UE μπορεί να επιλέξει ένα από τα δύο σενάρια για να μεταδώσει το προοίμιο τυχαίας προσπέλασης για να σηματοδοτήσει αν υποστηρίζει ή όχι τη μετάδοση πολλαπλών τόνων στο τρίτο βήμα τυχαίας προσπέλασης.

Ενδέχεται στην ανάπτυξη της περιοχής NB-IoT, ορισμένες υλοποιήσεις UE να μην υποστηρίζουν μετάδοση πολλών τόνων. Το δίκτυο θα πρέπει να έχει επίγνωση της ικανότητας μετάδοσης πολλών τόνων UE πριν από τον προγραμματισμό της uplink μετάδοσης. Ως εκ τούτου η UE πρέπει να υποδείξει την υποστήριξή της για τη μετάδοση πολλών τόνων στο πρώτο βήμα τυχαίας προσπέλασης για να διευκολύνει τον προγραμματισμό του δικτύου μετάδοσης uplink στο τρίτο βήμα τυχαίας πρόσβασης. Για το σκοπό αυτό, το δίκτυο μπορεί να χωρίσει τους υποφορείς NPRACH στον τομέα συχνοτήτων σε δύο μη αλληλεπικαλυπτόμενα σύνολα. Το UE μπορεί να επιλέξει ένα από τα δύο σενάρια για να μεταδώσει το προοίμιο τυχαίας προσπέλασης για να σηματοδοτήσει αν υποστηρίζει ή όχι τη μετάδοση πολλών τόνων στο τρίτο βήμα τυχαίας προσπέλασης.

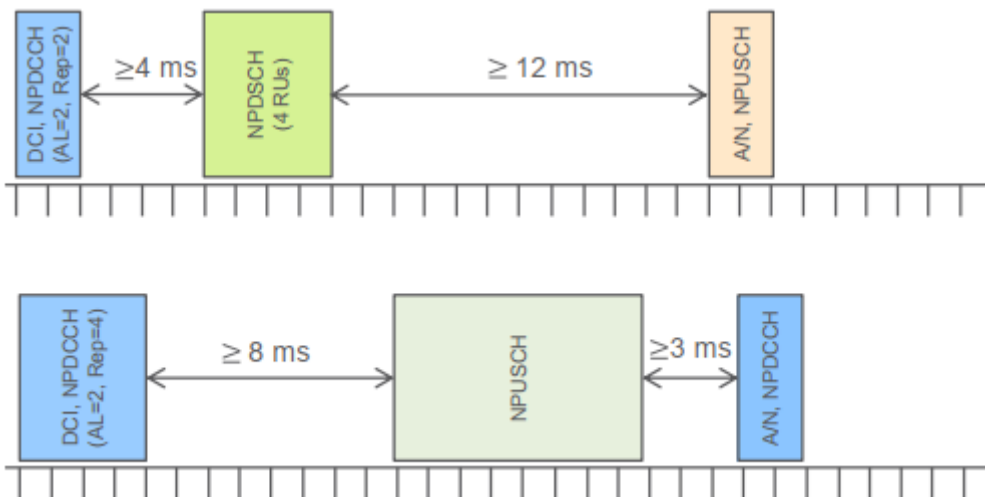
Συνοπτικά το UE καθορίζει το επίπεδο κάλυψης, μετρώντας την ισχύ λήψης του σήματος downlink. Μετά την ανάγνωση των πληροφοριών του συστήματος σχετικά με τη διαμόρφωση πόρων NPRACH, το UE μπορεί να προσδιορίσει τον ρυθμισμένο πόρο NPRACH και τους αριθμούς των επαναλήψεων που απαιτούνται για το εκτιμώμενο επίπεδο κάλυψης του, καθώς και την ισχύ μετάδοσης της εισαγωγής τυχαίας προσπέλασης. Στη συνέχεια, το UE μπορεί να μεταδώσει τις επαναλήψεις της βασικής εισαγωγής τυχαίας προσπέλασης ενός τόνου back-to-back μέσα σε μία περίοδο των πόρων NPRACH. [21,32]

3.5.2 Προγραμματισμός και λειτουργία HARQ

Το NB-IoT για να επιτρέψει την υλοποίηση χαμηλής πολυπλοκότητας για το UE, επιτρέπει μόνο μία διαδικασία HARQ τόσο στην κάτω όσο και στην άνω ζεύξη και επιτρέπει μεγαλύτερο χρόνο

αποκωδικοποίησης UE για NPDCCH και NPDSCH. Η ασύγχρονη, προσαρμοστική διαδικασία HARQ χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της ευελιξίας προγραμματισμού. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.14. Η εντολή προγραμματισμού μεταφέρεται μέσω του δείκτη ελέγχου κάτω ζεύξης (Downlink Control Indicator - DCI), ο οποίος μεταφέρεται από το NPDCCH. Το NPDCCH μπορεί να χρησιμοποιεί επίπεδα συνάθροισης (aggregation levels - AL) 1 ή 2 για τη μετάδοση ενός DCI. Με το AL-1, πολυπλέκονται δύο DCI σε ένα υποπλαίσιο, διαφορετικά ένα υποπλαίσιο μεταφέρει μόνο ένα DCI (δηλ. AL-2), οδηγώντας σε χαμηλότερο ρυθμό κωδικοποίησης και βελτιωμένη κάλυψη. Η περαιτέρω βελτίωση της κάλυψης μπορεί να επιτευχθεί μέσω της επανάληψης. Κάθε επανάληψη καταλαμβάνει ένα υποπλαίσιο. Το DCI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό δεδομένων downlink ή δεδομένων uplink. Στην περίπτωση των δεδομένων της κάτω ζεύξης, η ακριβής χρονική μετατόπιση μεταξύ του NPDCCH και του αντίστοιχου NPDSCH υποδεικνύεται στο DCI. Εφόσον οι συσκευές IoT αναμένεται να έχουν μειωμένη ικανότητα επεξεργασίας, η χρονική μετατόπιση μεταξύ του τέλους του NPDCCH και της έναρξης του συνδεδεμένου NPDSCH είναι τουλάχιστον 4 ms. Σε σύγκριση, το LTE PDCCH προγραμματίζει το PDSCH στο ίδιο TTI. Μετά την λήψη του NPDSCH, το UE χρειάζεται να αποστείλει την επιβεβαίωση (acknowledgement) HARQ χρησιμοποιώντας το NPUSCH Format 2. Οι πόροι του NPUSCH που φέρουν αναγνώριση HARQ υποδεικνύονται επίσης στο DCI. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους σε μια συσκευή IoT, η χρονική μετατόπιση μεταξύ του τέλους του NPDSCH και της έναρξης της σχετικής HARQ επιβεβαίωση (acknowledgement) είναι τουλάχιστον 12 ms. Αυτή η μετατόπιση είναι μεγαλύτερη από αυτή μεταξύ NPDCCH και NPDSCH επειδή το μπλοκ μεταφοράς που μεταφέρεται στο NPDSCH μπορεί να είναι μέχρι 680 bits, πολύ μεγαλύτερο από το DCI, το οποίο έχει μήκος μόνο 23 bits.

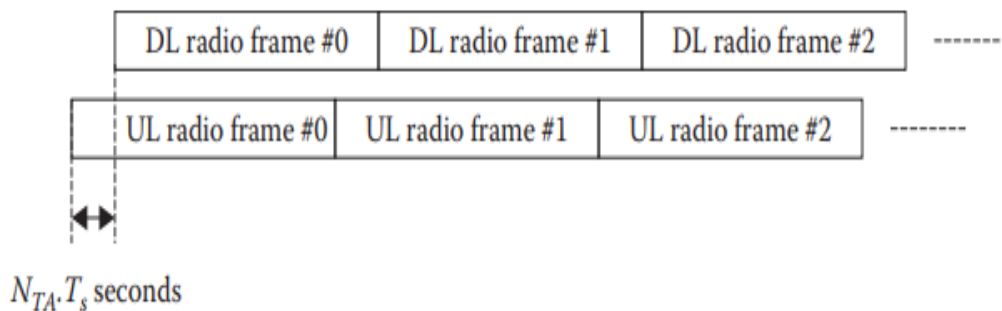
Με παρόμοια μέθοδο ο προγραμματισμός άνω ζεύξης και η λειτουργία HARQ απεικονίζονται επίσης στο Σχήμα 3.14. Το DCI για την πραγματοποίηση προγραμματισμού άνω ζεύξης πρέπει να καθορίζει ποιοι υποφορείς (subcarriers) κατανέμονται στο UE. Η χρονική μετατόπιση μεταξύ του τέλους του NPDCCH και της αρχής του σχετικού NPUSCH είναι τουλάχιστον 8 ms. Μετά την ολοκλήρωση της μετάδοσης NPUSCH, το UE παρακολουθεί το NPDCCH για να μάθει εάν το NPUSCH λαμβάνεται σωστά από τον σταθμό βάσης ή απαιτείται αναμετάδοση. [21]



Σχήμα 3.14: Λειτουργία σχέσης χρονισμού (κάθε μονάδα αντιστοιχεί σε ένα υποπλαίσιο) [21]

3.5.6 Timing Advance Command

Στο RAR (Random Access Response, ενότητα 3.5.1) , το UE λαμβάνει μια εντολή προώθησης χρονισμού (bit) 11-bit (TA). Το UE χρησιμοποιεί αυτή την εντολή για να ρυθμίσει το χρονισμό των πλαισίων κάτω ζεύξης και άνω ζεύξης σχετικά μεταξύ τους. Ο χρονισμός ενός πλαισίου κάτω ζεύξης και άνω ζεύξης είναι όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 2.15: Χρονισμός κάτω και άνω ζεύξης

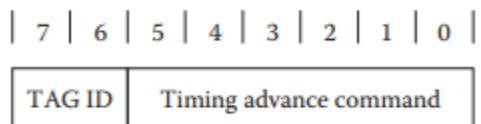
Όπου $0 \leq N_{TA} \leq 20512$. Το UE χρησιμοποιεί τον φορέα ακύρωσης ως αναφορά χρονισμού ανεξάρτητα από το αν υπάρχει ή όχι ένας φορέας μη ακύρωσης. Με την λήψη αυτής της εντολής, το UE ρυθμίζει το χρονισμό μετάδοσης του καναλιού άνω ζεύξης μέσω των καναλιών NPUSCH και NPRACH. Αυτή η εντολή υποδεικνύει στο UE ότι πρέπει να γίνει μια αλλαγή για το χρονισμό της άνω ζεύξης σε σχέση με το τρέχον χρονισμό που χρησιμοποιεί το UE την δεδομένη στιγμή. Η ακριβής τιμή ευθυγράμμισης χρονισμού, N_{TA} , υπολογίζεται από

$$NTA = 16 * TA * TS$$

Όπου $TA=0,1,2,\dots,1282$ και TS το διάστημα δειγματοληψίας που εξαρτάται από την απόσταση του υποφορέα:

$$TS = \begin{cases} \frac{1}{2048 * \Delta f}, & \Delta f < 15 \text{ KHz} \\ \frac{1}{8192 * \Delta f}, & \Delta f \geq 3.75 \text{ KHz} \end{cases}$$

Εκτός από τη λήψη εντολής TA στο RAR, το eNodeB μπορεί επίσης μεταβιβάσει ένα TA ως στοιχείο ελέγχου MAC όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16



Σχήμα 3.16: TA εντολή ως στοιχείο ελέγχου MAC

Αποτελείται από ταυτότητα TAG, η οποία έχει οριστεί σε μηδέν και τιμή εντολής TA 6-bit, $TA\{0,1,\dots,64\}$. Η τιμή της εντολής TA χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του παλιού χρονισμού $N_{TA,old}$ σε ένα νέο χρονισμό $N_{TA,new}$ με την τιμή του TA λαμβάνεται ως :

$$N_{TA,new} = N_{TA,old} + (TA - 31) * 16$$

Ανάλογα με την τιμή του TA , ο νέος χρόνος μπορεί να προχωρήσει ή να καθυστερήσει σε σχέση με τον τρέχοντα συγχρονισμό.

Εάν η εντολή TA παραληφθεί στο πλαίσιο DL, η, το UE αρχίζει να εφαρμόζει το νέο TA από την πρώτη διαθέσιμη υποδοχή NPUSCH ανοδικής ζεύξης ακολουθώντας το υποπλαίσιο $(n + 12)$ DL. [23]

3.6 Φυσικό Στρώμα PHY

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μελέτη για το φυσικό στρώμα PHY. Το PHY περιλαμβάνει την επεξεργασία των καναλιών μεταφοράς (transport channels) που υλοποιούν τις διαδικασίες

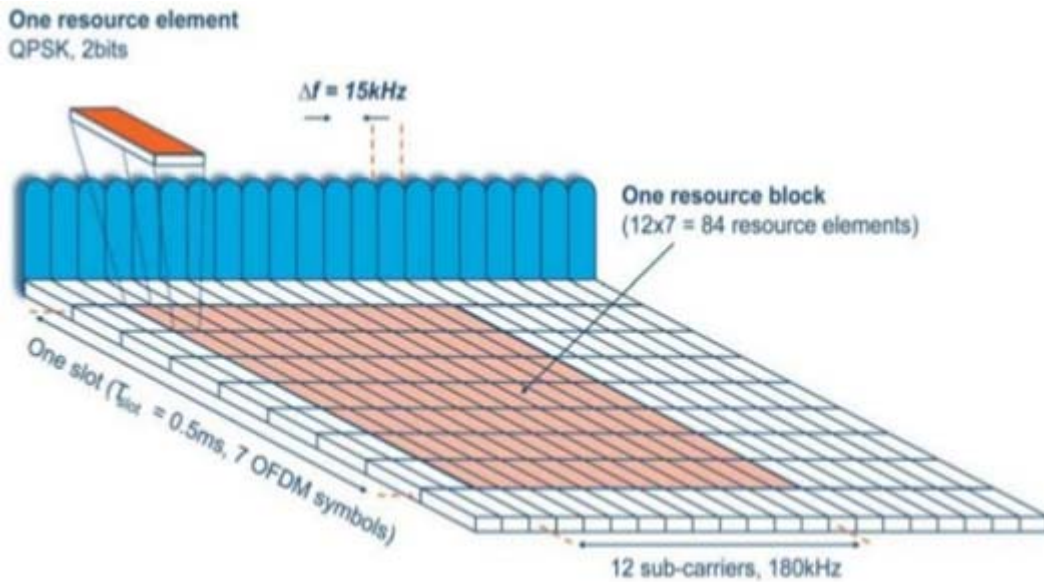
ελέγχου σφραγμάτων, την επεξεργασία των φυσικών καναλιών (physicals channels) που υλοποιούν τις τεχνικές OFDMA, SC-FDMA καθώς και το αναλογικό τμήμα (μίκτες, κεραίες κλπ). Η επικοινωνία του PHY με το MAC πραγματοποιείται μέσω καναλιών μεταφοράς, ενώ τα διάφορα τμήματα του PHY επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω φυσικών καναλιών. [25]

3.6.1 Κάτω ζεύξη (Downlink)

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει ανάλυση για την κάτω ζεύξη, όπως η δομή πλαισίου (frame) και θέσεις-σχισμής (slot), τα κανάλια και τα σήματα. Στην κάτω ζεύξη χρησιμοποιείται OFDMA με διαμόρφωση QAM και υπάρχουν τρία κανάλια και τρία σήματα.

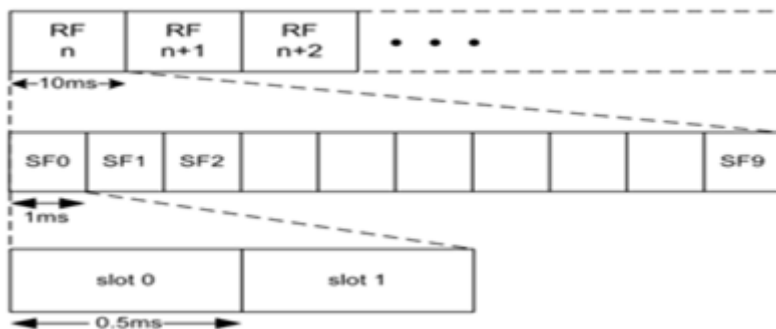
3.6.1.1 Δομή πλαισίου (frame) και θέσεις-σχισμής (slot) για την κάτω ζεύξη

Η κάτω ζεύξη (downlink) του NB-IoT χρησιμοποιεί OFDMA, όπου διαθέτει 12 υποφέρουσες με εύρος 15 KHz όπως και στο LTE αλλά χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK και όχι QAM. Οι σχισμές-θέσεις (slots), το υποπλαίσιο (subframe) και το πλαίσιο διάρκειας (frame duration) είναι 0,5 ms, 1 ms και 10 ms, αντίστοιχα με εκείνες του LTE. Επιπλέον, η μορφή των σχισμών-θέσεων (slots) όσον αφορά τη διάρκεια του κυκλικού προθέματος (cyclic prefix - CP) και τον αριθμό των συμβόλων OFDM ανά θέση-σχισμή είναι αντίστοιχες με εκείνες του LTE (7 symbols ανά slot). Στην ουσία, ένας πάροχος NB-IoT χρησιμοποιεί ένα LTE PRB στην περιοχή συχνοτήτων, δηλαδή δώδεκα υποφέρουσες(subcarriers) των 15 kHz για ένα σύνολο 180 kHz. Η επαναχρησιμοποίηση της ίδιας αριθμολογίας OFDM με το LTE εξασφαλίζει την απόδοση συνύπαρξης με το LTE στην κάτω ζεύξη. Για παράδειγμα, όταν η NB-IoT αναπτύσσεται μέσα σε ένα φορέα LTE, η ορθογωνικότητα μεταξύ του NB-IoT PRB και όλων των άλλων LTE PRB διατηρείται στην κάτω ζεύξη.



Σχήμα 3.17: OFDMA κάτω ζεύξης για το NB-IoT

Υπάρχουν 1024 κυκλικά επαναλαμβανόμενα RF πλαίσια, καθένα από τα οποία διαρκεί 10ms. Ένα ραδιοπλαίσιο χωρίζεται σε 10 υποπλαίσια (SF), το καθένα από τα οποία αποτελείται από δύο slots. Εκτός από τα πλαίσια του συστήματος, επίσης ορίζεται η έννοια των υπέρ-πλαισίων, η οποία μετράει τον αριθμό των περιόδων πλαισίου του συστήματος. Είναι ένας μετρητής 10 bit, έτσι ώστε η περίοδος υπέρ-πλαισίου να εκτείνεται σε 1024 περιόδους πλαισίου συστήματος, που αντιστοιχούν σε ένα χρονικό διάστημα περίπου 3 ωρών [21,26].



Σχήμα 3.16: Δομή πλαισίου για NB-IoT για downlink και uplink με απόσταση 15 KHz subcarrier

3.6.1.2 Κανάλια και σήματα κάτω ζεύξης

Το δίκτυο NB-IoT διαθέτει τρία κανάλια:

- Κανάλι φυσικής εκπομπής στενής ζώνης – Narrowband Physical Broadcast Channel (NPBCH)
- Κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης – Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH)
- Φυσικό κοινόχρηστο κανάλι στενής ζώνης – Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH)

και τρία σήματα στη κάτω ζεύξη:

- Σήμα στενής ζώνης πρωτεύοντος συγχρονισμού - Narrowband Primary Synchronization Signal (NPSS)
- Δευτερεύον σήμα συγχρονισμού στενής ζώνης - Narrowband Secondary Synchronization Signal (NSSS)
- Σήμα στενής ζώνης αναφοράς - Narrowband Reference Signal (NRS)

Σε αντίθεση με το LTE, αυτά τα φυσικά κανάλια και τα σήματα NB-IoT έχουν υποστεί κυρίως πολυπλεξία στον χρόνο. Το Σχήμα 3.18 απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο τα υποπλαίσια (subframes) NB-IoT κατανέμονται σε διαφορετικά φυσικά κανάλια και σήματα. Κάθε υποπλαίσιο (subframe) NB-IoT εκτείνεται σε ένα PRB (δηλαδή 12 subcarriers) στην περιοχή συχνοτήτων και 1 ms στην περιοχή χρόνου.

even numbered frame	subframe number									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	NPBCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPSS	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NSSS
odd numbered frame	subframe number									
	NPBCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPSS	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH	NPDCCH or NPDSCH

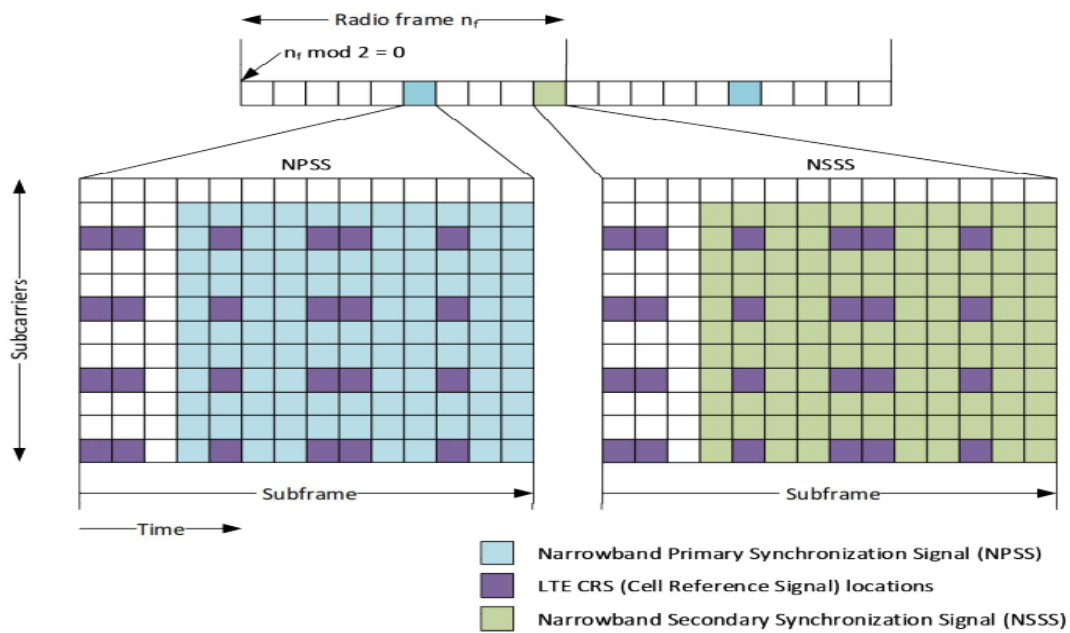
Σχήμα 3.18: Πολυπλεξία χρόνου στο κανάλι καθόδου των φυσικών καναλιών και σημάτων για το NB-IoT [21]

3.6.1.3 Σήματα κάτω ζεύξης

Τα σήματα NPSS και NSSS χρησιμοποιούνται από τις τερματικές συσκευές NB-IoT για την αναζήτηση κυψελών, η οποία περιλαμβάνει συγχρονισμό χρόνου και συχνότητας και ανίχνευση ταυτότητας κυψελών. Τα σήματα εκπέμπονται τακτικά από τα eNodeB. Το UE χρησιμοποιεί

αυτά τα σήματα συγχρονισμού για να επιτύχει RF πλαίσιο, υποπλάσιο, υποδοχή και συγχρονισμό στον ίδιο τομέα. Επειδή οι ακολουθίες συγχρονισμού παλαιών LTE καταλαμβάνουν 6 PRBs και δεν μπορούν επαναχρησιμοποιηθούν για το NB-IoT. Γι' αυτό τον λόγο εισάγεται ένας νέος σχεδιασμός.

- Το σήμα NPSS μεταδίδεται στο υποπλάσιο (subframe) # 5 σε κάθε 10 ms πλαίσιο (frame), χρησιμοποιώντας τα τελευταία 11 σύμβολα OFDM στο υποπλάσιο (subframe). Η ανίχνευση NPSS είναι μια από τις πιο απαιτητικές από υπολογιστική άποψη πράξεις από την προοπτική της τερματικής συσκευής. Για να επιτρέψει την αποτελεσματική εφαρμογή της ανίχνευσης NPSS, το NB-IoT χρησιμοποιεί μια ιεραρχική ακολουθία. Για κάθε ένα από τα 11 σύμβολα OFDM NPSS σε ένα υποπλάσιο μεταδίδεται είτε p είτε $-p$ όπου p είναι η ακολουθία βάσης που παράγεται με βάση την ακολουθία ZadoffChu (ZC) μήκους-11 με δείκτη ρίζας 5. Καθένα από τα μήκη - Η αλληλουχία ZC χαρτογραφείται στους χαμηλότερους 11 subcarriers μέσα στα NB-IoT PRB.
- Το σήμα NSSS έχει περιοδικότητα 20 ms και μεταδίδεται στο υποπλάσιο # 9, χρησιμοποιώντας επίσης τα τελευταία 11 σύμβολα OFDM που αποτελούνται από 132 στοιχεία πόρων συνολικά. Το NSSS είναι μια ακολουθία συχνότητας μήκους 132, με κάθε στοιχείο να αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο πόρων. Το NSSS παράγεται από τον πολλαπλασιασμό στοιχείων μεταξύ μιας ακολουθίας ZC και μιας δυαδικής ακολουθίας κρυπτογράφησης. Η ρίζα της αλληλουχίας ZC και η δυαδική ακολουθία κρυπτογράφησης προσδιορίζονται με στενή ζώνη φυσικής ταυτότητας κυττάρων (NB-PCID). Η κυκλική μετατόπιση της αλληλουχίας ZC προσδιορίζεται περαιτέρω από τον αριθμό πλαισίου. Το NSSS χρησιμοποιείται για να αποκτήσει την Κυψέλη ID και χρονισμό πλαισίου, και περιέχει την απαραίτητη πληροφορία για να αποκωδικοποιήσει το κανάλι στενής δέσμης κάτω συνδέσμου (NPBCH).
- Το σήμα NRS χρησιμοποιείται για την παροχή αναφοράς συγχρονισμού για την αποδιαμόρφωση των καναλιών κάτω ζεύξης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος αναφοράς (RSRP) και την παρεμβολή στο σήμα και το ρυθμό θορύβου του σήματος αναφοράς (RS-SNR). Έχει υποστεί πολυπλεξία χρόνου και συχνότητας με σύμβολα που φέρουν πληροφορίες σε υποπλάσια τα οποία μεταφέρουν NPBCH, NPDCCH και NPDSCH, χρησιμοποιώντας 8 στοιχεία πόρων ανά υποπλάσιο ανά θύρα κεραίας. [24]



Σχήμα 3.19: Σήματα κάτω ζεύξης για το NB-IoT [24]

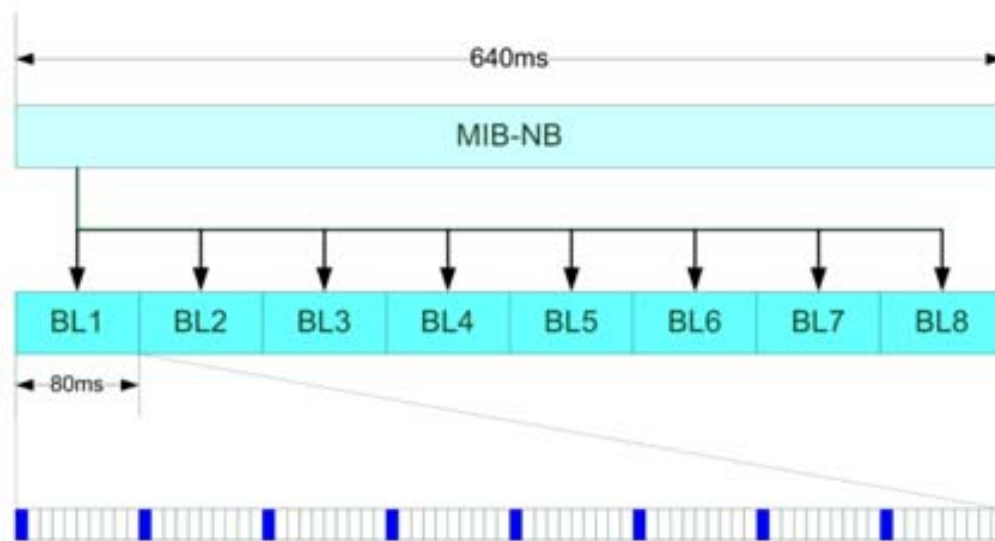
3.6.1.4 Φυσικά Κανάλια

Το κανάλι NPBCH χρησιμοποιείται για να σταλούν πληροφορίες για το εύρος της κυψέλης σε όλες τις τερματικές συσκευές. Το NPBCH χρησιμοποιείται, για παράδειγμα, για να μεταφέρει το Master Information Block (MIB ή MIB-NB) του δικτύου το οποίο περιγράφει την παρούσα διαμόρφωση δικτύου και μεταδίδεται στο υποπλαίσιο #0 σε κάθε πλαίσιο. Το MIB χρειάζεται για να εγκαταστήσει μία ενεργή σύνδεση με τον κόμβο. Περιέχει 34 bits και μεταδίδεται σε περίοδο 640ms, δηλαδή 4 RF πλαίσια που περιέχουν τις εξής πληροφορίες :

- 4 bits που δείχνουν τα πιο σημαντικά bits (MSBs) του αριθμού πλαισίου του συστήματος(SFN), τα υπόλοιπα λιγότερο σημαντικά bits (LSBs) προέρχονται έμμεσα από την έναρξη του MIB-NB
- 2 bits που υποδεικνύουν τα δύο LSB του αριθμού υπερ-πλασίου
- 4 bits για τον προγραμματισμό και το μέγεθος του SIB1-NB
- 5 bits που υποδεικνύουν την ετικέτα αξίας πληροφοριών συστήματος
- 1 bit που υποδεικνύει εάν εφαρμόζεται φραγή κατηγορίας πρόσβασης
- 7 bits που δείχνουν τον τρόπο λειτουργίας με τις συγκεκριμένες τιμές λειτουργίας

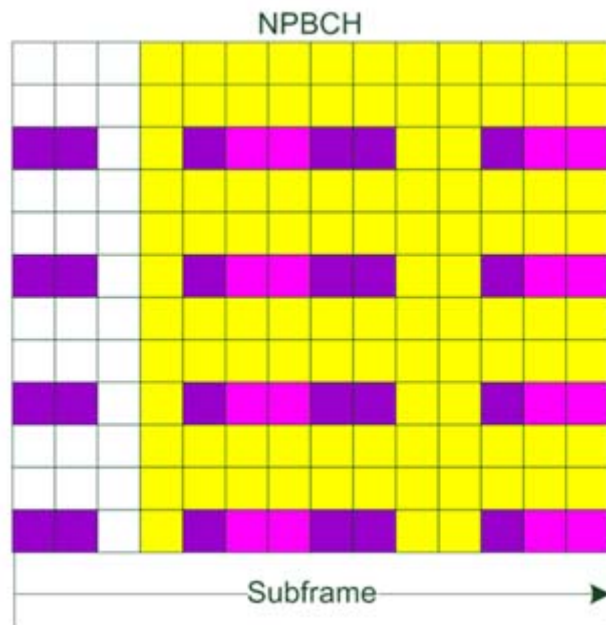
- 11 ανταλλακτικά κομμάτια για μελλοντικές επεκτάσεις

Ένα MIB παραμένει αμετάβλητο στο χρονικό διάστημα μετάδοσης των 640 ms (TTI).



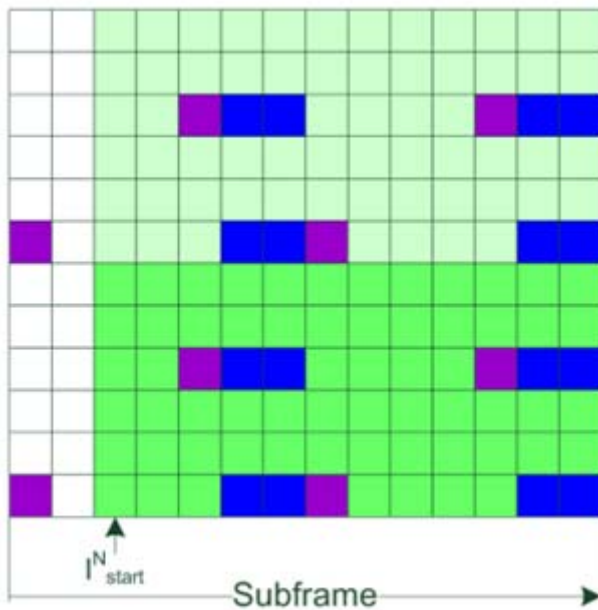
Σχήμα 2.20: Χαρτογράφηση καναλιού NPBCH στα υποπλαίσια [24]

Μετά την επεξεργασία της βασικής ζώνης φυσικού στρώματος, το MIB-NB που προκύπτει διαιρείται σε 8 υποπλαίσια. Το πρώτο μπλοκ μεταδίδεται στο πρώτο υποπλαίσιο (SF0) και επαναλαμβάνεται σε SF0 των επόμενων 7 διαδοχικών RF πλαισίων αντίστοιχα. Στο SF0 του ακόλουθου RF πλαισίου, η ίδια διαδικασία γίνεται για το BL2. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να μεταδοθεί ολόκληρο το MIB-NB. Χρησιμοποιώντας το SF0 για όλες τις μεταδόσεις, αποφεύγεται μια πιθανή σύγκρουση του NPBCH κατά την μετάδοση MBSFN σε LTE, εάν το NB-IoT αναπτύσσεται ως λειτουργία εντός ζώνης. Η δομή SF του NPBCH φαίνεται στο Σχήμα 3.21 ως λειτουργία εντός ζώνης.



Σχήμα 3.21: Η απεικόνιση των στοιχείων του NPBCH φαίνεται με κίτρινο χρώμα. Με φούξια εμφανίζονται τα NRS και με μωβ το CRS. [24]

- Το κανάλι NPDCCH χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τις τερματικές συσκευές του NB-IoT σχετικά με την κατανομή των πόρων του Καναλιού Κάτω συνδέσμου (DL-SCH) και του Καναλιού Paging (PCH). Επιπλέον, το NPDCCH διαθέτει ένα πεδίο Δείκτη Ελέγχου Κάτω Συνδέσμου(DCI), όπως και στο LTE. Το DCI περιλαμβάνει πληροφορίες τόσο για την άνω ζεύξη όσο και για την κάτω ζεύξη ως προς την κατανομή των πόρων, καθώς και περιγραφές των δεδομένων της κάτω ζεύξης που μεταδίδονται στις τερματικές συσκευές. Ο σχεδιασμός του υποπλαισίου NPDCCH απεικονίζεται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22: Στοιχεία πόρων που χρησιμοποιούνται από το NPDCCH (ελαφρύ και σκούρο πράσινο), LTE CRS (βιολετί) και NRS (μπλε). Αυτό το παράδειγμα δείχνει την χαρτογράφηση μιας λειτουργίας εντός της ζώνης, υποθέτοντας μια μόνο θύρα κεραίας στην κυψέλη LTE και δυο θύρες κεραίας στο NB-IoT. [24]

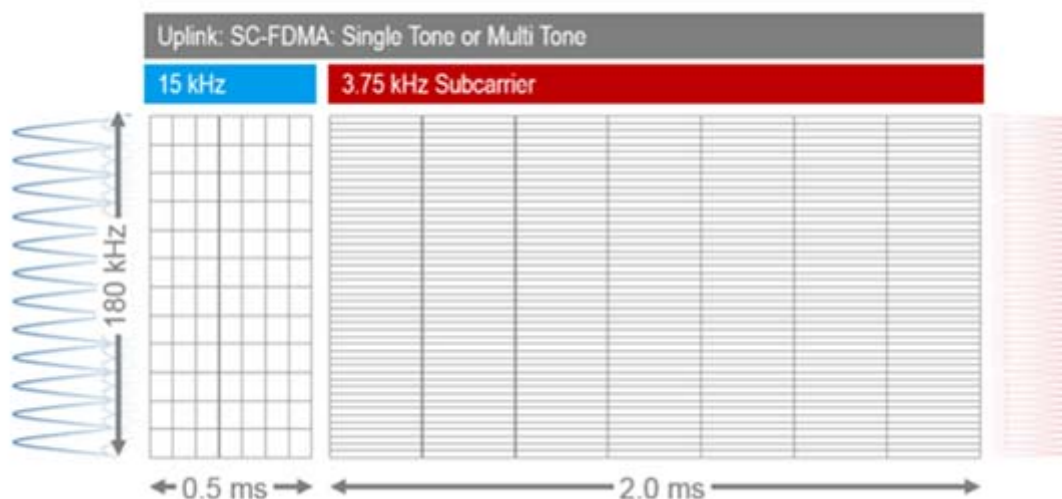
- Το NPDCCH μεταφέρει πληροφορίες προγραμματισμού τόσο για κανάλια δεδομένων κάτω ζεύξης όσο και για άνω ζεύξης. Επιπλέον μεταφέρει πληροφορίες επιβεβαίωσης (acknowledgement) HARQ για το κανάλι δεδομένων άνω ζεύξης καθώς και πληροφορίες προγραμματισμού της ένδειξης σελιδοποίησης (paging indication) και της απάντησης τυχαίας προσπέλασης (RAR). Το NPDSCH μεταφέρει δεδομένα από τα υψηλότερα επίπεδα, καθώς και το μήνυμα σελιδοποίησης, τις πληροφορίες συστήματος και το μήνυμα RAR. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.20, υπάρχουν διάφορα υποπλαίσια (subframes) που μπορούν να μοιραστούν για να μεταφέρουν NPDCCH ή NPDSCH. Για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του UE, όλα τα κανάλια κάτω ζεύξης χρησιμοποιούν τον LTE tail-biting convolutional code (TBCC). Επιπλέον, το μέγιστο μέγεθος μπλοκ μεταφοράς του NPDSCH είναι 680 bits. Σε σύγκριση, το LTE χωρίς χωρική πολυπλεξία υποστηρίζει μέγιστο TBS μεγαλύτερο από 70.000 bits [21,24,31].

3.6.2 Άνω ζεύξη (Uplink)

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει ανάλυση για την άνω ζεύξη, όπως η δομή πλαισίου(frame) και θέσεις-σχισμής(slot), τα κανάλια και τα σήματα. Στην κάτω ζεύξη χρησιμοποιείτε SC-FDMA με διαμόρφωση και υπάρχουν δυο κανάλια και ένα σήμα.

3.6.2.1 Δομή πλαισίου (frame) και θέσεις-σχισμής (slot) άνω ζεύξης

Η άνω ζεύξη του NB-IoT υποστηρίζει τόσο τις μεταδόσεις πολλαπλών τόνων (multi-tone) όσο και τις εκπομπές ενός τόνου (single-tone). Η μετάδοση πολλών τόνων βασίζεται σε SC-FDMA όπως και στο LTE, χρησιμοποιώντας υποφέρουσες (subcarriers) με εύρος 15 KHz , σχισμή-θέση (slots) 0,5 ms και υποπλαίσιο (subframe) 1 ms. Η μετάδοση ενός τόνου υποστηρίζει δύο αριθμολογίες, 15 KHz και 3,75 KHz. Η αριθμολογία 15 KHz είναι ταυτόσημη με την LTE και επιτυγχάνει έτσι την καλύτερη απόδοση συνύπαρξης με την LTE στην άνω ζεύξη. Η αριθμολογία ενός τόνου των 3,75 KHz χρησιμοποιεί σχισμή-θέση διάρκειας 2 ms. Όπως και η κάτω ζεύξη, ένας φορέας NB-IoT άνω ζεύξης χρησιμοποιεί ένα συνολικό εύρος ζώνης συστήματος 180 KHz. [21,25]



Σχήμα 3.23: SC-FDMA άνω ζεύξης για το NB-IoT

3.6.2.2 Κανάλια και σήματα άνω ζεύξης

Το δίκτυο NB-IoT παρέχει τα εξής φυσικά κανάλια στην άνω ζεύξη (uplink):

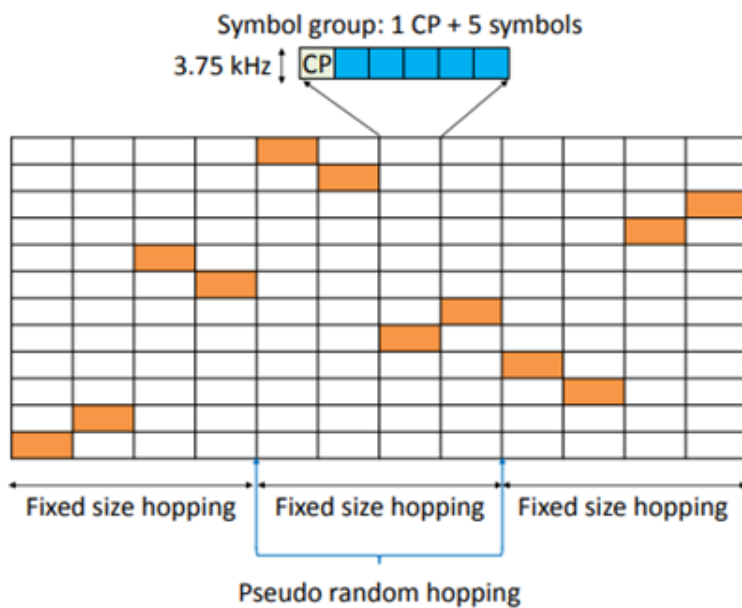
- Φυσικό κανάλι τυχαίας προσπέλασης στενής ζώνης - Narrowband Physical Random Access Channel (NPRACH)
- Φυσικό κοινόχρηστο κανάλι uplink στενής ζώνης - Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH)

Και το σήμα :

- Σήμα αναφοράς αποδιαμόρφωσης - Demodulation Reference Signal (DMRS)

Για να επιτευχθεί σύνδεση μιας τερματικής συσκευής με το eNodeB, η τερματική συσκευή χρησιμοποιεί το κανάλι NPRACH. Το UE μεταδίδει το NPRACH σήμα αφού επιτύχει συγχρονισμό του σήματος της κυψέλης και λάβει την πληροφορία ρύθμισης του κελιού. Είναι ένα νέο κανάλι, δεδομένου ότι το παλαιότερο LTE φυσικό κανάλι τυχαίας προσπέλασης (PRACH) χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 1,08 MHz, μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης άνω ζεύξης του NB-IoT. Ένα NPRACH κανάλι αποτελείται από 4 ομάδες συμβόλων, με κάθε ομάδα συμβόλων να περιλαμβάνει ένα CP και 5 σύμβολα. Το μήκος CP είναι 66,67 μs (Μορφή 0) για ακτίνα κυψέλης έως 10 km και 266,7 μs (Μορφή 1) για ακτίνα κυψέλης έως 40 km. Κάθε σύμβολο, με σταθερή τιμή συμβόλων 1, διαμορφώνεται σε τόνο 3,75 KHz με διάρκεια συμβόλων 266,67 μs.

Ωστόσο, ο δείκτης συχνότητας τόνου αλλάζει από μια ομάδα συμβόλων σε μια άλλη. Η κυματομορφή του NPRACH αναφέρεται ως αναπήδηση (hopping) συχνότητας σε ένα τόνο. Για να υποστηρίξει την επέκταση κάλυψης, ένα NPRACH μπορεί να επαναληφθεί έως και 128 φορές χρησιμοποιώντας την ίδια ισχύ εκπομπής σε κάθε επανάληψη.



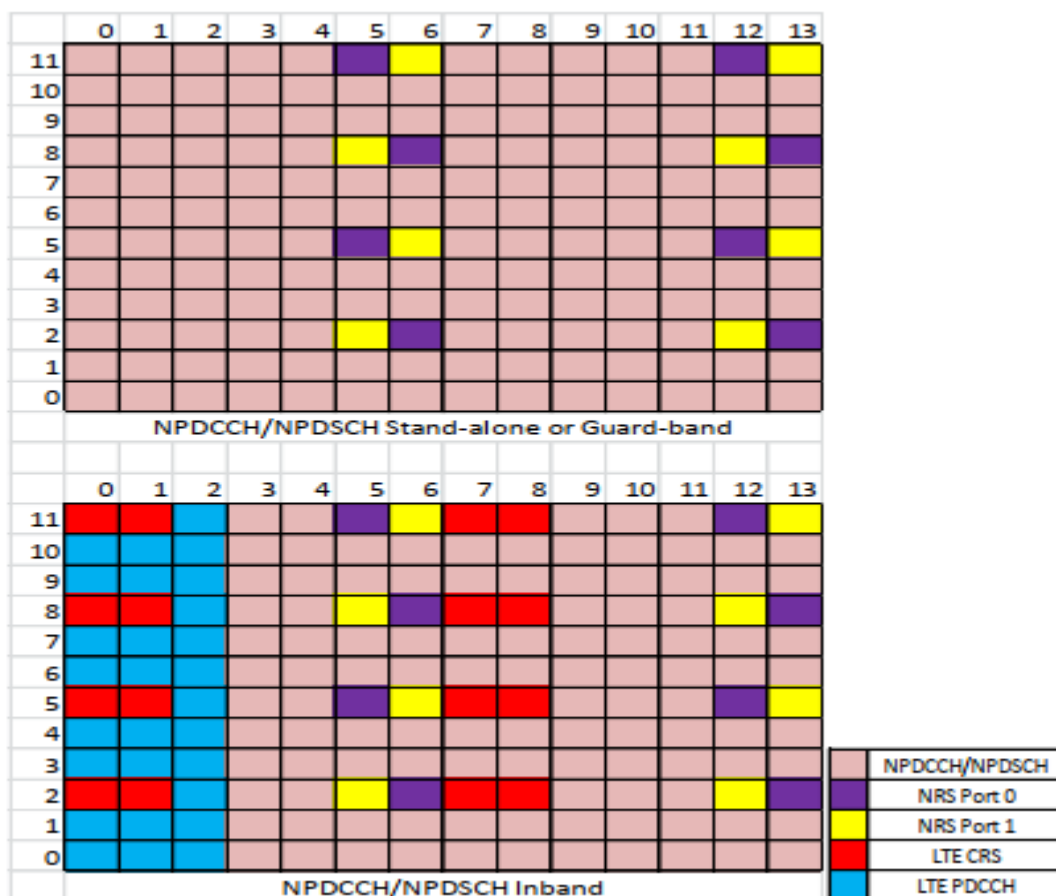
Σχήμα 3.24: Σχεδιασμός καναλιού φυσικής τυχαίας προσπέλασης για το NB-IoT

- Το κανάλι NPUSCH έχει δύο μορφές. Η μορφή 1 χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων άνω ζεύξης και χρησιμοποιεί τον ίδιο LTE turbo κώδικα για τη διόρθωση σφαλμάτων. Το μέγιστο μέγεθος μπλοκ μεταφορών της μορφής 1 NPUSCH είναι 1000 bits, το οποίο είναι πολύ χαμηλότερο από αυτό του LTE. Η Μορφή 2 χρησιμοποιείται για τη σηματοδότηση της αναγνώρισης λήψης (acknowledgment) HARQ για το NPDSCH και χρησιμοποιεί έναν κώδικα επανάληψης για τη διόρθωση σφαλμάτων. Η μορφή 1 NPUSCH υποστηρίζει τη μετάδοση πολλών τόνων με βάση την παλαιά LTE αριθμολογία. Σε αυτή την περίπτωση, το UE μπορεί να διατεθεί 12, 6 ή 3 τόνους. Ενώ μόνο η μορφή 12 τόνων υποστηρίζεται από παλαιότερα LTE UE, οι 6-τόνες και 3-τόνες μορφές εισάγονται για NB-IoT UE's οι οποίες λόγω του περιορισμού της κάλυψης δεν μπορούν να επωφεληθούν από την υψηλότερη κατανομή εύρους ζώνης UE. Επιπλέον, το NPUSCH υποστηρίζει τη μετάδοση ενός τόνου βασισμένη σε αριθμολογία 15 kHz ή 3,75 kHz. Για τη μείωση του λόγου της μέγιστης προς την μέση ισχύ (peak-to-average power ratio - PAPR), η μετάδοση ενός τόνου χρησιμοποιεί $\pi/2$ -BPSK ή $\pi/4$ -QPSK με τη συνεχή φάση μεταξύ συμβόλων.

Η μορφή 1 NPUSCH χρησιμοποιεί την ίδια κατασκευή σχισμής-θέσης (slot) με το LTE PUSCH με 7 σύμβολα OFDM ανά slot και το μεσαίο σύμβολο ως το σύμβολο αναφοράς αποδιαμόρφωσης (DMRS). Η μορφή 2 NPUSCH έχει επίσης 7 σύμβολα OFDM ανά υποδοχή, αλλά χρησιμοποιεί τα μεσαία τρία σύμβολα ως DMRS. Τα σήματα DMRS χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση καναλιών. [21,31]

3.6.3 Απεικόνιση Πόρων

Στα σήματα LTE διατηρείτε η ορθογωνικότητα των σημάτων , αποφεύγοντας την χαρτογράφηση των σημάτων NB-IoT στα στοιχεία πόρων που ήδη χρησιμοποιούν τα παλαιότερα σήματα LTE. Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στο σχήμα 2.25, στο οποίο κάθε στήλη υποδεικνύει στοιχεία πόρων σε ένα σύμβολο OFDM. Υπάρχουν 12 στοιχεία πόρων ανά σύμβολο OFDM που αντιστοιχούν σε 12 υποφορείς (subcarriers). Όπως φαίνεται, για την ανάπτυξη ανεξάρτητων και προστατευτικών ζωνών δεν χρειάζεται να προστατεύεται κανένας πόρος LTE, επομένως NPDCCH, NPDSCH ή NRS μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλα τα στοιχεία πόρων σε ένα ζεύγος PRB (που ορίζεται ως 12 subcarriers σε ένα υποπλαίσιο). Ωστόσο, για την ανάπτυξη εντός ζώνης, τα NPDCCH, NPDSCH ή NRS δεν μπορούν να αντιστοιχιστούν στα στοιχεία πόρων που λαμβάνονται από τα σύμβολα αναφοράς LTE Cell-Specific Reference (CRS) και το LTE Physical downlink Channel Control (PDCCH).



Σχήμα 3.25: Απεικόνιση πόρων NPDCCH/NPDSCH για λειτουργία inband [21]

Το NB-IoT έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει στην τερματική συσκευή να μάθει τον τρόπο ανάπτυξης (stand-alone, in-band ή guard band) καθώς και την ταυτότητα των κυψελών (και NB-IoT και LTE) μέσω του αρχικού εντοπισμού. Στη συνέχεια η τερματική συσκευή μπορεί να υπολογίσει ποια στοιχεία πόρων χρησιμοποιούνται από το LTE. Με αυτές τις πληροφορίες η τερματική συσκευή μπορεί να χαρτογραφήσει τα σύμβολα NPDCCH και NPDSCH στα διαθέσιμα στοιχεία πόρων. Από την άλλη πλευρά, τα NPSS, NSSS και NPBCH χρησιμοποιούνται για τον αρχικό συγχρονισμό και την απόκτηση βασικών πληροφοριών συστήματος. Αυτά τα σήματα πρέπει να ανιχνευθούν χωρίς να γνωρίζουν τη λειτουργία ανάπτυξης. Για να διευκολυνθεί αυτό, τα NPSS, NSSS και NPBCH αποφεύγουν τα πρώτα τρία σύμβολα OFDM σε κάθε υποπλάσιο, καθώς αυτά τα στοιχεία πόρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το LTE PDCCH. Επιπλέον, τα σήματα NPSS και NSSS που αλληλεπικαλύπτονται με τα στοιχεία πόρων που λαμβάνονται από το LTE CRS καταλαμβάνονται στο σταθμό βάσης. Αν και το UE δεν γνωρίζει ποια στοιχεία πόρων είναι κατελημμένα το NPSS και το NSSS μπορούν ακόμα να ανιχνευθούν μέσω της συσχέτισης του λαμβανόμενου κατελημμένου σήματος NPSS και NSSS με το μη κατελημμένο σήμα, καθώς το ποσοστό των κατελημμένο στοιχείων πόρων είναι σχετικά μικρό. Το NPBCH αντιστοιχεί στην ισοτιμία γύρω από το LTE CRS. Αυτό όμως απαιτεί από το UE να υπολογίσει τη θέση των στοιχείων πόρων CRS, η οποία εξαρτάται από την ταυτότητα φυσικών κυψελών LTE (PCID). Η τερματική συσκευή μαθαίνει την ταυτότητα κυψελών (NB-PCID) από το NSSS. Η σχέση των τιμών των PCID και NBPCID που χρησιμοποιούνται από την ίδια κυψέλη είναι τέτοια ώστε το UE να μπορεί να χρησιμοποιήσει NBPCID για να καθορίσει τις θέσεις LTE CRS. [21]

3.6.4 Έλεγχος Ισχύος

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει ανάλυση για τον έλεγχο ισχύος τόσο για την κάτω ζεύξη όσο και για την άνω ζεύξη.

3.6.4.1 Άνω Ζεύξη (Uplink)

Στην άνω ζεύξη η εκπεμπόμενη ισχύς εξαρτάται από ένα συνδυασμό παραμέτρων συγκεκριμένων κυψελών, τις επιλεγμένες παραμέτρους RU και UE. Για την περίπτωση που υπάρχουν 2 μέγιστες επαναλήψεις, η ισχύς στην υποδοχή i δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$P_{NPUSCH,C}(i) = \min \left(P_{C_{MAX},C}(i), 10 * \log(M_{NPUSCH,C}(i)) + P_{O_{NPUSCH,C}}(j) + a_c(j) * PL_c \right)$$

Εάν υπάρχουν περισσότερες από δύο επαναλήψεις, η ισχύς μετάδοσης γενικά δίνεται από το $P_{CMAX, c}(i), c$

- Το $P_{CMAX, c}(i)$ είναι η κυριότερη μέγιστη ισχύς μετάδοσης στην υποδοχή i . Με την παραπάνω σχέση, η μεταδιδόμενη ισχύς δεν μπορεί ποτέ να υπερβεί αυτό το όριο.
- Το $M_{NPUSCH, c}$ εξαρτάται στο εύρος ζώνης της επιλεγμένης RU και της απόστασης του subcarrier.
- Το $P_{O_NPUSCH, c}$ ένας συνδυασμός διαφορετικών παραμέτρων που σηματοδοτεί η RRC, η οποία εξαρτάται από το εάν το μπλοκ μεταφοράς είναι για δεδομένα UL-SCH ($j = 1$) ή για το μήνυμα RACH ($j = 2$).
- Το PLc είναι η απώλεια διάδοσης που εκτιμάται από το UE. Ο παράγοντας αυτός σταθμίζεται με το $a_c(j)$ το οποίο για τη μορφή NPUSCH 1 παρέχεται από την RRC, διαφορετικά εφαρμόζεται η σταθερή τιμή του 1.

3.6.4.2 Κάτω Ζεύξη (Downlink)

Η ισχύς μετάδοσης της κάτω ζεύξης αναφέρεται στην ισχύ μετάδοσης NRS. Η τιμή του υποδεικνύεται στο UE για να εκτιμηθεί η απώλεια διάδοσης. Είναι συνεχής για όλα τα στοιχεία πόρων που μεταφέρουν το NRS και όλα τα SF. Για τα NPBCH, NPDCCH και NPDSCH η ισχύς μετάδοσης εξαρτάται από τον σχεδιασμό μετάδοσης. Εάν εφαρμοστεί μόνο μία θύρα κεραίας, η ισχύς είναι ίδια με αυτή για το NRS, διαφορετικά μειώνεται κατά 3dB. Μια ειδική περίπτωση συμβαίνει όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία εντός ζώνης και η ίδια τιμή PCI είναι οριστεί σε αληθές (true). Στη συνέχεια, το eNB μπορεί επίσης να σηματοδοτήσει την αναλογία της ισχύος NRS στο CRS, επιτρέποντας στο UE να χρησιμοποιεί επίσης το CRS για την εκτίμηση καναλιών.

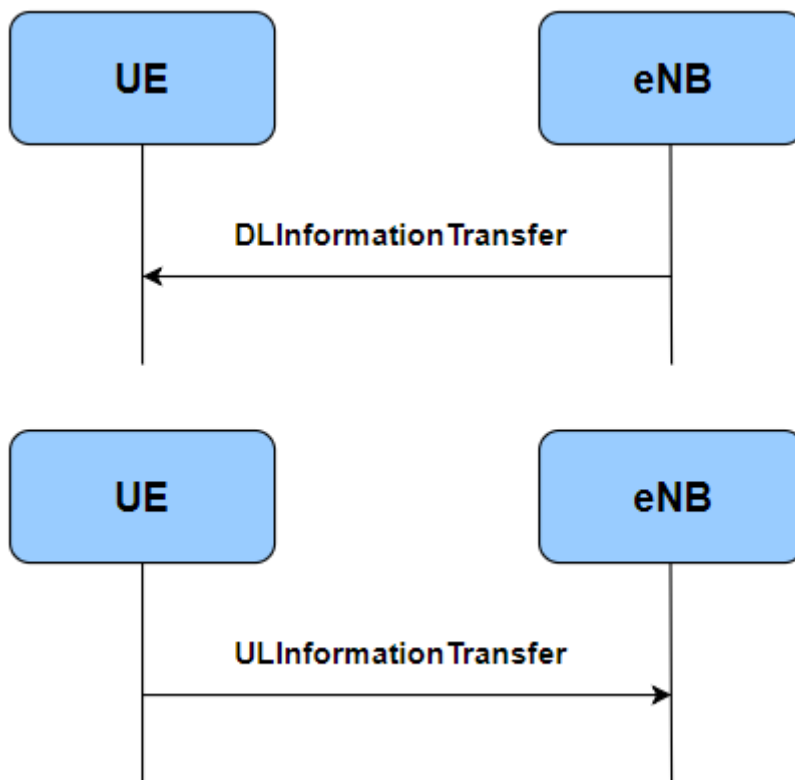
[24]

3.7 Μεταφορά Δεδομένων

Σε αυτή την ενότητα θα ασχοληθούμε με την μεταφορά δεδομένων. Θα γίνει αναφορά στην βελτιστοποίηση του CIoT EPS τόσο στο επίπεδο ελέγχου όσο και στο επίπεδο χρήστη, στην εγκατάσταση και διαμόρφωση σύνδεσης δεδομένων, στην διαμόρφωση πολλαπλών φορέων, στην λήψη του καναλιού ελέγχου και στην συνέχεια την μετάδοση του καναλιού δεδομένων στο uplink και την λήψη του καναλιού δεδομένων στο downlink.

3.7.1 Βελτιστοποίηση του CIoT EPS στο επίπεδο ελέγχου

Για τη βελτιστοποίηση του CIoT EPS στο επίπεδο Ελέγχου, η μεταφορά δεδομένων μεταξύ του UE και του eNB γίνεται σε επίπεδο RRC. Στην κάτω ζεύξη τα πακέτα δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μήνυμα RRCConnectionSetup ή στην άνω ζεύξη στο μήνυμα RRCConnectionSetupComplete. Εάν αυτό δεν είναι αρκετό, η μεταφορά δεδομένων μπορεί να συνεχιστεί χρησιμοποιώντας τα δύο μηνύματα DLInformationTransfer και ULInformationTransfer όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.26



Σχήμα 3.26: Μεταφορά δεδομένων στην κάτω και άνω ζεύξη

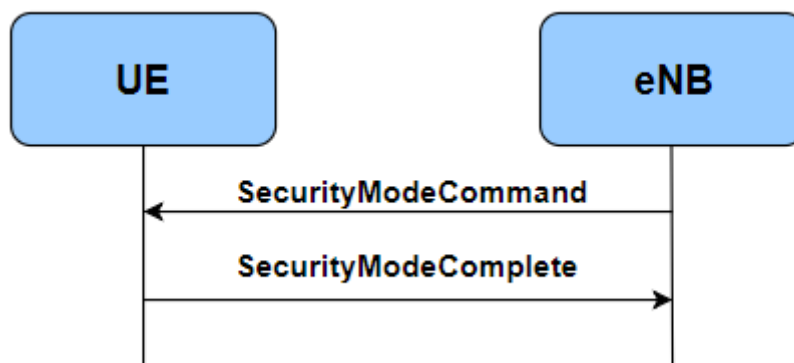
Στα συγκεκριμένα μηνύματα περιλαμβάνεται μια ακολουθία byte που περιλαμβάνει πληροφορίες NAS, και στην συγκεκριμένη περίπτωση πληροφορίες για πακέτα δεδομένων NB-IoT. Αυτή η διαδικασία καθιστά ξεκάθαρο για το eNB και το UE στο επίπεδο RRC να προωθήσει το περιεχόμενο του ληφθέν DLInformationTransfer στο ανώτερο στρώμα. Μεταξύ του eNB και του MME, το dedicatedInfoNAS ανταλλάσσεται μέσω της διασύνδεσης S1-MME.

2.7.2 Βελτιστοποίηση του CIoT EPS στο επίπεδο χρήστη

Για τη βελτιστοποίηση του CIoT EPS στο επίπεδο χρήστη, η μεταφορά δεδομένων πραγματοποιείται όπως και στο δίκτυο LTE. Το eNB προωθεί τα δεδομένα στην πύλη S-GW ή τα λαμβάνει από τον κόμβο. Προκειμένου να διατηρηθεί χαμηλή η πολυπλοκότητα του UE, μόνο ένα ή δύο DRB μπορούν να ρυθμιστούν ταυτόχρονα.

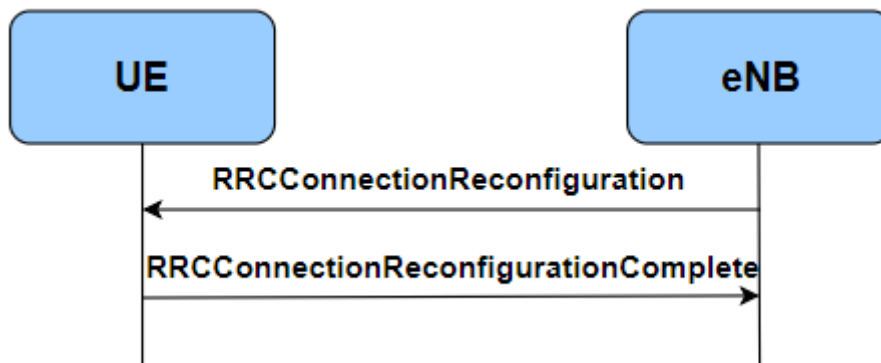
3.7.2.1 Εγκατάσταση και διαμόρφωση σύνδεσης δεδομένων

Μετά την εγκατάσταση της σύνδεσης RRC ακολουθεί η καθιέρωση της ασφάλειας επιπέδου. Αυτό γίνεται μέσω της διαδικασίας αρχικής ενεργοποίησης ασφαλείας.



Σχήμα 3.27: Ενεργοποίηση ασφαλείας

Στο μήνυμα SecurityModeCommand το eNB παρέχει στο UE τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης που πρέπει να εφαρμοστεί στο SRB1 και το DRB και ο αλγόριθμος προστασίας της ακεραιότητας για την προστασία του SRB1. Όλοι οι αλγόριθμοι που ορίζονται για το LTE περιλαμβάνονται επίσης στο NB-IoT. Με αυτό το μήνυμα, το SRB1bis αλλάζει αυτόματα στο SRB1, το οποίο χρησιμοποιείται για τα ακόλουθα μηνύματα ελέγχου. Μετά την ενεργοποίηση της ασφαλείας, τα DRBs ρυθμίζονται χρησιμοποιώντας τη διαδικασία επανασύνδεσης σύνδεσης RRC όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.28

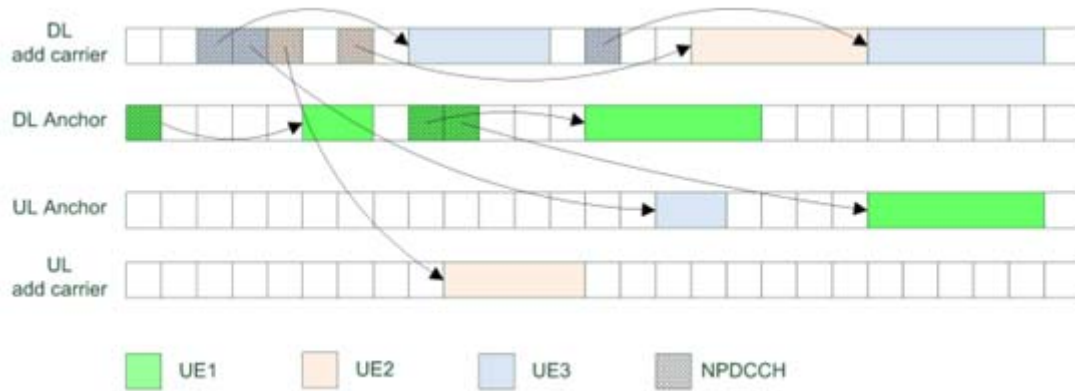


Σχήμα 3.28: Επανασύνδεση σύνδεσης RRC

Στο reconfiguration μήνυμα, το eNB παρέχει στο UE τον RF φορέα (radio bearer), συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης του RLC και των λογικών καναλιών. Το UE απαντάει με ένα μήνυμα που περιλαμβάνει μια προτεραιότητα η οποία χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση της μετάδοσης δεδομένων σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Το PDCP έχει ρυθμιστεί μόνο για DRB, επειδή το SRB χρησιμοποιεί μόνο τις προεπιλεγμένες τιμές. Για τις ρυθμίσεις στο επίπεδο MAC, περιλαμβάνονται ρυθμίσεις για την αναφορά κατάστασης buffer (BSR), το αίτημα προγραμματισμού (SR), την ευθυγράμμιση χρόνου και το DRX. Οι ρυθμίσεις για το φυσικό στρώμα εξασφαλίζουν τις απαραίτητες παραμέτρους για τη χαρτογράφηση των δεδομένων στα slots και τις συχνότητες, [24]

3.7.2.2 Διαμόρφωση πολλαπλών φορέων (Multi Carrier Configuration)

Το RRCConnectionReconfiguration μπορεί να περιέχει τις ρυθμίσεις για έναν πρόσθετο φορέα στην άνω και κάτω ζεύξη, τον μη αγκυροβολημένο φορέα (non-anchor). Όταν ένας φορέας non-anchor παρέχεται στο DL, το UE λαμβάνει όλα τα δεδομένα που αφορούν την συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτό αποκλείει τον συγχρονισμό, τις πληροφορίες broadcast και paging, οι οποίες λαμβάνονται μόνο στον φορέα αγκύρωσης. Μπορεί να παρέχεται bitmap που υποδεικνύει τα επιτρεπόμενα DL SF. Ο non-anchor μπορεί να περιέχει σημαντικά περισσότερα SF για δεδομένα, δεδομένου ότι δεν απαιτεί συγχρονισμό και πληροφορίες broadcast. Μόλις ρυθμιστεί ο non-anchor φορέας, το UE ακούει μόνο αυτό σε αυτή την κατάσταση, ενώ βρίσκεται στην κατάσταση RRC CONNECTED. Συνεπώς, το UE απαιτεί μόνο μία αλυσίδα δέκτη. Το ίδιο ισχύει και στην άνω ζεύξη. Εάν έχει ρυθμιστεί ένας επιπλέον φορέας UL, το UE παίρνει μόνο αυτόν για τη μετάδοση δεδομένων, δεν υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση σε αυτόν τον φορέα και τον φορέα αγκύρωσης. Για τα DL και UL, το UE επιστρέφει στον φορέα αγκύρωσης όταν απελευθερώνεται στην κατάσταση RRC_IDLE.



Σχήμα 3.29: Παράδειγμα προγραμματισμού για 3 UE's. Κάθε τετράγωνο υποδηλώνει ένα υποπλαίσιο [24]

Το UE1 διαμορφώνεται με τον φορέα αγκύρωσης, το UE2 με άλλο φορέα σε DL και UL και UE3 με διαφορετικό φορέα μόνο σε DL. Για λόγους απλούστευσης, αυτό το διάγραμμα ούτε λαμβάνει υπόψη την περίοδο NPDCCH που εξηγείται στην επόμενη ενότητα ούτε τα SF που δεν επιτρέπονται για δεδομένα DL. Αυτός ο περιορισμός είναι μόνο για εκείνους τους φορείς που μεταδίδουν τα NPSS, NSSS και NPBCH, δηλ. Τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορέας αγκύρωσης. Για μια παρεχόμενη συχνότητα DL, επιτρέπονται όλοι οι μεταφορείς. Αυτή η δομή επιτρέπει την ανάπτυξη ενός ευρυζωνικού δικτύου NB-IoT, αν και κάθε UE έχει μόνο μία αλυσίδα πομπού / δέκτη με διαθέσιμο ένα στενό εύρος ζώνης.

Η επιβάρυνση του συγχρονισμού, που μεταδίδεται σε DL, και οι πόροι NPRACH στο UL μπορεί να περιορίζονται σε ένα ή σε ένα ζεύγος προβολής φορέα, ενώ τα άλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήρως για τη μετάδοση δεδομένων. Δεδομένου ότι η λήψη και η μετάδοση δεν πραγματοποιούνται ποτέ ταυτόχρονα και περιορίζονται πάντοτε σε μία ζώνη, αντίστοιχα, αρκεί το UE να διαθέτει μόνο μία αλυσίδα πομπού / δέκτη με εύρος ζώνης 180 kHz. [24]

3.7.2.3 Λήψη του καναλιού ελέγχου

Στην κατάσταση σύνδεσης RRC, το UE παρακολουθεί μόνο τον συγκεκριμένο χώρο αναζήτησης UE (USS) «για να λάβει τις επιχορηγήσεις UL και τις αναθέσεις DL.» Το μήνυμα επανασύνδεσης περιέχει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, ο οποίος κυμαίνεται από 1 έως 2048 σε δυνάμεις του 2. Ωστόσο, ο πραγματικός αριθμός επαναλήψεων μπορεί να είναι μικρότερος, όπως υποδεικνύεται στον Πίνακα 3.5

Max nr. of repetitions R_{\max}	Actual nr. of repetitions
1	1
2	1, 2
4	1, 2, 4
≥ 8	R max/8, $R_{\max}/4$, $R_{\max}/2$, R_{\max}

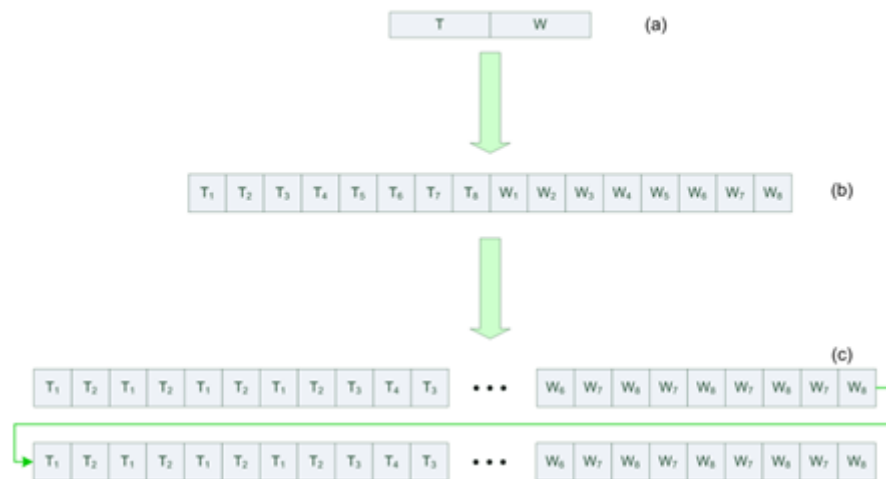
Πίνακας 3.5: Αριθμός Επαναλήψεων

Για την περίπτωση που ο πραγματικός αριθμός επαναλήψεων είναι μικρότερος από τον μέγιστο αριθμό, τα υπόλοιπα SFs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να στείλουν διαφορετικό NPDCCH σε άλλο UE. Για παράδειγμα, εάν ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων είναι 4, τότε όλα τα SFs μπορεί να περιέχουν το DCI ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα UE ή δύο SF για κάθε ένα από τα δύο UE ή κάθε SF για διαφορετικό UE, αντίστοιχα. Φυσικά, ο UE πρέπει να παρακολουθεί όλους αυτούς τους υποψηφίους.

3.7.2.4 Μετάδοση του καναλιού δεδομένων στο uplink

Η μορφή DCI N0 υποδεικνύει επιχορήγηση UL για μετάδοση στο NPUSCH, συμπεριλαμβανομένων όλων των σχετικών παραμέτρων. Ένα μπλοκ μεταφοράς μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές. Η διάταξη των επαναλήψεων εξαρτάται από τον αριθμό των μεταφορέων για ένα RU, την απόσταση μεταξύ του φορέα και τον αριθμό των επαναλήψεων. Αυτό πρέπει πρώτα να υλοποιηθεί με ένα παράδειγμα που φαίνεται στο Σχήμα 3.30

Βελτιστοποίηση του Clot EPS στο επίπεδο χρήστη



Σχήμα 3.30: Παράδειγμα σύνθεσης για μετάδοση NPUSCH με επαναλήψεις. Για την περίπτωση που δεν υπάρχουν επαναλήψεις, θα εμφανιστεί η ακολουθία των θυρίδων στο (b) που θα μεταδοθούν. [24]

Για την περίπτωση της απόστασης φορέα 15 kHz, μεταδίδεται ένα μπλοκ μεταφοράς που ονομάζεται λέξη δοκιμής (TW) σε δύο RUs (a), όπου κάθε RU έχει τη μορφή 3 υποφερέων (subcarriers) σε 8 υποδοχές (slots) (b). Ένας συνολικός αριθμός 8 επαναλήψεων εφαρμόζεται. Στο Σχήμα 2.30 όπου T_n υποδηλώνει την n-οστή θυρίδα της πρώτης RU, W_m η m-οστή θυρίδα της δεύτερης RU.

Σε ένα πρώτο βήμα, οι δύο σχισμές T₁ και T₂ μεταδίδονται. Αυτό το ζεύγος επαναλαμβάνεται τρεις φορές, έτσι ώστε να υπάρχουν 4 μεταδόσεις αυτών των υποδοχών. Στη συνέχεια, η ίδια διαδικασία γίνεται με τις επόμενες δύο υποδοχές. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου οι υποδοχές W₇ και W₈ μεταδίδονται με ζεύγη τέσσερις φορές. Τέλος, καθώς τώρα υπάρχουν 4 επαναλήψεις του TW, η αλληλουχία μετάδοσης επαναλαμβάνεται και πάλι, φτάνοντας έτσι στις 8 επαναλήψεις.

Στη γενική περίπτωση, η πρώτη επανάληψη δύο σχισμών γίνεται πάντοτε για απόσταση υποφέρουσας 15 KHz. Από την απόσταση υποφέρουσας 3,75 KHz γίνεται για κάθε θυρίδα χωριστά. Ο συνολικός αριθμός των πρώτων επαναλήψεων είναι το ήμισυ του αριθμού των συνολικών επαναλήψεων με ανώτατο όριο τεσσάρων, εάν η RU έχει περισσότερους από έναν υποφορείς ή ένα εάν η RU έχει μόνο έναν υποφορέα. Στο παραπάνω παράδειγμα αυτό θα σήμαινε ότι αν υπήρχαν 32 επαναλήψεις, η δημιουργία ακολουθίας θα ήταν όπως στο Σχήμα 3.30 (c), ωστόσο η συνολική ακολουθία θα επαναληφθεί 7 επιπλέον φορές.

Συνήθως, η ακολουθία χαρτογραφείται σε ένα συνεχές σύνολο υποδοχών. Υπάρχει εξαίρεση σε μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων. Πιο συγκεκριμένα, μετά από μετάδοση 256 ms, δημιουργείται κενό 40 ms προτού συνεχίσει η μετάδοση NPUSCH. Αυτό το κενό είναι απαραίτητο, επειδή όταν το UE μεταδίδει στο NPUSCH, δεν μπορεί ταυτόχρονα να λάβει το κανάλι DL και μπορεί έτσι να χάσει τον συγχρονισμό με το eNB. Κατά τη διάρκεια αυτού του κενού, ο συγχρονισμός διορθώνεται ξανά.

3.7.2.5 Λήψη του καναλιού δεδομένων downlink

Η μορφή DC1 N1 υποδεικνύει μια εκχώρηση DL που περιγράφει πού και πώς μεταδίδονται τα σύμβολα δεδομένων στο NPDSCH. Η αρχή είναι ουσιαστικά η ίδια όπως για την UL, ωστόσο τα πακέτα δεδομένων δεν ομαδοποιούνται πρώτα σε RUs. Εάν δεν υπάρχουν επαναλήψεις, τα πακέτα δεδομένων χαρτογραφούνται διαδοχικά σε υποδοχές και αποστέλλονται σε NPDSCH SFs.

Για την περίπτωση που υπάρχουν επαναλήψεις, η αντιστοίχιση είναι παρόμοια με αυτή του πολυτονικού UL. Τα δεδομένα για δύο υποδοχές χαρτογραφούνται πρώτα σε ένα SF, το οποίο επαναλαμβάνεται τώρα με τον συνολικό αριθμό επαναλήψεων, και πάλι με ανώτατο όριο τεσσάρων. Στη συνέχεια, η χαρτογράφηση συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο μέχρις ότου μεταδοθούν όλα τα SF. Τελικά ολόκληρη αυτή η δομή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων. Υπάρχει μια εξαίρεση, όταν τα δεδομένα DL περιέχουν πληροφορίες SIB-NB. Σε αυτή την περίπτωση, οι σχισμές μεταδίδονται διαδοχικά όπως στο παράδειγμα του Σχήματος 3.30(b), και στη συνέχεια ολόκληρο αυτό το μπλοκ επαναλαμβάνεται ο κατάλληλος αριθμός φορές.

Τα κενά μετάδοσης μπορεί να ρυθμιστούν από το RRC για μεταδόσεις NPDSCH με μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Το μήνυμα RRCConnectionReconfiguration μπορεί να παράσχει πληροφορίες σχετικά με το πόσο μεγάλο είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, προκειμένου να ενεργοποιηθούν αυτά τα κενά, η περιοδικότητα και το μήκος των εμφανίσεών τους. Όταν εμφανιστεί το κενό, η μετάδοση NPDSCH αναβάλλεται για την επόμενη διαθέσιμη SF μετά το κενό. Αυτά τα κενά δεν ισχύουν για τα NPDSCH που φέρουν πληροφορίες MIB-NB ή SIB-NB. [21,23,24]

3.8 3GPP LTE Έκδοση 14 για NB-IoT

Για την περαιτέρω βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών καθώς και για την καλύτερη χρήση περιπτώσεων, εισάγονται διάφορες βελτιώσεις και νέες λειτουργίες για το NB-IoT στην 3GPP LTE έκδοση 14 NB-IoT όπως αναφέρονται στην συνέχεια.

3.8.1 Τοποθέτηση (positioning)

Πολλές περιπτώσεις χρήσης IoT θα απαιτήσουν ή θα επωφεληθούν από τις πληροφορίες θέσης, καθιστώντας τη θέση ζωτική σημασία για το IoT.

Παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης περιλαμβάνουν έξυπνα ποδήλατα, παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και παρακολούθηση περιβάλλοντος. Η έκδοση 13 του NB-IoT υποστηρίζει μόνο βασικές λειτουργίες εντοπισμού θέσης μέσω της ταυτότητας κυψέλης (CID), η οποία χρησιμοποιεί πληροφορίες CID για να συσχετίσει τη συσκευή με την περιοχή που καλύπτεται από την κυψέλη εξυπηρέτησης. Προηγμένες τεχνικές τοποθέτησης εισάγονται στην έκδοση 14.

Οι προσπάθειες τυποποίησης της έκδοσης 14 είναι:

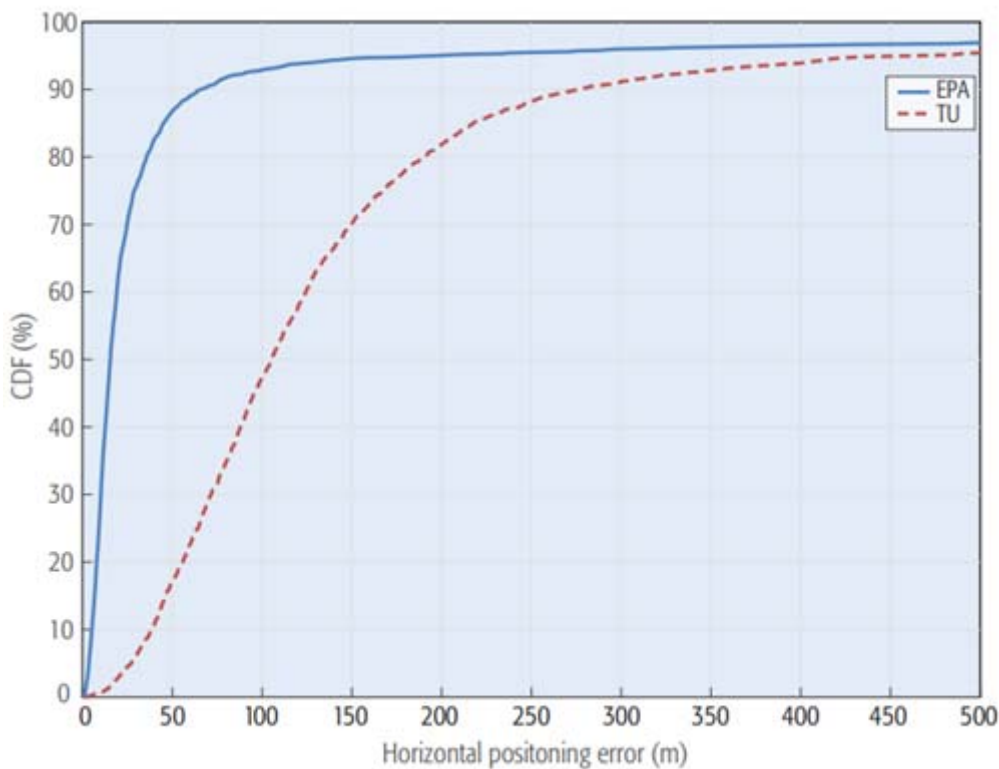
- Ανάπτυξη υποστήριξης για το χαρακτηριστικό της εξεταζόμενης χρονικής διαφοράς άφιξης (OTDOA) για NB-IoT
- Πλήρεις απαιτήσεις μέτρησης UE για βελτιωμένη CID

Οι απαιτήσεις μέτρησης του ενισχυμένου CID περιλαμβάνουν την εξελιγμένη χρονική διαφορά του κόμβου B (eNB) Rx-Tx χρονική διαφορά και την λαμβανόμενη ισχύ σήματος αναφοράς (RSRP) καθώς και την ποιότητα λαμβανόμενου σήματος αναφοράς (RSRQ).

Η OTDOA είναι μια μέθοδος εντοπισμού και χρησιμοποιείται από την κάτω ζεύξη, όπου μια συσκευή μετρά τις ώρες άφιξης (TOAs) των σημάτων αναφοράς θέσης (PRSs) που λαμβάνονται από πολλαπλούς κόμβους μετάδοσης σε σχέση με τη μετάδοση PRS ενός κόμβου αναφοράς για τον σχηματισμό των μετρήσεων της χρονικής διαφοράς σήματος αναφοράς (RSTD). Κάθε μέτρηση RSTD μπορεί να μεταφράζεται σε μια γεωγραφική υπερβολή στην οποία μπορεί να

θεωρηθεί ότι βρίσκεται η τοποθετημένη UE. Με την εξέταση πολλαπλών μετρήσεων RSTD, η θέση της UE μπορεί να εκτιμηθεί ότι βρίσκεται στο σημείο διασταύρωσης των αντίστοιχων υπερβολών.

Ένα νέο σήμα αναφοράς σχεδιάστηκε για το OTDOA στο NB-IoT, που αναφέρεται ως σήμα αναφοράς στενής ζώνης (NPRS), το οποίο έχει κοινά με το LTE PRS, όπως η επαναχρησιμοποίηση του ορισμού κυματομορφής PRS και βασικών παραμέτρων διαμόρφωσης. Στο Σχήμα 3.31 φαίνεται η απόδοση τοποθέτησης OTDOA για μια συσκευή με υψηλή ακρίβεια χρονισμού και δύο τύπους συνθηκών διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων: τυπικός αστικός (TU) και εκτεταμένο μοντέλο πεζών τύπου A (EPA).



Σχήμα 3.31: Ακρίβεια τοποθέτησης OTDOA NB-IoT [34]

Η μεγάλη καθυστέρηση εξάπλωσης του καναλιού TU καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη του TOA, γεγονός που οδηγεί σε υποβαθμισμένη απόδοση σε σύγκριση με το κανάλι EPA, το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή εξάπλωση καθυστέρησης. Αυτά τα αποτελέσματα δημιουργούνται με βάση το NPRS, και επομένως ισχύουν μόνο για το NB-IoT. Χρησιμοποιείται ένας μέγιστος αριθμός 10 κυψελών για την εκτίμηση της θέσης και για την επίτευξη της ακρίβειας χρησιμοποιούνται 100 υποπλάσια μετάδοσης NPRS.

Για το NB-IoT, διάφοροι φορείς μπορούν να διαμορφωθούν σε μια κυψέλη (δηλ., ένας φορέας άγκυρας συν πολλούς φορείς non-anchor). Το NPRS μπορεί να διαμορφωθεί ανά φορέα NB-IoT που μεταδίδει NPRS. Η χαρτογράφηση NPRS στους RF πόρους NB-IoT είναι ευέλικτη και μπορεί να υποδεικνύεται με δύο μέρη: μέρος A και μέρος B. Το δίκτυο μπορεί να ρυθμίσει το NPRS μόνο με το μέρος A, μόνο με το μέρος B ή και με τα δύο. Το Μέρος A είναι ένα bitmap υποπλαίσιο 10 ή 40 bit και το Μέρος B είναι ένας μηχανισμός διαμόρφωσης παρόμοιος με αυτόν του LTE PRS. Προσδιορίζει την περιοδικότητα των περιπτώσεων τοποθέτησης και τον αριθμό των διαδοχικών υποπλαισίων NPRS σε μια περίπτωση τοποθέτησης. Τα μέρη A και B μπορεί να ρυθμιστούν ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα υποπλάσιο περιέχει NPRS αν και τα δύο μέρη της διαμόρφωσης υποδεικνύουν ότι το υποπλάσιο περιέχει NPRS. Προσδιορίζει την περιοδικότητα των περιπτώσεων τοποθέτησης και τον αριθμό των διαδοχικών υποπλαισίων NPRS σε μια περίπτωση τοποθέτησης. Τα μέρη A και B μπορεί να ρυθμιστούν ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα υποπλάσιο περιέχει NPRS αν και τα δύο μέρη της διαμόρφωσης υποδεικνύουν ότι το υποπλάσιο περιέχει NPRS. [34,35]

3.8.2 Πολυεκπομπή (Multicast)

Η πολυεκπομπή είναι επικοινωνία ομάδας, όπου τα δεδομένα απευθύνονται σε μια ομάδα χρηστών για μετάδοση μονής κατεύθυνσης. Μία περίπτωση χρήσης για πολυεκπομπή είναι η αναβάθμιση firmware σε μια ομάδα έξυπνων μετρητών. Ένας άλλος είναι να μειωθεί η καθυστέρηση κατά την αντιμετώπιση μεγάλων ομάδων UEs (π.χ. ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των λαμπών των δρόμων). Το κύριο κίνητρο είναι η αποδοτικότητα όσον αφορά την ενέργεια και τη χρήση των πόρων λόγω της μετάδοσης των δεδομένων μια φορά και όχι πολλαπλάσιες φορές χωριστά για κάθε συσκευή. Στο LTE Release 14 NB-IoT, οι υπηρεσίες πολυκάναλης εκπομπής πολυμέσων (MBMS) υποστηρίζονται μέσω single-cell point-to-multipoint (SC-PtM). Το SC-PtM καθορίστηκε νωρίτερα στην έκδοση LTE 13. Τα δεδομένα SC-PtM μεταφέρονται στο λογικό κανάλι SC-MTCH, το οποίο χαρτογραφείται στο φυσικό κανάλι NPDSCH παρόμοιο με το traffic unicast, και ο προγραμματισμός του SC-PtM στο NB-IoT ακολουθεί τις ίδιες αρχές. Στο SC-PtM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες διαμορφώσεις βελτίωσης TBS και βελτίωσης κάλυψης, γεγονός που οδηγεί σε παρόμοιους επιτεύξιμους ρυθμούς δεδομένων κάτω ζεύξης όπως στο unicast, ανάλογα με τη διαμόρφωση του δικτύου. Στην SC-PtM, το single-cell MBMS κανάλι ελέγχου (SC-MCCH) και το single-cell MBMS κανάλι κίνησης (SC-MTCH) είναι λογικά κανάλια που μεταφέρουν τον έλεγχο και την κυκλοφορία δεδομένων, αντίστοιχα. Το SC-MTCH είναι το κανάλι κυκλοφορίας που μεταφέρει τα δεδομένα

πολλαπλών μεταδόσεων. Η ρύθμιση προγραμματισμού (scheduling) για το SC-MTCH παρέχεται μέσω του SC-MCCH για NB-IoT UEs για τον εντοπισμό και τη λήψη της υπηρεσίας ενδιαφέροντος. Κάθε υπηρεσία SC-PtM χαρτογραφείται σε μία SC-MTCH. Μια κυψέλη μπορεί να μεταδώσει πολλαπλά SC-MTCH, αλλά μόνο μία SC-MCCH μεταδίδεται για την ενημέρωση των UE σχετικά με τη διαμόρφωση προγραμματισμού φυσικού στρώματος. Και τα δύο λογικά κανάλια χαρτογραφούνται στο NPDSCH στο φυσικό επίπεδο, και έχουν προγραμματιστεί χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες ελέγχου κάτω ζεύξης στο NPDCCH, η οποία μεταδίδεται σύμφωνα με τις πληροφορίες SC-MCCH.

Οι πληροφορίες σχετικά με τον προγραμματισμό SC-MCCH μεταδίδονται στο μπλοκ πληροφοριών συστήματος 20-NB. Οι περιοδικότητες τροποποίησης και προγραμματισμού για το SC-MCCH επεκτείνονται σε σύγκριση με το LTE λόγω των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη στήριξη της ενισχυμένης κάλυψης. Υποστηρίζεται η κατάτμηση (segmentation) μηνυμάτων SC-MCCH και ένας μηχανισμός παρόμοιος με τον SC-MTCH DRX χρησιμοποιείται για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας της UE.

Το SC-MCCH φέρει τις πληροφορίες προγραμματισμού SC-MTCH και οι επιλογές διαμόρφωσης είναι παρόμοιες με τις επιλογές για το SC-MCCH. Οι κλίμακες για τους DRX timers και την περιοδικότητα προγραμματισμού έχουν επεκταθεί για να ανταπεξέλθουν σε διαφορετικά σενάρια κάλυψης. Λαμβάνοντας υπόψη την χωρητικότητα κάτω ζεύξης, σε μια κυψέλη NB-IoT, ο μέγιστος αριθμός διαφορετικών υποστηριζόμενων SC-MTCHs είναι 64. [34]

3.8.3 Χαμηλή Ισχύς UE

Η έκδοση 14 για το NB-IoT εισάγει μια νέα τάξη χαμηλής ισχύος στο UE, όπου ο στόχος είναι να επιτευχθεί μικρότερος συντελεστής σχήματος, χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος συσκευής και ακόμη χαμηλότερο κόστος συσκευής σε σύγκριση με τις συσκευές 20 dBm στο NB-IoT Release 13. Η μέγιστη ισχύς εξόδου της συσκευής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 20 dBm για να επιτρέψει σε ένα σύστημα τσιπ σχεδιασμού με ενσωματωμένο ενισχυτή ισχύος (PA).

Στην έκδοση 14, εισήχθη μια νέα κατηγορία ισχύος UE με μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εξόδου μειωμένη στα 14 dBm για να καταστεί δυνατή η χρήση παραγόντων μικρότερης μορφής μπαταρίας για συσκευές NB-IoT. Η κατηγορία χαμηλής ισχύος επιφέρει σημαντικά μειωμένο ρεύμα κατανάλωσης.

Για να διατηρηθεί η κάλυψη μιας συσκευής χαμηλής ισχύος σε ένα δίκτυο ευρείας περιοχής, η μειωμένη ισχύς άνω ζεύξης πρέπει να αντισταθμιστεί αυξάνοντας τον χρόνο μετάδοσης άνω ζεύξης για τη διατήρηση της ενέργειας ανά μεταδιδόμενο δυαδικό ψηφίο. Αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη χρήση πόρων των ανερχόμενων ζεύξεων και να οδηγήσει σε αυξημένη σηματοδότηση ελέγχου κάτω ζεύξης. Για να το διαχειριστεί και να ελέγξει τη συνολική χρήση των πόρων του συστήματος, το 3GPP συμφώνησε ότι το MCL για συσκευές χαμηλής ισχύος ότι θα πρέπει να μειωθεί σε σχέση με την προδιαγραφή Release 13. Εδώ θεωρούμε μια μείωση κάλυψης 9 dB, η οποία μπορεί να συνδυαστεί με τη διαφορά στην ισχύ εξόδου μεταξύ 23 και 14 dBm. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές που παρουσιάζουν απώλεια διάδοσης άνω των $164 - (23 - 14) = 155$ dB στην κυψέλη εξυπηρέτησης δεν θεωρείται ότι πληρούν το κριτήριο της καταλληλότητας των κυψελών και δεν έχουν πρόσβαση στο σύστημα. Το σχήμα 3 δείχνει τη μέση χρησιμοποίηση πόρων UL για δύο δίκτυα που βασίζονται σε συσκευές 14 dBm και συσκευές 23 dBm. Το σχήμα δείχνει ότι η αυξημένη χρησιμοποίηση πόρων που παρατηρείται για την περίπτωση των 14 dBm μπορεί να ελεγχθεί με την επιβολή του προαναφερθέντος περιορισμού MCL.

Η χρησιμοποίηση του πόρου κάτω ζεύξης μπορεί επίσης να επηρεαστεί εάν το eNB δεν έχει ακριβή γνώση της ισχύς εξόδου της χρησιμοποιούμενης συσκευής. Αυτό είναι συνέπεια του eNB που υπολογίζει την απώλεια διάδοσης σε μια συνδεδεμένη συσκευή βασισμένη στην λαμβανόμενη ισχύ άνω ζεύξης. Η παρουσία τάξης ισχύος 14 dBm εκτός από τις υπάρχουσες κατηγορίες ισχύος Release 13 εισάγει μια ασάφεια που απαιτούσε την έγκαιρη ένδειξη της τάξης ισχύος της συσκευής. Η διαδικασία ρύθμισης της σύνδεσης NB-IoT βελτιώθηκε στην έκδοση 14 για να επιτρέψει στο eNB εκυπηρέτησης να αποκτήσει τις δυνατότητες της συσκευής, συμπεριλαμβανομένης της τάξης ισχύος, κατά τις πρώτες φάσεις της ρύθμισης σύνδεσης. [34]

3.8.4 Βελτιωμένοι πολλαπλοί φορείς

Ο σχεδιαστικός στόχος της έκδοσης 13 για το NB-IoT σχετικά με την χωρητικότητα είναι οι 6×10^4 συσκευές/km², για την έκδοση 14 το ITU 5G έχει ανάγκη από 6×10^6 συσκευές/km² [44]. Το σύστημα NB-IoT μπορεί να περιέχεται σε ένα φορέα με εύρος ζώνης 200 kHz και για την αύξηση της ικανότητας μπορούν να αναπτυχθούν πολλαπλοί φορείς (δηλ., Πολλαπλές κυψέλες ή συστήματα). Ωστόσο, σε αυτό το στενό εύρος ζώνης η συνεχής μετάδοση των πληροφοριών συστήματος και των σημάτων συγχρονισμού θα πάρει ένα αρκετά μεγάλο μέρος των πόρων κάτω ζεύξης, πάνω από 50 τοις εκατό για ορισμένες ρυθμίσεις. Συνεπώς, η λειτουργία

πολλαπλών φορέων εισήχθη ήδη στην έκδοση 13, στην οποία υπάρχει ένας φορέας αγκύρωσης ο οποίος μεταφέρει αυτό πάντα σε εκπομπή σηματοδότησης και πιθανούς φορείς μη-άγκυρας για αποσυμφόρηση της κίνησης δεδομένων και αυξημένη χωρητικότητα.

Στην έκδοση 13, οι φορείς non-anchor περιορίζονται σε συσκευές offload (συνδέονται με RRC). Δηλαδή, όλες οι συσκευές θα εκτελούν λειτουργίες κατάστασης Idle RRC, όπως παρακολούθηση paging και τυχαίας προσπέλασης, στον φορέα αγκύρωσης, αλλά το eNB μπορεί, μετά τη εγκατάσταση σύνδεσης RRC ή τη σύνδεση RRC, να συνεχίσει την ανταλλαγή μηνυμάτων για να κατευθύνει μια συσκευή σε μη-φορέα αγκύρωσης για τη διάρκεια της σύνδεσης της. Το μειονέκτημα είναι ότι το paging και η τυχαία προσπέλαση είναι πιθανό να καταλήξουν σε σημεία συμφόρησης. Ως εκ τούτου, μια φυσική ενίσχυση της λειτουργίας πολλαπλών φορέων στην έκδοση 14 ήταν να μπορούν οι συσκευές τόσο να παρακολουθούν το paging όσο και να πραγματοποιούν τυχαία πρόσβαση σε μη αγκύρωσης φορείς. Οι συσκευές θα εξακολουθούν να παραμένουν στον φορέα αγκίστρωσης με την έννοια ότι οι μετρήσεις κινητικότητας και ο συγχρονισμός εκτελούνται πάντοτε στον φορέα αγκύρωσης. Στους μη αγκύρωσης φορείς, τα μόνα σήματα που μεταδίδονται είναι τα σήματα αναφοράς στενής ζώνης (NRSSs), αλλά μόνο όταν απαιτείται για paging είτε τυχαία πρόσβαση ή όταν υπάρχει μια συσκευή σε σύνδεση RRC.

Για τη διαδικασία τυχαίας προσπέλασης, μπορούν να διαμορφωθούν έως και τρεις πόροι NPRACH με χαρτογράφηση ένα προς ένα στα τρία πιθανά επίπεδα βελτίωσης της κάλυψης για φορέα μη αγκυροβόλησης. Μια συσκευή θα επιλέξει τυχαία έναν πόρο NPRACH μεταξύ όλων των φορέων που έχουν ρυθμιστεί NPRACH για το επίπεδο βελτίωσης της κάλυψης. Δεδομένου ότι όλες οι συσκευές έκδοσης 13 θα επιλέξουν έναν πόρο NPRACH στον φορέα αγκίστρου, εισάγεται μια προκατειλημμένη επιλογή NPRACH για τις συσκευές έκδοσης 14, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ένα φορτίο επιλογής για να μπορέσει να επιτύχει, για παράδειγμα, μια ανομοιόμορφη κατανομή φορτίου σε συστήματα που περιέχουν αμφότερα την έκδοση 13 και 14 για τις συσκευές. Έως ένα σύνολο 16 φορέων μπορεί να ρυθμιστεί για τυχαία προσπέλαση. Για την παρακολούθηση του paging και συνεπώς το φορτίο paging θα κατανέμετε επάνω στον φορέα αγκύρωσης και στους φορείς μη αγκυροβόλησης διαμορφωμένους με paging. Δεδομένου ότι μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των φορέων κάτω ζεύξης λόγω διαφορών στις καταστάσεις ανάπτυξης, φορτίο από την εκπομπή και συσκευές έκδοσης 13, και ειδικότερα αύξησης ισχύος, μπορεί να επιτευχθεί άνιση κατανομή φορτίου paging με τη διαμόρφωση ενός φορτίου ανά φορέα paging. Μπορούν να διαμορφωθούν έως και 16 μεταφορείς για paging.

Μια ανάλυση της συμβολής κάτω ζεύξης που παρέχεται από τα σήματα αναφοράς, τα κανάλια εκπομπής, τις πληροφορίες συστήματος και το νέο μπλοκ πληροφοριών συστήματος που μεταφέρει τις διαμορφώσεις μη-αγκύρωσης παρέχεται στον Πίνακα 3-1 για όλους τους τύπους φορέων. Είναι φανερό ότι το κέρδος μη-άγκυρας είναι μια γενική μείωση των μονάδων τουλάχιστον 30 τοις εκατό για τους φορείς standalone ή guard-band και 21 τοις εκατό μονάδες για φορείς in-band. Αυτό σημαίνει ότι για την standalone περίπτωση, η ίδια αύξηση της χωρητικότητας κάτω ζεύξης όπως επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη τριών πρόσθετων φορέων αγκίστρωσης θα μπορούσε στην πραγματικότητα να επιτευχθεί μόνο από δύο πρόσθετους μη αγκυρωτικούς φορείς. Για την έκδοση 14, αυτή η αύξηση της παραγωγικής ικανότητας ισχύει και για το NPRACH και paging. [34]

Carrier	Stand-alone/Guard-band overhead	In-band overhead
Rel-13 Anchor	40%	59%
Rel-14 Anchor	44%	62%
Rel-13 Non-anchor	10%	38%
Rel-14 Non-anchor	10%	38%

Πίνακας 3.6: Συστήματα πολλαπλών μεταφορέων

3.8.5 Αύξηση Ρυθμού δεδομένων

Το NB-IoT προορίζεται για το τμήμα της αγοράς πολύ χαμηλής πολυπλοκότητας IoT. Ένα βασικό στοιχείο για τη διασφάλιση της σχεδίασης συσκευών χαμηλής πολυπλοκότητας είναι ο περιορισμός των απαιτήσεων στη μνήμη προσωρινής αποθήκευσης της συσκευής και στην υπολογιστική ισχύ επεξεργασίας. Αυτοί οι περιορισμοί καταλήγουν σε ρυθμό δεδομένων μέγιστης ταχύτητας κάτω ζεύξης ~ 25 kb / s και στην υποστηριζόμενη ταχύτητα δεδομένων κορυφής άνω ζεύξης ~ 65 kb / s στην έκδοση NB-IoT 13.

Η έκδοση 14 του NB-IoT για να ανταπεξέλθει σε διάφορα σενάρια κίνησης εισάγει μια νέα κατηγορία συσκευών NB-IoT, CAT NB.2, υποστηρίζοντας 2536 bits TBS τόσο στο uplink όσο και στο downlink. Εκτός από την αύξηση του μέγιστου TBS, καθορίστηκε επίσης η προαιρετική υποστήριξη για μια δεύτερη διαδικασία HARQ. Αυτό οδήγησε σε περαιτέρω αύξηση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων. Ο Πίνακας 3.2 συνοψίζει τους μέγιστους ρυθμούς δεδομένων φυσικού στρώματος για την νέα κατηγορία συσκευών λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερήσεις

προγραμματισμού της συσκευής και τις προγραμματισμένες καθυστερήσεις προγραμματισμού NPDCCH.

Καθώς τα μεγαλύτερα TBS εισάγονται εις βάρος ενός αυξημένου ρυθμού κώδικα, ο οποίος μειώνει την ανθεκτικότητα του ραδιοζεύκτη, αναμένεται ότι ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων προορίζεται κυρίως για συσκευές που αντιμετωπίζουν ευνοϊκές RF συνθήκες. Το κέρδος throughput που επιτυγχάνεται με μια δεύτερη διαδικασία HARQ οφείλεται κυρίως στη μείωση της επιβάρυνσης από τα κενά προγραμματισμού NPDCCH, η οποία περιορίζει την επιτεύξιμη απόδοση σε καλές RF συνθήκες. Σε συνθήκες όπου χρησιμοποιούνται επαναλήψεις, ο αντίκτυπος στη διακίνηση από τα κενά προγραμματισμού NPDCCH είναι περιορισμένος. Αντίθετα, οι πραγματικοί χρόνοι μετάδοσης περιορίζουν τους επιτεύξιμους ρυθμούς δεδομένων. Αυτό σημαίνει επίσης ότι οι δύο διεργασίες HARQ χαρακτηριστικό είναι ως επί το πλείστον χρήσιμο σε καλές RF συνθήκες.

	NPDSCH	NPUSCH
Category NB 2	79 kb/s	106 kb/s
Category NB 2 με υποστήριξη 2 HARQ processes (βέλτιστο)	127 kb/s	158.5 kb/s

Πίνακας 3.7: NB-IoT release 14 μέγιστος ρυθμός δεδομένων

3.8.6 Ενισχυμένη συνδεσιμότητα κινητικότητας

Το NB-IoT υποστηρίζει σταθερές και χαμηλής κινητικότητας συσκευές. Η μεταπομπή δεν υποστηρίζεται στο NB-IoT και όταν η UE μετακινηθεί εκτός της περιοχής κάλυψης της κυψέλης εξυπηρέτησης, το UE θα παρουσιάσει βλάβη ραδιοζεύξεων (RLF). Ένα UE που υποστηρίζει το NB-IoT υποστηρίζει τη μεταφορά δεδομένων μέσω του επιπέδου ελέγχου. Προαιρετικά, το UE μπορεί επίσης να υποστηρίζει τη μεταφορά δεδομένων μέσω του επιπέδου χρήστη. Όταν το UE υποστηρίζει τη μεταφορά δεδομένων μέσω του επιπέδου χρήστη, υποστηρίζεται η διαδικασία αποκατάστασης σύνδεσης RRC, πράγμα που σημαίνει ότι μετά την ανίχνευση του RLF, το UE προσπαθεί να βρει μια κατάλληλη κυψέλη μέσω της επιλογής κυψελών. Αν το UE εντοπίσει μια κατάλληλη κυψέλη, το UE θα προσπαθήσει να αποκαταστήσει τη σύνδεση σε αυτήν την κυψέλη και να συνεχίσει τη μεταφορά δεδομένων. Η αποκατάσταση RRC σκοπεύει να κρύψει την προσωρινή απώλεια της RF διεπαφής στα ανώτερα στρώματα. Η αποκατάσταση RRC (RRC re-

establishment) για μια UE που υποστηρίζει μόνο τη μεταφορά δεδομένων μέσω του επιπέδου ελέγχου προστέθηκε στην έκδοση 14 [36].

3.8.7 Διαδικασία ένδειξης βοήθειας απελευθέρωσης

Το NB-IoT έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει UE που έχουν περιστασιακά μικρά ποσά δεδομένων για μετάδοση ή λήψη. Παρόλο που ο UE ξοδεύει το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου σε κατάσταση αναμονής σε ένα (εκτεταμένο) DRX για εξοικονόμηση ενέργειας, όταν ο UE έχει δεδομένα για αποστολή ή / και λήψη, είναι σημαντικό αυτές οι μεταδόσεις δεδομένων να ολοκληρωθούν το συντομότερο δυνατόν και με ελάχιστη ποσότητα γενικών εξόδων σηματοδότησης. Μετά την ολοκλήρωση των μεταδόσεων δεδομένων, το eNB απελευθερώνει τη σύνδεση και το UE επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής για εξοικονόμηση ενέργειας. Το eNB απελευθερώνει συνήθως τη σύνδεση χρησιμοποιώντας ένα χρονοδιακόπτη αδράνειας δεδομένων. δηλαδή, η σύνδεση αποδεσμεύεται όταν δεν αποστέλλονται ή παραλαμβάνονται περισσότερα δεδομένα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Σε σύγκριση με τους χρόνους μετάδοσης δεδομένων, αυτό είναι ένας σχετικά μεγάλος χρόνος αδράνειας κατά τον οποίο η UE περιμένει να απελευθερωθεί, ειδικά σε κανονική κάλυψη. Σε περιπτώσεις NB-IoT, οι περιπτώσεις κυκλοφοριακής χρήσης μπορεί να είναι μάλλον προβλέψιμες και η UE μπορεί να έχει καλή γνώση όταν έχει ολοκληρώσει τη μετάδοση ή / και τη λήψη δεδομένων. Η διαδικασία ένδειξης βοήθειας απελευθέρωσης επιτρέπει στο UE να στείλει μια ένδειξη στο eNB όταν δεν έχει περισσότερα δεδομένα για αποστολή ή λήψη. Το eNB μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτή την ένδειξη για να απελευθερώσει το UE πιο γρήγορα σε κατάσταση αναμονής. [36]

3.8.8 Περιορισμός στη χρήση βελτιώσεων κάλυψης

Για να επικρατήσει βελτιωμένη κάλυψη έως και 164 dB MCL, απαιτείται σημαντική ποσότητα πόρων δικτύου (π.χ. επαναλήψεις). Με την εξουσιοδότηση της δυνατότητας βελτίωσης της κάλυψης, το δίκτυο μπορεί να περιορίσει τη χρήση των βελτιώσεων κάλυψης σε ένα UE βάση πληροφοριών εγγραφών. Στην έκδοση 14, μια NB-IoT UE απαιτείται για να υποστηρίξει αυτό το χαρακτηριστικό. Σε κατάσταση αναμονής, η εξουσιοδότηση επιβάλλεται από το UE και σε συνδεδεμένη λειτουργία από το eNB. Το UE λαμβάνει πληροφορίες εξουσιοδότησης κατά τη διάρκεια της προσάρτησης και της ενημέρωσης περιοχής παρακολούθησης (TAU) από το δίκτυο. Όταν η UE δεν έχει άδεια να χρησιμοποιήσει τη βελτίωση της κάλυψης, το UE θα εφαρμόσει μια μετατόπιση της μετρημένης ισχύος σήματος του επιλεγμένου στοιχείου σε NB-

IoT και το UE δεν θα πρέπει να χρησιμοποιεί το κριτήριο επιλογής κυψελών για ενισχυμένη κάλυψη σε MTC. Όταν η ένταση του σήματος πέφτει κάτω από το ελάχιστο όριο (δηλ., Η κυψέλη δεν είναι κατάλληλη για το UE να στραφεί σε αδράνεια), το UE απαιτείται να προσπαθήσει να βρει μια άλλη κατάλληλη κυψέλη.

Τόσο τα νέα χαρακτηριστικά όσο και οι βελτιωμένες λειτουργίες εισάγονται στο NB-IoT 3GPP LTE Release 14. Τα νέα χαρακτηριστικά διευρύνουν τις περιπτώσεις χρήσης που μπορεί να προσφέρει η NB-IoT, ενώ οι ενισχυμένες λειτουργίες αυξάνουν την ικανότητα του συστήματος με ευελιξία, καθώς και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τα συστήματα NB-IoT επικεντρώνονται ειδικά σε συσκευές χαμηλού κόστους με υπηρεσίες που είναι ανθεκτικές στην καθυστέρηση. Το NB-IoT μπορεί να υποστηρίξει όχι μόνο πιο διαφοροποιημένες υπηρεσίες, αλλά και τη δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του κόστους των συσκευών. Επιπλέον, λόγω της ευελιξίας υποστήριξης διαφόρων τρόπων λειτουργίας, το σύστημα NB-IoT είναι προβλέψιμο για να είναι απόλυτα ανθεκτικό στη λειτουργία και να συνυπάρχει με τις νέες τεχνολογίες ραδιοσυχνότητας επόμενης γενιάς (δηλ. 5G).

Κεφάλαιο 4

Δορυφορικές επικοινωνίες

Τα δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, εξαιτίας της ανάπτυξης των δυνατοτήτων σχετικά με τους τρόπους μετάδοσης πληροφοριών, της ζεύξης μεταξύ σημείων, που θα ήταν αδύνατον να επικοινωνήσουν, χωρίς τη χρήση δορυφόρων, τον άμεσο χρόνο λήψης δεδομένων χωρίς την παρέμβαση άλλων δικτύων, αλλά και την προσιτή χρήση τους πλέον σε όλες τις εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ο σκοπός του IoT είναι να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο σε οποιαδήποτε συσκευή που διαθέτει πομποδέκτη κάθε στιγμή και σε κάθε μέρος. Ωστόσο υπάρχουν περιοχές όπου το επίγειο δίκτυο δεν μπορεί να καλύψει ορισμένες απομακρυσμένες περιοχές όπως για παράδειγμα έρημος, παράκτιες περιοχές. Η χρήση των δορυφορικών επικοινωνιών για το IoT μπορεί να παρέχει λύση στο πρόβλημα κάλυψης που αναφέραμε. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στις δορυφορικές επικοινωνίες ώστε στην συνέχεια να γίνει μελέτη για την χρήση στις επικοινωνίες NB-IoT.

4.1 Εισαγωγή

Τα δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, εξαιτίας της ανάπτυξης των δυνατοτήτων σχετικά με τους τρόπους μετάδοσης πληροφοριών, της ζεύξης μεταξύ σημείων, που θα ήταν αδύνατον να επικοινωνήσουν, χωρίς τη χρήση δορυφόρων, τον άμεσο χρόνο λήψης δεδομένων χωρίς την παρέμβαση άλλων δικτύων, αλλά και την προσιτή χρήση τους πλέον σε όλες τις εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας. Υπάρχουν γεωγραφικές περιοχές όπου τα επίγεια τηλεπικοινωνιακά συστήματα δεν μπορούν να παρέχουν επαρκής κάλυψη λόγω τεχνικών δυσκολιών (πχ σε γκρεμούς, κοιλάδες κλπ). Με την χρήση δορυφορικών συστημάτων έχει καταστεί πλέον δυνατή η επικοινωνία οποιουδήποτε, με οποιονδήποτε και ανά πάσα στιγμή. [37]

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των δορυφόρων επικοινωνίας θεωρείται η δυνατότητα για πέρα από τον ορίζοντα επικοινωνία από τη σκοπιά των δύο επίγειων σταθμών. Η ορατότητα από το δορυφόρο στον τερματικό σταθμό μπορεί να είναι κοντά στην γραμμική ορατότητα όταν ο δορυφόρος είναι πάνω από τον ορίζοντα, ο δορυφόρος μπορεί να συνδέσει τους σταθμούς του εδάφους οι οποίοι δε θα μπορούσαν κανονικά να δουν ο ένας τον άλλο λόγω της καμπυλότητας της Γης. Επομένως, ακόμα και ένας δορυφόρος μπορεί εύκολα να χτίσει μεγάλη υπηρεσία υποδομών η οποία καλύπτει τεράστιες επιφάνειες γης.

Η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών στο διάστημα άρχισε το 1957 με την εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου (Sputnik). Στην συνέχεια γίνονται διάφορα πειράματα όπως : το Χριστουγεννιάτικο μήνυμα του προέδρου Eisenhower που μεταδόθηκε από τον δορυφόρο SCORE το 1958, ο ανακλαστικός δορυφόρος ECHO το 1960, επίσης το 1960 η εκπομπή από τον δορυφόρο COURIER μέσω της διαδικασίας αποθήκευσης-προώθησης, οι ενεργοί δορυφόροι αναμετάδοσης TESLAR και RELAY το 1962, και ο πρώτος γεωστατικός δορυφόρος, ο SYNCOM το 1963. [34] Το 1964 εκτοξεύεται ο πρώτος γεωστατικός δορυφόρος για εμπορική χρήση. Η σειρά INTELSAT άρχισε να λειτουργεί το 1965. Το 1972 τίθεται σε λειτουργία το πρώτο δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών για οικιακή χρήση στον Καναδά, ενώ τίθεται σε τροχιά ο INTERSPUTNIK. Το 1975 γίνεται το πρώτο πείραμα απευθείας εκπομπών μέσω δορυφόρου μεταξύ ΗΠΑ-ΙΝΔΙΑΣ με επιτυχία.[39]

4.2 Τροχιές

Η διαδρομή που διανεύει ένας δορυφόρος ονομάζεται τροχιά. Η διαδρομή βρίσκεται επάνω σε ένα επίπεδο και έχει τη μορφή έλλειψης με την μέγιστη απόσταση του δορυφόρου από την γη το απόγειο και με την ελάχιστη απόσταση του δορυφόρου από την γη το περίγειο. Η ταχύτητα του δορυφόρου επάνω στην τροχιά του μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την γη. [40]

Οι πιο συνηθισμένες τροχιές είναι οι εξής :

Ελλειπτικές τροχιές (High Elliptical Orbit, HEO) με γωνία κλίσης 63,44ο ως προς το επίπεδο του Ισημερινού. Αυτός ο τύπος τροχιάς είναι σταθερός με τις αυξομειώσεις του γήινου βαρυτικού πεδίου και λόγω της κλίσης επιτρέπει στον δορυφόρο να καλύψει περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος κατά την διάρκεια ενός μεγάλου μέρους την τροχιακής περιόδου καθώς κινείται στο απόγειο. Ο δορυφόρος παραμένει πάνω από τις περιοχές, που βρίσκονται κάτω από το απόγειο για μία περίοδο της τάξης των 8 με 12 ωρών. Επίσης, οι κεκλιμένες ελλειπτικές τροχιές μπορούν να εξασφαλίσουν ζεύξεις σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται κοντά στο απόγειο με γωνίες ανύψωσης κοντά στις 90°. [39,40]

Κυκλικές τροχιές χαμηλού ύψους (Low Earth Orbit, LEO). Στην συγκεκριμένη τροχιά το ύψος του δορυφόρου είναι σταθερό και ισούται από 500 έως 2000 χιλιόμετρα. Η περίοδος είναι 1,5 ώρα με τροχιακό επίπεδο σε κλίση προς το ισημερινό. Με σχεδόν κλίση 90ο τροχιά ο δορυφόρος περνάει πάνω από κάθε περιοχή της γης. Δορυφόροι χαμηλής τροχιάς χρησιμοποιούνται για δορυφόρους παρατήρησης. Ένα σύνολο σε αριθμό μερικών δεκάδων δορυφόρων (που ονομάζουμε αστερισμό) χαμηλές τροχιές είναι ικανό να παρέχει παγκόσμιες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Τέτοια συστήματα είναι τα Iridium, Ellipsat και Teledesic. [39,40]

Κυκλικές τροχιές μέσου ύψους (Medium Earth Orbit, MEO). Οι τροχιές αυτές έχουν ύψος από 10.000 – 20.000 km περίπου, η κλίση είναι 50ο περίπου και έχουν περίοδο 6 ώρες. Με σύστημα 10 έως 15 δορυφόρων είναι εφικτό να επιτευχθεί παγκόσμια κάλυψη για παροχή επικοινωνιών σε πραγματικό χρόνο. Οι MEO δορυφόροι έχουν χαρακτηριστικά χρήσιμα για μετεωρολογικές εφαρμογές, τηλεπισκόπηση, πλοήγηση και εφαρμογές εντοπισμού θέσης όπως το σύστημα Global Positioning System (GPS), το Ρωσικό σύστημα GLONASS και το Ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO (GNSS). Το GPS χρησιμοποιεί ένα αστερισμό από 24 δορυφόρους σε υψόμετρο 18500

km, το GLONASS χρησιμοποιεί ένα αστερισμό από 24 δορυφόρους σε υψόμετρο 19,100 km και το GALILEO χρησιμοποιεί ένα αστερισμό από 30 δορυφόρους σε υψόμετρο 23,222 km. [37,39]

Κυκλικές γεωστατικές τροχιές (Geostationary Earth Orbit, GEO). Οι δορυφόροι περιστρέφονται γύρω από την γη σε ύψος 35.786km με την ίδια φορά όπως η γη. Η περίοδος είναι ίση με της γης όπου για τον συγκριμένο λόγο ονομάζεται και γεωσύγχρονη τροχιά (Geo-Synchronous Orbit,GSO) με αποτέλεσμα ο δορυφόρος να φαίνεται σταθερός στον ουρανό. Η γεωστατική τροχιά είναι η πιο δημοφιλής τροχιά που χρησιμοποιείται για τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους. Ο συγκεκριμένος δορυφόρος διασφαλίζει συνεχή κάλυψη ως αναμεταδότης σε πραγματικό χρόνο για την περιοχή στην οποία είναι ορατός (περίπου 42.4% της επιφάνειας της γης). Οπότε με τρεις δορυφόρους είναι επαρκές στο να καλύψουν την επιφάνεια της γης (εκτός από τις αστικές περιοχές). [39,40]

Τα πλεονεκτήματα των τροχιών χαμηλού ύψους LEO είναι :

- Επειδή το υψόμετρο των δορυφόρων είναι μικρό μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο μικρή και φθηνοί δορυφόροι αφού η ισχύς που απάτητε για μια ζεύξη είναι μικρότερη.
- Το μικρό μέγεθος των δορυφόρων και η μικρή απόσταση διευκολύνουν την εκτόξευση και μείνουν τα έξοδα.
- Οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι μικρές της τάξης των 10-20msec και έχουμε την δυνατότητα για πολλαπλές μεταπομπές του σήματος από δορυφόρο σε δορυφόρο. [37]

Τα μειονεκτήματα των τροχιών χαμηλού ύψους LEO είναι :

- Απαιτείται μεγάλος αριθμός δορυφόρων και η διαδικασία υλοποίησης όλου του συστήματος είναι χρονοβόρα και πολυέξοδη.
- Για να υπάρχει συνεχής κάλυψη σε όλα τα σημεία απαιτείται πλήρης ανάπτυξη του συστήματος.
- Απαιτούνται πολλές μεταπομπές εξαιτίας της γρήγορης κίνησης των δορυφόρων στον ουρανό.

- Δημιουργούνται ισχυρά φαινόμενα Doppler εξαιτίας της γρήγορης κίνησης των δορυφόρων.
- Λόγω της μεταβολής της γωνίας ανύψωσης οι συνθήκες διάδοσης είναι μεταβλητές. Δημιουργείται μεγάλο πρόβλημα εστίασης στις κεραίες λόγω της γρήγορης κίνησης των δορυφόρων.
- Μικρή διάρκεια ζωής των δορυφόρων. [37]

Τα πλεονεκτήματα των γεωστατικών τροχιών GEO είναι :

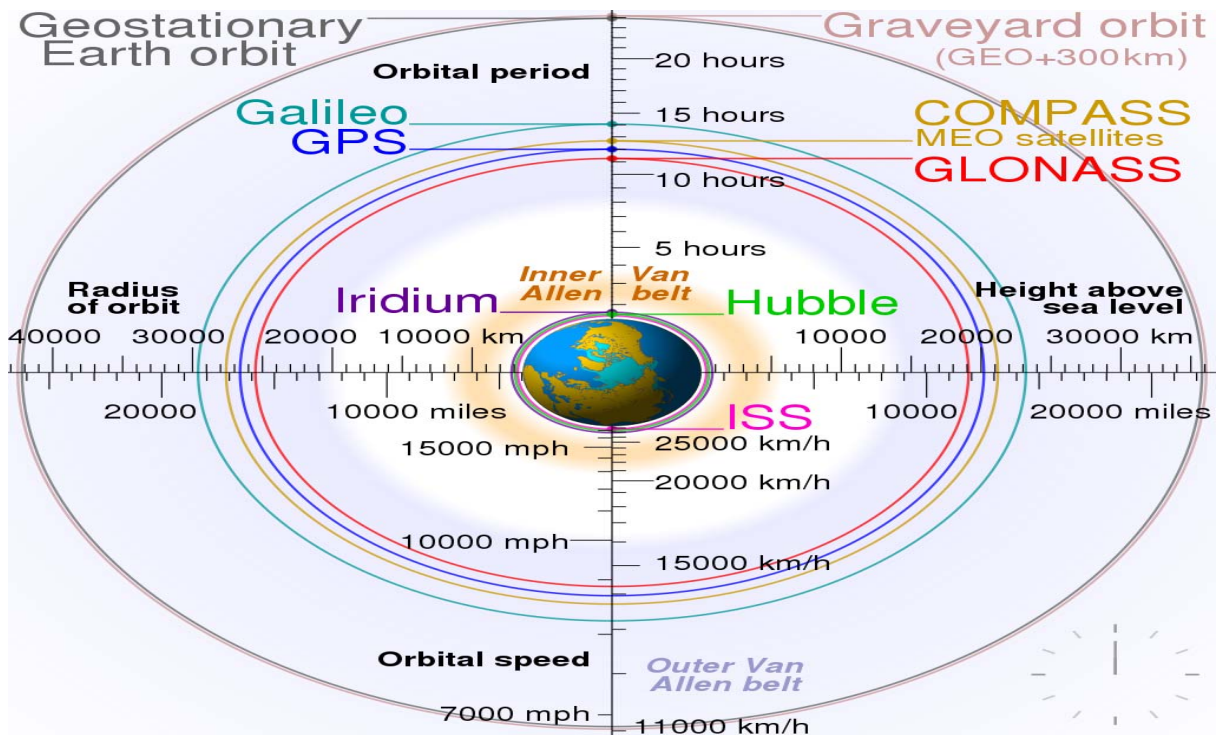
- Ο δορυφορικός αναμεταδότης φαίνεται σταθερός από τους επίγειους σταθμούς μέσα στην περιοχή κάλυψης που έχει ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις στους σταθμούς εδάφους γιατί από τη μια πλευρά η παρακολούθηση της θέσης του δορυφόρου είναι εύκολη και από την άλλη πλευρά τα χαρακτηριστικά μετάδοσης όπως οι απώλειες διάδοσης δεν μεταβάλλονται.
- Η κάλυψη που εξασφαλίζουν οι συγκεκριμένοι δορυφόροι είναι επαρκής για τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές της γης ενώ απαιτούνται τρεις δορυφόροι για παγκόσμια κάλυψη.
- Κάθε χρήστης επικοινωνεί συνέχεια με τον ίδιο δορυφόρο οπότε δεν χρειάζεται καμία διαδικασία μεταπομπής από δορυφόρο σε δορυφόρο.
- Το σύστημα ελέγχου των δορυφόρων είναι απλό και δοκιμασμένο.
- Δεν απαιτείται σύστημα ανίχνευσης και εντοπισμού του δορυφόρου στα επίγεια τερματικά.
- Δεν υπάρχει μεταβολή στην καθυστέρηση διάδοσης και στη γωνία ανύψωσης.
- Τα φαινόμενα Doppler είναι ασήμαντα, ενώ οι παρεμβολές με άλλα επίγεια τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι προβλέψιμες λόγω σταθερής γεωμετρίας.

- Οι δορυφόροι είναι σε μεγάλο υψόμετρο οπότε υπάρχει μεγάλη περιοχή πρόσβασης και καθένας παρέχει ορατότητα σε μεγάλο μέρος της γης. [39]

Τα μειονεκτήματα των γεωστατικών τροχιών GEO είναι :

- Η χρονική καθυστέρηση της μετάδοσης είναι σημαντική λόγω της μεγάλης απόστασης δορυφόρου με επίγειο σταθμό δυσκολεύοντας της αμφίδρομες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο.
- Παρατηρείται μείωση της ποιότητας της επικοινωνίας για μικρά χρονικά διαστήματα, όταν ο Ήλιος βρίσκεται μέσα στο εύρος του κύριου λοβού ακτινοβολίας του επίγειου σταθμού.
- Οι συγκεκριμένοι δορυφόροι δεν μπορούν να καλύψουν περιοχές της γης με γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο από τις 75°.
- Οι περιοχές αυτές καλύπτονται από δορυφόρους που κινούνται σε τροχιές που έχουν σημαντικές κλίσεις.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι εμφανίζουν μια αβεβαιότητα ως προς την ακριβή τους θέση της τάξης των $+0.1^\circ$ που οφείλεται στην μικρή εκκεντρότητα της τροχιάς τους οπότε η θέση του δορυφόρου προσδιορίζεται με αβεβαιότητα $\pm 40\text{km}$ πάνω στην τροχιά του. Οι γωνίες ανύψωσης είναι χαμηλές σε περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος ή σε περιοχές με πολλά βουνά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σοβαρό πρόβλημα στις κινητές επικοινωνίες. Ο αριθμός των δορυφόρων που μπορούν να λειτουργήσουν είναι περιορισμένος επειδή υπάρχει ένα ισημερινό επίπεδο και οι δορυφόροι πρέπει να απέχουν μεταξύ τους για να αντιμετωπιστούν πιθανές παρεμβολές. Οι γεωστατικοί δορυφόροι δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές δορυφορικών κινητών τηλεπικοινωνιών λόγω της μεγάλης απόστασης, των φαινομένων σκίασης και των πολλαπλών ανακλάσεων. [39]



Σχήμα 4-1: Τροχιές δορυφόρων [43]

4.3 Κατανομή φάσματος συχνοτήτων

Στον Πίνακα 4.1 δίνεται η κατανομή του φάσματος των συχνοτήτων.

Ζώνη Συχνοτήτων	Συχνότητα άνω ζεύξης (GHz)	Συχνότητα κάτω ζεύξης (GHz)	Κεραία Τερματικού	Διαθέσιμο Εύρος Ζώνης (MHz)	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
L-ζώνη	2	1	μικρή	<100	MSS, LMSS
S-ζώνη	4	2	μικρή	<100	MSS, SRS
C-ζώνη	8	4	μεγάλη	800	FSS
X-ζώνη	12,5	8	μεσαία		FSSMC
Ku-ζώνη	19	12,5	μικρή	1000	FSS, BSS
K-ζώνη	26,5	19	μικρή	1000	FSS, BSS
Ka-ζώνη	30	26,5	μικρή	2500	FSS, BSS

Πίνακας 4.1: Κατανομή φάσματος συχνοτήτων

4.4 Δορυφορικές Υπηρεσίες Κινητής

Στα δορυφορικά συστήματα κινητής, ο εξοπλισμός εδάφους είναι κινητός. Αυτό περιλαμβάνει πχ δορυφορικά τηλέφωνα, δορυφορικούς pagers μηνυμάτων, δορυφορικές υπηρεσίες δεδομένων και Παγκόσμια Συστήματα Δορυφορικής Πλοήγησης (GNSS).

Στις δορυφορικές υπηρεσίες κινητής, ο προϋπολογισμός συνδέσμου περιορίζεται κυρίως από τις δυνατότητες του εξοπλισμού εδάφους, καθώς οι high-gain κεραιές, ισχυροί αναμεταδότες και ικανότητα στόχευσης δεν είναι διαθέσιμα σε εφαρμογές που κρατούνται στο χέρι. Αυτοί οι περιορισμοί πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της αποστολής. Οι τερματικοί της κινητής ταιριάζουν καλύτερα με επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης με δορυφόρους σε LEO τροχιά. Τα συστήματα κινητής συνήθως χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες από τις υπηρεσίες μετάδοσης, όπως οι L-Band και S-band μεταξύ 1 και 4 GHz, το οποίο κάνει τη χρήση λογικά μικρότερων σε μέγεθος κεραιών δυνατή.

Οι τροχιές LEO κοντά στη Γη είναι γενικά προτιμότερες για υπηρεσίες κινητής σε σύγκριση με τις MEO και τις GEO, επειδή το χαμηλότερο υψόμετρο παράγει λιγότερες απώλειες ελεύθερου χώρου. Το χαμηλότερο υψόμετρο προκαλεί μόνο ελάχιστη καθυστέρηση μεταφοράς, η οποία είναι ωφέλιμη σε πολλές εφαρμογές κινητής. Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε μία υψηλή σχετική ταχύτητα μεταξύ του δορυφόρου και του σταθμού εδάφους, το οποίο προκαλεί μία υψηλή μετατόπιση Doppler.

Λόγω των χαμηλών υψομέτρων τροχιάς, η περιοχή κάλυψης εδάφους ενός δορυφόρου είναι πολύ μικρότερη σε μία LEO τροχιά από ότι σε μία GEO τροχιά. Επομένως, μεγαλύτεροι σχηματισμοί/καταιγισμοί χρειάζονται σε LEO για να επιτευχθεί συνεχής παγκόσμια κάλυψη. Πολλαπλοί δορυφόροι χρειάζεται να είναι ορατοί για τον χρήστη εδάφους ταυτόχρονα ώστε όταν μία σύνδεση χάνεται, ο δεύτερος δορυφόρος να μπορεί να προσεγγίζεται χωρίς διακοπή στην υπηρεσία.

Ένα παράδειγμα ενός σχηματισμού επικοινωνιών LEO είναι το δίκτυο δορυφόρων Iridium, του οποίου οι πρώτοι δορυφόροι εκτοξεύθηκαν το 1997. Το Iridium είναι πιο γνωστός πάροχος υπηρεσιών δορυφορικής τηλεφωνίας και δεδομένων για χρήστες κινητής. Ο σχηματισμός Iridium αποτελείται από 66 δορυφόρους, που κινούνται σε κυκλικές τροχιές στα 780 km γύρω

από τη Γη. Οι δορυφόροι συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα δυναμικό δίκτυο στο οποίο τα δεδομένα μπορούν να σταλούν στον κοντινότερο σταθμό εδάφους. Το Iridium χρησιμοποιεί 128 kbit/s L-band (1616 – 1626.5 MHz) συνδέσμους για τερματικούς κινητής, με 240 κανάλια (31.5 kHz bandwidth και 41.67 kHz channel spacing) και FDMA/TDMA μορφοποίηση. Λόγω των περιορισμών του σε ρυθμούς δεδομένων και αριθμό ταυτόχρονων τερματικών εδάφους, η μεταφορά δεδομένων ενός χρήστη έχει διατηρήσει υψηλό κόστος το οποίο περιορίζει την ευρύτερη προτίμηση. Μία ανανεωμένη σειρά δορυφόρων, που λέγεται Iridium NEXT, όπου έγινε εκτόξευση το 2018. Αυτοί οι δορυφόροι είναι συμβατοί με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα Iridium και εκτείνονται για να υποστηρίξουν υψηλότερες απαιτήσεις δεδομένων.

Ένας άλλος πάροχος υπηρεσιών δορυφορικής κινητής ο ORBCOMM, μία αμερικανική εταιρία, είναι ο μεγαλύτερος πάροχος υπηρεσιών δορυφορικής M2M επικοινωνίας. Λειτουργεί σε σχηματισμό 31 δορυφόρων σε 672 – 720 km LEO τροχιές, με κλίση 48°. Το δίκτυο ORBCOMM ταιριάζει καλύτερα σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν ελάχιστη μεταφορά δεδομένων, αλλά απαιτούν παγκόσμια ανεξαρτησία από γήινες υποδομές. Το δίκτυο πρώτης-γενιάς ήταν ικανό να μεταφέρει μέχρι και 2400 baud δεδομένα.

Το OneWeb, παλαιότερα γνωστό ως WorldVu δορυφόροι, είναι μία εταιρία που στοχεύει στην εγκατάσταση παγκόσμιας πρόσβασης διαδικτύου ευρέος φάσματος προσιτό για όλους. Ο σχηματισμός OneWeb στοχεύει σε 648 δορυφόρους σε ένα υψόμετρο περίπου 1200 km το οποίο να λειτουργεί στη δέση Ku-band (12 – 18 GHz). Αυτό επιτρέπει κάλυψη όπου προς το παρόν υπάρχει τουλάχιστον ένας δορυφόρος 55 μοίρες πάνω από τον ορίζοντα. Μεγάλος αριθμός από δορυφόρους ωφελεί επίσης σε διανεμημένο φορτίο στις κατοικημένες περιοχές. Η λύση του OneWeb απαιτεί αρκετά μεγάλο (0.45 – 1 μέτρα διάμετρο) εξοπλισμό οροφής για την επίτευξη σύνδεσης. Η παραγωγή των πρώτων δορυφόρων ξεκίνησε το 2018. [44,45]

4.5 Απώλειες διάδοσης δορυφορικών ζεύξεων

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μελέτη για τις απώλειες διάδοσης των δορυφορικών ζεύξεων, όπως απώλειες : ελευθέρου χώρου, ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας, λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, λόγω αποπόλωσης, ασυμφωνίας πόλωσης, λόγω ανωμαλιών της επιφάνειας κατόπτρου, εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής και του συστήματος λήψης.

4.5.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου (Free Space Loss – FSL)

Οι επικρατέστερες απώλειες στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου (Free Space Loss – FSL). Η απώλεια ελευθέρου χώρου δίνεται από την Εξίσωση 4.1 :

$$L_{FSL}(dB) = 32.45 + 20 * \log(R_{KM}) + 20 * \log(F_{MHZ})$$

Εξίσωση 4.1

Όπου R : Η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη σε χιλιόμετρα
F : Η φέρουσα συχνότητα σε MHz

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου αυξάνονται κατά 6 dB για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας ή της απόστασης. Η απόσταση μεταξύ δορυφόρου και γης είναι πολύ μεγάλη (όπως για παράδειγμα 35,786 km) και απαιτείται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να ταξιδεύουν δυο φορές για μια απλή ζεύξη. Συνεπώς λόγω μεγάλης απόστασης ανάμεσα σε δορυφόρο και γη καθιστούν τις απώλειες ελευθέρου χώρου επικρατέστερες.

Εκτός από τις απώλειες ελευθέρου χώρου υπάρχουν και άλλες απώλειες που πρέπει να υπολογιστούν κατά την διάδοση των δορυφορικών επικοινωνιών.

4.5.2 Απώλειες Ιονόσφαιρας και Τροπόσφαιρας (La)

Η ιονόσφαιρα και η τροπόσφαιρα αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και προκαλούν εξασθένιση στο πλάτος και αποπόλωση τους.

Οι Ιονοσφαιρικές επιδράσεις, περιλαμβάνουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων γύρω από την γη, του μαγνητικού πεδίου της γης και των ραδιοκυμάτων. Τα δύο βασικά φαινόμενα που δημιουργούνται είναι ο σπινθηρισμός και η στρόφη Faraday. Ο σπινθηρισμός δημιουργείται από την αλλαγή του συντελεστή διάθλασης της ιονόσφαιρας όπου έχει αποτέλεσμα γρήγορες διακυμάνσεις πλάτους, φάσης και της γωνίας πρόσπτωσης του κύματος στην επιφάνεια της γης. Η στρόφη Faraday εμφανίζεται στην περιστροφή ενός γραμμικά πολωμένου κύματος εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με το μαγνητικό πεδίο της γης και οδηγεί σε αποπόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα δυο αυτά φαινόμενα έχουν μεγάλη επίδραση σε σήματα με μεγάλα μήκη κύματος οπότε σε υψίσυχνα κύματα είναι

ασήμαντη η επίδραση τους. [39,39] Γενικά η ιονόσφαιρα επιδρά σε συχνότητες χαμηλότερες των 3 GHz και η τροπόσφαιρα επιδρά για συχνότητες άνω των 3 GHz [38].

Οι τροποσφαιρικές επιδράσεις, περιλαμβάνουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυμάτων και του χαμηλότερου επίπεδου της γήινης ατμόσφαιρας. Τα δυο βασικά στοιχεία της τροπόσφαιρας τα οποία προκαλούν απώλεια στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι το οξυγόνο και οι υδρατμοί λόγω της ηλεκτρικής (οξυγόνο) και της μαγνητικής (υδρατμοί) διπολικής ροπής.[38,39] Λόγω ότι τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών επικεντρώνονται σε συχνότητες λειτουργίας μεγαλύτερης των 10 GHz οι απώλειες επικεντρώνονται στις τροποσφαιρικές επιδράσεις. Οι περιοχές απορρόφησης των αερίων βρίσκονται σε μεγάλες συχνότητες και η επίδραση στις τηλεπικοινωνίες λαμβάνεται υπόψη για συχνότητες άνω των 30 GHz. Οι απώλειες εξαιτίας του μέσου μετάδοσης στην ιονόσφαιρα και τροπόσφαιρα είναι περιορισμένες και συμβολίζονται με L_a .

4.5.3 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά την διάδοση τους μέσω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή, χαλάζι, χιόνι) δημιουργείται εξασθένηση λόγω σκέδασης και απορρόφησης καθώς και αποπόλωση. Για συχνότητες πάνω από 10 GHz οι βροχές δημιουργούν προβλήματα στις δορυφορικές ζεύξεις. Οι απώλειες λόγω βροχής για την C-ζώνη (6/4 GHz) είναι μικρή για την Ku-ζώνη (14/11 GHz) είναι μεγαλύτερες και για την Ka-ζώνη είναι σημαντικές. Οι απώλειες βροχής συμβολίζονται με L_{rain} . [39]

4.5.4 Απώλειες λόγω αποπόλωσης (L_{DEPOL})

Οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και κυρίως η βροχή δημιουργεί αποπόλωση στο μεταδιδόμενο σήμα. Κατά την μετάδοση του σήματος για συχνότητες άνω των 10 GHz υπό βροχή παρατηρείται το φαινόμενο της αποπόλωσης, καθώς τα δυο κάθετα πολωμένα κύματα που διαδίδονται στην ίδια συχνότητα αποπολώνονται και δημιουργούν πρόβλημα στον δέκτη κατά την διάρκεια της αποδιαμόρφωσης. Οι απώλειες λόγω αποπόλωσης είναι περιορισμένες και συμβολίζονται με L_{DEPOL} .

4.5.5 Απώλειες λόγω ασυμφωνίας πόλωσης (L_{POL})

Οι κεραιές εκπέμπουν και λαμβάνουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μια συγκεκριμένη πόλωση και στην περίπτωση που η πόλωση του λαμβανόμενου σήματος διαφέρει από την πόλωση της κεραιάς λήψης δημιουργούνται απώλειες λόγω ασυμφωνίας πόλωσης. Οι απώλειες αυξάνονται με την αύξηση της γωνίας μεταξύ των πολώσεων κεραιάς-σήματος και στην περίπτωση που μια κεραιά λαμβάνει σήμα σε κάθετη πόλωση σε σχέση με αυτήν που είναι κατασκευασμένη να λαμβάνει τότε δημιουργείται πλήρης απώλεια σήματος. Οι απώλειες λόγω ασυμφωνίας πόλωσης συμβολίζονται με L_{POL} και υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.2

$$L_{POL}(dB) = -20 * \log[\cos(\Psi_p)]$$

Εξίσωση 4.2

Όπου : Ψ_p είναι η γωνία μεταξύ της πόλωσης της κεραιάς και αυτής του λαμβανόμενου σήματος.
[39]

4.5.6 Απώλειες λόγω σκόπευσης

Στην περίπτωση που οι κεραιές εκπομπής και λήψης δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους παρατηρείται μείωση του κέρδους τους σε σχέση με την τιμή στην κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας τους.

Οι απώλειες λόγω σκόπευσης υπολογίζονται από την Εξίσωση 4.3 :

$$L_t(dB) = 12 * \left(\frac{\theta_t}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

$$L_r(dB) = 12 * \left(\frac{\theta_r}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

Εξίσωση 4.3

Όπου :

θ_t είναι το γωνιακό σφάλμα σκόπευσης στην κεραιά πομπού,

θ_0 είναι το γωνιακό σφάλμα σκόπευσης στην κεραία δέκτη,

θ_{3dB} είναι η γωνία ημίσεως ισχύος της κεραίας λήψης.

Στα επίγεια συστήματα λήψης, κυρίως στα πιο αυτοματοποιημένα, υπάρχει συνεχής έλεγχος της τροχιάς του δορυφορικού αναμεταδότη, έτσι ώστε να γίνεται αναπροσαρμογή της κατεύθυνσης της κεραίας, για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σκόπευσης. Ακόμη και στα συστήματα, όπου δεν διατίθεται σύστημα αυτόματης σκόπευσης, ο σωστός προσανατολισμός μεταξύ των δύο κεραιών επιτυγχάνεται εύκολα. Για αυτούς τους λόγους, οι απώλειες σκόπευσης στα δορυφορικά συστήματα λήψης είναι ασήμαντες. [39]

4.5.7 Απώλειες λόγω ανωμαλιών της επιφάνειας κατόπτρου

Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στο κάτοπτρο δημιουργείται σκέδαση λόγω της επιφάνειας του κατόπτρου όπου δεν είναι πλήρως λεία επιφάνεια. Αυτό έχει ως συνέπεια να έχουμε απώλειες και υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση :

$$L_a(dB) = 10 * \log\left[\left(e^{\left(\frac{-4\pi\sigma}{\lambda}\right)}\right)^2\right]$$

Εξίσωση 4.4:

Όπου :

σ είναι η μέση τετραγωνική τιμή των επιφανειακών ανωμαλιών του κατόπτρου.

λ είναι το μήκος κύματος

Στα σύγχρονα συστήματα περιορίζονται οι απώλειες επειδή η κατασκευή των κατόπτρων έχει εξελιχθεί, τόσο ως προς την εξομάλυνση των επιφανειών τους όσο και ως προς τα υλικά κατασκευής τους [39].

4.5.8 Εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής και του συστήματος λήψης

Οι απώλειες που δημιουργούνται στο σήμα μεταξύ της εξόδου και του πομπού και της εισόδου της κεραίας ονομάζονται απώλειες του συστήματος εκπομπής και συμβολίζονται L_{TX} . Οι απώλειες που δημιουργούνται μεταξύ της εξόδου της κεραίας λήψης και του δέκτη ονομάζονται απώλειες του συστήματος λήψης και συμβολίζονται L_{RX} . Οι αναφερθέν απώλειες οφείλονται σε καλωδιώσεις, φίλτρα κ.α. [39]

4.5.9 Υπολογισμός συνολικών απωλειών διάδοσης

Οι συνολικές απώλειες διάδοσης που υφίσταται το εκπεμπόμενο σήμα υπολογίζονται από την Εξίσωση 4.5

$$L_{DL}(dB) = L_{TX} + L_T + L_t + L_{FSL} + L_A + L_{DEPOL} + L_{POL} + L_{rain} + L_r + 2 * L_a + L_{RX}$$

Εξίσωση 4.5:

όπου:

L_{TX} είναι οι εσωτερικές απώλειες του συστήματος εκπομπής (σε dB),

L_T είναι οι απώλειες σκόπευσης της κεραίας εκπομπής (σε dB),

L_{FSL} είναι οι απώλειες του ελεύθερου χώρου (σε dB),

L_A είναι οι απώλειες της ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας (σε dB),

L_{DEPOL} είναι οι απώλειες εξαιτίας αποπόλωσης (σε dB),

L_{POL} είναι οι απώλειες εξαιτίας ασυμφωνίας πόλωσης (σε dB),

L_{rain} είναι οι απώλειες βροχής (σε dB),

L_r είναι οι απώλειες σκόπευσης της κεραίας λήψης (σε dB),

L_a είναι οι απώλειες εξαιτίας ανωμαλιών της επιφάνειας του κατόπτρου (σε dB),

L_{RX} είναι οι εσωτερικές απώλειες του συστήματος λήψης (σε dB).

Επίσης έχουμε απώλειες από τις τοπικές επιδράσεις, είναι οι επιδράσεις μεταξύ των ραδιοκυμάτων και χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος που βρίσκονται κοντά στον δορυφορικό σταθμό εδάφους (δέντρα, κτήρια, έδαφος κλπ.) οι οποίες προκαλούν υποβάθμιση της διάδοσης στην κινητή δορυφορική διάδοση. Οι επιδράσεις αυτές αλληλοεπιδρούν με τη διάδοση των κυμάτων μέσω των ακόλουθων μηχανισμών : ανάκλασης, σκέδασης, περίθλασης και των πολλαπλών διαδρομών. [39]

4.6 Βασικοί όροι για τον υπολογισμό Link Budget

Θα γίνει μια αναφορά στους βασικούς όρους για τον υπολογισμό Link Budget ώστε στο επόμενο κεφάλαιο να υπολογίσουμε το Link Budget για συστήματα LEO και GEO για χρήση NB-IoT.

- Λαμβανόμενη ισχύ : P_r

Πρόσθετες απώλειες σημειώνονται σε οποιαδήποτε σύνδεση ασύρματης επικοινωνίας, και αυτές οι απώλειες μπορούν να συμπεριληφθούν στην Εξίσωση 4.6

$$P_r = \frac{P_t G_{TX} G_{RX}}{L_{FSL} L_a L_{ta} L_{ra} L_{pol} L_{other} L_r}, [watts]$$

Εξίσωση 4.6:

Όπου :

- P_t : Εκπεμπόμενη ισχύς [dBW]
- G_{TX} : Κέρδος της κεραίας εκπομπής [dBi]
- G_{RX} : Κέρδος της κεραίας λήψης [dBi]
- $L_{FSL} (dB) = 32.45 + 20 * \log(R_{KM}) + 20 * \log(F_{MHZ})$

- L_a : Απώλειες της ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας [dB]
- L_{ta} : Απώλειες που σχετίζονται με την κεραία μετάδοσης: Ωμικές απώλειες και ανάκλαση [dB]
- L_{ra} : Απώλειες που σχετίζονται με την κεραία λήψης: Ωμικές απώλειες και ανάκλαση [dB]
- L_{POL} είναι οι απώλειες εξαιτίας ασυμφωνίας πόλωσης [dB]
- L_{other} : Οποιαδήποτε άλλη γνωστή απώλεια [dB]
- L_r : Πρόσθετες απώλειες στον δέκτη (μετά την λήψη της κεραίας).

Υπολογισμός ενεργού ιστροπικής ακτινοβολούμενης ισχύς

$$EIRP[dBm] = P_t[dBm] + G_{TX}[dBi]$$

Εξίσωση 4.7

Αυτή είναι η πραγματική ισχύς που εκπέμπεται από τη κεραία του πομπού λαμβάνοντας υπόψη το κέρδος και την ισχύ εισόδου.

$$P_T = P_{out} - L_T$$

Όπου :

- P_{out} : Εκπεμπόμενη ισχύς εξόδου του ενισχυτή
- L_T : Απώλειες τροφοδοσίας

Στην συνέχεια είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η συνολική ισχύς που λαμβάνεται στον επίγειο δέκτη με τον οποίο μπορεί να εκτελεστεί η περαιτέρω επεξεργασία.

$$P_r = EIRP + G_{RX} - Losses [dBm]$$

Εξίσωση 4.8

$$Losses = L_{FSL} + \text{λοιπές απώλειες}$$

Η ισχύς λήψης: P_r αναφέρεται συνήθως ως ισχύς μεταφοράς C , η οποία μετράτε στην είσοδο του ενισχυτή χαμηλού θορύβου του δέκτη (LNA).

Η κύρια πηγή απώλειας σε οποιαδήποτε σύνδεση εδάφους-δορυφόρου είναι ο ελεύθερος χώρος (L_{FSL})

- Συντελεστής θορύβου NF

Ο συντελεστής θορύβου είναι ο λόγος της διαθέσιμης ισχύος θορύβου στην έξοδο του στοιχείου, προς την ισχύ θορύβου στην έξοδο, που παράγεται από μια πηγή στην είσοδο με θερμοκρασία θορύβου $T_0 = 290^\circ \text{K}$.

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε για συστήματα με $NF=3$

Στον παρακάτω Πίνακα 4.3 δίνεται η θερμοκρασία του συστήματος ανάλογα με το NF

Θερμοκρασία Θορύβου (K)	Συντελεστής Θορύβου (dB)	Θερμοκρασία Θορύβου (K)	Συντελεστής Θορύβου (dB)
0	0	400	3.8
20	0.29	600	4.9
40	0.56	800	5.8
60	0.82	1000	6.5
80	1.06	1500	7.9

100	1.29	2000	9.0
120	1.50	3000	10.5
150	1.81	4000	11.7
200	2.28	5000	12.6
290	3.0	10000	15.5

Πίνακας 4.3: Θερμοκρασία συστήματος ανάλογα με το NF

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

Ο όρος G/T αναφέρεται στην αναλογία μεταξύ του κέρδους της κεραίας του δέκτη και της θερμοκρασίας του θορύβου και υπολογίζεται :

$$G/T = G_{rx} - T_s [dBk^{-1}]$$

Εξίσωση 4.9

- Υπολογισμός Receiver power to Noise Ratio [Pr/No]

Ο λαμβανόμενος λόγος ισχύος / θορύβου θα πρέπει να έχει τη βέλτιστη τιμή έτσι ώστε τα δεδομένα που μεταδίδονται να είναι προσβάσιμα στον επίγειο δέκτη

$$P_R/N_o = EIRP + G/T - Losses - K$$

Εξίσωση 4.10

$$K = 10 * \log(1,38 * 10^{-23})$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [Eb/No]

Αυτός ο υπολογισμός παράγει τον λόγο ενέργειας ανά bit προς θόρυβο, ο οποίος είναι ακριβώς διαθέσιμος που αντιστοιχεί σε όλους τους παραπάνω θεωρητικούς υπολογισμούς.

$$E_b/N_o = P_R/N_o - R$$

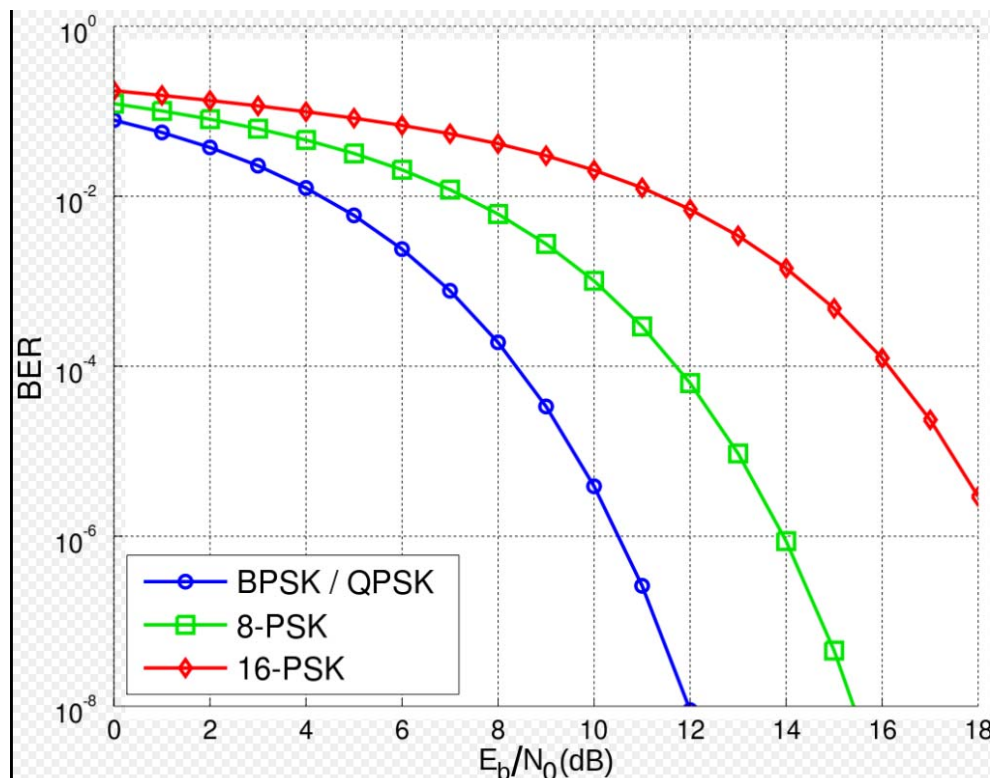
Εξίσωση 4.11

Όπου R ο ρυθμός δεδομένων

- Απαιτούμενο Energy to noise ratio [Eb/No]

Κάθε επικοινωνία δεδομένων απαιτεί κάποια τιμή [Eb / No] με την οποία η επικοινωνία μπορεί να γίνει αποτελεσματική. Το απαιτούμενο [Eb / No] μπορεί να υπολογιστεί από το Bit Error Rate της τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Για το NB-IoT χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης QPSK και το μέγιστο επιτρεπόμενο BER είναι 10^{-6}

$$BER = Q \sqrt{2 * \frac{E_B}{N_o}}$$



Σχήμα 4.4: Απαιτούμενο Eb/No ανά σχήμα διαμόρφωσης [49]

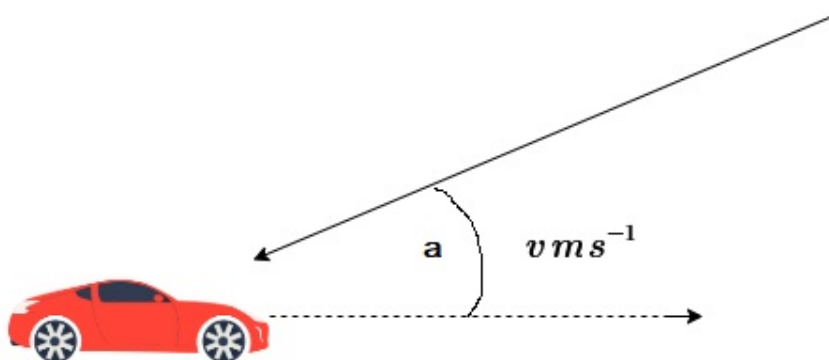
[46,47,48,54]

- Το περιθώριο ζεύξης

Το περιθώριο ζεύξης είναι απλά η διαφορά μεταξύ του διαθέσιμου και το απαιτούμενο Eb / No. Η τιμή πρέπει να είναι θετική και από 3 και πάνω για βέλτιστη απόδοση. [47]

4.7 Φαινόμενο Doppler

Όταν ο δέκτης λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα και υπάρχει μετακίνηση στην θέση του πομπού ή του δέκτη έχει ως αποτέλεσμα μια φαινομενική αύξηση της φέρουσας συχνότητα. [01] Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ένα χρήστης όπου μιλάει στο κινητό και βρίσκεται εν ώρα κίνησης με το αυτοκίνητο σε μια ευθεία γραμμή και με ταχύτητα v .



Σχήμα 4.5: Doppler shift

Παρατηρούμε ότι η κίνηση του οχήματος δημιουργεί μια γωνία α ως προς την κατεύθυνση ενός λαμβανόμενου σήματος με συχνότητα f όπου ο πομπός, ο σταθμός βάσης είναι σταθερός. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται το φαινόμενο Doppler δηλ υπάρχει μετατόπιση της συχνότητας του λαμβανόμενου σήματος, όπως παρατηρείται από το κινητό, με έναν συντελεστή ανάλογο ως προς τη συνιστώσα της ταχύτητας του κινητού προς την κατεύθυνση του σήματος. Στην περίπτωση όπου το κινητό κινείται ως προς το σημείο εκπομπής του κύματος, η συχνότητα αυξάνεται, ενώ μειώνεται όσο απομακρύνεται από το σημείο εκπομπής. Αυτό συμβαίνει διότι το κινητό διαπερνά τα κυματικά μετώπα του λαμβανόμενου κύματος με διαφορετικό ρυθμό σε σχέση αν ήταν στάσιμο.[38]

Η μετατόπιση της συχνότητας, η μετατόπιση Doppler (Doppler shift), f_d δίνεται από την εξίσωση 4.12:

$$f_d = f_c * \frac{v}{c}$$

Εξίσωση 4.12

Όπου :

f_c είναι η φέρουσα συχνότητα εκπομπής

v είναι η ταχύτητα που κινείται το κινητό

c είναι η ταχύτητα φωτός

Οι γεωστατικοί δορυφόροι φαίνονται να είναι σταθεροί ως προς τον ουρανό επειδή η περίοδος τους είναι ίση με της γης. Οπότε ένας τερματικός επίγειος σταθμός βλέπει τον δορυφόρο ακίνητο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το φαινόμενο Doppler είναι συνήθως μηδενικό. Στην περίπτωση όμως των δορυφόρων με χαμηλή τροχιά ένας τερματικός σταθμός βλέπει τον δορυφόρο σε σχετική κίνηση. Λόγω της κίνησης όπου συχνά είναι μεγάλη παρατηρείται το φαινόμενο doppler όπου περιγράψαμε παραπάνω. Όσο ο δορυφόρος κινείται σε σχέση με τον επίγειο τερματικό σταθμό, η συχνότητα του πομπού μεταβάλλεται σε σχέση με τον δέκτη του επίγειου τερματικού σταθμού. Η συχνότητα αυξάνεται όσο ο δορυφόρος πλησιάζει το επίγειο τερματικό σταθμό και μειώνεται όσο ο δορυφόρος απομακρύνεται από αυτόν. [3] Στις χαμηλές τροχιές Γης (LEO), η ταχύτητα προσέγγισης ενός δορυφόρου από τον σταθμό βάσης μπορεί να είναι κοντά στη ταχύτητα της τροχιάς του (>8 km/s), επομένως η μετατόπιση Doppler παίζει ένα σημαντικό ρόλο. Σύμφωνα με τους νόμους της μηχανικής των τροχιών, μπορεί να γενικευτεί ότι οι μετατοπίσεις Doppler είναι λιγότερο σημαντικές για δορυφόρους σε μεγαλύτερα υψόμετρα, επειδή η ταχύτητα της τροχιάς τους είναι χαμηλότερη.

Η μετατόπιση Doppler (Doppler Shift) είναι ένας παράγοντας όπου πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την σχεδίαση των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων για τους εξής λόγους :

- 1) Για την αντιμετώπιση της δυσκολίας του δέκτη να εντοπίσει την συχνότητα
- 2) Για την εξάλειψη της συχνότητας Doppler από τη συχνότητα του επίγειου σταθμού και του δορυφορικού αναμεταδότη.

3) Για την εκτίμηση της συχνότητα κάτω ζεύξης downlink, στην περίπτωση που οι συχνότητες των τοπικών ταλαντωτών του επίγειου σταθμού εκπομπής όσο και του δορυφορικού αναμεταδότη είναι γνωστές. [39]

Κεφάλαιο 5

Χρήση δορυφόρου για επικοινωνίες IoT με έμφαση στο NB-IoT

Ο σκοπός του IoT είναι να παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο σε οποιαδήποτε συσκευή που διαθέτει πομποδέκτη κάθε στιγμή και σε κάθε μέρος. Ωστόσο υπάρχουν περιοχές όπου το επίγειο δίκτυο δεν μπορεί να καλύψει ορισμένες απομακρυσμένες περιοχές όπως για παράδειγμα έρημος, παράκτιες περιοχές. Η χρήση των δορυφορικών επικοινωνιών για το IoT μπορεί να παρέχει λύση στο πρόβλημα κάλυψης που αναφέραμε.

Οι πιθανές ανάγκες κατασκευής δορυφορικού συστήματος IoT δίνονται παρακάτω :

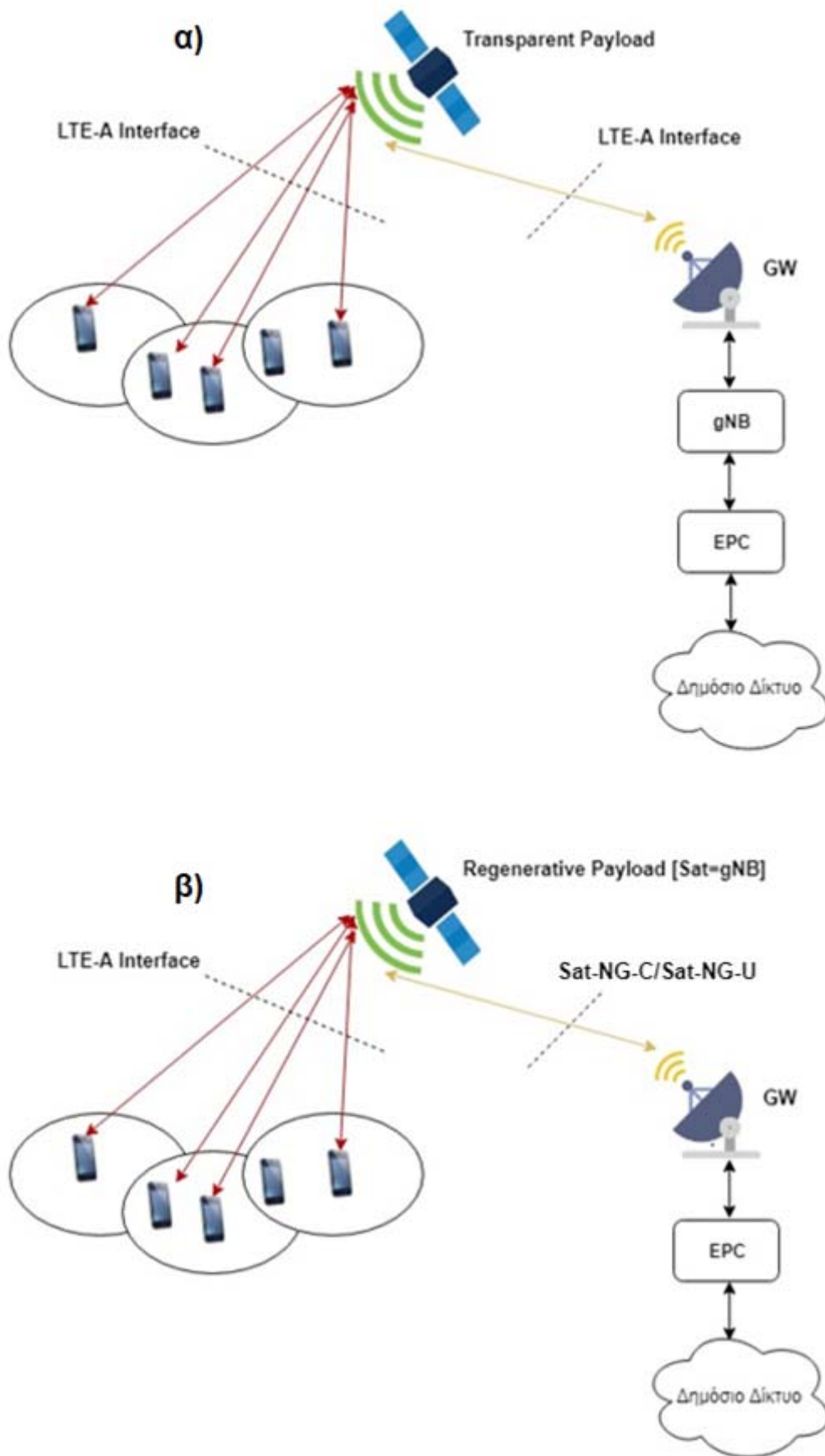
- Πρώτον οι ακραίες τοπογραφίες όπως γκρεμός, κοιλάδα, και απότομη κλίση, είναι περιοχές όπου γεωλογικές καταστροφές είναι πιο εύκολο να συμβούν ενώ τα επίγεια δίκτυα δεν μπορούν να υλοποιηθούν λόγω τεχνικών δυσκολιών. Τα δορυφορικά συστήματα IoT μπορούν να παρέχουν μια σημαντική κάλυψη στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα.
- Για τις εφαρμογές IoT σε απομακρυσμένες περιοχές, τα δορυφορικά συστήματα παρέχουν μια οικονομική καθώς και αποδοτική λύση με εκτίμηση σε άλλες επίγειες τεχνολογίες στην διασύνδεση τους και στην επικοινωνία με τον υπόλοιπο κόσμο.
- Για τα επίγεια IoT δίκτυα, όπου εξαρτούνται κυρίως από ασύρματη πρόσβαση, είναι απαραίτητο ένα ασύρματο σύστημα που περιέχει αρκετούς σταθμούς βάσης.

Ωστόσο η κατασκευή επίγειων σταθμών βάσης και συνδέσεις δικτύου αντιμετωπίζει αρκετούς περιορισμούς. Για παράδειγμα επίγειες επικοινωνιακές υποδομές είναι ευάλωτες σε φυσικές καταστροφές όπως σεισμό και πλημμύρες και μπορεί να υποστούν ζημιές. Εν το μεταξύ τα επίγεια IoT συστήματα μπορούν να παρέχουν αποτελεσματική κάλυψη σε σχετικά μικρό εύρος (Αυτή την στιγμή επίγεια ασύρματα συστήματα μπορούν να καλύπτουν το 20% της επικράτειας της Κίνας και Αμερικής).

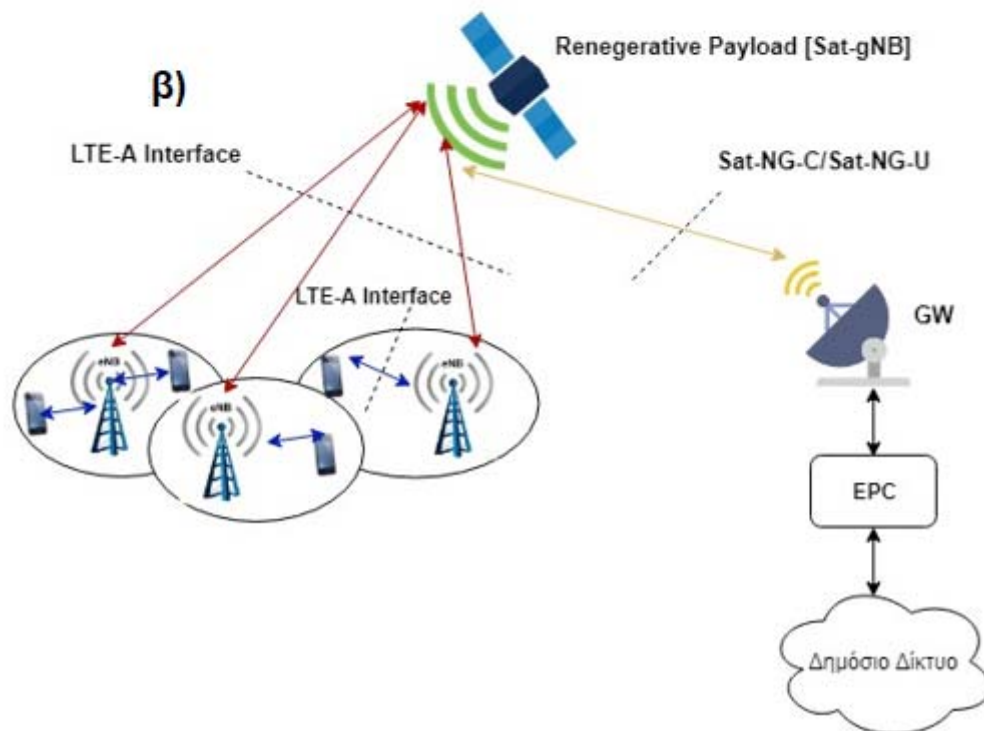
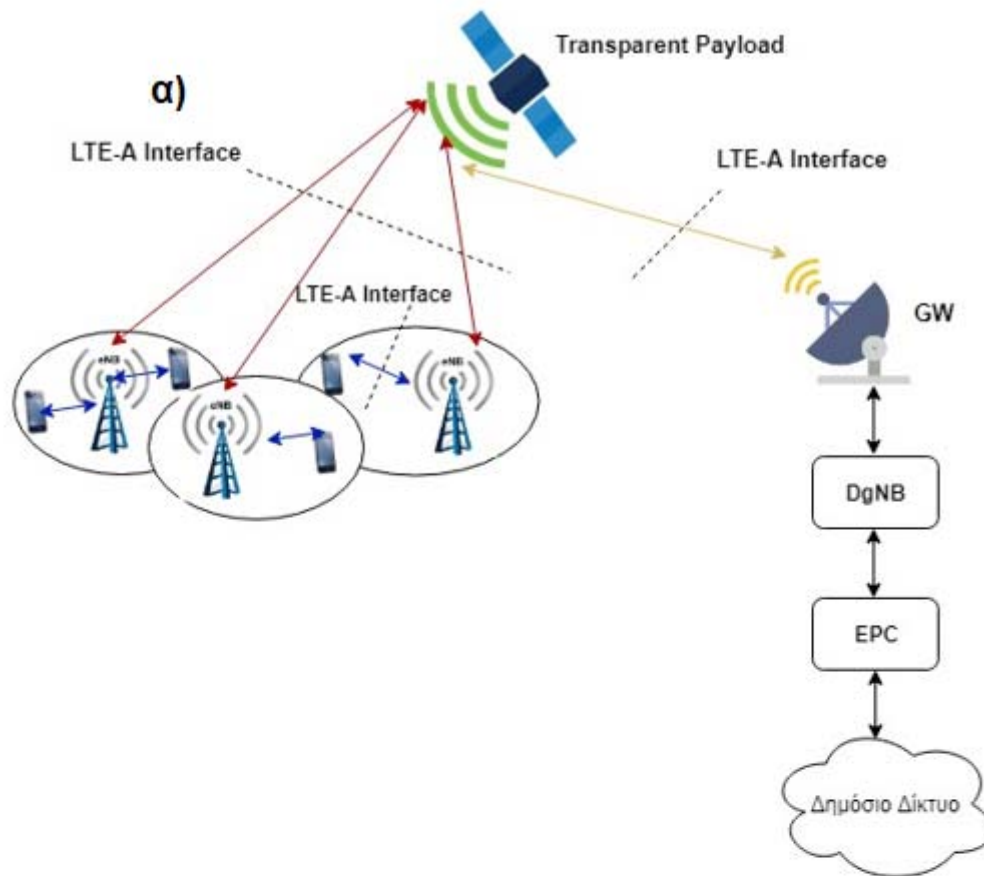
Ως συμπλήρωμα και επέκταση των επίγειων IoT συστημάτων, τα δορυφορικά IoT συστήματα είναι μοναδική προσέγγιση ώστε να επιτευχθεί παγκόσμια κάλυψη IoT υπηρεσιών. Η παγκόσμια αγορά δορυφορικών υπηρεσιών IoT πρόκειται να φθάσει τα 1,7 δισεκατομμύρια δολάρια το 2017 και θα επεκταθεί γρήγορα τα επόμενα χρόνια. [42]

5.1 Αρχιτεκτονικές Δορυφορικών Υπηρεσιών IoT

Οι αρχιτεκτονικές δορυφορικών υπηρεσιών IoT για την 3GPP μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τύπο του δορυφορικού ωφέλιμου φορτίου, αν είναι διαφανές ή αναγεννητικό και τον τύπο πρόσβασης του συνδέσμου του χρήστη όπως άμεσα ή διαμέσου επί εδάφους κόμβου προώθησης (RN) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1: Επιλογές αρχιτεκτονικής με σύνδεσμο χρήστη άμεσης πρόσβασης



Σχήμα 5.2: Επιλογές αρχιτεκτονικής με κόμβους προώθησης που παρέχουν σύνδεση πρόσβασης χρήστη.

Στις επιλογές άμεσης πρόσβασης ο σύνδεσμος πρόσβασης χρήστη εμπλέκει άμεσα τους δορυφόρους και τις κινητές συσκευές εδάφους (UE's) μέσω της RF διεπαφής αέρα LTE-A και στο άμεσο μέλλον μέσω της νέας διεπαφής αέρα (NR) για τα δίκτυα 5G. Όσο για τον σύνδεσμο τροφοδοσίας, η διεπαφή αέρα για να εφαρμοστεί εξαρτάται από τον τύπο του δορυφορικού ωφέλιμου φορτίου. Στην περίπτωση της εφαρμογής του διάφανου δορυφόρου, όπως στην Αρχιτεκτονική 5.1α, το σύστημα gNB(s) είναι τοποθετημένο στην Πύλη (GW) παρέχοντας τη σύνδεση προς το δίκτυο κορμού EPC (και μελλοντικά στο δίκτυο κορμού νέας γενιάς NGC για το δίκτυο 5g) και το δίκτυο δημόσιων δεδομένων. [50]

Στην περίπτωση που έχουμε ένα αναγεννητικό ωφέλιμο φορτίο, όπως στην Αρχιτεκτονική 5.1β, το gNB εφαρμόζεται στο δορυφόρο, ενώ η GW απλά παρέχει τη σύνδεση προς το EPC και το δίκτυο δημόσιων δεδομένων. Αυτή η αρχιτεκτονική είναι πιο πολύπλοκη και έχει υψηλότερο κόστος, αλλά επίσης επιτρέπει τη σημαντική μείωση των καθυστερήσεων αναπαραγωγής και επομένως, τη διευκόλυνση των τροποποιήσεων (αν υπάρχουν) που μπορεί να χρειαστούν στις LTE-A PHY και MAC διαδικασίες, οι οποίες μπορεί άμεσα να τερματιστούν στην on-board gNB αντί να απαιτηθεί να προχωρήσουν στην GW. Ο σύνδεσμος μεταξύ των gNB και EPC μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε κατάλληλη διεπαφή αέρα, πχ την SoA DVB-S2X διεπαφή αέρα [34], ή μία προσαρμοσμένη παραλλαγή της LTE-A διεπαφής αέρα μεταξύ gNB και EPC, πχ NG-C ή NG-U. Παρακάτω, αυτή η γενική διεπαφή αέρα αποκαλείται Sat-NG-C/Sat-NG-U, για τον έλεγχο και την επίπεδη πληροφορία χρήστη, αντίστοιχα. Είναι επίσης χρήσιμο να σημειώσουμε ότι τα NR συστήματα προβλέπουν την εφαρμογή του λειτουργικού διαχωρισμού στη gNB. Συγκεκριμένα, τα χαμηλότερα gNB στρώματα (αντίστοιχα, έως το στρώμα 3) μπορούν να εφαρμοστούν σε μία διανεμημένη μονάδα (gNB-DU), όπου στην περίπτωσή μας θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στο δορυφόρο, ενώ τα άλλα στρώματα μπορούν να εφαρμοστούν σε μία κεντρική μονάδα (gNB-CU), που θα μπορούσε να τοποθετηθεί στο σύστημα GW όπως στην Αρχιτεκτονική 5.1α. Η διεπαφή αέρα μεταξύ κεντρικών και διανεμημένων μονάδων ενός gNB είναι χ1 διεπαφή αέρα και οι τωρινές 3GPP προδιαγραφές δίνουν έμφαση στο ότι πρόκειται για μία ανοιχτή διεπαφή αέρα, αρκεί να είναι εγγυημένες συγκεκριμένες λειτουργίες σήματος. Επομένως, η διεπαφή αέρα μεταξύ ενός gNB-DU στο δορυφόρο και του ανταποκρινόμενου gNB-CU στην GW μπορεί να εφαρμοστεί μέσω των υπαρκτών SatCom στάνταρ, όπως, για παράδειγμα, DVB-RCS(2) [51], ή DVB-S2X [52].

Στις αρχιτεκτονικές 5.2α και 5.2β, ο σύνδεσμος πρόσβασης χρήστη παρέχεται από επί εδάφους Κόμβους Προώθησης, στους οποίους η backhaul σύνδεση εγγυάται από το δορυφόρο/τους

δορυφόρους, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Οι NR Κόμβοι Προώθησης και οι σχετικές διεπαφές αέρα υπόκεινται ακόμα στον ορισμό εντός του 3GPP. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι θα έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των LTE RNs. Με βάση αυτήν την υπόθεση, οι παρακάτω απόψεις αρχιτεκτονικής και λειτουργίας θα αναλυθούν:

- Το RN είναι συνδεδεμένο με ένα δέκτη gNB (DgNB), που παρέχει τη σύνδεση προς το EPC
- Το RN μπορεί να τερματίσει διαδικασίες και διεπαφές αέρα έως το στρώμα 3
- Η διεπαφή αέρα στο σύνδεσμο πρόσβασης χρήστη (RN-UE) είναι μία κανονική NR διεπαφή αέρα
- Η διεπαφή αέρα στο backhaul σύνδεσμο (RN-DgNB) είναι μία τροποποιημένη παραλλαγή της NR διεπαφής αέρα, για την οποία, ωστόσο, οι μόνες διαφορές είναι σε κάποια χαρακτηριστικά RF συχνοτήτων και ελάχιστες απαιτήσεις απόδοσης.

Με βάση αυτές τις υποθέσεις, το RN βασικά δρα ως ένα παραδοσιακό UE από την οπτική γωνία του DgNB, και θεωρείται ως ένα παραδοσιακό gNB από τα UEs μέσα στην κάλυψή του. Η διεπαφή αέρα και στις δύο περιπτώσεις πρόσβασης χρήστη (RNUEs) και backhaul (RN-DgNB) συνδέσεων είναι η NR διεπαφή αέρα. Αυτή η αρχιτεκτονική είναι σαφώς πιο πολύπλοκη όσον αφορά στα σενάρια άμεσης πρόσβασης λόγω της εισαγωγής ενός συγκεκριμένου αριθμού N από RNs, που μπορεί να χειρίζεται από τα M DgNBs με $N \geq M$, το οποίο επίσης αυξάνει το συνολικό κόστος συστήματος. Ωστόσο, εφόσον, τα RNs είναι ισοδύναμα με τα gNBs από την οπτική των χρηστών, ο σύνδεσμος πρόσβασης χρήστη είναι τώρα ένας παραδοσιακός επίγειος σύνδεσμος για τον οποίο δε χρειάζονται καθόλου τροποποιήσεις. Το αντίκτυπο των συνηθισμένων προβλημάτων ενός δορυφορικού καναλιού πρέπει επομένως να εκτιμηθεί μόνο για τον backhaul σύνδεσμο, αφού εφαρμόζεται μέσω της NR διεπαφής αέρα όπως επισημάνθηκε προηγουμένως. Με αναφορά στο σύνδεσμο τροφοδοσίας μεταξύ δορυφόρου/δορυφόρων και του συστήματος GW, ως προς τα σενάρια άμεσης πρόσβασης, μπορούμε να έχουμε είτε μία NR είτε μία NG-C/NG-U διεπαφή αέρα, ανάλογα με το αν το δορυφορικό ωφέλιμο φορτίο είναι διαφανές ή αναγεννητικό, αντίστοιχα, και εφαρμόζονται οι ίδιες παρατηρήσεις, π.χ. λειτουργικός διαχωρισμός, όπως παρέχεται στις επιλογές 5α,5β. [50]

5.2 NB-IoT διαμέσου δορυφόρου

Σε αυτήν την ενότητα εστιάζουμε στις μαζικές Τύπου Μηχανής Επικοινωνίες (mMTC) και συγκεκριμένα στο NB-IoT δια μέσου δορυφόρου . Για αυτό το σκοπό, υποθέτουμε ότι η αρχιτεκτονική άμεσης πρόσβασης με ωφέλιμο φορτίο διαφανούς δορυφόρου, πχ αρχιτεκτονική επιλογή 5.1α. Η επικοινωνία διαστήματος-εδάφους αντιμετωπίζει πολλαπλές δυσκολίες από την οπτική της διεπαφής αέρα. Απαιτεί ευρεία υποστήριξη κινητικότητας από το eNodeB, όπως σε αυτήν την περίπτωση, το eNodeB κινείται αντί του UE.

5.2.1 Επιλογή ανάπτυξης NB-IoT και συχνότητας δορυφόρου

Το NB-IoT και άλλα κυψελωτά IoT είναι σχεδιασμένα για να συνυπάρχουν και να μοιράζονται μερικώς το ίδιο ποσοστό συχνοτήτων. Σε αυτήν την In-band διάταξη το πακετάρισμα του φάσματος μπορεί να γίνει με την αξιοποίηση της ορθογώνιας φύσης των διαφορετικών σημάτων φορέων και τις ομοιότητες στο radio front-end. Με τον radio front-end αναφερόμαστε για όλα τα κυκλώματα ανάμεσα στην είσοδο της κεραίας του δέκτη μέχρι και τη βαθμίδα του μικτή. Το NB-IoT μπορεί επίσης να διαταχθεί ανεξάρτητα σε standalone ρύθμιση με οποιοδήποτε άλλο δίκτυο ή διανομή συχνοτήτων. Αυτό είναι κρίσιμο για το δίκτυο ως προς τη χωρική του διάταξη. Οι μέθοδοι ανάπτυξης In-band ή guard band και η συνύπαρξη με LTE ή GSM δίκτυο δεν είναι δυνατές λόγω του σημαντικού σφάλματος που προκαλείται από τη μετατόπιση Doppler και τα ζητήματα συγχρονισμού. Κάθε κυψέλη πρέπει να έχει τουλάχιστον 200 kHz εύρος δικτύου περιλαμβανομένου του guard band στις άκρες. Διαφορετικοί δορυφόροι στο σχηματισμό μπορούν να μοιράζονται την ίδια κατανομή συχνοτήτων αν το αποτύπωμα των δορυφόρων στο έδαφος δεν επικαλύπτεται.

Οι δυνατότητες συνδέσμου ασύρματης επικοινωνίας εξαρτώνται από την επιλεγμένη δέσμη συχνοτήτων και το διαθέσιμο φάσμα με πολλούς τρόπους. Γενικά, λόγω της καλύτερης διάθεσης μεγαλύτερων ευρών φάσματος, υψηλές δέσμες από 2 ως 7 GHz όπως S, C, Ku, Ka-δέσμες, προτιμώνται στην επικοινωνία εδάφους-διαστήματος. Παρόλο που η χρήση αυτών των δεσμών απαιτεί κεραίες με μεγάλη κατευθυντικότητα λόγω της αύξησης της απώλειας ελεύθερου χώρου όπου μεγάλες υψηλής δυνατότητας κατευθυντικές κεραίες μπορεί να είναι προβληματικές για πολλές εφαρμογές κινητής. Οι IoT εφαρμογές είναι περιορισμένου μεγέθους και δεν είναι ικανές να έχουν κατευθυντική κεραία.

Η μπάντα S, 2170–2200 MHz για την κάτω ζεύξη και 1980–2010 MHz για την άνω ζεύξη είναι πιο κατάλληλες για επικοινωνία NB-IoT. Η υψηλή ζήτηση για τις δέσμες συχνοτήτων και την παγκόσμια κάλυψη της δορυφορικής υπηρεσίας μπορεί να κάνει την παραχώρηση άδειας δύσκολη. Η δέσμη συχνότητας επηρεάζει σημαντικά τόσο την μετατόπιση Doppler μεταξύ διαφορετικών χρηστών, όσο στενότερο το πακέτο στον τομέα συχνοτήτων, οπότε ευνοείται η χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων.

Για το συγκεκριμένο σύστημα η κύρια απώλεια διάδοσης είναι η απώλεια ελευθέρου χώρου. Για την πάντα S οι απώλειες ιονόσφαιρας και τροπόσφαιρας L_A , οι απώλειες αποπόλωσης L_{DEPOL} , οι απώλειες ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων είναι αμελητέες.

5.2.2 Υπολογισμός Link Budget

Στην ενότητα 4.7 έγινε αναφορά για τους βασικούς όρους για τον υπολογισμό του Link Budget. Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει υπολογισμός Link Budget για συστήματα LEO και GEO. Για όλα τα συστήματα παρέχουμε τους ακόλουθους όρους και απαιτήσεις. [48]

- Για την κάτω ζεύξη χρησιμοποιείται ένα PRB που διαθέτει 12 υποφέρουσες με εύρος 15 KHz (OFDMA)
- Για την άνω ζεύξη χρησιμοποιούνται υποφέρουσες 3,75 KHz ή 15 KHz. Γίνεται επιλογή υποφερουσών 3,75 kHz ώστε να είναι ικανοποιητική η ζεύξη.
- Για το NB-IoT χρησιμοποιείται η τεχνική διαμόρφωσης QPSK και το μέγιστο επιτρεπόμενο BER είναι 10^{-6}

Στην άνω ζεύξη, θεωρούμε ότι ο μοναδικός τόνος ισοδυναμεί με έναν μόνο φορέα για να είναι ικανοποιητική η ζεύξη.

- Απαιτήσεις Data Rate: Για το uplink 20kb/s και για το downlink 250 kb/s σε 180 KHz.
- Περιθώρια διάδοσης: Υπολογίζουμε με συνθήκες Clear Line of Sight (CLOS)
- Εύρος ζώνης Uplink : 3,75 kHz

- Ελάχιστη γωνία ανύψωσης: 5 °
- NF=3

5.2.2.1 Περίπτωση δορυφόρων LEO στα 600 χλμ

Στον Πίνακα 5.2 δίνεται ο υπολογισμός για την περίπτωση δορυφόρων LEO στα 600 χλμ για την κάτω ζεύξη.

Link Budget LEO 600km Downlink		
Χαρακτηριστικά μετάδοσης		
Συχνότητα [MHz]	2170	
Εύρος καναλιού [KHz]	15	
Ρυθμός Δεδομένων [kbit/s]	250	
Διαμόρφωση	QPSK	
Bit Error Rate	10 ⁻⁶	
Eb/No (Απαιτούμενο)	11.3	
Ισχύς Εκπομπής [dBm]	27	
Κέρδος κεραίας εκπομπής [dBi]	5	
EIRP [dBm]	32	
Απώλειες διάδοσης (Μέγιστες τιμές)		
Ατμοσφαιρική απώλεια [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω βροχής [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω ομίχλης [dB]	0.03	
Απώλεια λόγω χιονιού [dB]	0.01	
Ατμοσφαιρική Ανάκλαση [dB]	0.2	
Απώλεια Ιονόσφαιρας [dB]	0.6	
Απώλεια πόλωσης [dB]	0.3	
=	1.34	
Απώλεια Ελευθέρου χώρου [dB]	600km=154,48	2329km=166,26
Συνολικές απώλειες [dB]	600km=155.83	2329km=167.6
Χαρακτηριστικά Δέκτη UE		

Κέρδος κεραίας [dBi]	0	
Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]	600km=-123.82	2329km=-135.6
Συντελεστής Θορύβου [dB]	3	
Θερμοκρασία Θορύβου [°K]	289	
G/T [dBk ⁻¹]	-24.6	
Pr/No [dBHz]	600km=80.17	2329km=68.4
Eb/No (Διαθέσιμο)	600km=26.19	2329km=14.41
Link Margin	14.89	3.11

Πίνακας 5.2: Υπολογισμός Link Budget LEO 600km Downlink

- Υπολογισμός ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς [EIRP]

$$P_t = 27dBm, \quad G_t = 5dBi, \quad L_t = 0dB$$

$$EIRP = P_t + G_t - L_t = 32$$

- Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου χώρου [L_{fs}]

$$R_1 = 600 \text{ Km}, \quad d_{max} = 2329 \text{ Km}, \quad F_d = 2170$$

$$L_{fsl}(R_1) = 32.45 + 20 * \log(R_1) + 20 * \log(F_d) = 154.48dB$$

$$L_{fsl}(d_{max}) = 32.45 + 20 * \log(d_{max}) + 20 * \log(F_d) = 166.26dB$$

- Υπολογισμός Συνολικών απωλειών διάδοσης [L_{total}]

$$\text{Λοιπες Απώλειες} = 1.34$$

$$L_{total}(R_1) = L_{fsl}(R_1) + 1.34 = 155.87 \text{ dB}$$

$$L_{total}(d_{max}) = L_{fsl}(d_{max}) + 1.34 = 167.6 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Λαμβανόμενης ισχύς [P_r]

$$EIRP = 32dBm$$

$$G_r = 0$$

$$P_r(R_1) = EIRP(dBw) + G_r - L_{total}(R_1) = -123.82 \text{ dBm}$$

$$P_r(R_2) = EIRP(dBw) + G_r - L_{total}(d_{max}) = -135.6 \text{ dBm}$$

- Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Δέκτη [N]

$$T_{ref} = 290, NF = 3$$

$$T_s = T_{ref} * (10^{NF/10} - 1) = 289$$

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

$$Gr = 0, \quad Ts = 89$$

$$G/T = Gr - 10 * \log(Ts) = -24.6 \text{ dBK}^{-1}$$

- Υπολογισμός Receiver power to Noise Ratio [Pr/No]

$$k = 1.38 * 10^{-23} = -228.60 \text{ dB}$$

$$Pr/No(R1) = EIRP + G/T - L_{total}(R1) - k(\text{dB}) = 80.17 \text{ dBHz}$$

$$Pr/No(dmax) = EIRP + G/T - L_{total}(dmax) - k(\text{dB}) = 68.4 \text{ dBHz}$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [Eb/No]

$$BitRate/s = 250 * 10^3$$

$$R = 10 * \log(BitRate/s) = 53.98$$

$$Eb/No(R1) = C/No(R1) - R = 26.19$$

$$Eb/No(R2) = C/No(dmax) - R = 14.4$$

- Υπολογισμός Link Margin

$$Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} = 11.3$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (R1) = 14.89 \text{ dB}$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (dmax) = 3.11 \text{ dB}$$

Στον Πίνακα 5.3 δίνεται ο υπολογισμός για την περίπτωση δορυφόρων LEO στα 600 χλμ για την άνω ζεύξη.

Link Budget LEO 600km Uplink Single Tone	
Χαρακτηριστικά μετάδοσης UE	
Συχνότητα [MHz]	1980
Εύρος καναλιού [KHz]	3.75
Ρυθμός Δεδομένων [kbit/s]	20
Διαμόρφωση	QPSK
Bit Error Rate	10^{-6}
Eb/No (Απαιτούμενο)	5.7
Ισχύς Εκπομπής [dBm]	23
Κέρδος κεραίας εκπομπής [dBi]	0

EIRP [dBm]	23	
Απώλειες διάδοσης (Μέγιστες τιμές)		
Ατμοσφαιρική απώλεια [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω βροχής [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω ομίχλης [dB]	0.03	
Απώλεια λόγω χιονιού [dB]	0.01	
Ατμοσφαιρική Ανάκλαση [dB]	0.2	
Απώλεια Ιονόσφαιρας [dB]	0.6	
Απώλεια πόλωσης [dB]	0.3	
=	1.34	
Απώλεια Ελευθέρου χώρου [dB]	600km=153,94	2329km=165.73
Συνολικές απώλειες [dB]	600km=155.29	2329km=167
Χαρακτηριστικά Δέκτη Δορυφόρου		
Κέρδος κεραίας [dBi]	0	
Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]	600km=-127.28	2329km=-139
Συντελεστής Θορύβου [dB]	3	
Θερμοκρασία Θορύβου [°K]	289	
G/T [dBk ⁻¹]	-19.6	
Pr/No [dBHz]	600km=76.71	2329km=64.93
Eb/No (Διαθέσιμο)	600km=33.7	2329km=22
Link Margin	28	16.2

Πίνακας 5.3: Link Budget LEO 600km Uplink Single Tone

- Υπολογισμός ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς [EIRP]

$$P_t = 23dBm, \quad G_t = 0dBi, \quad L_t = 0dB$$

$$EIRP = P_t + G_t - L_t = 23$$

- Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου χώρου [L_{fs}]

$$R_1 = 600 \text{ Km}, \quad d_{max} = 2329 \text{ Km}, \quad F_d = 1980\text{GHz}$$

$$L_{fsl}(R_1) = 32.45 + 20 * \log(R_1) + 20 * \log(F_d) = 153.94 \text{ dB}$$

$$L_{fsl}(d_{max}) = 32.45 + 20 * \log(d_{max}) + 20 * \log(F_d) = 165.72 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Συνολικών απωλειών διάδοσης [L_{total}]

$$\text{Λοιπες Απώλειες} = 1.34$$

$$L_{total}(R1) = L_{fsl}(R1) + 1.34 = 155.28dB$$

$$L_{total}(dmax) = L_{fsl}(dmax) + 1.34 = 167.1 dB$$

- Υπολογισμός Λαμβανόμενης ισχύος [Pr]

$$EIRP = 32dBm$$

$$G_r = 0$$

$$Pr(R1) = EIRP(dBw) + G_r - L_{total}(R1) = -127.29 dBm$$

$$Pr(R2) = EIRP(dBw) + G_r - L_{total}(dmax) = -139dBm$$

- Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Δέκτη [N]

$$T_{ref} = 290, NF = 3$$

$$T_s = T_{ref} * (10^{NF/10} - 1) = 289$$

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

$$G_r = 5, \quad T_s = 289$$

$$G/T = G_r - 10 * \log(T_s) = -19.6 dBK^{-1}$$

- Υπολογισμός Receiver power to Noise Ratio [Pr/No]

$$k = 1.38 * 10^{-23} = -228.60dB$$

$$Pr/No(R1) = EIRP + G/T - L_{total}(R1) - k(dB) = 76.71 dBHz$$

$$Pr/No(dmax) = EIRP + G/T - L_{total}(dmax) - k(dB) = 65 dBHz$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [Eb/No]

$$BitRate/s = 20 * 10^3$$

$$R = 10 * \log(BitRate/s) = 43$$

$$Eb/No(R1) = C/No(R1) - R = 33.7$$

$$Eb/No(R2) = C/No(dmax) - R = 22$$

- Υπολογισμός Link Margin

$$Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} = 5.7$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (R1) = 28dB$$

E_b/N_0 (Διαθέσιμο) – E_b/N_0 (Απαιτούμενο) για (d_{max}) = 16.22dB

5.2.2.2 Περίπτωση δορυφόρων LEO στα 1500 χλμ

Στον Πίνακα 5.4 δίνεται ο υπολογισμός για την περίπτωση δορυφόρων LEO στα 1500χλμ για την κάτω ζεύξη.

Link Budget LEO 1500km Downlink		
Χαρακτηριστικά μετάδοσης		
Συχνότητα [MHz]	2170	
Εύρος καναλιού [KHz]	15	
Ρυθμός Δεδομένων [kbit/s]	250	
Διαμόρφωση	QPSK	
Bit Error Rate	10^{-6}	
E_b/N_0 (Απαιτούμενο)	11.3	
Ισχύς Εκπομπής [dBm]	31	
Κέρδος κεραίας εκπομπής [dBi]	5	
EIRP [dBm]	36	
Απώλειες διάδοσης (Μέγιστες τιμές)		
Ατμοσφαιρική απώλεια [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω βροχής [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω ομίχλης [dB]	0.03	
Απώλεια λόγω χιονιού [dB]	0.01	
Ατμοσφαιρική Ανάκλαση [dB]	0.2	
Απώλεια Ιονόσφαιρας [dB]	0.6	
Απώλεια πόλωσης [dB]	0.3	
=	1.34	
Απώλεια Ελευθέρου χώρου [dB]	1500km=162.44	4101km=171.18
Συνολικές απώλειες [dB]	1500km=163.78	4101km=172.5
Χαρακτηριστικά Δέκτη UE		
Κέρδος κεραίας [dBi]	0	

Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]	1500km=-127.78	4101km=-136.52
Συντελεστής Θορύβου [dB]	3	
Θερμοκρασία Θορύβου [°K]	289	
G/T [dBk ⁻¹]	-24.6	
Pr/No [dBHz]	1500km=76.213	4101km=67.213
Eb/No (Διαθέσιμο)	1500km=22.23	4101km=13.497
Link Margin	10.93	2.197

Πίνακας 5.4: Link Budget LEO 1500km Downlink

- Υπολογισμός ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς [EIRP]

$$P_t = 31dBm, \quad G_t = 5dBi, \quad L_t = 0dB$$

$$EIRP = P_t + G_t - L_t = 35$$

- Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου χώρου [L_{fs}]

$$R_1 = 1500 Km, \quad d_{max} = 4101 Km, \quad Fd = 2170$$

$$L_{fsl}(R_1) = 32.45 + 20 * \log(R_1) + 20 * \log(Fd) = 162.44 dB$$

$$L_{fsl}(d_{max}) = 32.45 + 20 * \log(d_{max}) + 20 * \log(Fd) = 171.18 dB$$

- Υπολογισμός Συνολικών απωλειών διάδοσης [L_{total}]

$$Λοιπες Απώλειες = 1.34$$

$$L_{total}(R_1) = L_{fsl}(R_1) + 1.34 = 163.78 dB$$

$$L_{total}(d_{max}) = L_{fsl}(d_{max}) + 1.34 = 172.52 dB$$

- Υπολογισμός Λαμβανόμενης ισχύς [P_r]

$$EIRP = 35dBm$$

$$G_r = 0$$

$$P_r(R_1) = EIRP(dBw) + G_r - L_{total}(R_1) = -127.78 dBm$$

$$P_r(R_2) = EIRP(dBw) + G_r - L_{total}(d_{max}) = -136.51 dBm$$

- Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Δέκτη [N]

$$T_{ref} = 290, NF = 3$$

$$T_s = T_{ref} * (10^{NF/10} - 1) = 289$$

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

$$Gr = 0, \quad Ts = 289$$

$$G/T = Gr - 10 * \log(Ts) = -24.6 \text{ dBK}^{-1}$$

- Υπολογισμός Receiver power to Noise Ratio [Pr/No]

$$k = 1.38 * 10^{-23} = -228.60 \text{ dB}$$

$$Pr/No(R1) = EIRP + G/T - L_{total}(R1) - k(\text{dB}) = 76.213 \text{ dBHz}$$

$$Pr/No(dmax) = EIRP + G/T - L_{total}(dmax) - k(\text{dB}) = 67.477 \text{ dBHz}$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [Eb/No]

$$BitRate/s = 250 * 10^3$$

$$R = 10 * \log(BitRate/s) = 53.98$$

$$Eb/No(R1) = C/No(R1) - R = 22.23$$

$$Eb/No(R2) = C/No(dmax) - R = 13.497$$

- Υπολογισμός Link Margin

$$Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} = 11.3$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (R1) = 10.933 \text{ dB}$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (dmax) = 2.197 \text{ dB}$$

Στον Πίνακα 5.5 δίνεται ο υπολογισμός για την περίπτωση δορυφόρων LEO στα 1500χλμ για την άνω ζεύξη.

Link Budget LEO 1500km Uplink Single Tone	
Χαρακτηριστικά μετάδοσης UE	
Συχνότητα [MHz]	1980
Εύρος καναλιού [KHz]	3.75
Ρυθμός Δεδομένων [kbit/s]	20
Διαμόρφωση	QPSK
Bit Error Rate	10^{-6}

Eb/No (Απαιτούμενο)	5.7	
Ισχύς Εκπομπής [dBm]	23	
Κέρδος κεραίας εκπομπής [dBi]	0	
EIRP [dBm]	23	
Απώλειες διάδοσης (Μέγιστες τιμές)		
Ατμοσφαιρική απώλεια [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω βροχής [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω ομίχλης [dB]	0.03	
Απώλεια λόγω χιονιού [dB]	0.01	
Ατμοσφαιρική Ανάκλαση [dB]	0.2	
Απώλεια Ιονόσφαιρας [dB]	0.6	
Απώλεια πόλωσης [dB]	0.3	
=	1.34	
Απώλεια Ελευθέρου χώρου [dB]	1500km=161.9	4101km=170.64
Συνολικές απώλειες [dB]	1500km=163.24	4101km=171.98
Χαρακτηριστικά Δέκτη Δορυφόρου		
Κέρδος κεραίας [dBi]	0	
Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]	1500km=-135.24	4101km=-144
Συντελεστής Θορύβου [dB]	3	
Θερμοκρασία Θορύβου [°K]	289	
G/T [dBk ⁻¹]	-19.6	
Pr/No [dBHz]	1500km=68.75	4101km=60
Eb/No (Διαθέσιμο)	1500km=25.7	4101km=17
Link Margin	20	11

Πίνακας 5.5: Link Budget LEO 1500km Uplink Single Tone

- Υπολογισμός ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς [EIRP]

$$P_t = 23\text{dBm}, \quad G_t = 0\text{dBi}, \quad L_t = 0\text{dB}$$

$$\text{EIRP} = P_t + G_t - L_t = 23$$

- Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου χώρου [L_{fs}]

$$R_1 = 1500 \text{ Km}, \quad d_{\max} = 4101 \text{ Km}, \quad F_d = 1980$$

$$L_{fsl}(R1) = 32.45 + 20 * \log(R1) + 20 * \log(Fd) = 153.94 \text{ dB}$$

$$L_{fsl}(dmax) = 32.45 + 20 * \log(dmax) + 20 * \log(Fd) = 165.72 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Συνολικών απωλειών διάδοσης [L_{total}]

$$L_{οιπες \text{ Απώλειες}} = 1.34$$

$$L_{total}(R1) = L_{fsl}(R1) + 1.34 = 155.28 \text{ dB}$$

$$L_{total}(dmax) = L_{fsl}(dmax) + 1.34 = 167.1 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Λαμβανόμενης ισχύς [P_r]

$$EIRP = 23 \text{ dBm}$$

$$G_r = 5$$

$$P_r(R1) = EIRP(\text{dBw}) + G_r - L_{total}(R1) = -127.29 \text{ dBm}$$

$$P_r(R2) = EIRP(\text{dBw}) + G_r - L_{total}(dmax) = -139 \text{ dBm}$$

- Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Δέκτη [N]

$$T_{ref} = 290, NF = 3$$

$$T_s = T_{ref} * (10^{NF/10} - 1) = 289$$

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

$$G_r = 5, \quad T_s = 289$$

$$G/T = G_r - 10 * \log(T_s) = -19.6 \text{ dBK}^{-1}$$

- Υπολογισμός Receiver power to Noise Ratio [P_r/No]

$$k = 1.38 * 10^{-23} = -228.60 \text{ dB}$$

$$P_r/No(R1) = EIRP + G/T - L_{total}(R1) - k(\text{dB}) = 76.71 \text{ dBHz}$$

$$P_r/No(dmax) = EIRP + G/T - L_{total}(dmax) - k(\text{dB}) = 65 \text{ dBHz}$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [E_b/No]

$$BitRate/s = 20 * 10^3$$

$$R = 10 * \log(BitRate/s) = 43$$

$$E_b/No(R1) = C/No(R1) - R = 33.7$$

$$E_b/No(R2) = C/No(dmax) - R = 22$$

- Υπολογισμός Link Margin

E_b/N_0 (Απαιτούμενο) = 5.7

E_b/N_0 (Διαθέσιμο) – E_b/N_0 (Απαιτούμενο) για (R1) = 28dB

E_b/N_0 (Διαθέσιμο) – E_b/N_0 (Απαιτούμενο) για (d_{max}) = 16.22dB

5.2.2.3 Περίπτωση δορυφόρων GEO

Στον Πίνακα 5.6 δίνεται ο υπολογισμός για την περίπτωση δορυφόρων GEO για την κάτω ζεύξη.

Link Budget LEO 35786km Downlink	
Χαρακτηριστικά μετάδοσης	
Συχνότητα [MHz]	2170
Εύρος καναλιού [KHz]	15
Ρυθμός Δεδομένων [kbit/s]	250
Διαμόρφωση	QPSK
Bit Error Rate	10^{-6}
E_b/N_0 (Απαιτούμενο)	11.3
Ισχύς Εκπομπής [dBm]	31
Κέρδος κεραίας εκπομπής [dBi]	5
EIRP [dBm]	36
Απώλειες διάδοσης (Μέγιστες τιμές)	
Ατμοσφαιρική απώλεια [dB]	0.1
Απώλεια λόγω βροχής [dB]	0.1
Απώλεια λόγω ομίχλης [dB]	0.03
Απώλεια λόγω χιονιού [dB]	0.01
Ατμοσφαιρική Ανάκλαση [dB]	0.2
Απώλεια Ιονόσφαιρας [dB]	0.6
Απώλεια πόλωσης [dB]	0.3
=	1.34
Απώλεια Ελευθέρου χώρου [dB]	35786km=190 41126km=191.2

Συνολικές απώλειες [dB]	35786km=191.34	41126km=192.54
Χαρακτηριστικά Δέκτη UE		
Κέρδος κεραίας [dBi]	0	
Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]	35786km=-133.33	41126km=-134.54
Συντελεστής Θορύβου [dB]	3	
Θερμοκρασία Θορύβου [°K]	289	
G/T [dBk ⁻¹]	-24.6	
Pr/No [dBHz]	35786km=70.66	41126km=69.45
Eb/No (Διαθέσιμο)	35786km=16.68	41126km=15.47
Link Margin	5.38	4.17

Πίνακας 5.6: Link Budget Geo Downlink

- Υπολογισμός ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς [EIRP]

$$P_t = 43\text{dBm}, \quad G_t = 15\text{dBi}, \quad L_t = 0\text{dB}$$

$$\text{EIRP} = P_t + G_t - L_t = 58$$

- Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου χώρου [L_{fs}]

$$R_1 = 35786 \text{ Km}, \quad d_{\max} = 41126 \text{ Km}, \quad F_d = 2170$$

$$L_{\text{fsl}}(R_1) = 32.45 + 20 * \log(R_1) + 20 * \log(F_d) = 190 \text{ dB}$$

$$L_{\text{fsl}}(d_{\max}) = 32.45 + 20 * \log(d_{\max}) + 20 * \log(F_d) = 191.2 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Συνολικών απωλειών διάδοσης [L_{total}]

$$\text{Λοιπες Απώλειες} = 1.34$$

$$L_{\text{total}}(R_1) = L_{\text{fsl}}(R_1) + 1.34 = 191.34 \text{ dB}$$

$$L_{\text{total}}(d_{\max}) = L_{\text{fsl}}(d_{\max}) + 1.34 = 192.55 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Λαμβανόμενης ισχύς [P_r]

$$\text{EIRP} = 58 \text{ dBm}$$

$$G_r = 0$$

$$P_r(R_1) = \text{EIRP}(\text{dBw}) + G_r - L_{\text{total}}(R_1) = -133.39\text{dBm}$$

$$P_r(R_2) = \text{EIRP}(\text{dBw}) + G_r - L_{\text{total}}(d_{\max}) = -134.55 \text{ dBm}$$

- Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Δέκτη [N]

$$T_{\text{ref}} = 290, \text{NF} = 3$$

$$Ts = Tref * (10^{NF/10} - 1) = 289$$

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

$$Gr = 0, \quad Ts = 289$$

$$G/T = Gr - 10 * \log(Ts) = -24.6 \text{ dBK}^{-1}$$

- Υπολογισμός Receiver power to Noise Ratio [Pr/No]

$$k = 1.38 * 10^{-23} = -228.60 \text{ dB}$$

$$Pr/No(R1) = EIRP + G/T - Ltotal(R1) - k(\text{dB}) = 70.66 \text{ dBHz}$$

$$Pr/No(dmax) = EIRP + G/T - Ltotal(dmax) - k(\text{dB}) = 69.45 \text{ dBHz}$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [Eb/No]

$$BitRate/s = 250 * 10^3$$

$$R = 10 * \log(BitRate/s) = 53.98$$

$$Eb/No(R1) = C/No(R1) - R = 16.68$$

$$Eb/No(R2) = C/No(dmax) - R = 15.47$$

- Υπολογισμός Link Margin

$$Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} = 11.3$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (R1) = 5.38 \text{ dB}$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (dmax) = 4.173 \text{ dB}$$

Link Budget GEO 35786km Uplink Single Tone	
Χαρακτηριστικά μετάδοσης UE	
Συχνότητα [MHz]	1980
Εύρος καναλιού [KHz]	3.75
Ρυθμός Δεδομένων [kbit/s]	20
Διαμόρφωση	QPSK

Bit Error Rate	10 ⁻⁶	
Eb/No (Απαιτούμενο)	5.7	
Ισχύς Εκπομπής [dBm]	23	
Κέρδος κεραίας εκπομπής [dBi]	0	
EIRP [dBm]	23	
Απώλειες διάδοσης (Μέγιστες τιμές)		
Ατμοσφαιρική απώλεια [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω βροχής [dB]	0.1	
Απώλεια λόγω ομίχλης [dB]	0.03	
Απώλεια λόγω χιονιού [dB]	0.01	
Ατμοσφαιρική Ανάκλαση [dB]	0.2	
Απώλεια Ιονόσφαιρας [dB]	0.6	
Απώλεια πόλωσης [dB]	0.3	
=	1.34	
Απώλεια Ελευθέρου χώρου [dB]	35786km=189.46	41126km=190.66
Συνολικές απώλειες [dB]	35786km=190.8	41126km=192
Χαρακτηριστικά Δέκτη Δορυφόρου		
Κέρδος κεραίας [dBi]	0	
Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]	35786km=-152.8	41126km=-154
Συντελεστής Θορύβου [dB]	3	
Θερμοκρασία Θορύβου [°K]	289	
G/T [dBk ⁻¹]	-9.6	
C/No [dBHz]	35786km=51.2	41126km=50
Eb/No (Διαθέσιμο)	35786km=8.19	41126km=6.98
Link Margin	2.49	1.28

Πίνακας 5.7: Link Budget Geo Uplink

- Υπολογισμός ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς [EIRP]

$$P_t = 23dBm, \quad G_t = 0dBi, \quad L_t = 0dB$$

$$EIRP = P_t + G_t - L_t = 23$$

- Υπολογισμός Απωλειών Ελευθέρου χώρου [L_{fs}]

$$R1 = 35786 \text{ Km}, \quad d_{\max} = 41126 \text{ Km}, \quad Fd = 1980$$

$$L_{\text{fsl}}(R1) = 32.45 + 20 * \log(R1) + 20 * \log(Fd) = 189.46 \text{ dB}$$

$$L_{\text{fsl}}(d_{\max}) = 32.45 + 20 * \log(d_{\max}) + 20 * \log(Fd) = 190.66 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Συνολικών απωλειών διάδοσης [L_{total}]

$$\text{Λοιπες Απώλειες} = 1.34$$

$$L_{\text{total}}(R1) = L_{\text{fsl}}(R1) + 1.34 = 190.79 \text{ dB}$$

$$L_{\text{total}}(d_{\max}) = L_{\text{fsl}}(d_{\max}) + 1.34 = 192 \text{ dB}$$

- Υπολογισμός Λαμβανόμενης ισχύς [P_r]

$$EIRP = 23 \text{ dBm}$$

$$G_r = 15$$

$$P_r(R1) = EIRP(\text{dBw}) + G_r - L_{\text{total}}(R1) = -152.8 \text{ dBm}$$

$$P_r(R2) = EIRP(\text{dBw}) + G_r - L_{\text{total}}(d_{\max}) = -154 \text{ dBm}$$

- Υπολογισμός Θερμοκρασίας Θορύβου Δέκτη [N]

$$T_{\text{ref}} = 290, NF = 3$$

$$T_s = T_{\text{ref}} * (10^{NF/10} - 1) = 289$$

- Υπολογισμός Gain to Noise temperature ratio [G/T]

$$G_r = 15, \quad T_s = 289$$

$$G/T = G_r - 10 * \log(T_s) = -9.6 \text{ dBK}^{-1}$$

- Υπολογισμός Received power to Noise ratio [C/No]

$$k = 1.38 * 10^{-23} = -228.60 \text{ dB}$$

$$C/No(R1) = EIRP + G/T - L_{\text{total}}(R1) - k(\text{dB}) = 51.2 \text{ dBHz}$$

$$C/No(d_{\max}) = EIRP + G/T - L_{\text{total}}(d_{\max}) - k(\text{dB}) = 49.99 \text{ dBHz}$$

- Υπολογισμός διαθέσιμου Energy to Noise ratio [Eb/No]

$$\text{BitRate}/s = 20 * 10^3$$

$$R = 10 * \log(\text{BitRate}/s) = 43$$

$$Eb/No(R1) = C/No(R1) - R = 8.2$$

$$Eb/No(R2) = C/No(dmax) - R = 6.98$$

- Υπολογισμός Link Margin

$$Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} = 5.7\text{dB}$$

$$Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (R1) = 2.49\text{dB}$$

$$\mathbf{Eb/No \text{ (Διαθέσιμο)} - Eb/No \text{ (Απαιτούμενο)} \text{ για } (dmax) = 1.282\text{dB}}$$

Στην NB-ΙοT προδιαγραφή, η Μέγιστη Απώλεια Ζεύξης (MCL) μπορεί να είναι 164 dB. Η Απώλεια Ελευθέρου χώρου που προκαλείται που προκαλείται από ένα δορυφόρο LEO 600km με γωνία ανύψωσης 5 μοίρες είναι 166 dB, με αποτέλεσμα το περιθώριο του συνδέσμου θεωρητικά να γίνεται σχεδόν κλειστό σε μία ζεύξη οπτικής επαφής (LoS- Line of Sight) χωρίς άλλες απώλειες. Οι δορυφόροι GEO έχουν απώλεια ελευθέρου χώρου 191dB και δεν είναι κατάλληλη για χρήση NB-ΙοT. Η αύξηση στη απώλεια ελευθέρου χώρου μπορεί γενικά να αποσβεστεί από την αύξηση της δυνατότητας κατεύθυνσης των κεραιών και της ισχύος μετάδοσης αλλά αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επίσης όπως θα δούμε στην συνέχεια η αυξημένη απώλεια ελευθέρου χώρου (μεγαλύτερες αποστάσεις δορυφόρου-γης) δημιουργεί μεγαλύτερες καθυστερήσεις στην αναπαραγωγή του σήματος.

5.3 Προβλήματα δορυφορικού καναλιού

Για να εξετάσουμε τη δυνατότητα εφαρμογής των NR τεχνικών και διαδικασιών στο NB-ΙοT σε αυτή την ενότητα αναλύουμε τα συνηθισμένα προβλήματα του δορυφορικού καναλιού που ενδέχεται να έχουν αντίκτυπο στα NR PHY και MAC στρώματα, όπως και τις μεγάλες μετατοπίσεις Doppler και αναπαραγωγές καθυστερήσεων.

5.3.1 Καθυστέρηση

Αναφορικά με την αναπαραγωγή της καθυστέρησης, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τόσο την μίας-κατεύθυνσης αναπαραγόμενη καθυστέρηση όσο και το Χρόνο Επιστροφής (RTT), ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας που θεωρούμε, πχ αν όλη η διαδικασία ή ένα συγκεκριμένο βήμα μπορούν να τερματιστούν στο gNB ή αν απαιτεί μία αλληλεπίδραση με το EPC. Στα παρακάτω, το RTT είναι περίπου διπλάσιο από την αναπαραγόμενη καθυστέρηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, εφόσον ο χρόνος επεξεργασίας του σήματος στο πλαίσιο μίας Δορυφορικής

Επικοινωνίας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο αναφορικά με την αναπαραγόμενη καθυστέρηση. Για να εκτιμήσουμε την αναπαραγόμενη καθυστέρηση στα θεωρούμενα σενάρια, υποθέτουμε επιπλέον να υπάρχει ένα κακό σενάριο στο οποίο ο πομπός και ο δέκτης δεν είναι τέλεια εναρμονισμένοι, και επομένως έχουν διαφορετικές γωνίες ανύψωσης. Το συνολικό RTT μπορεί επομένως να υπολογιστεί ακολούθως:

$$RTT \approx 2T_{owp} = \frac{d_{GW-sat}(\theta_{GW}) + d_{Sat-RX}(\theta_{RX})}{c}$$

Εξίσωση 5.1

Όπου :

- T_{owp} είναι η καθυστέρηση μίας-κατεύθυνσης
- d_{GW-sat} η απόσταση μεταξύ της GW και του δορυφόρου καθώς και μία συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης θ_{GW}
- d_{Sat-RX} η απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη (πχ το RN ή το UE για το NB-IoT σενάριο) ως συνάρτηση της γωνίας ανύψωσής του θ_{RX} , και c η ταχύτητα του φωτός. [50]

Στον πίνακα 5.9 δίνονται οι αποστάσεις μονής διαδρομής και οι σχετικές καθυστερήσεις για την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος και στον πίνακα 5.10 η καθυστέρηση μονής διαδρομής και RTT για την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος

Αποστάσεις μονής διαδρομής και οι σχετικές καθυστερήσεις για την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος			
NB-IoT scenario: LEO $h_{sat} = 600$ km			
Γωνία ανύψωσης	Διαδρομή	Απόσταση [km]	Καθυστέρηση [ms]
UE: $\theta_{UE} = 10^\circ$	Sat-UE	1932.25	≈ 6.44
GW: $\theta_{GW} = 5^\circ$	Sat-GW	2329.03	≈ 7.76
NB-IoT scenario: LEO $h_{sat} = 1500$ km			
Γωνία ανύψωσης	Διαδρομή	Απόσταση [km]	Καθυστέρηση [ms]
UE: $\theta_{UE} = 10^\circ$	Sat-UE	3647.55	≈ 12.16

GW: $\vartheta_{GW} = 5^\circ$	Sat-GW	4101.72	≈ 13.67
NB-IoT scenario: GEO $h_{sat} = 35786$ km			
Γωνία ανύψωσης	Διαδρομή	Απόσταση [km]	Καθυστέρηση [ms]
UE: $\vartheta_{UE} = 10^\circ$	Sat-UE	40586.07	≈ 135.28
GW: $\vartheta_{GW} = 5^\circ$	Sat-GW	41126.72	≈ 137.09

Πίνακας 5.9: Αποστάσεις μονής διαδρομής και οι σχετικές καθυστερήσεις για την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος.

- Υπολογισμός καθυστέρησης LEO 600km

$$T_{wop}(UE) = \frac{1932 * 10^3}{3 * 10^8} = 6.44 * 10^{-3}$$

$$T_{wop}(GW) = \frac{2329 * 10^3}{3 * 10^8} = 7.76 * 10^{-3}$$

- Υπολογισμός καθυστέρησης LEO 1500km

$$T_{wop}(UE) = \frac{3647.5 * 10^3}{3 * 10^8} = 12.16 * 10^{-3}$$

$$T_{wop}(GW) = \frac{4101 * 10^3}{3 * 10^8} = 13.67 * 10^{-3}$$

- Υπολογισμός καθυστέρησης GEO

$$T_{wop}(UE) = \frac{40586 * 10^3}{3 * 10^8} = 135.28 * 10^{-3}$$

$$T_{wop}(GW) = \frac{41126.7 * 10^3}{3 * 10^8} = 137.09 * 10^{-3}$$

Καθυστέρηση μονής διαδρομής και RTT για την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος	
NB-IoT scenario: LEO $h_{sat} = 600$ km	
Μονής κατεύθυνσης [ms]	RTT [ms]
≈ 14.2	≈ 28.4
NB-IoT scenario: LEO $h_{sat} = 1500$ km	
Μονής κατεύθυνσης [ms]	RTT [ms]
≈ 25.83	≈ 51.66
NB-IoT scenario: GEO $h_{sat} = 35786$ km	
Μονής κατεύθυνσης [ms]	RTT [ms]
≈ 272.37	≈ 544.75

Πίνακας 5.10: Καθυστέρηση μονής διαδρομής και RTT για την εξεταζόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος.

Το σύστημα GW θεωρείται να είναι σε $\theta_{GW} = 5^\circ$ γωνία ανύψωσης, ενώ η ελάχιστη γωνία ανύψωσης και για τα UEs και τα RNs θεωρείται $\theta_{RX} = 10^\circ$. Οι αποστάσεις μονής διαδρομής και οι σχετικές καθυστερήσεις μεταξύ δορυφόρου και των UE/RN και GW αναγράφεται στον Πίνακα 1, όπου θεωρήσαμε τόσο το ελάχιστο όσο και το μέγιστο υψόμετρο δορυφόρου στο NB-IoT σενάριο. Με βάση αυτές τις τιμές, η αναπαραγόμενη καθυστέρηση μίας-διαδρομής, πχ RN (UE) στο gNB (DgNB), και RTT, πχ RN (UE) στο gNB (DgNB) και πίσω στο RN (UE), που φαίνονται στον Πίνακα 2 μπορούν να αποκτηθούν. Μπορεί να σημειωθεί ότι, όπως είναι αναμενόμενο, για το NB-IoT GEO σενάριο, η αναπαραγόμενη καθυστέρηση μπορεί να είναι ζήτημα για όλες τις διαδικασίες και βήματα, εφόσον είναι αρκετές τάξεις μεγέθους πάνω από τις συνηθισμένες καθυστερήσεις επίγειων δικτύων. Αναφορικά με το NB-IoT LEO σενάριο, το αντίκτυπο των καθυστερήσεων μπορεί να εκτιμηθεί σε βάση περίπτωσης προς περίπτωση επίσης λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο της επικοινωνίας που η εν λόγω διαδικασία απαιτεί, πχ προς το gNB ή το EPC. [50]

Οι καθυστερήσεις δημιουργούν πρόβλημα στο συγχρονισμό στο επίπεδο mac. Λόγω της αλλαγής στην καθυστέρηση της αναπαραγωγής του σήματος και ο συγχρονισμός του σήματος πρέπει να διορθώνεται συνεχώς. Στην ενότητα 2.5.6 Timing Advance Command εξετάσαμε ότι το UE χρησιμοποιεί αυτή την εντολή για να ρυθμίσει το χρονοισμό των πλαισίων κάτω ζεύξης και άνω

ζεύξης σχετικά μεταξύ τους. Ο μέγιστη τιμή προώθησης χρόνου είναι 0.6667 ms ως θυμηθούμε τον τύπο

$$T_{AD} = 16 * T_A * T_S$$

Όπου: $T_S = \frac{1}{(2048 \times 15000)}$, $T_A =$ παράμετρος με μέγιστη τιμή 1282

Οι καθυστερήσεις RTT για τον LEO 600km υπολογίσαμε ότι είναι 15 ms.

Προσθέτοντας μία μετατόπιση χρόνου που λαμβάνει υπόψη την αναπαραγόμενη καθυστέρηση του δορυφορικού καναλιού, ανάλογα με τις γεωγραφικές θέσεις των UEs και του Sat, θα μπορούσε να υπάρχει μία εναλλακτική λύση για να ξεπεραστεί ο περιορισμός της εντολής του TA. [50]

Για την διαδικασία Random Access ο χρονομετρητής σύγκρουσης ρυθμίζεται σε 64 ms, ο οποίος είναι πολύ μεγαλύτερος από τον RTT μεταξύ του UE και του δορυφόρου LEO. Έτσι, δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στη διαδικασία LTE RA προκειμένου να υλοποιηθεί μέσω ενός δορυφορικού συστήματος LEO. Για τους δορυφόρους GEO λόγω μεγάλης καθυστέρησης δημιουργείται πρόβλημα στην διαδικασία Random Access.

Στη διαδικασία HARQ, το κρίσιμο ζήτημα είναι ότι το RTT είναι μεγαλύτερο από το χρονικό παράθυρο του HARQ. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα προτείνονται 2 λύσεις:

1) Ενισχυμένη περιοδικότητα: μια πιθανή λύση θα μπορούσε να είναι η επέκταση της περιοδικότητας της αναμετάδοσης HARQ ανερχόμενης ζεύξης κατά τουλάχιστον 16 ms. Όσο για την κατερχόμενη ζεύξη, το χρονικό παράθυρο μπορεί να επεκταθεί πέραν των 16 ms. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή θα επηρεάσει βαθιά τη συνολική απόδοση: διότι διπλασιάζουμε την περιοδικότητα της διαδικασίας HARQ, η απόδοση θα είναι κατά το ήμισυ εκείνη του παραδοσιακού συστήματος LTE οι αναμεταδόσεις θα επιτρέπονται μετά από διπλάσια περίοδο αδράνεια, για μια συγκεκριμένη διαδικασία.

2) Χωρίς HARQ με αναπαραγωγή: Η επέκταση της περιοδικότητας της διαδικασίας HARQ οδηγεί σε μειωμένη απόδοση. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν η μη εφαρμογή HARQ. Σε αυτή την περίπτωση, προκειμένου να αντισταθμιστεί η αυξημένη απώλεια πακέτων, το ίδιο πακέτο

μπορεί να αναπαραχθεί σε ένα ορισμένο αριθμό κατά τη μετάδοσή του. Αυτό θα μείωνε την απόδοση, αλλά με πολύ πιο περιορισμένο αντίκτυπο.

5.5.2 Μετατόπιση Doppler

Η μετατόπιση Doppler συνιστάται στην αλλαγή της συχνότητας του φορέα λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ του δορυφόρου και της τερματικής συσκευής. Ο μέγιστος στόχος κινητικότητας χρήστη στις NR απαιτήσεις έχει τεθεί στα 500 km/h για συχνότητες κάτω από 6 GHz και ορίζεται ως τη μέγιστη NR ταχύτητα αναφορικά με το gNB στο οποίο το NR μπορεί να εξυπηρετηθεί με μία συγκεκριμένη εγγυημένη Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS).

- Υπολογισμός doppler shift για δορυφόρους LEO 600km

Πρώτα υπολογίζουμε την περίοδο τροχιάς του δορυφόρου :

$$T = \sqrt{\frac{(4 * \pi^2 * \alpha^3)}{\mu}} = \sqrt{\frac{4 * \pi^2 * (6978)^3}{3.986004418 * 10^5 s^2}} = 5801s$$

Εξίσωση 5.2

Όπου :

$$\alpha = (Re + H)$$

$$Re = \text{Ακτίνα της γης} = 6378 * 10^3$$

$$h = \text{ύψος του δορυφόρου}$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την περίμετρο της τροχιάς $2\pi\alpha=43.884\text{km}$ και την ταχύτητα του δορυφόρου

$$u_s = 43.884/T = 7.562\text{km/s}$$

Εξίσωση 5.3

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την συνιστώσα της ταχύτητας του δορυφόρου ως προς τον δέκτη :

$$\cos\theta = \frac{Re}{(Re + h)} = 0.914$$

$$u_r = u_s * \cos\theta = 6911m/s$$

Εξίσωση 5.4

Από την σχέση 5.5 υπολογίζουμε την μετατόπιση doppler για φέρουσα συχνότητα 2.17GHz :

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0.138$$

$$\Delta_f = \frac{u_r}{\lambda} = 49.98KHz$$

Εξίσωση 5.5

Ύψος Δορυφόρου LEO	Ταχύτητα Δορυφόρου	Doppler Shift για συχνότητα 2.17GHz
600 km	7.562km/s	±49.98KHz
1000 km	7.354km/s	±45.98KHz
1500 km,	7.11km/s	±41.66KHz
2329 km	6.76 km/s	±35.85KHz

Πίνακας 5.11 : Υπολογισμός Doppler Shift για δορυφόρους LEO

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε GEO συστήματα η μετατόπιση Doppler θεωρείται αμελητέα. Από την άλλη, όταν θεωρούμε το NB-IoT σενάριο, έχουμε μη- GEO δορυφόρους να εξυπηρετούν κινούμενους τερματικούς και επομένως η μετατόπιση Doppler μπορεί να εισάγει σημαντικές μετατοπίσεις συχνοτήτων αναφορικά με εκείνες που αναμένονται σε επίγεια NR συστήματα. Αυτό θα μπορούσε να επιδράσει σημαντικά στο συγχρονισμό συχνοτήτων των πηγών που χρησιμοποιούνται για να εκπέμπουν μέσω της διεπαφής αέρα.

Για την κάτω ζεύξη του και της συχνότητας, ένας φορέας πομπού OFDM μπορεί να λειτουργήσει χωρίς κανένα πρόβλημα. Επειδή υπάρχει μόνο ένας πομπός κάθε υποφορέας μετατοπίζεται, λόγω της μετατόπισης Doppler, ισόποσα, και οι υποφορείς παραμένουν ορθογώνιοι. Ο UE πρέπει να εντοπίσει και να αποσβέσει αυτή τη μετατόπιση Doppler η οποία μπορεί να είναι σημαντική συγκρινόμενη με το συνολικό εύρος του σήματος. Για την περίπτωση LEO 600 η μέγιστη μετατόπιση doppler είναι ± 49.98 KHz. Η μέγιστη μετατόπιση συχνότητας είναι 833 Hz/s.

Αυτή η εκτροπή στο χρονισμό μπορεί να διορθωθεί από τα σήματα του συγχρονισμού του κάτω συνδέσμου (NPSS and NSSS). Το UE μεταδίδει το αρχικό του σήμα συγχρονισμού (PSS) καθώς το πρώτο slot ανταποκρίνεται με 10 ms. Η εκτροπής συχνότητας λόγω του Doppler μεταξύ δύο σημάτων συγχρονισμού μπορεί να είναι 8.3 Hz και η εκτροπή χρόνου 0.2 μ s. Η κυκλική προσθήκη χρησιμοποιείται στη διεπαφή αέρα, προσφέρει περιόδους προστασίας για να προστατέψει εναντίον μικρής μετατόπισης χρονισμού. Με τη χρήση κανονικού CP μήκους το σφάλμα μπορεί να είναι 4.7 μ s πριν να προκαλέσει παρεμβολή μεταξύ των συμβολών. Όταν υποθέτουμε μέγιστη ταχύτητα προσέγγισης 6 km/s, ο συγχρονισμός πρέπει να διορθωθεί κάθε 230 ms. Επομένως, είναι δυνατό να διατηρηθεί ο συγχρονισμός με τη ροή κάτω συνδέσμου με τον εκ νέου συγχρονισμό σε κάθε PSS χωρίς την εκτίμηση μετατόπισης Doppler.

Στην άνω ζεύξη κάθε UE έχει διαφορετική θέση άρα διαφορετική τιμή Doppler για την ίδια χρονική στιγμή. Η μετατόπιση συχνοτήτων, λόγω της μετατόπισης Doppler, μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην ορθογωνικότητα των σημάτων δημιουργώντας παρεμβολή μεταξύ φορέων όταν οι υποφορείς επικαλύπτονται στον τομέα συχνότητας.

Το Doppler shift μπορεί να μειωθεί μέσω ενός GNN δέκτη, αλλά μια GNSS συσκευή δημιουργεί μεγαλύτερη κατανάλωση μπαταρίας στα UE οδηγώντας σε μικρότερη διάρκεια ζωής. Μια λύση είναι η τεχνική positioning που αναλύσαμε στην ενότητα 3.2.1 Τοποθέτηση (positioning). Ο εντοπισμός θέσης μπορεί να μειώσει το επίπεδο των σφαλμάτων σε μια αποδεκτή τιμή για το UE.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σκοπό να μελετηθεί η εφικτή λύση για τη σύνδεση των αισθητήρων και των συσκευών επικοινωνίας τύπου μηχανής (M2M) σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές, όπου υπάρχει περιορισμένη ή καθόλου επικοινωνιακή υποδομή. Για να επιτευχθεί ο στόχος του IoT ώστε να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο οποιαδήποτε συσκευή που διαθέτει πομποδέκτη κάθε στιγμή και σε κάθε μέρος τα δορυφορικά IoT συστήματα είναι μοναδική προσέγγιση ώστε να επιτευχθεί παγκόσμια κάλυψη IoT υπηρεσιών.

Στην αρχή της εργασίας έγινε αναφορά στην τεχνολογία του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) καθώς και στα δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής (LPWAN). Το NB-IoT φαίνεται το ιδανικότερο, πιο οικονομικό και εύκολα εφαρμοζόμενο ώστε να επιτευχθεί μεγάλη κάλυψη, να αξιοποιηθεί το δορυφορικό κανάλι για απομακρυσμένες περιοχές και να επιτευχθεί παγκόσμια κάλυψη IoT υπηρεσιών. Επίσης ο οργανισμός 3GPP προσφέρει αναβαθμίσεις και βελτιώσεις σε κάθε έκδοση και παρέχει ετερογένεια. Στα ανερχόμενα δίκτυα πέμπτης γενιάς 5G το NB-IoT θα μπορεί να επωφεληθεί από τις υποδομές. Στην συνέχεια της εργασίας έγινε θεωρητική μελέτη για το δίκτυο NB-IoT και τις δορυφορικές επικοινωνίες ώστε να μελετηθεί το NB-IoT διαμέσου δορυφόρου. Η πιο ιδανική επιλογή ανάπτυξη για το NB-IoT διαμέσου δορυφόρου είναι η standalone και πιο κατάλληλες συχνότητες είναι η ζώνη συχνοτήτων S, 2170–2200 MHz για την κάτω ζεύξη και 1980–2010 MHz για την άνω ζεύξη. Ακολούθως έγιναν υπολογισμοί Link Budget. Από τους υπολογισμούς Link Budget οι δορυφόροι LEO σε σχέση με τους δορυφόρους GEO είναι πιο ιδανικοί για να χρησιμοποιηθούν στο NB-IoT. Στην συνέχεια έγινε μελέτη για τα κυριότερα προβλήματα του δορυφορικού καναλιού που είναι οι καθυστερήσεις διάδοσης και οι μετατοπίσεις doppler. Ακολούθως γίνονται υπολογισμοί των καθυστερήσεων διάδοσης για δορυφόρους LEO και GEO. Από τους υπολογισμούς των καθυστερήσεων διάδοσης προκύπτει

ότι οι δορυφόροι GEO έχουν μεγάλη καθυστέρηση σε σχέση με τους δορυφόρους LEO και η χρήση τους δεν ενδείκνυται για χρήση NB-IoT. Στην συνέχεια έγινε μελέτη για τα προβλήματα που δημιουργούν οι καθυστερήσεις των δορυφόρων LEO στην επικοινωνία δορυφόρου-τερματικών συσκευών και τρόποι αντιμετώπισης τους.

Η μελέτη ολοκληρώνεται με τους υπολογισμούς της μετατόπισης doppler για τους δορυφόρους LEO, τα προβλήματα που δημιουργούνται στην επικοινωνία δορυφόρου-τερματικών συσκευών καθώς και τρόπους αντιμετώπισης τους. Από την έρευνα προκύπτει ότι οι καθυστερήσεις και η μετατόπιση doppler δημιουργούν προβλήματα στην επικοινωνία δορυφόρου-τερματικών συσκευών, αλλά μπορούν να αντιμετωπιστούν με τροποποίηση των προδιαγραφών, είτε από άλλες υπάρχουσες τεχνικές που απαιτούν ελάχιστες αλλαγές στο πρότυπο. Συνεπώς για την επίτευξη της παγκόσμιας κάλυψης των συσκευών IoT, το δίκτυο NB-IoT μαζί με την χρήση των δορυφόρων παρέχουν μια ρεαλιστική λύση.

Εν όψει της 4ης βιομηχανικής επανάστασης και με τον ερχομό των δικτύων 5ης γενιάς 5G το NB-IoT θα έχει πρωταγωνιστικό ρόλο για την διασύνδεση των συσκευών IoT. Το NB-IoT θα μπορεί να αξιοποιήσει τις υποδομές των 5G δικτύων και να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα που θα παρέχουν. Τα 5G δίκτυα θα παρέχουν υψηλές ταχύτητες της τάξης των Gbps, επιτρέποντας την ταχεία μετάδοση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών IoT και ενεργοποιώντας εφαρμογές που απαιτούν συνδέσεις σε πραγματικό χρόνο. Τα δίκτυα 5G με συνδυασμό του IoT, θα είναι σε θέση να παρέχουν εφαρμογές πέρα από τη σημερινή ικανότητα, όπως για παράδειγμα προηγμένη εικονική πραγματικότητα και τεχνητή νοημοσύνη. Σε συνδυασμό με την αύξηση της ταχύτητας, ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα του 5G θα είναι η χαμηλότερη καθυστέρηση και η αυξημένη αξιοπιστία. Στοχεύοντας σε καθυστέρηση μικρότερη από 1 ms, το 5G θα επιτρέψει σε εφαρμογές κρίσιμης σημασίας για το IoT που απαιτούν μέγιστη ανταπόκριση και αξιοπιστία όπως για παράδειγμα η απομακρυσμένη υγειονομική περίθαλψη. Οι υψηλές ταχύτητες και η χαμηλή καθυστέρηση δεν είναι απαραίτητες για όλες τις εφαρμογές του IoT, το 5G θα υποστηρίξει επίσης εκείνες με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλές απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης. Τα δίκτυα NB-IoT εξυπηρετούν το σκοπό αυτό σήμερα, παρέχοντας αξιόπιστη, οικονομικά αποδοτική και διαδεδομένη συνδεσιμότητα και θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στο μέλλον των 5G. Μια παρόμοια έρευνα όταν θα ολοκληρωθεί η έκδοση 16 του 3GPP θα ήταν χρήσιμη για τις βελτιώσεις και τα οφέλη που θα παρέχει στο δίκτυο NB-IoT καθώς και στην χρήση του δορυφορικού καναλιού.

Βιβλιογραφία

- [01] Μ.Ε Θεολόγου, “Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών”, Τζιόλα, 2015.
- [02] Φ. Κωνσταντίου, Α. Κανατάς, και Γ. Πάντος, “Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών”, Παπασωτηρίου, 2013.
- [03] B.K Tripat, J. Anuradha, “Internet of Things (IoT) Technologies, Applications, Challenges, and solutions”, 2018, Taylor & Francis Group.
- [04] D. Evans, “The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything”, Cisco, 2011
- [05] Our IoT overview, <https://wylidrin.com/post/our-iot-overview>
- [06] RF Wireless, <http://www.rfwireless-world.com/IoT/CoAP-protocol.html>
- [07] A. Fugaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, & M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications”, IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol. 17, No. 4, Fourth Quarter, 2015
- [08] Cosmote, www.cosmote.gr
- [09] R. S. Sinha, Y. Wei, S. H. Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT”, ScienceDirect, 2017
- [10] Linklab, “A Comprehensive Look At Low Power, Wide Area Networks For ‘Internet of Things’ Engineers and Decision Makers”, Whitepaper, 2016
- [11] Vodafone, “Narrowband-IoT: pushing the boundaries of IoT, whitepaper, 2017
- [12] RF Wireless World, <http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Sigfox-tutorial.html>
- [13] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F.Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”, 2018 The Korean Institute of Communications Information Sciences.

- [14] Y. Song, J. Lin, M. Tang, S. Dong, "An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN", *Engineering* 3, 2017
- [15] S. Tyagi, P.C Jain "Internet of Things using LPWAN", Department of Electrical Engineering, School of Engineering, Shiv Nadar University, G. Noida-201314 (UP) India
- [16] C. Gomez, J. C. Veras, R. Vidal, L. Casals and J. Paradells "A Sigfox Energy Consumption Model", 2019
- [17] Nokia, "*LTE evolution for IoT connectivity*", whitepaper, 2016.
- [18] Nokia, "*LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things*", whitepaper, 2016
- [19] Qualcomm, "*Leading the LTE IoT evolution to connect the massive Internet of Things*", July 2017.
- [20] Qualcomm, "*Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT)*", July 2016.
- [21] E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergam, & S. Razaghi, "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things (NB-IoT)", Vol.55, Issue 3, 2017
- [22] Keysight Technologies, Inc., <https://www.youtube.com/watch?v=SLA55EPPnkl>
- [23] H. Fattah, "5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT)", CRC Press, 2019
- [24] Rohde & Schwarz, "Narrowband Internet of Things", whitepaper, 2017
- [25] C. Beard, W. Stallings, "Ασύρματες επικοινωνίες δίκτυα & Συστήματα", Τζιόλα, 2017
- [26] H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access". Wiley, 2009.
- [27] M. Sauter, "From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G_ An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband". Wiley, 2017.

- [28] 3GPP," TS 36.101: User Equipment (UE) radio transmission and reception, version 13.4.0, 2016
- [29] 3GPP,"TS 36.101: User Equipment (UE) radio transmission and reception, version 14.5.0, 2017
- [30] 3GPP, "*TS 36.211: Physical channels and modulation*", Technical Specification 36.211, version 13.2.0, 2016.
- [31] 3GPP, "TS 36.213: Physical layer procedures", Technical Specification 36.213, version 13.2.0, 2016.
- [32] 3GPP, "*TS 36.321: Medium Access Control (MAC) protocol specification*", version 13.2.0, 2016.
- [33] 3GPP, "TS 36.304: User Equipment (UE) procedures in idle mode", version 13.2.0
- [34] A. Hoglund, X. Lin, O. Liberg, A. Behravan, E. Yazuz, M. Zee, Y. Sui, T. Tirronen, A. Ratilainen, & D. Eriksson, "Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT", IEEE, 2017
- [35] 3GPP R1-1611118, "OTDOA Performance for NB-IoT,"Ericsson, Nov. 2016; <http://www.3gpp.org>, accessed Apr.30, 2017.
- [36] 3GPP R2-1706165, "Introduction of RRC Connection Re-Establishment for NB-IoT Control Plane," Qualcomm Inc., Huawei, HiSilicon, Gemalto N.V., May 2017; <http://www.3gpp.org>, accessed July 5, 2017.
- [37] Π.Γ. Κωττής, Χ.Ν. Καψάλης, "Δορυφορικές επικοινωνίες". Τζιόλα, 2013
- [38] S.R Saunders, A. Aragon-Zavala, "Κεραίες και διάδοση για ασύρματα συστήματα επικοινωνιών". Πεδίο, 2017.
- [39] Δ. Βουγιούκας, "Δορυφορικές επικοινωνίες", ΣΕΑΒ, 2015
- [40] G, Maral, M. Bousquet, "Δορυφορικές επικοινωνίες, συστήματα, τεχνολογία και τεχνικές". Τζιόλα, 2015.

- [41] Σ. Κωτσόπουλος, “Αρχές και Μοντελοποίηση Ασύρματης Διάδοσης : Εφαρμογές στην σχεδίαση ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων”. Τζιόλα, 2016.
- [42] Z. Qu, G. Zhang, Haotong Cao, and J. Xie, “LEO Satellite Constellation for Internet of Things”. IEEE Access, vol. 5, 2017
- [43] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_orbits
- [44] OneWeb, "OneWeb Non-Geostationary Satellite System", Technical specification.
- [45] OneWeb and GMV, "Architecting OneWeb's Massive Satellite Constellation Ground System", presentation, 2017.
- [46] Atlanta RF, “Link Budget Analysis: Getting Started”, whitepaper, 2013.
- [47] A. Arun, T.K. Sreeja, “An Effective Downlink Budget for 2.24GHz S-Band LEO Satellites”, IEEE, 2013.
- [48] N. Chuberre, M. Cohen, T. Deleu, R. D’Errico, J.B. Dore, M. Gineste, M. Mueck, V.Saravanan “5G Communication with a Heterogeneous, Agile Mobile network in the Pyeongchang Winter Olympic competition”, 5GCHAMPION project, 2017
- [49] Wikipedia,
https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate#/media/File:PSK_BER_curves.svg
- [50] A. Guidotti, A. Vanelli-Coralli, M. Conti, S. Andrenacci, S. Chatzinotas, N. Maturo, B. Evans, A. Awoseyila, A. Ugolini, T. Foggi, L. Gaudio, N. Alagha, & S. Cioni, “Architectures and Key Technical Challenges for 5G Systems Incorporating Satellites”, arxiv, 2018.
- [51] ETSI EN 302 307-2, “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X)”, 2015.

- [52] ETSI TS 101 545-1, "Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2), Part 1: Overview and System Level specification", 2014.
- [53] 3GPP TS 38.211 "Physical channels and modulation (Release 15)", 2017.
- [54] S. Dey, D.K. Mohapatra, & P. Archana, "An Approach to calculate the Performance and Link Budget of LEO Satellite (Iridium) For Communication Operated at frequency Range (1650-1550) MHz" International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET), 2014.
- [55] 3GPP TS 22.368, "Service Requirements for Machine-Type Communications (MTC)," v. 13.1.0, Dec. 2014; <http://www.3gpp.org>, accessed Apr. 30, 2017
- [56] Volker Jungnickel, Holger Gaebler, Udo Krueger, Konstantinos Manolakis, Thomas Haustein, "LTE trials in the return channel over satellite," Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2012 6th, 2012.3GPP TS 36.101, "User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 14)," Jun 2017
- [57] C. Fossa, R. Raines, G. Gunsch, M.A. Temple, "An overview of the IRIDIUM(R) low Earth orbit (LEO) satellite system", Proceedings of the IEEE 1998, National Aerospace and Electronics Conference, 1998.