

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Πληροφοριακά και Επικοινωνιακά Συστήματα

Μεταπτυχιακή Διατριβή



**Μελέτη απόδοσης ασύρματου δικτύου μεγάλης εμβέλειας
LoRa για εφαρμογές IoT**

Γεωργία Αραμπατζή

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Μάιος 2019

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Πληροφοριακά και Επικοινωνιακά Συστήματα

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Μελέτη απόδοσης ασύρματου δικτύου μεγάλης εμβέλειας
LoRa για εφαρμογές IoT**

Γεωργία Αραμπατζή

**Επιβλέπων Καθηγητής
Δημοσθένης Βουγιούκας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στο Πληροφοριακά και Επικοινωνιακά Συστήματα από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου.

Μάιος 2019

Περίληψη

Το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) έχει φέρει την επανάσταση στο παραδοσιακό Internet επιτρέποντας στα αντικείμενα να συνδέονται και να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του διαδικτύου. Ωστόσο, για την βέλτιστη λειτουργία του IoT απαιτούνται κόμβοι αισθητήρων με υψηλή ενεργειακή απόδοση και επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Η τεχνολογία LoRa η οποία είναι πολύ πρόσφατη, δημιουργήθηκε για να ικανοποιήσει πλήρως τις παραπάνω απαιτήσεις.

Σε αυτή τη διατριβή μελετάμε το σύστημα LoRa σε πραγματικό περιβάλλον. Γίνεται μελέτη και προσομοίωση των συστημάτων LoRa και Wi-Fi, τόσο σε επίπεδο παρεμβολών μεταξύ των κόμβων LoRa και κόμβων άλλων τεχνολογιών, όσο και σε επίπεδο ενεργειακών καταναλώσεων. Επιπλέον, μελετάται το λογισμικό CupCarbon και χρησιμοποιείται για την μέτρηση και σύγκριση των ενεργειακών καταναλώσεων μεταξύ των δικτύων LoRa και Wi-Fi.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ότι η τεχνολογία LoRa παρουσιάζει ανοχή στις παρεμβολές, που μπορεί να προέρχονται από κόμβους LoRa ή από κόμβους άλλων τεχνολογιών όπως Wi-Fi, με την αύξηση του συντελεστή εξάπλωσης SF και την μείωση του εύρους ζώνης BW. Τέλος, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας παρατηρείται ότι οι κόμβοι LoRa έχουν την μικρότερη σε σχέση με τους κόμβους Wi-Fi.

Summary

The Internet of Things (IoT) has revolutionized the traditional Internet by enabling objects to connect and communicate with each other through Internet. However, for the optimal operation of IoT, energy sufficient sensor nodes and long range communication are required. LoRa technology, which is very recent, was created to meet the above requirements.

In this dissertation we study the LoRa system in a real environment. LoRa and Wi-Fi systems are studied and simulated, both at interference between LoRa nodes and nodes of other technologies, as well as at the level of energy consumptions. In addition, the CupCarbon software is being studied and is used to measure and compare power consumption between LoRa and Wi-Fi networks.

According to these studies, LoRa technology is able to tolerate the interference caused by LoRa nodes or other technologies nodes, such as Wi-Fi nodes etc. , by increasing the Spread Factor SF and reducing the Bandwidth BW . Finally, as regards power consumption, it is noted that LoRa nodes have the lowest energy consumption compared to Wi-Fi nodes.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της μεταπτυχιακής διατριβής απαιτεί σκληρή δουλειά και υποστήριξη από τους ανθρώπους του οικείου περιβάλλοντος που χωρίς την παρουσία και την ανεκτικότητα τους δεν θα ήταν δυνατή η υλοποίηση της.

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου κύριο Δημοσθένη Βουγιούκα του Ανοιχτού Πανεπιστημίου Κύπρου, για την επιστημονική, πνευματική και ηθική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τον σύζυγο μου που στάθηκε στο πλευρό μου όλο αυτόν τον καιρό προσφέροντας μου ηθική στήριξη.

Περιεχόμενα

	Εισαγωγή	1
1	Internet of Things	3
1.1	Εισαγωγή στο IoT	3
1.2	Τα χαρακτηριστικά του IoT.....	4
1.3	Αρχιτεκτονική του IoT.....	5
1.4	Πρωτόκολλα εφαρμογών IoT.....	6
1.5	Πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT	9
1.5.1	LPWAN	9
1.5.2	WPAN.....	11
1.6	Μοντέλα επικοινωνίας.....	13
1.7	Εφαρμογές IoT.....	14
2	Το πρότυπο 802.11	17
2.1	Εισαγωγή στο πρότυπο 802.11	17
2.2	Αρχιτεκτονική του IEEE 802.11.....	17
2.3	Το φυσικό στρώμα του 802.11	18
2.4	Το MAC στρώμα του 802.11.....	20
2.5	Οι επεκτάσεις του προτύπου 802.11	21
2.6	Το πρότυπο 802.11ah.....	22
3	Το πρότυπο LoRa	24
3.1	Τεχνολογία συστήματος LoRa και Αρχιτεκτονική	24
3.1.1	Spread Spectrum	24
3.1.2	Τοπολογίες.....	25
3.1.3	LOS/NLOS.....	25
3.2	Το φυσικό στρώμα LoRa.....	26
3.2.1	Διαμόρφωση CSS.....	26
3.2.2	Συντελεστής Εξάπλωσης (SF).....	26
3.2.3	Ρυθμός δεδομένων	27
3.2.4	Coding Scheme	28
3.2.5	Μορφή πακέτου LoRa.....	28
3.2.6	Interleaving	30
3.2.7	Forward Error Correction	30
3.2.8	Data Whitening	30
3.2.9	Grey Indexing.....	30
3.2.10	Φαινόμενο Doppler	31
3.3	Ιδιότητες της τεχνολογίας LoRa	31
3.4	Σύγκριση συναφών τεχνολογιών	32
3.5	Το MAC στρώμα LoRaWAN.....	34
3.5.1	Δομή του LoRaWAN.....	35
3.5.2	Αρχιτεκτονική του δικτύου LoRaWAN	36
3.5.3	Κλάσεις τελικών συσκευών LoRaWAN.....	36
3.6	Ασφάλεια.....	38
4	Μοντέλα Διάδοσης και Παρεμβολές	40
4.1	Μοντέλα διάδοσης.....	40
4.1.1	Εμπειρικά Μοντέλα.....	40
4.1.2	Θεωρητικά Μοντέλα	43
4.1.3	Μοντέλα με οπτική επαφή	47
4.1.4	Μοντέλα χωρίς οπτική επαφή.....	49
4.2	Στατιστικές κατανομές.....	51
4.2.1	Κατανομή Rayleigh.....	51
4.2.2	Κατανομή Rice.....	52
4.2.3	Κατανομή NAKAGAMI-m	54
4.3	Ραδιοκάλυψη	55

4.4	Παρεμβολές	56
4.5	Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας.....	57
5	Μελέτες και Μετρήσεις Παρεμβολών LoRa	60
5.1	Θεωρητική μελέτη παρεμβολών.....	60
5.1.1	Συνύπαρξη των δικτύων LoRa και άλλων τεχνολογιών	60
5.1.2	Λήψη σήματος και επιτυχής ακύρωση παρεμβολών	64
5.1.3	Πακέτα που χάθηκαν από τις συγκρούσεις και πακέτα που ελήφθησαν με λανθασμένο φορτίο CRC.....	67
5.2	Προσομοίωση παρεμβολών.....	72
5.3	Μετρήσεις παρεμβολών	77
5.3.1	Μετρήσεις παρεμβολών Wi-Fi σε LoRa	77
5.3.2	Μετρήσεις της ευαισθησίας LoRa σε παρεμβολές.....	81
5.3.3	Μετρήσεις παρεμβολών με κόμβους LoRa	84
5.3.4	Μετρήσεις παρεμβολών IEEE 802.15.4g σε LoRa.....	90
6	Προσομοίωση στο λογισμικό CupCarbon	93
6.1	Εισαγωγή στο CupCarbon	93
6.2	Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας CupCarbon	95
6.3	Υπολογισμός παρεμβολών στο CupCarbon	97
6.4	Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας στο CupCarbon	98
6.5	Προσομοίωση κατανάλωσης ενέργειας δικτύων LoRa και Wi-Fi.....	100
7	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις	109
7.1	Συμπεράσματα.....	109
7.2	Μελλοντικές προεκτάσεις	111
	Βιβλιογραφία	112

Εισαγωγή

Στην παρούσα διατριβή θα γίνει μελέτη της τεχνολογίας LoRa ,αναλύοντας τα χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες και την αρχιτεκτονική της. Η μελέτη των παρεμβολών μεταξύ των συσκευών LoRa, WiFi και άλλων τεχνολογιών αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της διατριβής αυτής. Η υλοποίηση της μελέτης παρεμβολών θα γίνει μέσω των θεωρητικών μελετών, της προσομοίωσης και των μετρήσεων ώστε να αποδειχθεί η ευρωστία του προτύπου LoRa στις παρεμβολές.

Στην θεωρητική μελέτη θα αποδειχθεί ότι η αύξηση των κόμβων προκαλεί αύξηση των παρεμβολών και αύξηση του ποσοστού των πακέτων που συγκρούονται και πως η χρήση υψηλού SF συμβάλει στην αποφυγή των παραπάνω. Στην προσομοίωση θα αποδειχθεί πως η συνεχής αποστολή δεδομένων μειώνει το PDR (Packet Delivery Rate) και πως η αύξηση των gateway προκαλεί την αύξηση του PDR. Τέλος, στις μετρήσεις θα αποδειχθεί πως μετριάζονται οι ομοκαναλικές παρεμβολές μεταξύ LoRa και WiFi με την αύξηση του SF και την μείωση του εύρους ζώνης. Επιπλέον, πως αποφεύγονται οι παρεμβολές μέσα στην ζώνη μεταξύ LoRa και WiFi με την χρήση των αχρησιμοποίητων τμημάτων των 80MHz. Ακόμα, στις παρεμβολές μεταξύ των κόμβων LoRa με οπτική επαφή θα μελετηθεί ο ρόλος του SF και του εύρους ζώνης σε σχέση με το PER (Packet Error Rate). Για τις παρεμβολές με μη οπτική επαφή μεταξύ των κόμβων LoRa θα αποδειχθεί ότι η αύξηση του SF οδηγεί σε αύξηση της ανοχής σε παρεμβολές. Επιπλέον, θα μελετηθούν οι επιπτώσεις που έχει η τιμή του RSSI και ο χρόνος που θα ξεκινήσει η παρεμβολή στο ζητούμενο . Τέλος, θα συγκριθούν οι τεχνολογίες LoRa και 802.15.4g για το ποια από τις δυο είναι ανθεκτική στις παρεμβολές.

Όσον αφορά την μελέτη των ενεργειακών καταναλώσεων αυτή θα γίνει με προσομοίωση στο λογισμικό CupCarbon, ώστε να διαπιστωθεί ποια από τις δυο τεχνολογίες LoRa και WiFi καταναλώνει την λιγότερη ενέργεια.

Επομένως τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα με τα οποία θα ασχοληθεί η έρευνα είναι:

- η απόδοση του συστήματος LoRa σε πραγματικό περιβάλλον
- η μελέτη, η προσομοίωση και μέτρηση των συστημάτων LoRa, WiFi και άλλων τεχνολογιών σε επίπεδο παρεμβολών
- η μελέτη του λογισμικού CupCarbon και η χρήση του για την μέτρηση και την σύγκριση των ενεργειακών καταναλώσεων μεταξύ των δικτύων LoRa και Wi-Fi

.

Κεφάλαιο 1

Internet of Things

1.1 Εισαγωγή στο IoT

Στις μέρες, ολοένα και περισσότερα φυσικά αντικείμενα συνδέονται μεταξύ τους και συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον τους. Το Internet of Things έχει μπει στην ζωή μας σε όλους τους τομείς όπως βιομηχανία, υγεία, εκπαίδευση, γεωργία κτλ.

Ο όρος του Internet of Things[1] παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1998 από τον Kevin Ashton με την φράση του “Το Internet of Things έχει την δυνατότητα να αλλάξει τον κόσμο όπως έκανε και το Internet, ενδεχομένως και περισσότερο”. Όμως, η χρήση του ήταν περιορισμένη στην δεκαετία του 1990 λόγω της χαμηλής απόδοσης της διασύνδεσης του δικτύου. Το 2005 έγινε και επίσημα γνωστό από το International Telecommunication Union (ITU) με στόχο τα πάντα να μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους. Η βασική ιδέα του IoT ήταν η αυτόνομη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών που τροφοδοτούνται με τεχνολογίες όπως RFID (Radio Frequency IDentification) και ασύρματα δίκτυα (WSNs) καθώς και η αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων και επεξεργασία. Με απλά λόγια έξυπνες συσκευές συνδεδεμένες μεταξύ τους και διαθέσιμες από παντού και οποτεδήποτε.

Σήμερα, πάνω από 5 τρισεκατομμύρια «έξυπνες» συσκευές είναι συνδεδεμένες και αυτός ο αριθμός προβλέπεται να αυξηθεί ραγδαία σύμφωνα με προβλέψεις ειδικών αναμένεται να φτάσει μέχρι το 2020 στα 50 τρισεκατομμύρια. Καθώς ο αριθμός των συσκευών δεκαπλασιάζεται και οι απαιτήσεις είναι μεγάλες, καθιστά αναγκαία την χρήση μεγαλύτερου χώρου διευθύνσεων όπως είναι η IPv6. Επιπλέον, λόγω της ετερογένειας των συσκευών και της δυνατότητας παρακολούθησης τους κρίνεται αναγκαίος ο παράγοντας της ασφάλειας ο οποίος είναι πολύ σημαντικός. Τέλος, απαιτείται αρχιτεκτονική που να ανταποκρίνεται στις προκλήσεις του IoT καθώς και πρωτόκολλα ώστε να μπορούν να επικοινωνούν οι ετερογενείς συσκευές.

1.2 Τα χαρακτηριστικά του Internet of Things

Τα χαρακτηριστικά του IoT είναι τα παρακάτω [2]:

- Οι ετερογενείς Συσκευές: καθώς το IoT χρησιμοποιείται πλέον σε κάθε τομέα και σε διαφορετικές λειτουργικές περιοχές οι πολυάριθμες συσκευές που μετέχουν σε αυτό παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια. Επομένως, η διαχείριση τέτοιων συστημάτων απαιτεί κατάλληλα πρωτόκολλα και κατάλληλη αρχιτεκτονική που να μπορούν να τα υποστηρίξουν.
- Η επεκτασιμότητα: στο σύστημα IoT συνδέεται ένας μεγάλος συσκευών, οι οποίες ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους. Η επεκτασιμότητα το καθιστά ευέλικτο στο να αντιμετωπίσει τις ανάγκες που προκύπτουν. Ο κύριος λόγος της επεκτασιμότητας του συστήματος είναι για να μπορεί να ανταπεξέλθει στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις. Με αυτό τον τρόπο το σύστημα λειτουργεί χωρίς καθυστερήσεις, κάνοντας σωστή και όχι άσκοπη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων του.
- Η διάχυτη ανταλλαγή δεδομένων μέσω ασύρματων τεχνολογιών: στα IoT συστήματα η επικοινωνία μεταξύ των έξυπνων συσκευών γίνεται μέσω των ασύρματων τεχνολογιών δίνοντας την δυνατότητα στις συσκευές να συνδεθούν στο δίκτυο.
- Οι βέλτιστες ενεργειακές λύσεις: για να είναι αποτελεσματικές οι συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους θα πρέπει να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια που καταναλώνουν και αυτό διότι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας στις συσκευές αυτές θα πρέπει να είναι μέγιστη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να οδηγήσει πολλές συσκευές να χρησιμοποιούν εκτός από μπαταρίες και εναλλακτικές πηγές ενέργειας παρέχοντας έτσι ενεργειακή αποτελεσματικότητα.
- Η δυνατότητα εντοπισμού και παρακολούθησης: στις συσκευές IoT που η επικοινωνία τους γίνεται μέσω των ασύρματων τεχνολογιών υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης και εντοπισμού τους.
- Οι αυτό-οργανωτικές δυνατότητες: οι έξυπνες συσκευές του συστήματος IoT έχουν την δυνατότητα να δρουν αυτόνομα χωρίς να απαιτείται η ανθρώπινη παρέμβαση.
- Διαλειτουργικότητα: στο IoT οι συσκευές αναλύουν και ανταλλάσσουν μεγάλο όγκο πληροφοριών μεταξύ τους. Οι συσκευές που το απαρτίζουν είναι ετερογενείς και ανήκουν σε διαφορετικές πλατφόρμες. Έτσι λοιπόν,

προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αυτή η πληροφορία θα πρέπει να υπάρχει διαλειτουργικότητα μεταξύ των εφαρμογών και οι πληροφορίες να έχουν την κατάλληλη μορφή.

- Η ασφάλεια και ιδιωτικότητα: η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι του IoT. Στο ετερογενές δίκτυο του IoT δεν μπορεί να διασφαλιστεί η ασφάλεια καθώς ανταλλάσσονται τεράστιες ποσότητες πληροφοριών. Επιπλέον, θα πρέπει να διασφαλιστεί και η ιδιωτικότητα των δεδομένων αποτελώντας ένα κρίσιμο θέμα διότι οι πληροφορίες μπορούν να υποκλαπούν από τρίτους. Επομένως, η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη από του σχεδιαστές του συστήματος θωρακίζοντας τα με μηχανισμούς κρυπτογράφησης , μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης στα δεδομένα, κατάλληλο σύστημα διαχείρισης ταυτότητας έξυπνης συσκευής κ.α.

1.3 Αρχιτεκτονική του Internet of Things

Για να μπορέσουν τα τρισεκατομμύρια των ετερογενών συσκευών να επικοινωνήσουν και να συνδεθούν στο διαδίκτυο απαιτείται η κατάλληλη αρχιτεκτονική και τα κατάλληλα πρωτόκολλα. Η αρχιτεκτονική του IoT χωρίζεται σε 5 στρώματα (layers) [3].

Το κατώτερο στρώμα του IoT είναι το στρώμα των αντικειμένων (Perception Layer ή Object Layer) και περιλαμβάνει τις φυσικές συσκευές που σαν σκοπό τους έχουν την συλλογή και επεξεργασία των πληροφοριών. Τέτοιες συσκευές είναι οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές που εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες. Ο αισθητήρας είναι μια συσκευή που ανιχνεύει, μετρά μια φυσική ποσότητα όπως την θερμοκρασία, την υγρασία, την πίεση κ.α. ενώ ο ενεργοποιητής είναι μια συσκευή που λαμβάνει σήμα και δημιουργεί μηχανική κίνηση. Ο σκοπός αυτού του στρώματος είναι να ψηφιοποιήσει τα δεδομένα και να τα μεταφέρει στο επόμενο στρώμα που είναι το στρώμα αφαίρεσης αντικειμένων (Object Abstraction layer).

Το στρώμα αφαίρεσης αντικειμένων ή στρώμα δικτύου (Object Abstraction Layer) είναι υπεύθυνο για την ασφαλή μεταφορά των δεδομένων μέσω καναλιών, από το Object Layer στο οποίο έχουν παραχθεί, προς το Service Management Layer. Η μεταφορά των δεδομένων γίνεται μέσω διαφόρων τεχνολογιών όπως RFID, LTE, UMTS, GSM, Bluetooth, ZigBee κτλ.

Το στρώμα διαχείρισης υπηρεσιών (Service Management Layer) παρέχει υπηρεσίες στον αιτούντα με τη βοήθεια διευθύνσεων και ονομάτων. Καθώς υπάρχει ετερογένεια μεταξύ των συσκευών το στρώμα αυτό δίνει την δυνατότητα στους προγραμματιστές του IoT να δουλεύουν με τις συσκευές αυτές χωρίς να απαιτείται συγκεκριμένη πλατφόρμα. Τέλος, το στρώμα αυτό επεξεργάζεται τα ληφθέντα δεδομένα, λαμβάνει αποφάσεις και παρέχει υπηρεσίες μέσω των πρωτοκόλλων των δικτύων.

Το στρώμα των εφαρμογών (Application Layer) παρέχει πληροφορίες που ζητούνται από τους χρήστες όπως μετρήσεις θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας κτλ. Οι υπηρεσίες που παρέχει το στρώμα αυτό διακρίνονται για την υψηλή τους ποιότητα για την ικανοποίηση των πελατών. Η βιομηχανία, το έξυπνο σπίτι, η υγεία είναι κάποιοι από τους τομείς τους οποίους καλύπτει το στρώμα αυτό.

Το Business Layer είναι υπεύθυνο για την διαχείριση όλων υπηρεσιών και δραστηριοτήτων του IoT. Το στρώμα αυτό λαμβάνει όλα τα δεδομένα από το στρώμα των εφαρμογών και δημιουργεί μοντέλα, γραφήματα κ.α. Επιπλέον, διαχειρίζεται τα 4 παραπάνω στρώματα και έχει την δυνατότητα να σχεδιάζει, να αναλύει, να εφαρμόζει, να αναπτύσσει και να παρακολουθεί τα στοιχεία που είναι σχετικά με το IoT.



Διάγραμμα 1 Τα 5 στρώματα της IoT αρχιτεκτονικής

1.4 Πρωτόκολλα εφαρμογών IoT

Τα πρωτόκολλα, όπως είναι γνωστό αποτελούνται από ένα σύνολο εντολών και κανόνων και χρησιμοποιούνται όταν μια συσκευή θέλει να επικοινωνήσει με μια άλλη (Device-to-device D2D) η οποία μπορεί να είναι συνδεδεμένη στο ίδιο ή σε διαφορετικό δίκτυο. Στο IoT λόγω των ετερογενών συσκευών τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται για

την αποστολή και την λήψη μηνυμάτων και στην συνέχεια τα δεδομένα αποστέλλονται στον server και ο server μοιράζεται τα δεδομένα με τις εφαρμογές.

CoAP

Το CoAP (Constrained Application Protocol) [3] είναι ένα πρωτόκολλο στο επίπεδο εφαρμογής που ακολουθεί το μοντέλο πελάτη- εξυπηρετητή μεταφοράς πληροφορίας μέσω του διαδικτύου, παρόμοιο με το HTTP, αλλά προορίζεται για συσκευές με περιορισμένους πόρους. Το CoAP χρησιμοποιεί παρόμοιες μεθόδους με το HTTP όπως GET, POST,PUT, DELETE κτλ. όμως επιτρέπει να πετύχουμε χαμηλό overhead και multicast. Το HTTP είναι βασισμένο στο TCP πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιεί point to point επικοινωνία, καθιστώντας το πολύπλοκο για χρήση σε εφαρμογές του Internet of Things. Για αυτό το λόγω, το CoAP χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο UDP το οποίο είναι ελαφρύ σε σχέση με το TCP και επιτρέπει multicast το οποίο ικανοποιεί την ανάγκη για ομαδική επικοινωνία. Επιπλέον, το CoAP βασίζεται στην αρχιτεκτονική REST. Επιπλέον, χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο DTLS για την προστασία των μεταδιδόμενων δεδομένων στην end to end επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Χωρίζεται σε δυο υποστρώματα, το κομμάτι των μηνυμάτων που επιδρά με το UDP και το Request/Response που διαχειρίζεται το κομμάτι πελάτη – εξυπηρετητή (client-server). Το CoAP πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τέσσερις τύπους μηνυμάτων confirmable, non-confirmable, reset, acknowledgement. Τα χαρακτηριστικά του είναι η παρακολούθηση των πόρων, η δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων πομποδέκτη μεταξύ του client – server ,η εύρεση πόρων, η ασφάλεια και η αλληλεπίδραση με το HTTP.

MQTT

Το MQTT (Message Queue Telemetry Transport) [4] αποτελεί το πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων ενός δικτύου IoT. Το MQTT πρωτόκολλο είναι βασίζεται σε ανοιχτό κώδικα, είναι απλό, ελαφρύ και μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί κάνοντας το έτσι ιδανικό για χρήση σε δίκτυα όπου εμπλέκονται συσκευές με περιορισμένες δυνατότητες όπως Machine to Machine και Internet of Things. Χρησιμοποιεί το μοντέλο Publish/Subscribe για την ανταλλαγή μηνυμάτων. Στο μοντέλο αυτό ο ένας κόμβος του δικτύου που ονομάζεται publisher μπορεί να στέλνει μηνύματα σε έναν ή περισσότερους κόμβους που ονομάζονται subscriber με τη χρήση ενδιάμεσου διακομιστή, τον λεγόμενο broker. Ο broker, ο οποίος αποτελεί τον ενδιάμεσο κόμβο φιλτράρει και παραδίδει τα μηνύματα στους ενδιαφερόμενους

κόμβους. Τα μηνύματα που χρησιμοποιούν οι τελικοί χρήστες στο πρωτόκολλο MQTT είναι CONNECT, CONNACK, PUBLISH, SUBSCRIBE. Το MQTT χρησιμοποιεί τα θέματα (topics) για να απλουστεύσει την διαδικασία αποστολής μηνυμάτων. Τα θέματα χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν τον broker να βρει ποιος subscriber ενδιαφέρεται για τα μηνύματα. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του MQTT αποτελεί το Quality of Service καθώς διευκολύνει την επικοινωνία πάνω από μη αξιόπιστα δίκτυα, διότι διαχειρίζεται πρωτόκολλα αναμετάδοσης και εγγυείται την παράδοση ενός μηνύματος.

XMPP

Το πρωτόκολλο XMPP (Extensible Messaging Presence Protocol) [4] είναι ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως είναι τα chats, βίντεο κλήσεις κ.α. Η ανταλλαγή των δεδομένων γίνεται μέσω ροών XML stanzas ανάμεσα στον server και στον πελάτη και η επικοινωνία είναι ασύγχρονη. Το XMPP είναι ένα ασφαλές πρωτόκολλο που λειτουργεί σε πολλές πλατφόρμες, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στις συσκευές να στέλνουν μηνύματα μεταξύ τους ανεξάρτητα με το λειτουργικό σύστημα που τρέχουν. Το XMPP τρέχει πάνω στο TCP και κάποιες φορές και πάνω στο HTTP που και αυτό τρέχει πάνω στο TCP. Η αρχιτεκτονική του XMPP στηρίζεται στο μοντέλο πελάτη - εξυπηρετητής και η πρόσβαση στο δίκτυο γίνεται μόνο όταν ο πελάτης συνδεθεί στον εξυπηρετητή και με αυτόν τον τρόπο ο πελάτης μπορεί να ανταλλάσσει XML stanza με άλλους πελάτες. Η διευθυνσιοδότηση της συσκευής είναι μοναδική ώστε τα μηνύματα να δρομολογηθεί και να παραδοθεί στον προορισμό του. Μόλις ο πελάτης τελειώσει με την ανταλλαγή κλείνει και η σύνδεση με τον εξυπηρετητή.

AMQP

Το AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) [4] είναι ένα πρωτόκολλο του στρώματος εφαρμογής για περιβάλλοντα ανταλλαγής δεδομένων. Είναι αξιόπιστο πρωτόκολλο μεταφοράς και χρησιμοποιείται για την αξιόπιστη παράδοση των μηνυμάτων χωρίς απώλειες. Η αρχιτεκτονική του AMQP στηρίζεται στο μοντέλο publisher/subscriber/broker. Τα μηνύματα του publisher τα λαμβάνει ο broker, ο οποίος αποθηκεύει και προωθεί τα μηνύματα αυτά. Μόλις ο broker λάβει τα μηνύματα από τον publisher τα αποθηκεύει σε ξεχωριστά queues και στη συνέχεια τα προωθεί

στους παραλήπτες. Η ασφάλεια του πρωτοκόλλου παρέχεται από το TLS (Transport Layer Security).

DDS

Το DDS (Data Distribution Service) είναι ένα middleware πρωτόκολλο πραγματικού χρόνου επικοινωνίας M2M και η αρχιτεκτονική του βασίζεται στο μοντέλο publisher/subscriber. Επιτρέπει την αξιόπιστη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του publisher και του subscriber. Στο DDS έχουμε δυο επίπεδα, το Data-Centric Publish-Subscribe (DCPS) που είναι υπεύθυνο για την παράδοση των πληροφοριών στους Subscriberest και το Data Local Reconstruction Layer (DLRL) που επιτρέπει την ενσωμάτωση του DDS στο στρώμα της εφαρμογής.

1.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, η πρώτη κατηγορία είναι η LPWAN (Low Power Wide Area Network) και η δεύτερη είναι η WPAN (Wireless Personal Area Network).

1.5.1 Low Power WAN

Οι LPWAN τεχνολογίες αποτελούν τεχνολογίες με μεγάλη εμβέλεια μετάδοσης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό κόστος υλοποίησης. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες στην βιομηχανία και ιδανικές για IoT εφαρμογές όπου απαιτείται η μεταφορά μικρής ποσότητας δεδομένων σε μεγάλη απόσταση καθώς και αξιόπιστη και εύρωστη επικοινωνία. Οι τεχνολογίες αυτές λειτουργούν τόσο στην εξουσιοδοτημένη ζώνη όσο και στην μη εξουσιοδοτημένη ζώνη. Τέτοιες τεχνολογίες είναι οι SigFox, LoRa, NB-IoT, 2G/3G/4G και άλλες.

SigFox [5]

Η SigFox είναι μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε το 2009 και επιτρέπει απομακρυσμένες συσκευές να συνδεθούν στο UNB (Ultra Narrow Band). Η SigFox υποστηρίζει ότι κάθε σημείο πρόσβασης μπορεί να χειριστεί πάνω από ένα εκατομμύριο συσκευές με περιοχή κάλυψης πάνω από 30 με 50 km σε αγροτικές περιοχές και 3 με 10 km σε αστικές περιοχές. Με την χρήση του UNB γίνεται αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον πολύ χαμηλό θόρυβο και την χαμηλή κατανάλωση

ενέργειας. Επιπλέον, η χρήση του UNB παρέχει υψηλότερη ευαισθησία στον δέκτη μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το κόστος σχεδιασμού της κεραίας. Η SigFox αρχικά υποστήριζε μόνο την uplink επικοινωνία και αργότερα εξελίχθηκε σε αμφίδρομη. Ο αριθμός μηνυμάτων στο uplink ανέρχεται 140 ανά ημέρα ενώ το downlink σε 4 ανά ημέρα.

LoRa

Η τεχνολογία LoRa την οποία θα δούμε αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια είναι μια τεχνολογία μεγάλου εύρους δηλαδή επιτρέπει την μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Χρησιμοποιεί την μη εξουσιοδοτημένη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων ISM (Industrial Scientific and Medical) και χωρίζεται σε δυο επίπεδα, το φυσικό επίπεδο με την χρήση της διαμόρφωσης Chirp Spread Spectrum (CSS) και το πρωτόκολλο του MAC επιπέδου. Το σήμα που προκύπτει με την διαμόρφωση CSS έχει χαμηλότερα επίπεδα θορύβου καθιστώντας το έτσι ανθεκτικό σε υψηλές παρεμβολές. Η LoRa χρησιμοποιεί συντελεστές διάδοσης (Spreading Factor) για την προσαρμογή του ρυθμού των δεδομένων και το εύρος διάδοσης. Έτσι λοιπόν, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διάδοσης τόσο αυξάνεται η εμβέλεια σε βάρος όμως του ρυθμού δεδομένων και αντίστροφα. Το πρωτόκολλο του MAC επιπέδου ονομάζεται LoRaWAN και με την χρήση του το μήνυμα που μεταδίδεται από μια συσκευή λαμβάνεται από έναν αριθμό σταθμών βάσεων που σαν αποτέλεσμα έχει την επιτυχή λήψη των μηνυμάτων. Τα μηνύματα αυτά προωθούνται από τον σταθμό βάσης στον server ο οποίος ελέγχει την ασφάλεια των μηνυμάτων αυτών, στέλνει ACK στην συσκευή και προωθεί τα μηνύματα αυτά στον server εφαρμογών. Τέλος, η πολλαπλή αποστολή των μηνυμάτων στους σταθμούς βάσης επιτρέπει στο LoRaWAN τον εντοπισμό των συσκευών και αποτρέπει το handover στο LoRaWAN δίκτυο.

NB-IoT [5]

Η τεχνολογία NB-IoT είναι μια τεχνολογία στενής ζώνης τυποποιημένη από την 3GPP. Το NB-IoT λειτουργεί σε εξουσιοδοτημένες ζώνες μαζί με το GSM και το LTE. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας του NB-IoT βασίζεται στο LTE πρωτόκολλο όπου το NB-IoT μειώνει τις λειτουργίες του LTE πρωτοκόλλου στο ελάχιστο διαμορφώνοντας τες όπως απαιτείται για τις εφαρμογές IoT. Αναπτύχθηκε για να καλύψει ένα ευρύ φάσμα συσκευών IoT και εστιάζει σε συσκευές χαμηλού κόστους, υψηλής αξιοπιστίας, ασφάλειας, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και δεκαετή διάρκεια ζωής μπαταρίας.

2G/3G/4G

Για να λειτουργήσουν οι IoT εφαρμογές απαιτούνται οι κυψελοειδής τεχνολογίες οι οποίες παρέχουν υψηλής ταχύτητας σύνδεση στο Internet. Η τεχνολογία αυτή ενώ παρέχει υψηλή ταχύτητα σύνδεσης στο Internet ωστόσο απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

1.5.2 WPAN

Οι WPAN (Wireless Personal Area Network) τεχνολογίες αποτελούν τεχνολογίες για ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης οι οποίες λειτουργούν στην μη εξουσιοδοτημένη ζώνη ISM. Τέτοιες τεχνολογίες είναι οι 6LoWPAN, ZigBee, RFID, NFC, BLE, Z-Wave.

6LoWPAN

Η 6LoWPAN τεχνολογία δημιουργήθηκε από την IETF (Internet Engineering Task Force) και αποτελεί ένα IoT πρωτόκολλο επικοινωνιών πάνω σε ασύρματα δίκτυα IEEE 802.15.4 χαμηλής ενέργειας χρησιμοποιώντας την IPv6 υποστηρίζοντας ικανοποιητικό αριθμό διευθύνσεων IP . Έχει την δυνατότητα να συνδέεται απευθείας με άλλα IP δίκτυα χωρίς την παρεμβολή ενδιάμεσων, όπως gateways ή proxys. Η τεχνολογία αυτή έχει χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υποστηρίζει διαφορετικές τοπολογίες όπως αστέρα και πλέγματος.

ZigBee

Το ZigBee πρωτόκολλο βασίζεται στο χαμηλής ενέργειας ασύρματο πρότυπο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί στην μη αδειοδοτημένη ραδιοσυχνότητα ISM στα 2.4 GHz . Είναι ένα απλό, φθινό και αξιόπιστο πρωτόκολλο το οποίο μεταφέρει δεδομένα μικρής εμβέλειας υποστηρίζοντας διαφορετικούς τύπους τοπολογιών όπως αστέρα, πλέγματος.

RFID

Το RFID προέρχεται από το Radio Frequency IDentification που σημαίνει “ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνότητων”. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί ραδιοκύματα

για τον εντοπισμό και την ανάγνωση στοιχείων. Η λειτουργία του βασίζεται στην συσκευή ανάγνωσης και στον πομποδέκτη γνωστός και σαν RFID ετικέτα (tag). Όταν οι RFID ετικέτες βρεθούν στην εμβέλεια της κεραίας του αναγνώστη τότε υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ τους και οι πληροφορίες από τον αναγνώστη μεταφέρονται στο εκάστοτε πληροφοριακό σύστημα. Υπάρχουν δυο κατηγορίες RFID tags τα ενεργητικά και τα παθητικά. Τα ενεργητικά έχουν δική τους μπαταρία, χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες και λειτουργούν αρκετά μέτρα μακριά από τον RFID αναγνώστη. Ενώ τα παθητικά δεν έχουν δική τους πηγή ενέργειας και χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες. Τέλος, δεν απαιτείται η ετικέτα να έχει οπτική επαφή με τον αναγνώστη. Τα RFID tags τοποθετούνται σε προϊόντα, ζώα ακόμα και σε ανθρώπους.

NFC

Το NFC (Near Field Communication) αποτελεί μια μικρής εμβέλειας ασύρματη τεχνολογία που λειτουργεί στην συχνότητα των 13,56 MHz και επιτρέπει σε δυο συσκευές όπου η μια είναι φορητή και περιέχει το τσιπ της NFC και η άλλη περιέχει τον αισθητήρα, να επικοινωνήσουν μεταξύ τους σε απόσταση τεσσάρων με πέντε εκατοστών. Το σύστημα πληρωμής με επαφή της πιστωτικής κάρτας αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα.

BLE

Η τεχνολογία BLE (Bluetooth Low Energy) δεν είναι άμεσα συμβατή με το κλασικό Bluetooth. Αποτελεί τεχνολογία μικρής εμβέλειας με χαμηλή ισχύ ώστε μπορεί να λειτουργήσει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σε σύγκριση με το κλασικό Bluetooth, η κάλυψη που προσφέρει είναι δέκα φορές μεγαλύτερη και η καθυστέρηση 15 φορές μικρότερη του κλασικού. Έτσι λοιπόν, είναι κατάλληλο για να καλύψει ανάγκες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας καθώς και λιγότερο συχνή συναλλαγή δεδομένων. Τέλος, χαρακτηρίζεται από το χαμηλό κόστος.

Z-Wave

Το Z-Wave είναι ένα χαμηλής ισχύος ασύρματο πρωτόκολλο που εστιάζει στα “έξυπνα” σπίτια. Το Z-Wave καλύπτει περίπου 30 μέτρα point-to-point επικοινωνία και εξυπηρετεί εφαρμογές που απαιτούν μικρή μετάδοση δεδομένων όπως έλεγχος

φωτισμού, ενέργειας κ.τ.λ. Λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ζώνη ISM και είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο πρωτόκολλο.

1.6 Μοντέλα επικοινωνίας IoT

Οι συσκευές του IoT συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους με βάση τα μοντέλα επικοινωνίας τα οποία έχουν οριστεί το 2015 από το Συμβούλιο Αρχιτεκτονικής Διαδικτύου (Internet Architecture Board). Είναι ένα πλαίσιο τεσσάρων μοντέλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούν οι IoT συσκευές. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα αυτά και εξηγούνται τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Device-to-device επικοινωνία

Στο μοντέλο αυτό δυο ή περισσότερες συσκευές επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς την μεσολάβηση τρίτου. Η επικοινωνία τους επιτυγχάνεται μέσω των IP δικτύων ή μέσου του Internet. Οι επικοινωνίες device-to-device συνήθως χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως το Z-Wave, το ZigBee κ.α. Έτσι, οι συσκευές στο μοντέλο αυτό επικοινωνούν ανταλλάσσοντας συνήθως μικρά μηνύματα για την επίτευξη της λειτουργίας τους. Η εφαρμογή του μοντέλου αυτού συνίσταται κυρίως στα “έξυπνα” σπίτια. Το πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστεί στο μοντέλο αυτό είναι η ασυμβατότητα των πρωτοκόλλων επικοινωνίας από συσκευή σε συσκευή με αποτέλεσμα να οδηγήσει τον χρήστη να επιλέξει συσκευές που χρησιμοποιούν κοινό πρωτόκολλο.

Devices-to-cloud επικοινωνία

Στο μοντέλο αυτό η IoT συσκευή συνδέεται απευθείας στο Internet cloud service για να ανταλλάξει δεδομένα και να διαχειριστεί την κίνηση των δεδομένων. Για να καταστεί όμως δυνατή η σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του δικτύου IP ώστε να μπορέσει η συσκευή να συνδεθεί με το cloud απαιτείται σύνδεση μέσω Ethernet ή WiFi. Στο “έξυπνο” σπίτι η συσκευή η οποία μπορεί να είναι για παράδειγμα ένας θερμοστάτης στέλνει τα δεδομένα στη cloud βάση δεδομένων ώστε να γίνει για παράδειγμα ανάλυση της οικιακής κατανάλωσης. Επιπλέον, η σύνδεση με το cloud δίνει την δυνατότητα στον χρήστη της εξ αποστάσεως σύνδεσης με τις συσκευές. Υπάρχει το ενδεχόμενο να δημιουργηθεί πρόβλημα στην διαλειτουργικότητα όταν οι συσκευές είναι φτιαγμένες από διαφορετικούς κατασκευαστές. Συνήθως η συσκευή και το cloud είναι από τον ίδιο κατασκευαστή.

Device-to-gateway επικοινωνία

Στο μοντέλο αυτό που λέγεται και device-to-application layer gateway (ALG) στην σύνδεση μεταξύ συσκευής και cloud μεσολαβεί η υπηρεσία ALG. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια εφαρμογή, η οποία δρα σαν μεσολαβητής μεταξύ της συσκευής και της υπηρεσίας cloud παρέχοντας ασφάλεια στα δεδομένα και μετάφραση των πρωτοκόλλων. Η τοπική gateway συσκευή είναι ένα smartphone που τρέχει μια εφαρμογή για να επικοινωνήσει με μια IoT συσκευή και να μεταφέρει τα δεδομένα στο cloud. Το μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι το κόστος ανάπτυξης του συστήματος και των εφαρμογών.

Back-end data-sharing μοντέλο

Στο μοντέλο αυτό ο χρήστης μπορεί να εξάγει και να αναλύσει τα δεδομένα της έξυπνης συσκευής από την υπηρεσία cloud σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλες πηγές. Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια επέκταση του μοντέλου επικοινωνίας device-to-cloud. Επίσης, επιτρέπει να συγκεντρωθούν και να αναλυθούν τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από τις IoT συσκευές. Ακόμα, διευκολύνει την φορητότητα των δεδομένων και οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να μετακινούν τα δεδομένα τους όταν εναλλάσσουν IoT συσκευές χωρίς να δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα.

1.7 Εφαρμογές του IoT

Το IoT έχει εισβάλλει για τα καλά τα τελευταία χρόνια σε όλους τους τομείς της ζωής. Έχει μεταβάλλει τον τρόπο αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με το τεχνικό περιβάλλον και δημιούργησε νέες ευκαιρίες επενδύσεων καθώς και νέες υλοποιήσεις ιδεών. Είναι πλέον αισθητή η παρουσία του σε αμέτρητες εφαρμογές, προσφέροντας υπηρεσίες που διευκολύνουν την ζωή του ανθρώπου. Παρακάτω αναλύονται οι τομείς όπου εφαρμόζεται το IoT [1] [2].

Έξυπνα σπίτια

Η εφαρμογή της τεχνολογίας IoT στα κτήρια συμβάλει σημαντικά στην βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων ότι αφορά την άνεση τους, την ασφάλεια του σπιτιού καθώς και την εξοικονόμηση ενέργειας όπως ηλεκτρισμός, νερό, θέρμανση, ψύξη κ.τ.λ. Στο έξυπνο σπίτι όλες οι συσκευές είναι διασυνδεδεμένες μεταξύ τους και με το Internet. Οι αισθητήρες που τοποθετούνται χρησιμοποιούνται για να παρακολουθήσουν την κατανάλωση των πόρων και δεύτερον για να αντιληφθούν τις

ανάγκες των χρηστών. Το σύστημα αυτό αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα και επομένως είναι απαραίτητη η διαλειτουργικότητα καθώς και ο κατάλληλος σχεδιασμός ο οποίος θα διασφαλίζει ότι οι αποφάσεις που παίρνουν οι πόροι (θέρμανση, ψύξη, φωτισμός κ.α.) βρίσκονται σε συμφωνία με τις ανάγκες των χρηστών.

Έξυπνες πόλεις

Η ανάγκη για ποιοτικότερη ζωή των κατοίκων των πόλεων καθώς και η διαχείριση των σύγχρονων αστικών προβλημάτων οδήγησε στις έξυπνες πόλεις στις οποίες επιδιώκεται η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων της μέσα από την παρακολούθηση και τον έλεγχο όπως για παράδειγμα το οδικό δίκτυο, το δίκτυο ενέργειας κ.α. Παράδειγμα έξυπνης πόλης αποτελεί η χρήση τεχνολογιών για τον έλεγχο της κυκλοφορίας όπου μέσω του διαδικτύου γίνεται παρακολούθηση των δρόμων και των αυτοκινητοδρόμων προσφέροντας πληροφορίες κίνησης ,ατυχημάτων στους οδηγούς συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας. Το έξυπνο σύστημα στάθμευσης αυτοκινήτων με τεχνολογίες RFID παρέχει στους οδηγούς πληροφορίες σχετικά με τα σημεία στάθμευσης μέσα στην πόλη. Άλλο παράδειγμα αποτελεί η τοποθέτηση αισθητήρων για την μέτρηση των επιπέδων ρύπανσης μέσα στην πόλη.

Υγεία

Η τεχνολογία του IoT μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη ακόμα και στον τομέα της υγείας. Ιδιαίτερα σε ηλικιωμένα άτομα με επιβεβαρυσμένο ιστορικό υγείας η εφαρμογή της τεχνολογίας του IoT αποδεικνύεται καταλυτική και αυτό διότι με τους ιατρικούς αισθητήρες που τοποθετούνται στους ασθενείς παρακολουθείται η υγεία τους με μετρήσεις θερμοκρασίας, παλμών, αρτηριακής πίεσης κ.α. Επιπλέον με τους αισθητήρες μπορεί να καταγραφεί και η δραστηριότητα των ασθενών όπως καύση θερμίδων, καταμέτρηση βημάτων, άσκηση κ.α. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποστέλλονται σε διάφορα ιατρικά κέντρα για την επεξεργασία τους.

Περιβαλλοντική παρακολούθηση

Ένας ακόμα τομέας όπου η τεχνολογία IoT είναι απαραίτητη είναι το περιβάλλον. Με την τοποθέτηση πολυάριθμων αισθητήρων σε δάση, βουνά, θάλασσες, ωκεανούς κ.α. έχουμε την επεξεργασία των πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο καθώς και την ανίχνευση και παρακολούθηση αποτρέποντας έτσι τον κίνδυνο για ανθρώπους και ζώα. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κρίσιμες περιοχές όπου δεν είναι δυνατή η ανθρώπινη

παρουσία και μεταδίδουν πληροφορίες μόλις ανιχνευθούν ανωμαλίες. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η περιβαλλοντική ασφάλεια με πυρανίχνευση όπου τοποθετούνται αισθητήρες οι οποίοι ανιχνεύουν την πιθανή παρουσία φωτιάς στέλνοντας σήμα συναγερμού στην αντίστοιχη υπηρεσία και παρέχοντας πληροφορίες για πιθανή παρουσία ανθρώπων. Τέλος, με την τεχνολογία IoT μπορούμε να έχουμε πρόσβαση σε περιβαλλοντολογικά δεδομένα που αφορούν πλημμύρες, σεισμούς, τσουνάμι κ.α.

Κεφάλαιο 2

Το πρότυπο 802.11

2.1 Εισαγωγή στο πρότυπο 802.11

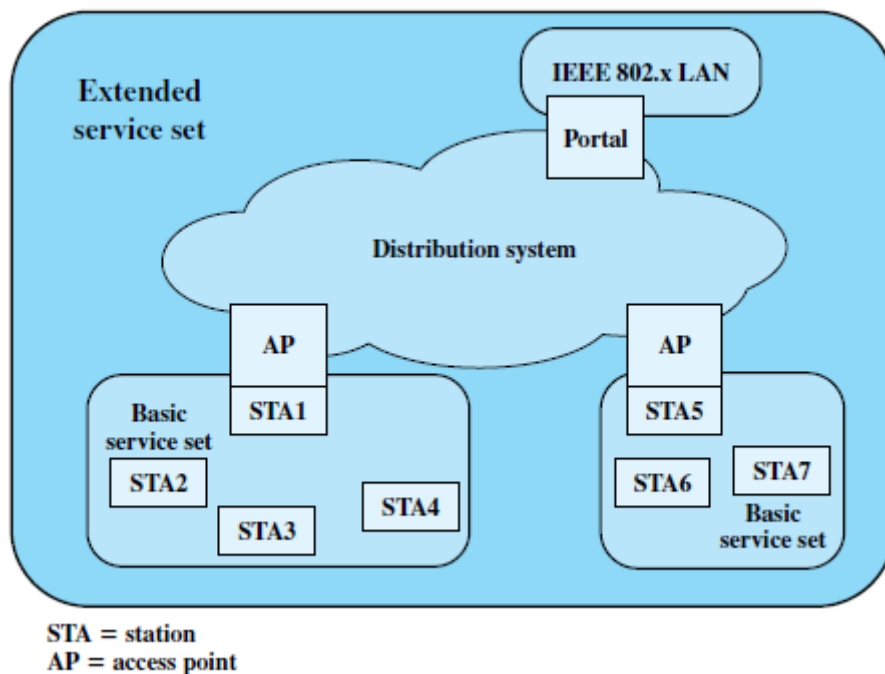
Το 1985 πάρθηκε η απόφαση από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών να απελευθερωθεί η ζώνη φάσματος 2.4-2.5 GHz διαθέτοντας την προς χρήση από τις Βιομηχανικές Επιστημονικές και Ιατρικές κοινότητες (ISM) χωρίς την απαίτηση άδειας. Αυτό αποτέλεσε την αφετηρία το 1987 να εγκριθεί το πρώτο πρότυπο 802.11 και η τεχνολογία Wi-Fi να τυποποιηθεί από το ινστιτούτο IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) κάτω από το πρότυπο 802 για ασύρματα δίκτυα Local Area Networks (LAN) στη ζώνη λειτουργίας ISM.

Το πρώτο πρότυπο που κέρδισε την αποδοχή ήταν το 802.11b, όμως πάντα υπήρχε η ανησυχία της διαλειτουργικότητας με άλλα προϊόντα από άλλους κατασκευαστές. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το 1999 να δημιουργηθεί η Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), που στην συνέχεια μετονομάστηκε σε Wi-Fi Alliance, και να δημιουργήσει μια δοκιμαστική σουίτα για την πιστοποίηση της διαλειτουργικότητας των προϊόντων 802.11b. Ο όρος που χρησιμοποιείται για τα πιστοποιημένα προϊόντα 802.11b είναι Wi-Fi.

2.2 Αρχιτεκτονική του IEEE 802.11

Το βασικό δομικό στοιχείο του ασύρματου δικτύου 802.11 είναι το BSS (Basic Service Set), το βασικό σύνολο εξυπηρέτησης. Το BSS αποτελείται από έναν αριθμό σταθμών οι οποίοι εκτελούν το ίδιο πρωτόκολλο MAC και ανταγωνίζονται για πρόσβαση στο ίδιο κοινό ασύρματο μέσο. Αν κάποιος σταθμός μετακινηθεί έξω από το BSS στο οποίο ανήκει τότε δεν μπορεί να επικοινωνήσει με τους υπόλοιπους σταθμούς του συγκεκριμένου BSS. Τα BSS μπορούν να συνδεθούν σε ένα DS (Distribution System) μέσω του Access Point (AP). Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μετακίνηση των δεδομένων μεταξύ του BSS και του DS. Μέσα στο BSS η επικοινωνία μεταξύ των σταθμών δεν

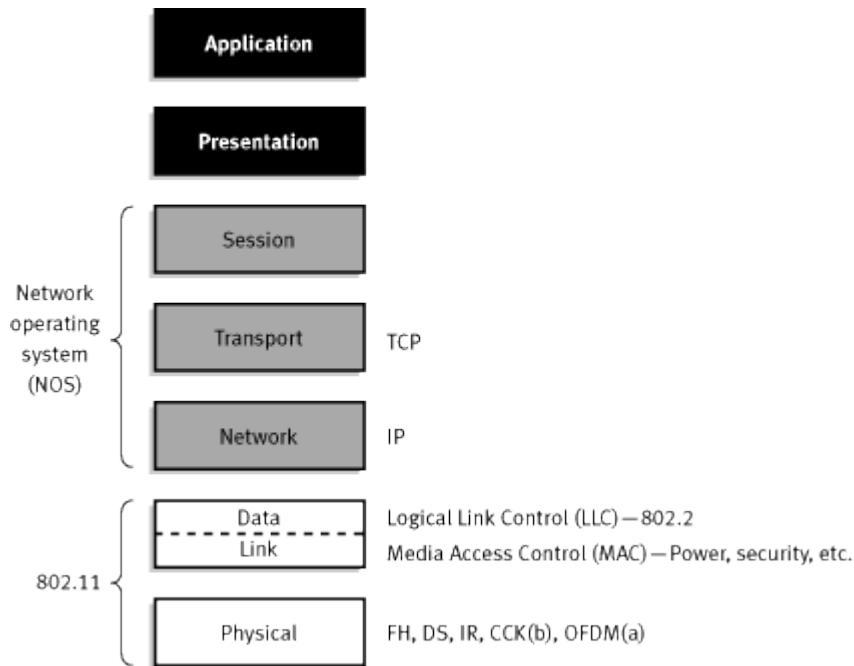
γίνεται απευθείας αλλά μέσω του AP όπου ένα πλαίσιο MAC αποστέλλεται από τον σταθμό προέλευσης προς το AP και στη συνέχεια από το AP στον σταθμό που προορίζεται. Το ίδιο συμβαίνει και όταν θέλουν να επικοινωνήσουν απομακρυσμένοι σταθμοί μεταδίδονται μέσω AP και DS. Στην περίπτωση που όλοι οι σταθμοί μέσα στο BSS επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους και δεν υπάρχει AP έχουμε ένα ad hoc δίκτυο και το BSS ονομάζεται Independent BSS (IBSS) και το οποίο έχει περιορισμένη ραδιοκάλυψη. Τέλος, η δημιουργία σύνδεσης πολλών BSS με DS δημιουργεί ένα πολύπλοκο δίκτυο το λεγόμενο εκτεταμένο σύνολο υπηρεσιών, ESS (Extended Service Set). Οι σταθμοί μέσα στο ίδιο ESS μπορούν να μετακινούνται από το ένα BSS σε ένα άλλο.



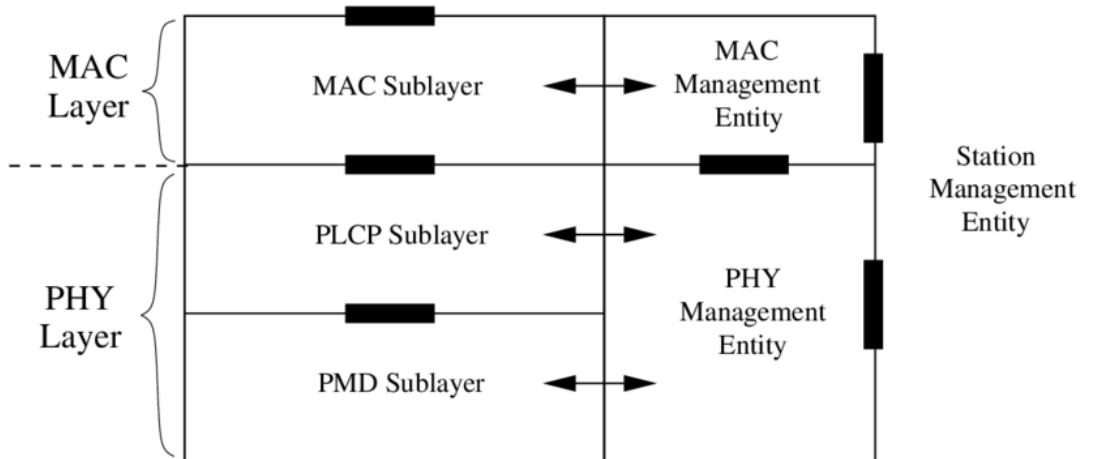
Διάγραμμα 2 IEEE 802.11 αρχιτεκτονική

2.3 Το φυσικό στρώμα του 802.11

Το 802.11 επικεντρώνεται στα δυο χαμηλότερα στρώματα του OSI που είναι το φυσικό στρώμα (Physical Layer-PHY) και το στρώμα MAC (Medium Access Control Layer)



Διάγραμμα 3 Τα στρώματα του OSI



Διάγραμμα 4 Το φυσικό στρώμα PHY του 802.11

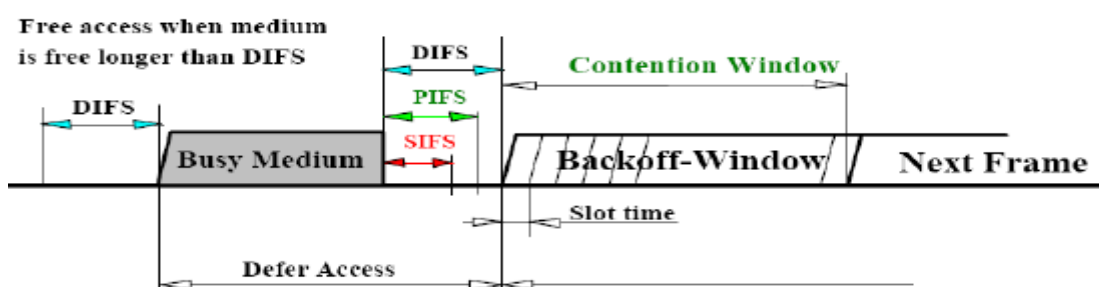
Το φυσικό στρώμα PHY είναι αυτό που κάνει την ανίχνευση φέροντος, ορίζοντας το PMD να ελέγξει αν το μέσο είναι ελεύθερο ή απασχολημένο. Το φυσικό στρώμα αποτελείται από δυο υποστρώματα το PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) και το PMD (Physical Medium Dependent). Όταν ο σταθμός δεν λαμβάνει ή μεταδίδει πλαίσια, το PLCP ανιχνεύει για εισερχόμενα σήματα και καθορίζει αν το κανάλι είναι ελεύθερο με την ανίχνευση ενέργειας. Επιπλέον, διασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται η σωστή μορφή πλαισίου για τα δεδομένα που πρέπει να μεταδοθούν από το PMD. Το PMD βρίσκεται κάτω από την καθοδήγηση του PLCP συνδέεται άμεσα με το ασύρματο μέσο, τον αέρα και διαμορφώνει και αποδιαμορφώνει τα πλαίσια που μεταδίδονται.

2.4 Το MAC στρώμα του 802.11

Το MAC στρώμα [9] αποτελείται από 2 βασικές οντότητες από το MAC υπόστρωμα και το MAC στρώμα (MLME) διαχειριστή της οντότητας. Το MAC υπόστρωμα είναι υπεύθυνο για λειτουργίες όπως πρόσβαση στο κανάλι, τεμαχισμός πακέτων και κρυπτογράφηση. Ενώ το MAC στρώμα (MLME) είναι υπεύθυνο για τον συγχρονισμό, την διαχείριση της ενέργειας και της σύνδεσης.

Ο κύριος μηχανισμός πρόσβασης στο κανάλι είναι το DCF (Distributed Coordination Function). Το DCF χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο που ακούει πριν μεταδώσει, το λεγόμενο CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Με την πολλαπλή προσπέλαση ανίχνευση φέροντος καθορίζεται πριν από κάθε μετάδοση αν ένα κανάλι είναι ελεύθερο ή κατειλημμένο. Στην περίπτωση που το κανάλι είναι ελεύθερο ο κόμβος που θέλει να μεταδώσει περιμένει ένα χρονικό διάστημα που ονομάζεται inter-frame-space (IFS), το οποίο αποτελεί το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των πλαισίων ενός σταθμού. Έτσι, ο κόμβος στέλνει ένα RTS (Ready To Send) στον δέκτη και αν αυτός είναι ελεύθερος στέλνει στον κόμβο ένα CTS (Clear To Send) και με αυτόν τον τρόπο οι υπόλοιποι κόμβοι που ακούνε δεν επιτρέπεται να εκπέμψουν. Στη συνέχεια ο κόμβος στέλνει τα δεδομένα και περιμένει για επιβεβαίωση ACK.

Στην περίπτωση που το κανάλι είναι κατειλημμένο ο κόμβος που θέλει να μεταδώσει πρέπει να αναβάλλει την μετάδοση του για χρονικό διάστημα DIFS (DCF InterFrame Space) ή EIFS Extended (InterFrame Space) εξαρτάται από το αν το τελευταίο πλαίσιο λήφθηκε σωστά ή όχι, μέχρι αυτό να ελευθερωθεί. Στην συνέχεια, ο σταθμός θα δημιουργήσει μια τυχαία περίοδο υποχώρησης (backoff), έναν επιπρόσθετο χρόνο πριν την μετάδοση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των συγκρούσεων μεταξύ των σταθμών.



Διάγραμμα 5 Λειτουργία του DCF

Για να επιτευχθεί η σύνδεση με το AP θα πρέπει πρώτα να γίνει ανίχνευση του AP, στην συνέχεια πιστοποίηση και σύνδεση με το AP. Υπάρχουν δυο τρόποι με τους οποίους ο κόμβος μπορεί να συνδεθεί με το Access Point (AP) η παθητική σάρωση και η ενεργητική σάρωση.

Στην παθητική σάρωση ο σταθμός περιμένει να λάβει ένα πλαίσιο το beacon, τα beacons είναι κάτι σαν φάροι που περιέχουν πληροφορίες για την SSID και την MAC διεύθυνση του AP και έτσι ακολουθούν το SSID του κάθε AP, οπότε μετά ο χρήστης επιλέγει το SSID που θέλει να συνδεθεί. Στη συνέχεια το AP πρέπει να του επιστρέψει πίσω ένα frame στο οποίο του λέει ότι μπορεί να συνδεθεί.

Στην ενεργητική σάρωση, ο σταθμός προσπαθεί να βρει κάποιο σημείο πρόσβασης ώστε να γίνει ζεύξη στέλνοντας τα probe frames , τα δοκιμαστικά πλαίσια. Έτσι ο σταθμός εκπέμπει τα δοκιμαστικά αυτά πλαίσια περιμένοντας απάντηση από το AP. Τα beacons στέλνονται περιοδικά και η περιοδικότητα στην ενεργητική σάρωση είναι κάθε 10ms, ενώ αντίστοιχα στην παθητική σάρωση είναι κάθε 100ms.

2.5 Οι επεκτάσεις του πρότυπου 802.11

Το πρότυπο IEEE 802.11 εξελίχθηκε με το πέρασμα του χρόνου και ακολούθησαν και άλλες επεκτάσεις οι οποίες αναφέρονται παρακάτω.

802.11b

Το 802.11b που αναπτύχθηκε το 1999 αποτελεί βελτίωση του αρχικού πρότυπου , λειτουργεί στην μη αδειοδοτημένη ζώνη ISM στα 2.4 GHz και παρέχει υψηλό ρυθμό δεδομένων 5.5Mbps και 11Mbps. Οι υψηλές αυτές ταχύτητες επιτεύχθηκαν με την προσθήκη μιας νέας διαμόρφωσης, της CCK (Complementary Code Keying) ώστε να υποστηρίξει τις παραπάνω ταχύτητες. Το ISM φάσμα ζώνης των 2.4GHz χωρίζεται σε 14 κανάλια, όπου οι κεντρικές συχνότητες τους απέχουν μεταξύ τους 5MHz. Τέλος, υπάρχει η πιθανότητα γειτονικών παρεμβολών από πολλούς χρήστες λόγω της χρήσης τριών μόνο καναλιών.

802.11 a

Το πρότυπο 802.11a εκδόθηκε το 1999 μαζί με το 802.11b και υποστηρίζει ταχύτητες από 6 Mbps έως 54Mbps. Η λειτουργία του καθορίστηκε μόνο στην ζώνη των 5GHz U-

NII (Unlicensed National Information Infrastructure). Η διαμόρφωση που χρησιμοποιεί είναι η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) με 52 carriers από τα οποία τα τέσσερα είναι δοκιμαστικά tunes για την εκτίμηση του καναλιού. Το 802.11a παρουσιάζει καλή προστασία από γειτονικές παρεμβολές.

802.11 g

Το πρότυπο 802.11g εκδόθηκε το 2002 και αποτελεί την επέκταση του 802.11b για να υποστηρίξει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 54 Mbps. Λειτουργεί στην ISM ζώνη στα 2.4 GHz και υποστηρίζει την τεχνική διαμόρφωσης CCK και OFDM καθώς και άλλες τεχνικές.

802.11 n

Το πρότυπο 802.11n είναι συμβατό με τα πρότυπα 802.11 a/b/g και αυτό διότι χρησιμοποιεί και τις δυο περιοχές UNII 5GHz και ISM 2.4GHz. Με την τεχνική MIMO (Multiple Input Multiple Output) που χρησιμοποιεί το πρότυπο αυτό έχουμε ταυτόχρονη λήψη αλλά και μετάδοση μέσω πολλαπλών κεραιών MxN όπου M η κεραία του πομπού και η N η κεραία του δέκτη, με αποτέλεσμα να ενισχύεται το σήμα και το throughput. Επομένως, είναι 4 με 5 φορές πιο γρήγορο σε σχέση με το 802.11a/g και με ταχύτητα μεγαλύτερη των 200Mbps.

802.11 ac

Το πρότυπο 802.11ac εκδόθηκε το 2013 με τρεις βασικές βελτιώσεις ώστε να αυξηθεί η απόδοση του. Αρχικά αυξήθηκε το εύρος του καναλιού από 40 MHz σε 80MHz και 160 MHz καθώς και η διαμόρφωση αυξήθηκε από 64-QAM σε 256-QAM. Επιπλέον, αυξήθηκε και ο μέγιστος αριθμός ροών της χωρικής πολυπλεξίας από 4 σε 8. Κατά συνέπεια, αυτό αντιπροσωπεύει την αύξηση της τελικής ταχύτητας από 866 Mbps έως και 7Gbps. Τέλος, η τεχνική διαμόρφωσης του προτύπου είναι η OFDM.

2.6 Το πρότυπο 802.11 ah

Η τεχνολογία Wi-Fi που χρησιμοποιείται σήμερα δεν είναι κατάλληλη για IoT, καθώς έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει υψηλό ρυθμό απόδοσης που σε περιορισμένο αριθμό σταθμών σε εσωτερικό χώρο και σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Έτσι, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του IoT και να γεφυρωθεί το κενό η ομάδα εργασίας IEEE

802.11 δημιούργησε το 802.11 ah , ώστε να μπορούν χιλιάδες συσκευές εσωτερικού και εξωτερικού χώρου να λειτουργήσουν στην ίδια περιοχή.

Τα χαρακτηριστικά του 802.11 ah [10]

Το 802.11 ah λειτουργεί στην μη αδειοδοτημένη ζώνη sub-1GHz. Έχει κληρονομήσει το φυσικό του στρώμα από το πρότυπο 802.11ac. Τα κανάλια που χρησιμοποιεί το 802.11 ah είναι 10 φορές μικρότερα από αυτά του 802.11ac.

Το 802.11 ah χρησιμοποιεί τις τεχνικές OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), MIMO (Multiple Input Multiple Output) και το Downlink Multi-User MIMO. Η διάρκεια των συμβόλων στην OFDM στο 802.11 ah είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από ότι στο 802.11ac. Επιπλέον, στις καθορισμένες συχνότητες Wi-Fi 2.4GHz και 5GHz το εύρος διάδοσης είναι μικρότερο κατά 3 με 9 φορές. Ακόμα, υποστηρίζει τις διαμορφώσεις BPSK, QPSK, και από 16 έως 256-QAM.

Το στρώμα MAC έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των σταθμών που συνδέονται στο δίκτυο διασφαλίζοντας και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Επομένως, αυτό που προσφέρει το πρότυπο 802.11 ah πρώτον είναι, το εύρος κάλυψης όπου λόγω του στενού εύρους ζώνης έχουμε μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου και με μεγαλύτερα σύμβολα οι μεταδόσεις στο 802.11 ah γίνονται πιο ανθεκτικές στις διασυμβολικές παρεμβολές. Με την υποστήριξη της τεχνικής MIMO επωφελείται από το spatial diversity το οποίο βελτιώνει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Δεύτερον, η υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών IoT που επιτυγχάνεται με τον μηχανισμό πρόσβασης καναλιού RAW (Restricted Access Window) για την αποτροπή συγκρούσεων διαχωρίζοντας τους σταθμούς σε διαφορετικές ομάδες και περιορίζοντας την πρόσβαση των καναλιών σε μια ομάδα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για να αυξηθεί ο αριθμός των υποστηριζόμενων σταθμών το πρότυπο 802.11 ah χρησιμοποιεί την ιεραρχική δομή AID. Τρίτον , η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας στις IoT συσκευές οι οποίες απαιτείται να έχουν μπαταρίες με μεγάλη διάρκεια ζωής. Η εξοικονόμηση ενέργειας στο πρότυπο αυτό επιτυγχάνεται με μικρότερης διάρκειας κεφαλίδες, με τον μηχανισμό της σιωπηρής επιβεβαίωσης και με την ελαχιστοποίηση του χρόνου μετάδοσης.

Κεφάλαιο 3

Το πρότυπο LoRa

3.1 Τεχνολογία Συστήματος LoRa και Αρχιτεκτονική

Παρακάτω περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί το σύστημα LoRa καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν για την υλοποίηση ασύρματων δικτύων επικοινωνιών χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας.

3.1.1 Spread Spectrum

DSSS

Στην τεχνική DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) τα σήματα των δεδομένων πολλαπλασιάζονται με έναν κώδικα διάδοσης τον chip sequence εξαπλώνοντας το εύρος του σήματος. Το ψηφιακό σήμα και το σήμα που προκύπτει εμφανίζεται σαν θόρυβος. Το Direct Sequence σήματος ρίχνει την ισχύ του θορύβου κάτω από το όριο του θορύβου έτσι ώστε να μην υπάρχει απώλεια στην πληροφορία. Τα δεδομένα στον δέκτη ανακτώνται πολλαπλασιάζοντας τα με αντίγραφο της ακολουθίας διάδοσης ώστε να συμπιεστεί το εξαπλωμένο σήμα και να επανέλθει στο αρχικό μη εξαπλωμένο.

FHSS

Στην τεχνική είναι η FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) το συνολικό διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων χωρίζεται σε μικρότερα ευρυζωνικά κανάλια και πομπός και δέκτης μεταπηδούν μεταξύ διαφορετικών καναλιών.

CSS

Η τεχνική CSS (Chirp Spread Spectrum) αναπτύχθηκε αρχικά για εφαρμογή στα Radar όμως τα τελευταία χρόνια υιοθετήθηκε από έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών επικοινωνίας λόγω της χαμηλής ισχύος και της ευρωστίας που παρουσιάζει. Στην τεχνική CSS η διάδοση του σήματος σε μεγάλη ζώνη συχνοτήτων επιτυγχάνεται με τη δημιουργία chirp σήματος το οποίο μεταβάλλεται γραμμικά στην συχνότητα. Έτσι οι

αντισταθμίσεις χρόνου και συχνότητας μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ίσες και το εύρος ζώνης της συχνότητας του είναι ίσο με το φασματικό εύρος ζώνης του σήματος.

3.1.2 Τοπολογίες

Τοπολογία Αστέρα

Η τοπολογία αστέρα χρησιμοποιείται είναι εύκολη στην υλοποίηση της και χρησιμοποιείται συνήθως για συσκευές με περιορισμένη ισχύ. Υπεύθυνος στην τοπολογία αστέρα είναι ο κεντρικός συντονιστής ο οποίος δρομολογεί όλες τις μεταδόσεις του δικτύου και ελαχιστοποιεί και τον όγκο της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι μια αποτυχία του συντονιστή μπορεί να απενεργοποιήσει τις επικοινωνίες του δικτύου.

Τοπολογία πλέγματος

Στην τοπολογία πλέγματος, τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω των κόμβων και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε κόμβος να μεταδίδει το ίδιο μήνυμα ανεξάρτητα από τελικό προορισμό. Το πλεονέκτημα αυτής τοπολογίας είναι ότι σε περίπτωση που χαθεί η σύνδεση με έναν ή περισσότερους κόμβους δεν απενεργοποιούνται οι επικοινωνίες του δικτύου και μπορούν να επαναπροσδιοριστούν. Το μειονέκτημα είναι η πολυπλοκότητα και η αυξημένη κυκλοφορία καθώς το ίδιο μήνυμα μπορεί να μεταδοθεί από πολλούς κόμβους.

3.1.3 LOS/NLOS

Στα σενάρια με οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (LOS) η απευθείας συνιστώσα είναι πάντα η δυνατότερη και η γρηγορότερη που φτάνει στον δέκτη και βέβαια υπάρχουν και άλλες συνιστώσες που είναι χαμηλότερες και έρχονται με διαφορετικά πλάτη και διαφορετικές φάσεις από ανακλάσεις, περιθλάσεις, διαθλάσεις. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να προβλεφτεί ποια είναι η απευθείας συνιστώσα και κατά πόσο μεγαλύτερη είναι σε σχέση με τις άλλες που έρχονται διαφορετικές στιγμές και από διαφορετικές διαδρομές.

Στα σενάρια με μη οπτική επαφή (NLOS) υπάρχει ένας πομπός και ένας δέκτης όπου στον δέκτη τα σήματα δεν φτάνουν απευθείας αλλά φτάνουν από ανάκλαση ή από σκέδαση. Έτσι, κάθε ακτίνα που λαμβάνει ο δέκτης μπορεί να έχει διαφορετικό πλάτος και φάση και όταν αυτή φτάνει με την ίδια φάση τότε γίνεται προσθετική όταν όμως

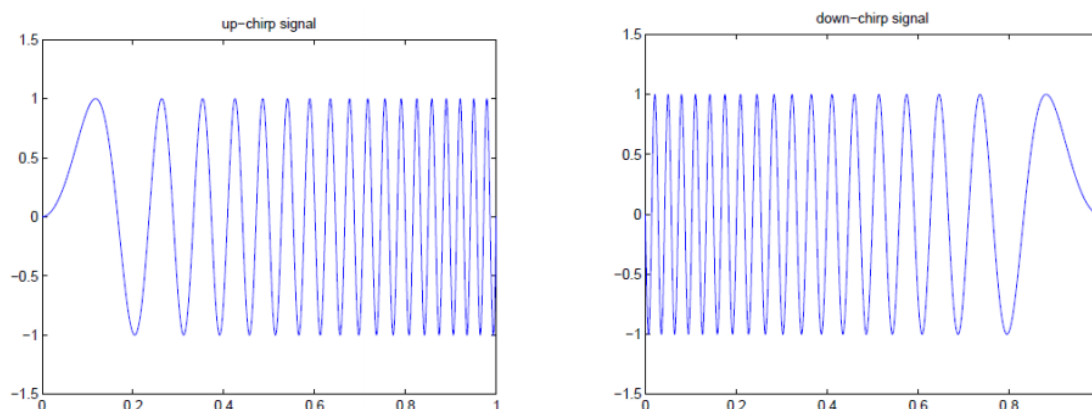
φτάνει με διαφορετική φάση τότε γίνεται αφαιρετική με αποτέλεσμα να παρατηρούνται πολλά σκαμπανεβάσματα στο σήμα του δέκτη.

3.2 Το φυσικό στρώμα LoRa

Η τεχνολογία LoRa είναι μια τεχνολογία του φυσικού στρώματος που έχει σχεδιαστεί και κατοχυρωθεί από την Semtech. Το φυσικό στρώμα LoRa επιτρέπει επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής ισχύος. Η LoRa χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο του στρώματος MAC το LoRaWAN το οποίο αποτελεί ένα ανοιχτό πρωτόκολλο.

3.2.1 Διαμόρφωση CSS (Chirp Spectrum Spread)

Η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί την διαμόρφωση CSS, όπου η εξάπλωση του φάσματος επιτυγχάνεται με την παραγωγή chirp σήματος το οποίο μεταβάλλεται διαρκώς στη συχνότητα. Τα chirp σήματα αυτά ονομάζονται up-chirp όταν αυξάνονται διαρκώς στην συχνότητα, είτε down-chirp όταν διαρκώς μειώνονται στην συχνότητα [11]. Τα chirp σήματα χρησιμοποιούνται σαν φέροντα σήματα όπου κωδικοποιείται ένα μήνυμα.



Διάγραμμα 6 Up chirp και Down chirp σήμα

3.2.2 Συντελεστής εξάπλωσης SF (Spreading Factor)

Στη LoRa η ποσότητα του κώδικα εξάπλωσης που εφαρμόζεται στο αρχικό σήμα καλείται συντελεστής εξάπλωσης (Spreading Factor). Η LoRa χρησιμοποιεί έξι συντελεστές εξάπλωσης SF7 έως SF12. Σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 1 το σήμα που διαμορφώνεται με το μεγαλύτερο συντελεστή εξάπλωσης διάδοσης θα ταξιδέψει μεγαλύτερη απόσταση άρα και μεγαλύτερο χρόνο μετάδοσης (ToA) και θα ληφθεί από

τον δέκτη χωρίς λάθη σε σχέση με ένα σήμα με μικρότερο συντελεστή εξάπλωσης SF.
[12]

Spreading factor (at 125 kHz)	Bitrate (bps)	Expected Range (km)	Time on Air (ms) (for 10 bytes payload)
SF7	5470	2	56
SF8	3125	4	100
SF9	1760	6	200
SF10	980	8	370
SF11	440	11	700
SF12	290	14	1400

Πίνακας 1 Συντελεστές εξάπλωσης SF με ToA

3.2.3 Ρυθμός δεδομένων (data rate)

Ο ρυθμός των bit είναι

$$R_b \text{ (bits/sec)} = SF * \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3.1)$$

όπου BW το εύρος ζώνης σε Hz και SF (Spreading Factor): 7-12

Η περίοδος των συμβόλων δίνεται από τον τύπο:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3.2)$$

Το symbol rate ορίζεται ως

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3.3)$$

Το R_c chip rate ορίζεται ως

$$R_c = R_s * 2^{SF} = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} = BW \quad (3.4)$$

Επομένως, το bit rate που περιλαμβάνει και το error correction scheme ορίζεται ως εξής:

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{(4+CR)} \quad (3.5)$$

όπου BW το εύρος ζώνης σε Hz, CR (code rate): 1-4 και SF (Spreading Factor): 7-12

Αν το Bandwidth BW αυξηθεί τότε θα αυξηθεί και το R_b bit rate και αν αυξηθεί το SF (Spreading Factor) τότε θα μειωθεί το R_b bit rate.

3.2.4 Coding Scheme

Η LoRa χρησιμοποιεί τα Hamming codes για το Forward Error Correction (FEC). Το FEC αποτελεί μια μορφή διόρθωσης και ανάκτησης των bits των πληροφοριών που καταστράφηκαν από τις παρεμβολές. Η LoRa προσφέρει code rates 4/5, 4/6, 4/7 και 4/8.

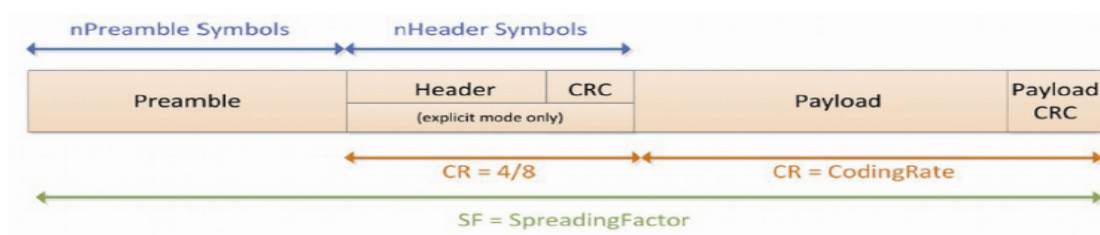
Code Rate	Error Correction (bits)	Error detection (bits)
4/5	0	0
4/6	0	1
4/7	1	2
4/8	1	3

Πίνακας 2 Διόρθωση και ανίχνευση σφαλμάτων LoRa

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα 2 έχουμε error correction για code rate 4/7 και 4/8. Το code rate 4/5 δεν προσφέρει ούτε error correction αλλά και ούτε και error detection. Το code rate 4/6 δεν προσφέρει error correction όμως προσφέρει error detection. Επομένως, για να έχουμε δυνατότητες error correction θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον το code rate 4/7 [13].

3.2.5 Μορφή πακέτου LoRa

Το πακέτο LoRa [14] [15] αποτελείται από τρία στοιχεία, το προίμιο (preamble), την κεφαλίδα (header) και το φορτίο με τα δεδομένα (payload).



Διάγραμμα 7 Μορφή πακέτου LoRa

Το προίμιο (preamble) χρησιμοποιείται για να συγχρονίσει τον δέκτη με το εισερχόμενο σήμα. Το μέγεθος του μπορεί να είναι 8 έως και 65539 σύμβολα. Το ελάχιστο μέγεθος των 8 συμβόλων δεν είναι αρκετό για όλες τις επικοινωνίες.

Στις κεφαλίδες (header) υπάρχουν δυο περιπτώσεις. Η πρώτη είναι η explicit που περιλαμβάνει την κεφαλίδα και η implicit που δεν περιλαμβάνει την κεφαλίδα. Στην περίπτωση της explicit η κεφαλίδα περιέχει πληροφορίες για τον αριθμό των bytes στο φορτίο (payload), το coding rate και για αν χρησιμοποιείται ή όχι το προαιρετικό 16 bit CRC (Cyclic Redundancy Check αποτελεί μια τεχνική εντοπισμού σφαλμάτων κατά την οποία εξακριβώνεται αν το πακέτο έχει ληφθεί με ή χωρίς σφάλματα) μεταδίδεται με έναν κώδικα επιδιόρθωσης σφαλμάτων (error correction mode) με 4/8 coding και έχει και δικό του CRC. Στην περίπτωση του implicit το μέγεθος του φορτίου υπολογίζεται από τον αριθμό των πακέτων καθώς και το coding rate και το CRC πρέπει να ρυθμιστούν με τον ίδιο τρόπο σε πομπό και δέκτη. Τέλος, το φορτίο (payload) περιλαμβάνει τα δεδομένα που μεταδίδονται στον αέρα.

Ο χρόνος που τα πακέτα βρίσκονται στον αέρα (Packet on Air Time) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T_{\text{packet}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}} \quad (3.6)$$

όπου T_{preamble} είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθεί το προοίμιο και T_{payload} ο χρόνος μετάδοσης του φορτίου (payload).

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4.25) * T_s \quad (3.7)$$

όπου n_{preamble} η παράμετρος που επηρεάζει το μήκος του προοιμίου και

4.25 (2 επιπλέον σύμβολα προοιμίου + 2.25 του Start of Frame Delimiter-SFD) είναι ο αριθμός των συμβόλων που απαιτούνται για να φτάσουν στην αρχή το payload

T_s η διάρκεια του κάθε συμβόλου

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$$

$$T_{\text{payload}} = \text{payloadSymNb} * T_s \quad (3.8)$$

όπου PL ο αριθμός των payload bytes

Ο αριθμός των συμβόλων από τα οποία αποτελείται το packet payload και το header δίνεται από τον τύπο

$$\text{payloadSymNb} = 8 + \max\left(\text{ceil}\left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 + 20H}{4(SF - 2DE)}\right)(CR + 4), 0\right) \quad (3.9)$$

όπου PL είναι το φορτίο σε bytes, SF Spreading Factor, H=0 όταν το header είναι ενεργοποιημένο και H=0 όταν δεν υπάρχει header, DE=1 όταν το low data optimization είναι ενεργό και DE=0 όταν είναι ανενεργό, CR coding rate από 1 έως 4

3.2.6 Interleaving

Το Interleaving είναι μια τεχνική που περιπλέκει μέσα στο πακέτο τα bits των δεδομένων. Σε συνδυασμό με το FEC (Forward Error Correction) κάνει τα δεδομένα πιο ανθεκτικά στις παρεμβολές. Στη LoRa υλοποιείται το διαγώνιο interleaver με τα δυο πιο σημαντικά bit αντεστραμμένα. Κάθε διαγώνια λέξη είναι μετατοπισμένη ή αντιστραμμένη από έναν τυχαίο αριθμό bits.[13]

3.2.7 FEC Forward Error Correction

Το FEC είναι η διαδικασία κατά την οποία error correction bits προστίθενται στα δεδομένα μετάδοσης. Αυτά τα περιττά bits βοηθάνε στην επαναφορά των δεδομένων, όταν τα δεδομένα αλλοιώνονται ή καταστρέφονται από τις παρεμβολές. Όσο περισσότερα error correction bits προστίθενται τόσο πιο εύκολα τα δεδομένα μπορούν να διορθωθούν. Ωστόσο, αυτό έχει σαν μειονέκτημα την μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

3.2.8 Data Whitening

Το data whitening εφαρμόζεται για να προκαλέσει τυχαία σύμβολα. Επιπλέον, το βοηθά στην κατανομή των πληροφοριών σε όλο το εύρος της ζώνης του καναλιού. Τα λαμβανόμενα σύμβολα ενδέχεται να υποβληθούν σε διαδικασία re-whiten μέσω της XOR πύλης, χρησιμοποιώντας την ίδια ακολουθία whitening που χρησιμοποιείται από τον πομπό.

3.2.9 Gray Indexing

Η διαδικασία του gray indexing χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί ότι δυο γειτονικά σύμβολα διαφέρουν μόνο κατά 1 bit, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα ότι ο αποκωδικοποιητής θα διορθώσει τα πιθανά bit λάθη. Σύμφωνα με την 3.2.2 παράγραφο το bit rate που περιλαμβάνει και το error correction scheme ορίζεται ως εξής:

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{(4+CR)} \text{ όπου CR είναι το coding rate (1...4)}$$

3.2.10 Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler στις ασύρματες επικοινωνίες μπορεί να εμποδίσει τη σωστή λήψη του σήματος. Προκαλεί μικρή μετατόπιση της συχνότητας στον παλμό και αυτό δημιουργεί μετατόπιση στον άξονα του χρόνου. Εάν ο ρυθμός chirp είναι μεγάλος, η μετατόπιση στον άξονα του χρόνου είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα να θεωρείται αμελητέα. Αυτό κάνει το CSS (Chirp Spread Spectrum) να αποδίδει καλύτερα στην παρουσία του φαινομένου Doppler. Με χαμηλό ρυθμό chirp η μετατόπιση στον άξονα του χρόνου είναι μεγάλη καθιστώντας την σωστή λήψη των πακέτων δύσκολη [16].

3.3 Ιδιότητες της τεχνολογίας LoRa

Σύμφωνα με την Semtech οι ιδιότητες της τεχνολογίας LoRa είναι οι ακόλουθες [17]

Κλιμακωτό εύρος ζώνης

Η τεχνολογία LoRa μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές στενής ζώνης αλλά και για εφαρμογές ευρείας ζώνης και αυτό διότι η LoRa είναι κλιμακωτή τόσο στο εύρος ζώνης όσο και στη συχνότητα.

Constant Envelope / Χαμηλή ισχύς

Η τεχνολογία LoRa όπως και η FSK αποτελεί μια Constant Envelope διαμόρφωση που σημαίνει ότι το ίδιο χαμηλό κόστος, η ίδια χαμηλή ισχύς και τα υψηλής απόδοσης στάδια του ενισχυτή μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν χωρίς διαμόρφωση. Επιπλέον, το κέρδος επεξεργασίας συμβάλλει στη μείωση της ισχύος μετάδοσης, διατηρώντας παράλληλα τον ίδιο ή καλύτερο link budget σε σύγκριση με το FSK.

Υψηλή ευρωστία

Η τεχνολογία LoRa παρουσιάζει ανοχή στις παρεμβολές εντός και εκτός ζώνης λόγω του υψηλού Bandwidth-Time ($BM > 1$).

Multipath/Fading αντοχή

Καθώς ο παλμός chirp είναι ευρυζωνικός κάνει τη LoRa ανθεκτική στο multipath και στο fading καθιστώντας την έτσι ιδανική για χρήση σε αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα.

Ανοχή στο φαινόμενο Doppler

Η μετατόπιση Doppler προκαλεί μια μικρή μετατόπιση συχνότητας στον παλμό LoRa δημιουργώντας μια αμελητέα μετατόπιση στον άξονα του χρόνου του σήματος. Με τη διαμόρφωση CSS η LoRa γίνεται ανθεκτική στο φαινόμενο Doppler.

Μεγάλο εύρος

Το link budget της τεχνολογίας LoRa ξεπερνά αυτό του FSK όταν αυτό συνδυάζεται με ευρωστία στις παρεμβολές και στις διαλείψεις, η βελτίωση αυτή του link budget μπορεί να μεταφραστεί σαν 4 τέσσερις φορές παραπάνω ενίσχυση του φάσματος.

Ενίσχυση χωρητικότητας δικτύου

Οι συντελεστές εξάπλωσης στην LoRa είναι ορθογώνιοι επιτρέποντας τα πολλαπλά σήματα διασποράς να μεταδίδονται ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι, χωρίς να υποβαθμιστεί η ευαισθησία του δέκτη. Σήματα με διαφορετικό συντελεστή εξάπλωσης εμφανίζονται σαν θόρυβος στον πομπό.

Ranging / Εντοπισμός

Μια ιδιότητα της τεχνολογίας LoRa είναι η δυνατότητα της γραμμικής διάκρισης σφαλμάτων μεταξύ συχνότητας και χρόνου και η διαμόρφωση CSS, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές ranging και εντοπισμού.

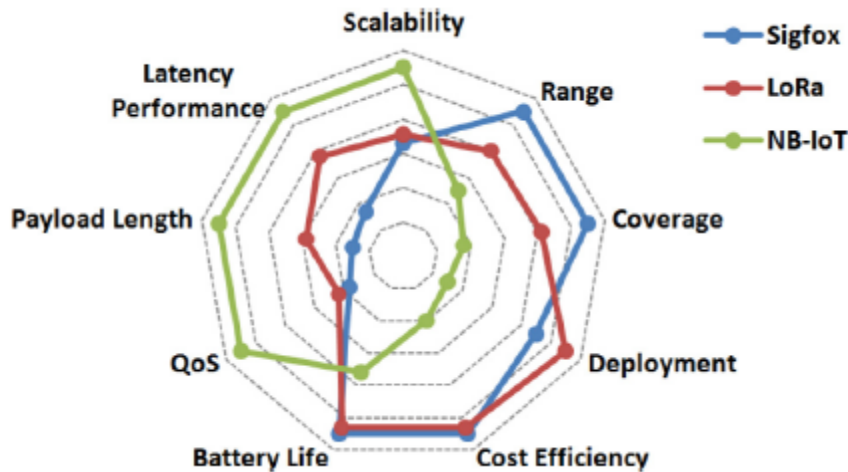
3.4 Σύγκριση συναφών τεχνολογιών

Ο παρακάτω πίνακας 3 δίνει μια συνοπτική σύγκριση των τεχνολογιών LPWAN, Sigfox, LoRaWAN και NB-IoT. [5]

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high	Low
Authentication & encryption	Not supported	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	No	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)	No (under specification)
Allow private network	No	Yes	No
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance	3GPP

Πίνακας 3 Επισκόπηση τεχνολογιών LPWAN

Στο SigFox οι τελικές συσκευές που συνδέονται στους σταθμούς βάσης χρησιμοποιούν την binary phase-shift keying (BPSK) διαμόρφωση, στο LoRaWAN η αμφίδρομη επικοινωνία γίνεται μέσω του chirp spread spectrum (CSS), ενώ το NB-IoT χρησιμοποιεί την QPSK διαμόρφωση. SigFox και LoRaWAN χρησιμοποιούν την μη αδειοδοτημένη ISM ζώνη, ενώ το NB-IoT κάνει χρήση της αδειοδοτημένης LTE συχνότητας. Το εύρος ζώνης στο SigFox είναι 100Hz, στο LoRaWAN είναι 125Hz και 250Hz, ενώ στο NB-IoT είναι 200Hz. Σύμφωνα με τον πίνακα 3 το SigFox παρέχει τον χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων 100bps, το LoRaWAN παρέχει ρυθμό δεδομένων 50kbps, ενώ το NB-IoT παρέχει τον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων στα 200kbps. Τα μηνύματα τα οποία μπορούν να σταλούν ανά ημέρα είναι περιορισμένα στο SigFox και ανέρχονται στα 140 (UL) και 4(DL), ενώ στα LoRaWAN και NB-IoT είναι απεριόριστα. Το υψηλότερο φορτίο μεταφοράς το έχει το NB-IoT με 1600bytes, ενώ σε LoRaWAN το μέγιστο φορτίο μεταφοράς ανέρχεται στα 243bytes και στο SigFox στα 12bytes(UL) και 8bytes(DL). Το εύρος κάλυψης σε SigFox και LoRaWAN είναι υψηλό, ενώ στο NB-IoT είναι χαμηλό. Επίσης, η ανοχή στις παρεμβολές τόσο στο SigFox όσο και στο LoRaWAN είναι υψηλή, σε αντίθεση με το NB-IoT που είναι χαμηλή. Επιπλέον, ενώ LoRaWAN και NB-IoT παρέχουν πιστοποίηση και κρυπτογράφηση το SigFox δεν τα υποστηρίζει. Τέλος, τον προσαρμοστικό ρυθμό δεδομένων (ADR) τον χρησιμοποιεί μόνο το LoRaWAN.

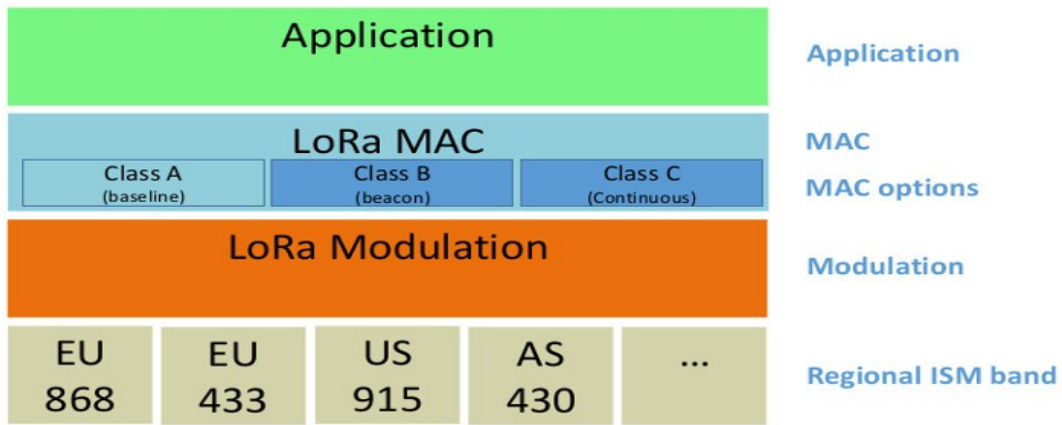


Διάγραμμα 8 Σύγκριση τεχνολογιών SigFox LoRaWAN και NB-IoT

Σύμφωνα με το διάγραμμα 8, το NB-IoT παρέχει Quality of Service (QoS) σε σχέση με τις άλλες δυο τεχνολογίες καθώς χρησιμοποιεί την αδειοδοτημένη ζώνη. SigFox και LoRaWAN έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας σε σχέση με το NB-IoT. Το NB-IoT παρουσιάζει υψηλότερη επεκτασιμότητα σε σχέση με τις άλλες δυο τεχνολογίες. Τέλος, όσον αφορά την αποδοτικότητα κόστους αυτή είναι υψηλότερη για το SigFox και το LoRaWAN σε σχέση με το NB-IoT.

3.5 Το MAC στρώμα LoRaWAN

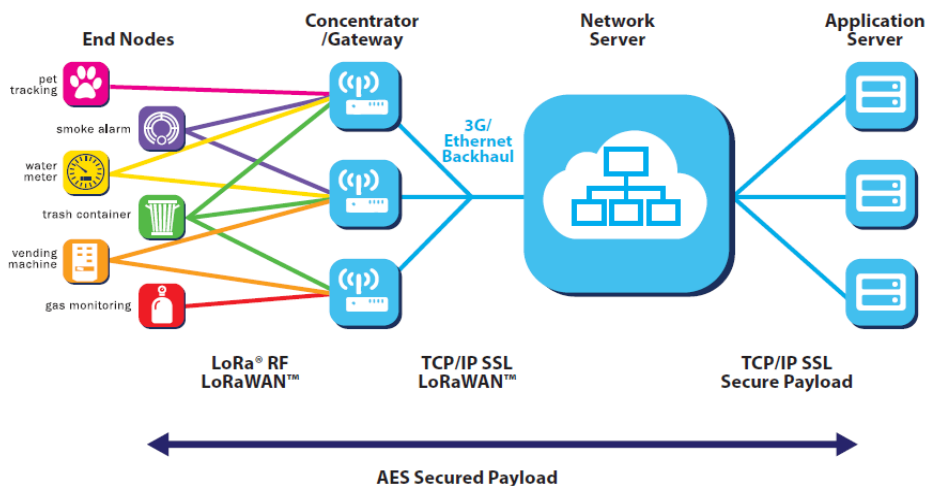
Το LoRaWAN είναι ένα MAC πρωτόκολλο που βρίσκεται πάνω από το φυσικό επίπεδο LoRa και χρησιμοποιεί τη φυσικό επίπεδο LoRa. Είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο που υποστηρίζεται από την μη κερδοσκοπική ένωση LoRa Alliance. Έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει τη λειτουργία των δικτύων LPWAN (Low Power Wide Area Network) ότι αφορά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, την χωρητικότητα του δικτύου, την ποιότητα των υπηρεσιών και την ασφάλεια, ενώ το φυσικό επίπεδο LoRa επιτρέπει την επικοινωνία μεγάλου εύρους. Οι διαφορετικές οντότητες του LoRaWAN λειτουργούν στη μη εξουσιοδοτημένη ζώνη ISM. Έτσι στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται οι ζώνες 863-870MHz ενώ στην Αμερική χρησιμοποιείται η ζώνη US 902-928MHz και στην Κίνα η CN779-787 MHz[18].



Διάγραμμα 9 LoRaWAN Protocol Stack

3.5.1 Δομή του LoRaWAN

Το LoRaWAN αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:



Διάγραμμα 10 Αρχιτεκτονική του LoRaWAN

Τελική συσκευή: η τελική συσκευή είναι ένας αισθητήρας, χαμηλής ενέργειας που επικοινωνεί με τα gateway δημιουργώντας κυκλοφορία uplink και downlink.

Gateway: τα gateway αποτελούν τις ενδιάμεσες συσκευές που λαμβάνουν τα δεδομένα από τις τελικές συσκευές και τα προωθούν σε έναν Network Server (διακομιστή δικτύου) μέσω μιας IP Backhaul διασύνδεσης (Ethernet, 3G, 4G). [19]

Network Server: ο network server παίζει τον ρόλο του κεντρικού συντονιστή και ελεγκτή του δικτύου. Εκτελεί ελέγχους ασφαλείας, στέλνει επιβεβαιώσεις ACK στις τελικές συσκευές. Είναι υπεύθυνος για τα διπλότυπα πακέτα και την αποκωδικοποίηση

τους από τις συσκευές. Τέλος, αποτελεί τον ενδιάμεσο κρίκο μεταξύ τελικών συσκευών και Application Server.[20]

Applications: οι εφαρμογές αποτελούν τον τελευταίο προορισμό με τον οποίο επικοινωνούν οι τελικές συσκευές. Αποτελούν ένα κομμάτι λογισμικού που τρέχει στον Application Server. Τυπικά, θα μπορούσε να είναι μια εφαρμογή με REST API που λαμβάνει και διαχειρίζεται τα πακέτα των συσκευών.[20]

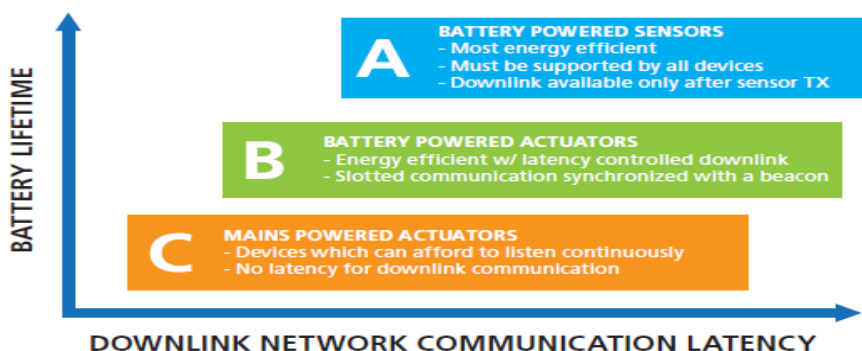
3.5.2 Αρχιτεκτονική του δικτύου LoRaWAN

Το LoRaWAN δίκτυο υλοποιείται με την τοπολογία αστέρα. Στην τοπολογία πλέγματος οι συσκευές αναμεταδίδουν τα μηνύματα των συσκευών που βρίσκονται δίπλα τους ξοδεύοντας έτσι ενέργεια από την μπαταρία τους. Αντίθετα, στην τοπολογία αστέρα η κατανάλωση ενέργειας περιορίζεται, διότι οι συσκευές μεταδίδουν μόνο τα δικά τους μηνύματα εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο ενέργεια. [12]

Ένα LoRaWAN δίκτυο αποτελείται από ένα ή περισσότερα gateways τα οποία είναι συνδεδεμένα με τον συντονιστή του δικτύου που είναι ο Network Server. Κάθε gateway λαμβάνει τα μηνύματα από τις τελικές συσκευές. Το κάθε πλαίσιο που λαμβάνεται προωθείται στον network server μέσω Backhaul (3G/4G, Ethernet). Ο network server που διαχειρίζεται το δίκτυο ελέγχει για διπλότυπα μηνύματα που λαμβάνει από τις ίδιες συσκευές από διαφορετικά gateways και τα διαγράφει. Κάνει ελέγχους ασφαλείας και δρομολογεί τα acknowledgements μέσω του βέλτιστου gateway. Επίσης, προωθεί όλα τα δεδομένα εφαρμογών στον κατάλληλο application server.

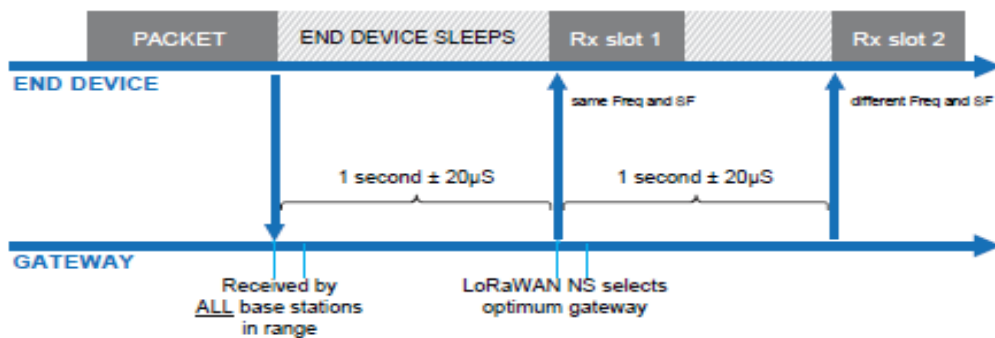
3.5.3 Κλάσεις τελικών συσκευών LoRaWAN δικτύου

Το LoRaWAN ορίζει τρεις διαφορετικές κλάσεις τελικών συσκευών



Διάγραμμα 11 LoRaWAN κλάσεις τελικών συσκευών

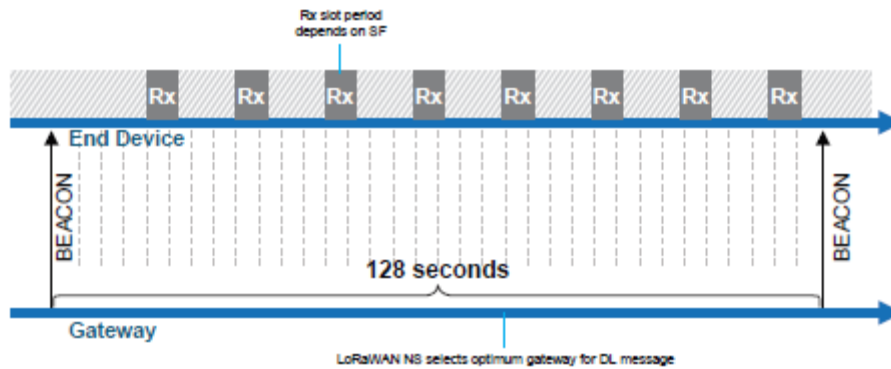
Κλάση A Στο πρωτόκολλο Aloha, οι συσκευές μεταδίδουν ένα μήνυμα uplink μια τυχαία στιγμή προς τον network server. Όταν η τελική συσκευή μεταδώσει ένα uplink μήνυμα περιμένει από τον network server το downlink μήνυμα. Το downlink αυτό μήνυμα μπορεί να έρθει σε ένα από δυο λαμβανόμενα downlink slots, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12. Αν η συσκευή λάβει το DL μήνυμα στο πρώτο slot τότε δεν θα περιμένει να ακούσει το δεύτερο slot και θα κάνει εξοικονόμηση ενέργειας περνώντας στην φάση αδράνειας. Η επιλογή της κλάσης A είναι κατάλληλη για αισθητήρες αλλά όχι για ενεργοποιητές καθώς ο network server θα μπορεί να επικοινωνεί μαζί τους όταν υπάρχει ανάγκη. Επομένως, οι συσκευές της κλάσης A έχουν την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, προσφέροντας όμως λιγότερη ευελιξία στις downlink



μεταδόσεις. [12]

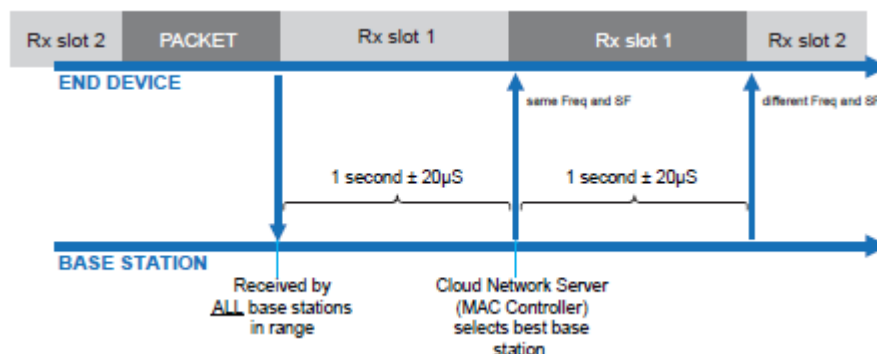
Διάγραμμα 12 Διάγραμμα χρόνου συσκευών κλάσης A

Κλάση B Η κλάση B χρησιμοποιείται από συσκευές που τροφοδοτούνται με μπαταρίες και χρησιμοποιούνται από εφαρμογές που απαιτούν τακτικές downlink ανταλλαγές όπως είναι οι ενεργοποιητές (actuators). Στην κλάση B έχουν εκχωρηθεί περισσότερα παράθυρα λήψης downlink χωρίς να υπάρχουν αλλαγές στην uplink επικοινωνία. Βασίζεται στην περιοδική μετάδοση beacon μηνυμάτων από το gateway σε ένα σταθερό κανάλι downlink. Το κανάλι αυτό χωρίζεται σε χρονικές περιόδους ξεκινώντας με την μετάδοση ενός beacon μηνύματος. Κάθε beacon περίοδος χωρίζεται σε ένα σύνολο από slots. Έτσι, οι συσκευές αυτές πρέπει να υποστηρίζουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις συσκευές της κλάσης A. [18]



Διάγραμμα 13 Διάγραμμα χρόνου συσκευών κλάσης B

Κλάση C Στην κλάση αυτή οι συσκευές ακούνε συνεχόμενα για downlink μήνυμα από τον network server, εκτός από την περίπτωση κατά την οποία μεταδίδουν ένα uplink μήνυμα όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παρακάτω. Οι συσκευές αυτής της κλάσης συνήθως τροφοδοτούνται από ρεύμα. Εφαρμόζουν δυο ίδια παράθυρα timing όπως και οι συσκευές της κλάσης A όμως δεν κλείνουν το παράθυρο του δέκτη RX2 μέχρι να χρειαστεί να μεταδώσουν ξανά. [12]



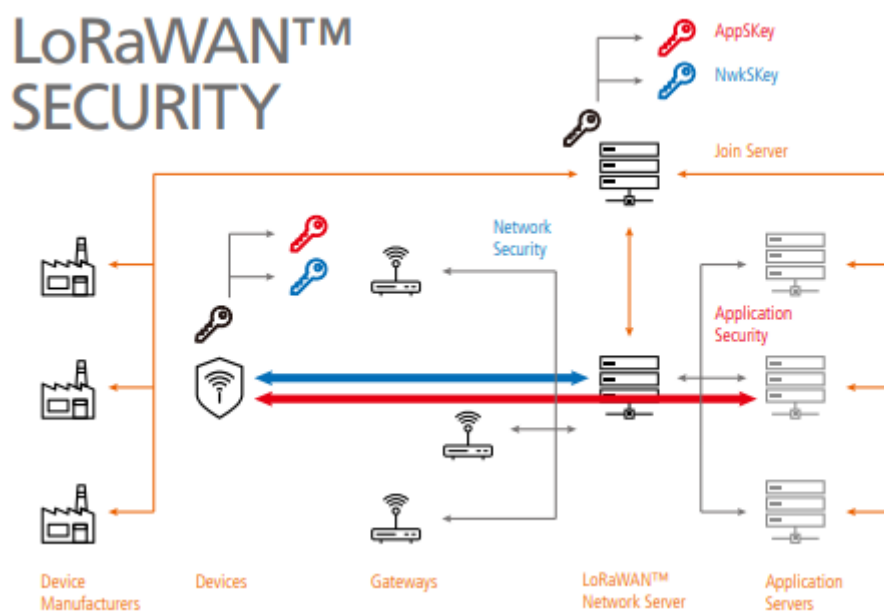
Διάγραμμα 14 Διάγραμμα χρόνου συσκευών κλάσης C

3.6 Ασφάλεια

Σημαντικό παράγοντα για τις εφαρμογές IoT αποτελεί η ασφάλεια, διότι εξασφαλίζει την λειτουργία των αντικειμένων χωρίς εξωτερική παρεμβολή. Το LoRaWAN παρέχει δυο επίπεδα ασφάλειας από τα οποία το ένα είναι στο επίπεδο του δικτύου διασφαλίζοντας την αυθεντικότητα του κόμβου και το άλλο στο επίπεδο των εφαρμογών διασφαλίζοντας ότι ο διαχειριστής του δικτύου δεν θα έχει πρόσβαση στα δεδομένα της εφαρμογής. Στο επίπεδο του δικτύου, η λύση ασφάλειας LoRaWAN που παρέχεται, είναι αυτή του εξουσιοδοτημένου πλαισίου και του πλαισίου ασφαλείας που βασίζεται στο σχέδιο κρυπτογράφησης AES-128 (Advanced Encryption Security). Αυτό

που κάνει το AES-128 είναι να κρυπτογραφεί τα πλαίσια για λόγους εμπιστευτικότητας και να παράγει έναν κώδικα τον MIC (Message Integrity Code) για την ακεραιότητα τους. Κάθε τελική συσκευή έχει αναθέσεις κλειδιών τα οποία έχουν δοθεί από τους κατασκευαστές. [21]

Τα κλειδιά ασφαλείας που χρησιμοποιεί το LoRaWAN είναι τα NwkSKey, AppSKey και AppKey. Το NwkSKey (Network Session Key) χρησιμοποιείται για την αλληλεπίδραση μεταξύ της συσκευής και του network server. Το AppSKey (Application Session Key) χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων (payload). Τα δεδομένα είναι πλήρως κρυπτογραφημένα μεταξύ της συσκευής και του application server που σημαίνει ότι κανείς δεν μπορεί να διαβάσει τα περιεχόμενα των μηνυμάτων που στέλνονται ή που λαμβάνονται. Επιπλέον, τα δυο αυτά κλειδιά NwkSKey και AppSKey είναι μοναδικά ανά συσκευή και ανά συνεδρία. Τέλος, το AppKey είναι αυτό που εξάγει τα δυο κλειδιά περιόδου λειτουργίας (NwkSKey και AppSKey) όταν οι συσκευές είναι δυναμικά ενεργοποιημένες. [22]



Διάγραμμα 15 Ασφάλεια LoRaWAN

Κεφάλαιο 4

Μοντέλα διάδοσης και Παρεμβολές

4.1 Μοντέλα διάδοσης

Τα μοντέλα διάδοσης που παρουσιάζονται παρακάτω αποτελούν μοντέλα εξωτερικού χώρου που αντιμετωπίζουν την απώλεια διαδρομής. Χωρίζονται σε δυο κατηγορίες στα εμπειρικά και στα θεωρητικά μοντέλα.

Τα εμπειρικά μοντέλα στηρίζονται σε μια σειρά εκτεταμένων ράδιο-μετρήσεων απώλειας διάδοσης. Το μοντέλα αυτά είναι απλά στον υπολογισμό τους και μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν σε παρόμοια περιβάλλοντα με αρκετή ακρίβεια. Ωστόσο, μπορούν να χαρακτηριστούν περιοριστικά και αυτό γιατί εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες περιοχές και σε περιβάλλον στο οποίο δεν αναλύουν καθόλου τους μηχανισμούς διάδοσης και δεν παρέχουν καμία φυσική διορατικότητα για τους μηχανισμούς διάδοσης που είναι σημαντικοί για την πρόβλεψη της λαμβανόμενης τιμής ισχύος στον δέκτη.

Τα θεωρητικά μοντέλα από την άλλη πλευρά, λαμβάνουν υπόψη το μηχανισμό της περίθλασης από τα κτίρια και μπορούν να δώσουν πιο ακριβή αποτελέσματα. Όμως και σε αυτά οι υπολογισμοί είναι πολύπλοκοι και τα αποτελέσματα δεν μπορούν να γενικευτούν.

4.1.1 Εμπειρικά μοντέλα

Μοντέλο Okumura Hata: Το μοντέλο Okumura-Hata είναι ένα εμπειρικό μοντέλο που βασίζεται εξ ολοκλήρου σε μια εκτενή σειρά μετρήσεων που έγιναν μέσα και γύρω από το Τόκιο. Οι προβλέψεις της απώλειας διάδοσης (path loss) γίνονται μέσω μιας σειράς γραφημάτων, τα οποία έχουν προσεγγιστεί από ένα σύνολο τύπων από τον Hata. Οι περιοχές του μοντέλου Okumura -Hata διαίρονται σε τρεις κατηγορίες, στις ανοιχτές, στις προαστιακές και στις αστικές περιοχές.

Ο υπολογισμός των απωλειών διαδρομής γίνεται χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις του Hata

$$\text{Αστικές περιοχές} \quad L_{dB} = A + B \log R - E \quad (4.1)$$

$$\text{Ημιαστικές περιοχές} \quad L_{dB} = A + B \log R - C \quad (4.2)$$

$$\text{Ανοιχτές περιοχές} \quad L_{dB} = A + B \log R - D \quad (4.3)$$

όπου

$$A = 69.55 + 26.16 \log f_c - 13.82 \log h_b \quad (4.4)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log h_b \quad (4.5)$$

$$C = 2(\log(f_c/28))^2 + 5.4 \quad (4.6)$$

$$D = 4.78(\log f_c)^2 - 18.33 \log f_c + 40.94 \quad (4.7)$$

$$E = 3.2(\log(11.75 h_m))^2 - 4.97 \quad \text{για μεγάλες πόλεις, } f_c \geq 300 \text{ MHz} \quad (4.8)$$

$$E = 8.29(\log(1.54 h_m))^2 - 1.1 \quad \text{για μεγάλες πόλεις, } f_c < 300 \text{ MHz} \quad (4.9)$$

$$E = (1.1 \log f_c - 0.7) h_m - (1.56 \log f_c - 0.8) \quad \text{για μεσαίες - μικρές πόλεις} \quad (4.10)$$

Το μοντέλο ισχύει μόνο για:

$150 \text{ MHz} \leq f_c \leq 1500 \text{ MHz}$, $30 \text{ m} \leq h_b \leq 200 \text{ m}$, $1 \text{ m} < h_m < 10 \text{ m}$ και $R > 1 \text{ Km}$ και ο εκθέτης απωλειών διαδρομής δίνεται από το $B = 10$

Μοντέλο COST231-Hata Το μοντέλο Okumura-Hata για μεσαίου προς μικρού μεγέθους πόλεις έχει επεκταθεί για να καλύψει τη ζώνη $1500 \text{ MHz} < f_c < 2000 \text{ MHz}$

$$L_{dB} = F + B \log R - E + G \quad (4.11)$$

όπου

$$F = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b \quad (4.12)$$

Το E έχει οριστεί στην (4.10) για μεσαίες - μικρές πόλεις και

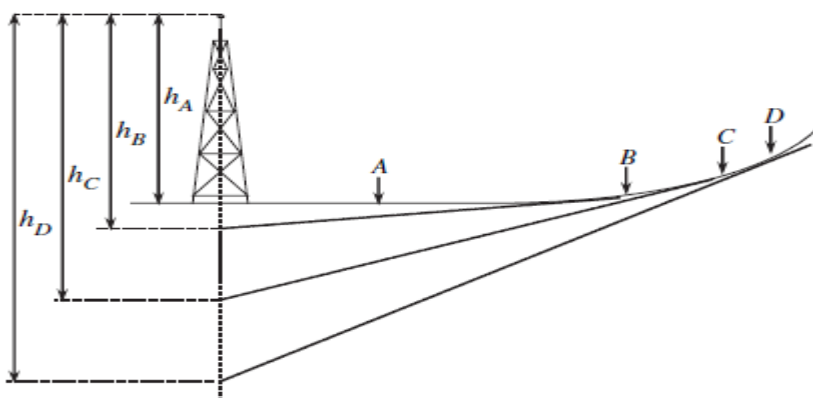
$G = 0 \text{ dB}$ για μεσαίου μεγέθους πόλεις και ημιαστικές περιοχές και $G = 3 \text{ dB}$ για μητροπολιτικές περιοχές

Μοντέλο Lee Το μοντέλο Lee είναι ένα μοντέλο τύπου power law με παραμέτρους που προέρχονται από εμπειρικές μετρήσεις στα 900 MHz όπου το ενεργό ύψος βάσης (Effective base height) εξαρτάται από το έδαφος.

$$L = 10n \log r - 20 \log h_b (\text{eff}) - P_o - 10 \log h_m + 29 \quad (4.13)$$

Environment	n	P _o
Free space	2	-45
Open area	4.35	-49
Suburban	3.84	-61.7
Philadelphia	3.68	-70
Newark	4.31	-64
Tokyo	3.05	-84
New York	4.8	-77

Πίνακας 4 Παράμετροι για το μοντέλο Lee



Διάγραμμα 16 Προσδιορισμός του ύψους της κεραίας σταθμού βάσης για το μοντέλο του Lee

Μοντέλο Ibrahim and Parsons Το μοντέλο αυτό επικεντρώνεται σε αστικές περιοχές στηρίζεται σε μετρήσεις στην ευρύτερη περιοχή του Λονδίνου. Βασίζεται σε τετράγωνα της τάξης του 0.5km. Κάθε τετράγωνο περιγράφεται από 3 παραμέτρους: η πρώτη είναι το ύψος εδάφους H (Terrain height). Η δεύτερη παράμετρος είναι ο συντελεστής αστικοποίησης U (Urbanisation Factor) και αποτελεί το ποσοστό περιοχής που καταλαμβάνεται από κτίρια > 4 ορόφων. Η τρίτη παράμετρος είναι ο συντελεστής χρήσης γης L (Land usage factor) και αποτελεί το ποσοστό περιοχής που καταλαμβάνεται από κτίρια οπουδήποτε τύπου < 4ορόφων.

Το μοντέλο βασίζεται Μοντέλο επίπεδης Γης/επιφάνειας (Plane earth model) με συνάθροιση ενός συντελεστή clutter (clutter factor) β που εξαρτάται από τις παραμέτρους H , U , L και f_c

$$L_T = 40 \log r - 20 \log(h_m h_b) + \beta \quad (4.14)$$

όπου

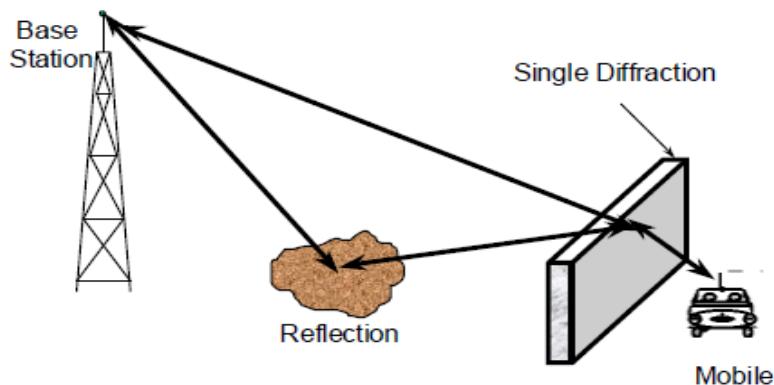
$$\beta = 20 + \frac{f_c}{40} + 0.18L - 0.34H + K \quad (4.15)$$

και

$$K = 0.094U - 5.9 \quad (4.16)$$

4.1.2 Θεωρητικά μοντέλα

Μοντέλο Allsebrook & Parsons Model Το μοντέλο Allsebrook & Parsons αν και βασίστηκε σε μια σειρά μετρήσεων που έγιναν σε τρεις Βρετανικές πόλεις στα 86 MHz, 167 MHz και 441 MHz αποτελεί μια προσπάθεια δημιουργίας θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης απώλειας διάδοσης για τις αστικές περιοχές. Αποτελείται από το μοντέλο της επίπεδης γης συν τις απώλειες λόγω της περίθλασης. Επειδή, στο μοντέλο της επίπεδης γης δεν αναμένεται η λήψη ανάκλασης από το έδαφος γι αυτό το λόγω δεν μπορεί να εξηγηθεί “φυσικά” το μοντέλο αυτό.



Διάγραμμα 17 Φυσική ερμηνεία του μοντέλου Allsebrook και Parsons

Στο μοντέλο Allsebrook & Parsons η “επίπεδη πόλη” μπορεί να εκφραστεί

$$L_T = L_P + L_B + \gamma \quad (4.17)$$

όπου

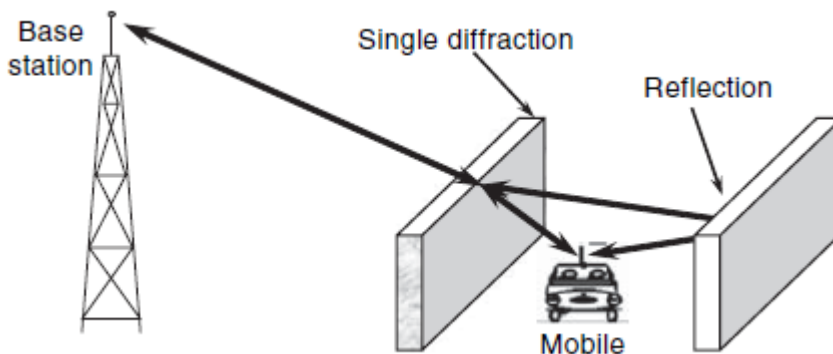
$$L_B = 20 \log \left(\frac{h_o - h_m}{548 \sqrt{(d_m * 10^{-3}) / f_c}} \right) \quad (4.18)$$

και L_P απώλειες επίπεδης γης και

$$\gamma = -2.03 - 6.67f_c + 8.1 \times 10^{-5}f_c^2 \quad (4.19)$$

Μοντέλο Ikegami Το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη μια περίθλαση και μια ανάκλαση. Χρησιμοποιεί ένα λεπτομερή χάρτη του ύψους, του σχήματος και της θέσης των κτιρίων για τον υπολογισμό των ακτινών μεταξύ πομπού και δέκτη. Η περίθλαση υπολογίζεται με την μέθοδο της ευθείας ακμής, ενώ η απώλεια θεωρείται σταθερή με τιμή $L_r = 0.25$.

Στο σχήμα παρακάτω δίνεται η φυσική ερμηνεία του μοντέλου Ikegami

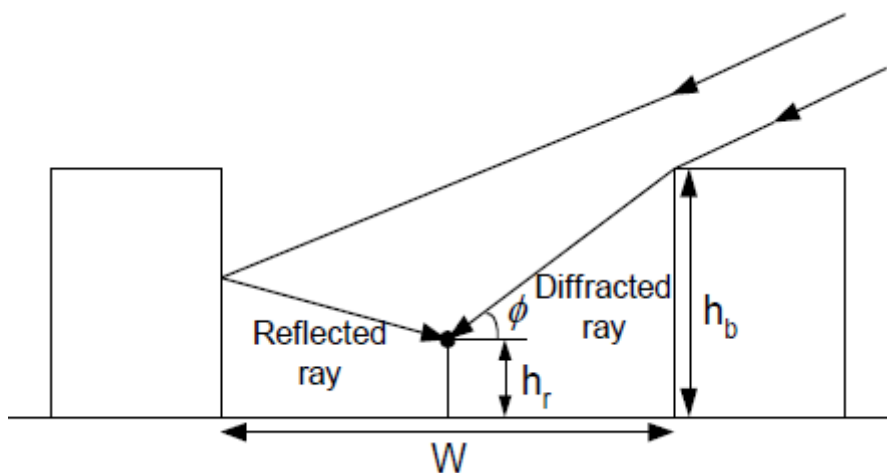


Διάγραμμα 18 Φυσική ερμηνεία του μοντέλου Ikegami

Οι δύο ακτίνες περίθλαση και ανάκλαση προστίθενται ώστε:

$$L_E = 10 \log f_c + 10 \log(\sin \phi) + 20 \log(h_b - h_r) - 10 \log w - 10 \log\left(1 + \frac{3}{L_r^2}\right) - 5.8 \quad (4.20)$$

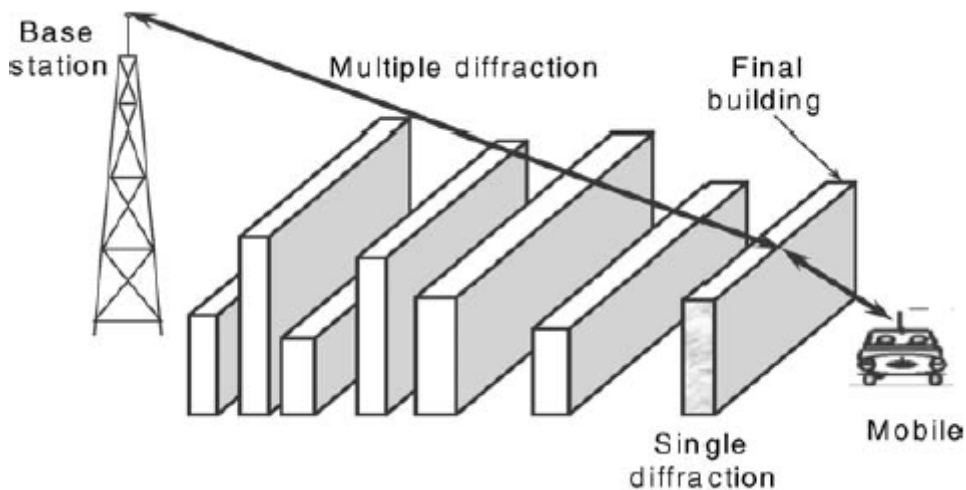
όπου $L_r = 0.25$ και ϕ η γωνία μεταξύ του δρόμου και της ευθείας γραμμής μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού.



Διάγραμμα 19 Συνεισφορές των δύο ακτινών

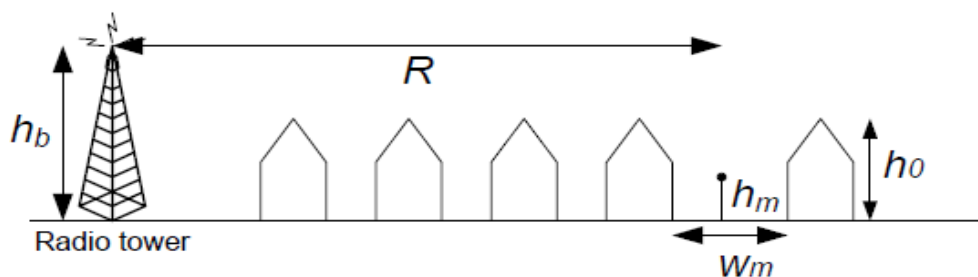
Περίθλαση από στέγες κτιρίων Λόγω της ύπαρξης των στεγών των κτιρίων δημιουργείται πολλαπλή περίθλαση η οποία αποτελεί τον κύριο μηχανισμό διάδοσης των ραδιοκυμάτων στις μακροκυψέλες που λειτουργούν σε σχετικά επίπεδες κατοικημένες περιοχές. Ο πλήρης θεωρητικός υπολογισμός αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία και για αυτό το λόγω χρησιμοποιούνται πιο απλοποιημένα μοντέλα.

Παρακάτω στην Εικόνα 20 απεικονίζεται η πολλαπλή περίθλαση στις στέγες των κτιρίων



Διάγραμμα 20 Πολλαπλή περίθλαση στις στέγες των κτιρίων

Μοντέλο Cost 231/ Walfisch - Ikegami Το μοντέλο Walfisch-Bertoni συνδυάστηκε με το μοντέλο Ikegami για περίθλαση μέχρι το επίπεδο του δρόμου



Διάγραμμα 21 Περίθλαση μέχρι το επίπεδο του δρόμου

Σε συνθήκες όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή NLOS (non line of sight) η συνολική απώλεια δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L = L_F + L_{msd} + L_{sd} \quad (4.21)$$

όπου L_F απώλεια ελευθέρου χώρου

$$L_{FSL} = 32.5 + 20 \log R_{km} + 20 \log F_{MHz} \quad (4.22)$$

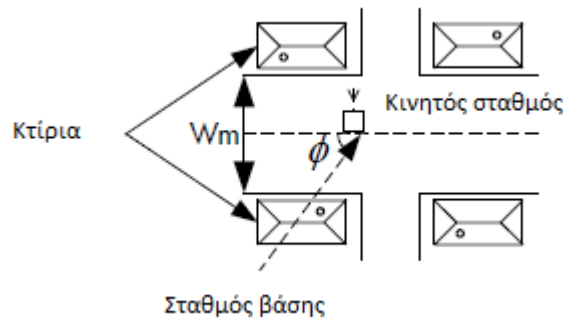
L_{msd} απώλεια λόγω πολλαπλών περιθλάσεων ευθείας ακμής

L_{sd} απώλεια λόγω περίθλασης και σκέδασης στο επίπεδο του δρόμου

$$L_{sd} = -16.9 + 10 \log f_c + 10 \log \frac{(h_o - h_m)^2}{W_m} + L(\varphi) \quad (4.23)$$

όπου W_m η απόσταση μεταξύ κτιρίων που βρίσκεται ο χρήστης και

h_o το ύψος του κτιρίου όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω



Διάγραμμα 22 Μοντέλο Walfisch-Bertoni

$$L(\varphi) = -10 + 0.354\varphi \quad \text{για } 0^\circ < \varphi < 35^\circ \quad (4.24)$$

$$L(\varphi) = 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ) \quad \text{για } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \quad (4.25)$$

$$L(\varphi) = 4.0 - 0.114(\varphi - 55^\circ) \quad \text{για } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad (4.26)$$

όπου $L(\varphi)$ είναι η γωνία μεταξύ του δρόμου και της ευθείας γραμμής μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού.

Τέλος η περίθλαση στην κορυφή των στεγών δίνεται από:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log R + k_f \log f_c - 9 \log w \quad (4.27)$$

όπου

$$L_{bsh} = -18 \log [1 + (h_b - h_o)] \quad \text{για } h_b > h_o \quad (4.28)$$

$$L_{bsh} = 0 \quad \text{για } h_b \leq h_0 \quad (4.29)$$

$$k_a = 54 \quad \text{για } h_b > h_0 \quad (4.30)$$

$$k_a = 54 - 0.8 \quad \text{για } R \geq 0.5 \text{ km και } h_b \leq h_0 \quad \text{αύξηση απωλειών όταν } h_b < h_0 \quad (4.31)$$

$$k_a = 54 - 0.8 \frac{(h_b - h_0)R}{0.5} \quad \text{για } R < 0.5 \text{ km και } h_b \leq h_0 \quad (4.32)$$

$$k_d = 18 \quad \text{για } h_b > h_0 \quad (4.33)$$

$$k_d = 18 - 15 \frac{(h_b - h_0)}{h_0} \quad \text{για } h_b \leq h_0 \quad (4.34)$$

Οι απώλειες εξαρτώνται από τα πολλαπλά εμπόδια

$$k_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) \quad (4.35)$$

για μεσαίου μεγέθους πόλεις με μέτρια πυκνότητα δέντρων

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) \quad (4.36)$$

για μητροπολιτικά κέντρα

$$w = 2Xw_m$$

Προσεγγιστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τιμές παραμέτρων:

$$h_0 = 3n_{\text{floors}} \quad \text{για επίπεδες στέγες} \quad (4.37)$$

$$h_0 = 3n_{\text{floors}} + 3 \quad \text{για κεκλιμένες στέγες} \quad (4.38)$$

$$w = 20 - 50 \text{ m (4.39), } d_m = w/2 \text{ (4.40), } \varphi = 90^\circ$$

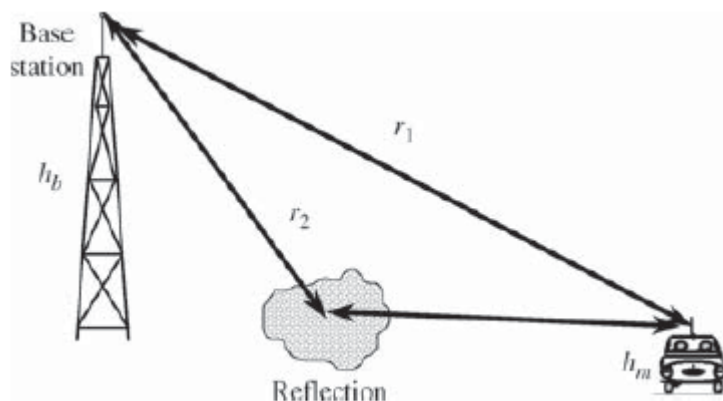
όπου n_{floors} είναι ο αριθμός των ορόφων στο κτίριο και το μοντέλο εφαρμόζεται για

$$800\text{MHz} \leq f_c \leq 2000\text{MHz}, 4\text{m} \leq h_b \leq 50\text{m}, 1\text{m} \leq h_m \leq 3\text{m} \text{ και } 0.02\text{km} \leq R \leq 5 \text{ km.}$$

4.1.3 Μοντέλα με οπτική επαφή (LOS)

Μοντέλο δυο ακτινών Το μοντέλο των δυο ακτινών είναι μοντέλο οπτικής επαφής και παρόμοιο με αυτό της επίπεδης γης με την μόνη διαφορά ότι εδώ υπάρχει ένας συντελεστής ανάκλασης. Έχουμε δηλαδή την απευθείας συνιστώσα και την

ανακλώμενη συνιστώσα που έρχεται από διαφορετικό μονοπάτι όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 23 Μοντέλο δυο ακτινών

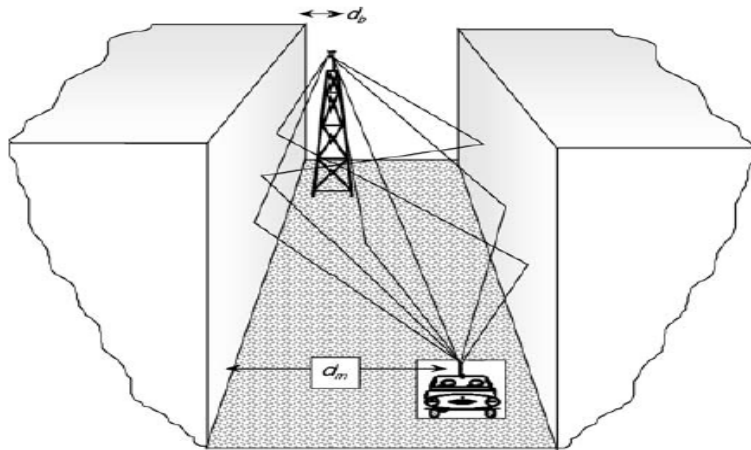
Η απώλεια δίνεται από τον τύπο

$$\frac{1}{L} = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left| \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + R \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right|^2 \quad (4.41)$$

όπου r_1 η απευθείας συνιστώσα και r_2 η ανακλώμενη συνιστώσα και R ο συντελεστής ανάκλασης Fresnel αναλόγως της πολικότητας.

Παρά το γεγονός ότι ο συντελεστής ανάκλασης προκαλεί μια αλλαγή φάσης 180ο όταν $r_2 = (r_1 + \lambda/2)$ υπάρχει ακόμα μια αναστροφή φάσης που οδηγεί τα δύο κύματα να είναι σε φάση. Αυτός είναι ο ορισμός της πρώτης ζώνης Fresnel. Έτσι η γρήγορη διάλειαση του σήματος μπορεί να συμβαίνει μόνο σε μικρότερες αποστάσεις από αυτή. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις το συνδυασμένο σήμα μειώνεται ομαλά προς το μηδέν, επειδή στο άπειρο τα μήκη των δύο ακτινών είναι ίσα αλλά σε αντίθεση φάσης.

Μοντέλο Street Canyon Το μοντέλο Street Canyon αποτελεί επέκταση του μοντέλου των δυο ακτινών σε τέσσερις, έξι ή περισσότερες ακτίνες. Στο σχήμα παρακάτω οι κινητοί σταθμοί όπως και οι σταθμοί βάσης βρίσκονται σε έναν ευθύ, μακρύ δρόμο ευθυγραμμισμένο και στις δυο πλευρές από κτίρια με τοίχους. Στο σχήμα απεικονίζονται έξι πιθανές διαδρομές.



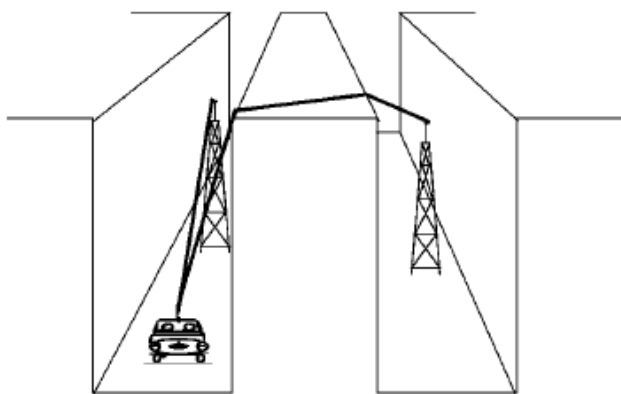
Διάγραμμα 24 Μοντέλο Street Canyon

Βέβαια είναι πιθανές και άλλες διαδρομές αλλά τείνουν να περιλαμβάνουν αντανακλάσεις οι οποίες είναι τυπικά εξασθενημένες σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα οι συνεισφορές του σήματος να υπολογίζονται από αυτές τις διαδρομές που απεικονίζονται στο σχήμα παραπάνω. Τέλος, οι συντελεστές Fresnel είναι διαφορετικοί για έδαφος και τοίχους.

4.1.4 Μοντέλα χωρίς οπτική επαφή (NLOS)

Κυριότεροι μηχανισμοί διάδοσης Όταν η διαδρομή περιλαμβάνει εμπόδια το σήμα μεταδίδεται από το σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό μέσω διαφόρων εναλλακτικών μηχανισμών που είναι περίθλαση από τις στέγες των κτιρίων, περίθλαση από τις ακμές των κτιρίων, ανάκλαση και σκέδαση από τους τοίχους, έδαφος και περιβάλλον.

Στην περίθλαση από τις στέγες των κτιρίων, όταν ένα κύμα προσπίπτει πάνω στην στέγη ενός κτιρίου, στην περιοχή της σκιάς δεν θα έπρεπε να υπάρχουν ακτίνες αλλά λόγω της αρχής του Huygens τα δευτερεύοντα wavefronts καμπυλώνονται και δημιουργούνται επιπλέον συνιστώσες και κάτω ακριβώς από την στέγη του κτιρίου.

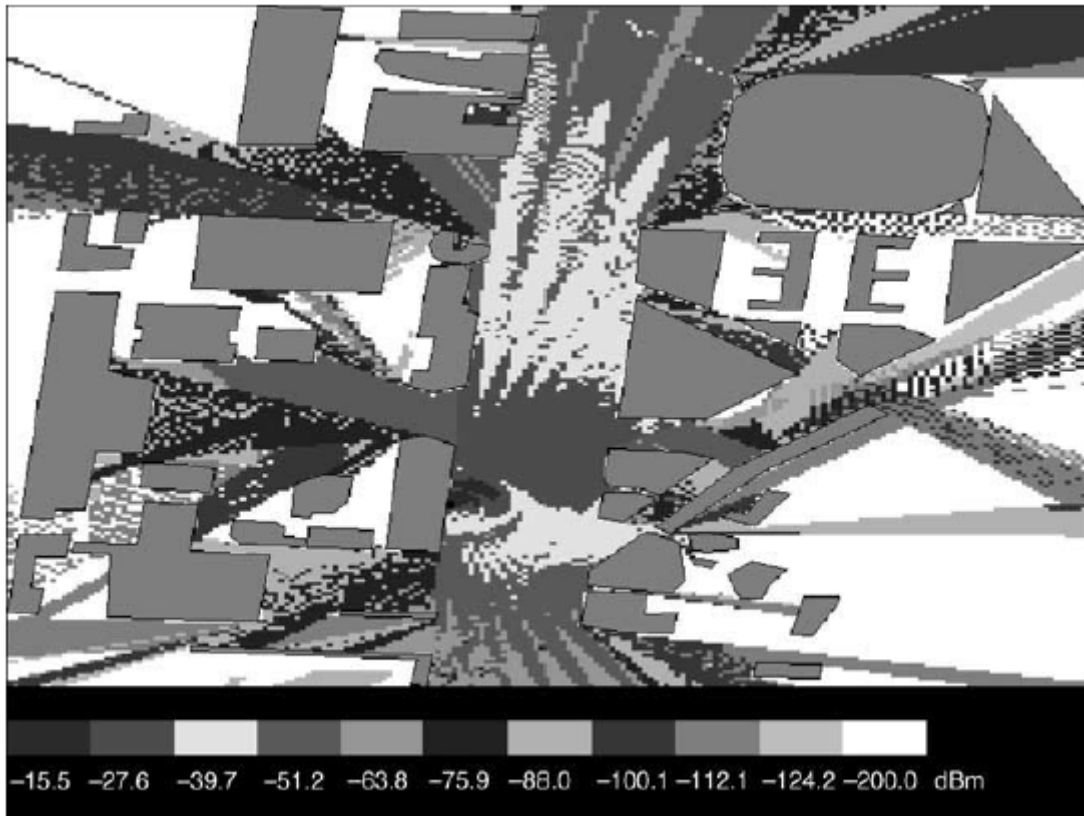


Διάγραμμα 25 Περίθλαση από οροφές

Η περίθλαση από τις ακμές των κτιρίων δημιουργείται όταν το κύμα που βρίσκεται μεταξύ του πομπού και του δέκτη εμποδίζεται από επιφάνεια με ακμές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα κύματα να καμπυλώνονται γύρω από τις ακμές του εμποδίου και να δημιουργούνται δευτερεύοντα κύματα.

Στην ανάκλαση το μεταδιδόμενο κύμα προσκρούει σε λείες επιφάνειες με πολύ μεγάλες διαστάσεις όπως έδαφος, τοίχοι και αντανακλάται. Στην σκέδαση το κύμα προσκρούει πάνω σε επιφάνειες όπως είναι οι πέτρες του δρόμου, τα φύλλα, οι λάμπες, όπου οι διαστάσεις του είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος οπότε και έχουμε δευτερεύοντα κύματα με διαφορετικά πλάτη σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις

Μοντέλα τύπου Ray tracing Τα μοντέλα τύπου Ray tracing στηρίζονται στην γεωμετρική θεωρία της περίθλασης GTD και στην ομοιόμορφη θεωρία της περίθλασης UTD. Στα μοντέλα αυτά γίνονται μετρήσεις για την πρόβλεψη της ραδιοκάλυψης σε μια περιοχή με block κτήρια και σταθμό βάσης όπου διαπιστώνεται ότι η λαμβανόμενη τιμή ισχύος αυξάνεται όσο ο κινητός σταθμός βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό βάσης ενώ μικραίνει όσο απομακρύνεται από αυτόν. Αυτό έχει προκύψει διότι είναι γνωστό το τρισδιάστατο περιβάλλον, δηλαδή το ύψος των κτηρίων και τα μοντέλα ώστε να υπολογιστούν αυτές οι συνιστώσες. Τέλος, για να γίνουν οι μετρήσεις εκτός του ότι απαιτούνται ακριβή γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένα τα κτήρια, απαιτούνται και αυξημένοι υπολογιστικοί πόροι.



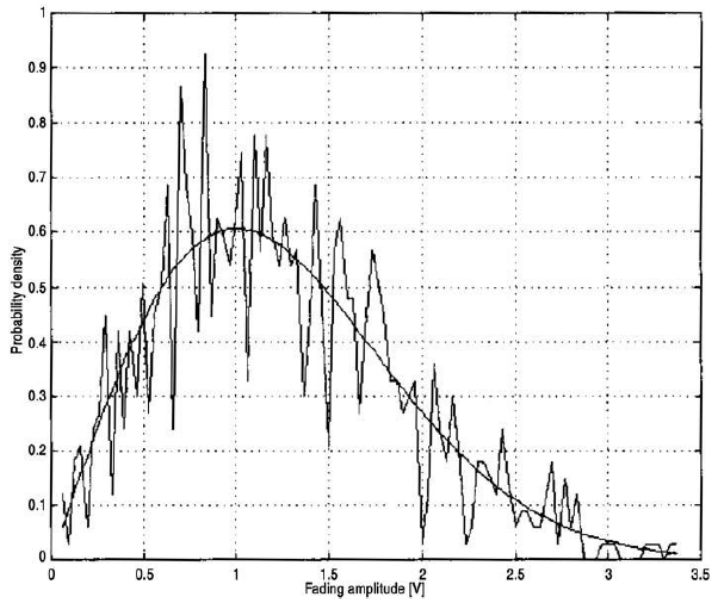
Διάγραμμα 26 Μοντέλα τύπου Ray tracing που στηρίζονται σε τεχνικές GTD/UTD

4.2 Στατιστικές κατανομές

Το σήμα λόγω των πολλαπλών διαδρομών εξασθενεί και ο υπολογισμός της ισχύος του δεν μπορεί να γίνει καθώς απαιτείται ακριβή γνώση των θέσεων και των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών όλων των σκεδαστών με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται η στατιστική περιγραφή.

4.2.1 Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh είναι αποτελεί μια καλή προσέγγιση για να περιγραφεί το φαινόμενο της γρήγορης διάλειψης στα κινητά κανάλια σε περιπτώσεις μη οπτικής επαφής NLOS. Οι γρήγορες διαλείψεις προκύπτουν από τις πολλές μεγάλες αυξομειώσεις του σήματος οι οποίες προκύπτουν από τους σκεδαστές. Όταν το κύμα προσπίπτει πάνω σε έναν σκεδαστή προκύπτουν συνιστώσες οι οποίες έχουν διαφορετικά πλάτη και φάσεις φτάνοντας στον δέκτη από διαφορετικές διαδρομές, επομένως και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτά τα κανάλια ονομάζονται κανάλια διάλειψης Rayleigh ή απλώς κανάλια Rayleigh.



Διάγραμμα 27 Θεωρητικές και πειραματικές κατανομές Rayleigh

Στο παραπάνω διάγραμμα η καμπύλη είναι η κατανομή Rayleigh που δίνεται από τον τύπο

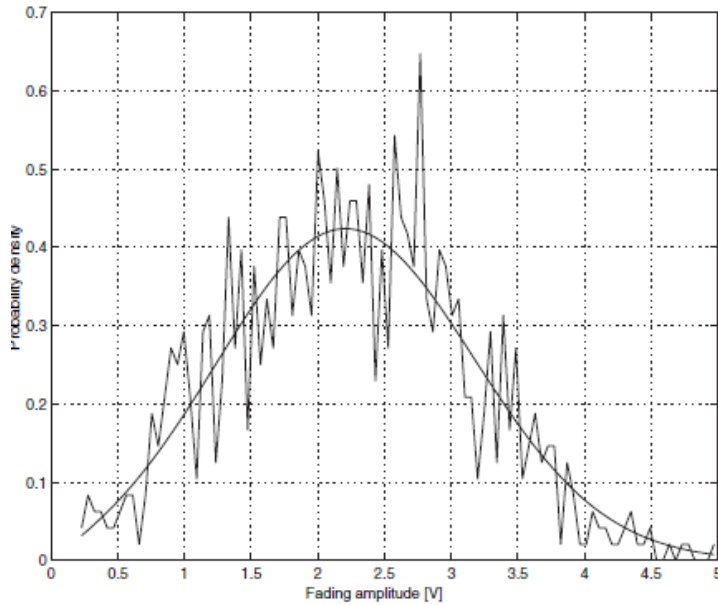
$$p_R(r) = (r/\sigma^2) e^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}} \quad (4.42)$$

όπου το σ^2 είναι η τυπική απόκλιση (standard deviation) και Power of the complex baseband signal είναι:

$$\text{Power} = \sigma^2 \quad (4.43)$$

4.2.2 Κατανομή Rice

Στην περίπτωση της οπτικής επαφής LOS, λόγω ότι η διαδρομή δεν περιλαμβάνει εμπόδια το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από την ισχυρή απευθείας συνιστώσα και από άλλες μικρότερες συνιστώσες εξαιτίας της ανάκλασης. Η ισχύς της απευθείας συνιστώσας είναι μεγαλύτερη από αυτή των μικρότερων συνιστωσών. Παρακάτω έχουμε το διάγραμμα της κατανομής Rice το οποίο αν το συγκρίνουμε με το διάγραμμα της κατανομής Rayleigh παρατηρούμε ότι είναι πιο συμμετρικό και λιγότερο μεταβαλλόμενο σε σχέση με την μη οπτική επαφή NLOS.



Διάγραμμα 28 Θεωρητικές και πειραματικές κατανομές Rice

Η θεωρητική κατανομή Rice δίνεται από τον τύπο

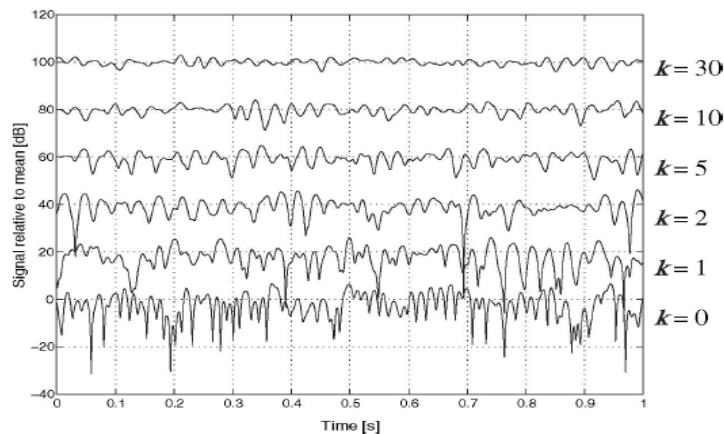
$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-(r^2+s^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (4.44)$$

όπου s το πλάτος της προστιθέμενης συνιστώσας LOS

Η Rice p.d.f μπορεί να εκφραστεί με την παράμετρο k (Rice factor) ως

$$\text{Rice factor } k = \frac{\text{Power in constant part}}{\text{Power in random part}} = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (4.45)$$

Στο παρακάτω σχήμα έχουμε τυπικά σήματα με διάλειψη σε συνθήκες LOS.



Διάγραμμα 29 Time series σημάτων διαλείψεων Rice για $k=0, 1, 2, 5, 10$ και 30

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα 29 μεγαλύτερη παράμετρος k σημαίνει μικρότερες διαλείψεις.

Συμπερασματικά, τα κανάλια τύπου Rice είναι πιο φιλικά σε σχέση με τα κανάλια τύπου Rayleigh. Η κατανομή Rice ισχύει όταν η ισχύς της ισχυρής συνιστώσας είναι μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες. Τέλος, η κατανομή Rice μπορεί να ισχύσει και σε περίπτωση NLOS όταν η ισχύς από μια διαδρομή είναι πολύ πιο ισχυρή από τις υπόλοιπες διαδρομές.

4.2.3 Κατανομή NAKAGAMI-m

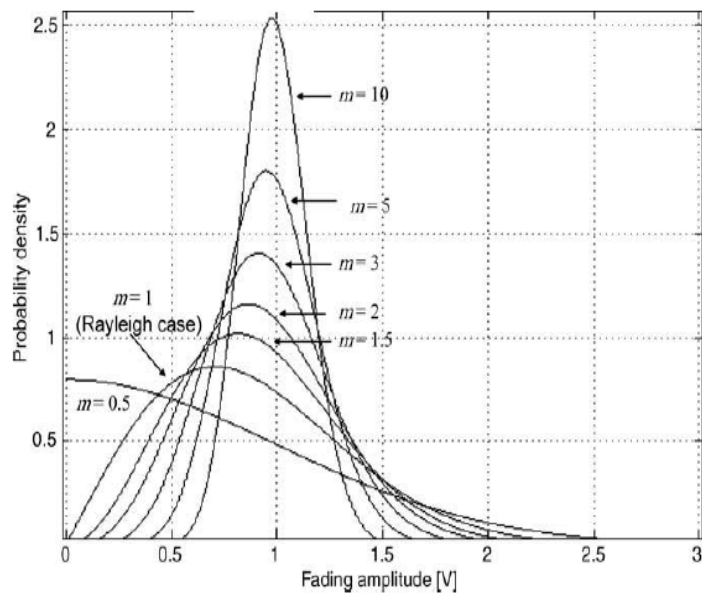
Ορισμένα κανάλια δεν είναι ούτε Rice αλλά ούτε Rayleigh και αυτό συμβαίνει για παράδειγμα όταν δυο μονοπάτια παρουσιάζουν συγκρίσιμη ισχύ και ισχυρότερη απ' ό,τι άλλα. Για αυτόν τον λόγο προτάθηκε μια εναλλακτική κατανομή κατάλληλη για αυτές τις περιπτώσεις που είναι γνωστή ως κατανομή Nakagami-m. Η κατανομή Nakagami-m χρησιμοποιείται εκτεταμένα για να μοντελοποιήσει περίπλοκα κανάλια διαλείψεων.

Η p.d.f κατανομή Nakagami-m δίνεται από

$$p_R(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}r^2} \quad r \geq 0 \quad (4.46)$$

όπου $\Gamma()$ είναι η συνάρτηση Γάμμα, το Ω είναι το second moment και η παράμετρος m ορίζει βάθος της εξασθένισης.

Το παρακάτω διάγραμμα μας δίνει την p.d.f κατανομή Nakagami-m η οποία καλύπτει ένα μεγάλο εύρος συνθηκών εξασθένισης. Είναι μια μονόπλευρη κατανομή Gauss όταν $m=0.5$ και γίνεται κατανομή Rayleigh όταν το $m=1$ με $\Omega = 2\sigma^2$



Διάγραμμα 30 Κατανομή Nakagami

4.3 Ραδιοκάλυψη

Στην ραδιοκάλυψη οι παράγοντες οι οποίοι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι παρακάτω:

Το **RSSI** (Received Signal Strength Indicator) που είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος σε dBm. Η τιμή αυτή υποδηλώνει πόσο καλά ακούει το ο δέκτης το σήμα που εκπέμπει ο πομπός. Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι η τιμή του RSSI τόσο καλύτερο είναι το σήμα.

Το **SNR** (Signal to Noise Ratio) είναι ο λόγος της ισχύς του λαμβανόμενου σήματος προς την ισχύ του θορύβου και υποδηλώνει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος.

Το **PDR** (Packet Delivery Ratio) που είναι η αναλογία των πακέτων ελήφθησαν επιτυχώς από τον Network Server προς τον συνολικό αριθμό των πακέτων που μεταδίδονται από μια τελική συσκευή. Το PDR όταν υπάρχει κινητικότητα στις τελικές συσκευές, στις χαμηλές ταχύτητες είναι υψηλότερο. Όμως σημαντικό ρόλο παίζει και η τοπολογία της πόλης, το Line of Sight (LOS) καθώς και τα εμπόδια. [24]

Το **SF** (Spreading Factor) που ορίζει το ρυθμό μετάδοσης και παίρνει τιμές από SF=7 έως SF=12 όπου όταν SF=7 ο ρυθμό μετάδοσης είναι γρηγορότερος ενώ όταν SF=12 ο ρυθμός μετάδοσης είναι πιο αργός. Οι συσκευές LoRa χρησιμοποιούν υψηλό SF όταν το σήμα είναι αδύναμο ή όταν υπάρχουν παρεμβολές. Η χρήση υψηλού SF σημαίνει ταυτόχρονα και μεγαλύτερο χρόνο μετάδοσης του μηνύματος (ToA). Έτσι, όταν μια

συσκευή είναι αρκετά μακριά από το gateway το σήμα γίνεται αδύναμο και γι αυτό το λόγω χρειάζεται και μεγαλύτερο SF.

4.4 Παρεμβολές

Η απόδοση των συσκευών σε μια ραδιοεπικοινωνία επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τις παρεμβολές. Οι παρεμβολές δημιουργούν καταστάσεις απώλειας πακέτων με αποτέλεσμα να απαιτείται η επαναποστολή τους. Οι παρεμβολές δημιουργούνται όταν οι μεταδόσεις ενός σταθμού βάσης παρεμβάλουν στις μεταδόσεις ενός άλλου δικτύου ή ακόμα και του ίδιου του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πολλά ανεπιθύμητα σήματα, που προέρχονται από τους πομπούς που παρεμβάλλουν, να προστεθούν στο επιθυμητό σήμα.

Οι παράμετροι οι οποίοι καθορίζουν την ανθεκτικότητα στις παρεμβολές είναι οι ακόλουθοι:

- Η **συχνότητα φέροντος (Carrier Frequency)** που καθορίζει την κεντρική συχνότητα μετάδοσης.
- Το **εύρος ζώνης (Bandwidth)** που είναι η απόσταση μεταξύ της χαμηλότερης και της υψηλότερης συχνότητας σε κάθε chirp. Όταν το εύρος ζώνης είναι υψηλό αυξάνεται ο ρυθμός των δεδομένων και μειώνεται ο χρόνος μετάδοσης (ToA) για ένα πακέτο. Επιπλέον, θα μειώσει την ευαισθησία αποκωδικοποίησης καθώς τώρα το σήμα εκτίθεται περισσότερο στο θόρυβο. Η χρήση μικρότερου εύρους ζώνης για το ίδιο πακέτο σημαίνει μεγαλύτερο χρόνο μετάδοσης καθώς μειώνεται ο ρυθμός των δεδομένων αλλά και μεγαλύτερη ευαισθησία.
- Ο **συντελεστής διάδοσης (Spreading Factor)** ορίζει πόσο bits κωδικοποιούνται σε κάθε σύμβολο. Η αύξηση του spreading factor, αυξάνει το SNR (Symbol to Noise Ratio) και ως εκ τούτου την ευαισθησία του δέκτη και την εμβέλεια του σήματος. Ωστόσο, μειώνει τον ρυθμό των δεδομένων και τον χρόνο μετάδοσης με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, ταυτόχρονες μεταδόσεις με διαφορετικό SF δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους και μπορούν να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς. [25][26]
- Ο **ρυθμός κωδικοποίησης (Coding rate)** είναι η τιμή του FEC (Forward Error Correction) που χρησιμοποιείται στα μόντεμ LoRa και ορίζεται από τις τιμές 4/5, 4/6, 4/7 και 4/8. Υψηλότερο CR παρέχει μεγαλύτερη προστασία αλλά αυξάνει

και τον χρόνο διάδοσης (ToA). Οι πομποδέκτες LoRa με διαφορετικά CR και σε κατάσταση λειτουργίας explicit header μπορούν ακόμα να επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς το CR είναι κωδικοποιημένο στην κεφαλίδα. [25][26]

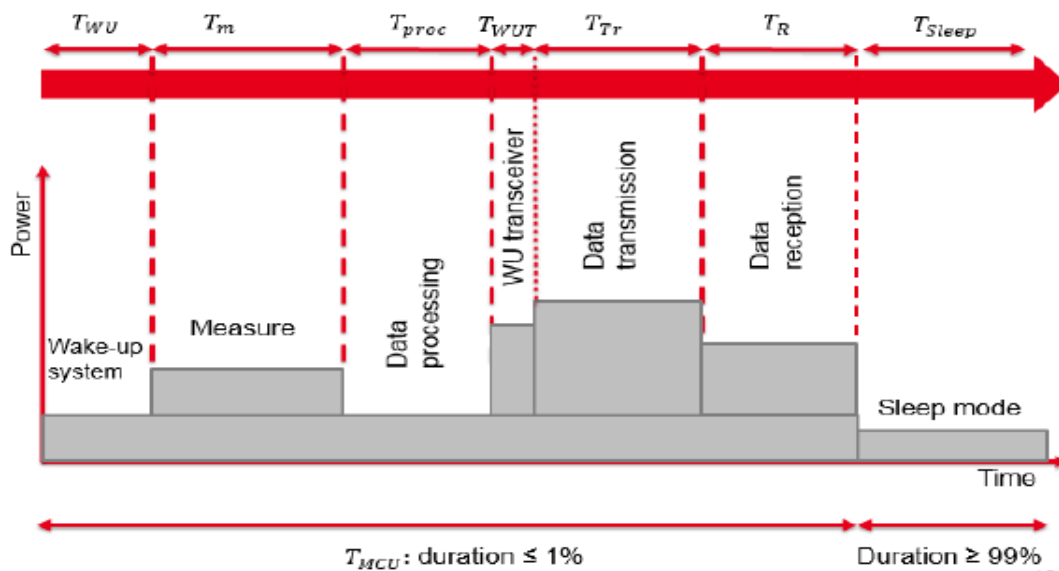
Το SINR είναι ο λόγος της ισχύς του σήματος προς το άθροισμα της παρεμβολής και του θορύβου. Ο υπολογισμός του SINR δίνεται από τον τύπο:

$$\text{SINR} = \frac{P}{I+N} \text{ (dB) όπου}$$

P η ισχύς του σήματος, I η ισχύς της παρεμβολής, N ο θόρυβος

4.5 Υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας [27]

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ακολουθία λειτουργίας ενός αισθητήρα και ορίζονται και οι διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίες του.



Διάγραμμα 31 Λειτουργία αισθητήρα

Η μονάδα επεξεργασίας του αισθητήρα καθ' όλη την διάρκεια βρίσκεται σε λειτουργία. Κάθε βήμα της ακολουθίας λειτουργίας του αισθητήρα χαρακτηρίζεται από σταθερή χρονική διάρκεια.

Στο μοντέλο αυτό εξετάζονται τα στοιχεία που είναι ενεργά σε μια χρονική στιγμή και ανενεργά στον υπόλοιπο χρονικό κύκλο. Το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ο αισθητήρας βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας (sleep mode).

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας δίνεται από το άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται σε κατάσταση sleep και από την ενέργεια που καταναλώνεται σε κατάσταση λειτουργίας:

$$E_{Total} = E_{Sleep} + E_{Active} \quad (4.47)$$

Η κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση αδράνειας (sleep) δίνεται από:

$$E_{Sleep} = P_{Sleep} * T_{Sleep} \quad (4.48)$$

όπου P_{Sleep} η κατανάλωση ενέργειας και T_{Sleep} η χρονική διάρκεια αδράνειας

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας E_{Active} είναι το άθροισμα της κατανάλωσης ενέργειας του κάθε τμήματος του αισθητήρα και δίνεται από:

$$E_{Active} = E_{WU} + E_m + E_{proc} + E_{WUT} + E_{Tr} + E_R \quad (4.49)$$

όπου E_{WU} είναι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διάρκεια της αφύπνισης (wake up), E_m η κατανάλωση ενέργειας από τις μετρήσεις των δεδομένων, E_{proc} η ενέργεια που καταναλώνει ο επεξεργαστής του αισθητήρα, E_{WUT} η κατανάλωση ενέργειας κατά την αφύπνιση του αισθητήρα, E_{Tr} η ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση μετάδοσης, E_R η ενέργεια που καταναλώνεται στην κατάσταση λήψης.

Η κατανάλωση ενέργειας E_{WU} κατά την διάρκεια T_{WU} αφύπνισης δίνεται:

$$E_{WU} = P_{ON}(f_{MCU}) * T_{WU} \quad (4.50)$$

όπου $P_{ON}(f_{MCU})$ η κατανάλωση ενέργεια του μικροελεγκτή και T_{WU} ο χρόνος που ο αισθητήρας είναι σε κατάσταση αφύπνισης.

Μετά τον χρόνο αφύπνισης (wake up), ο αισθητήρας πραγματοποιεί μετρήσεις δεδομένων. Η ενέργεια που καταναλώνεται σε αυτή την φάση δίνεται από:

$$E_m = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_m) * T_m \quad (4.51)$$

όπου P_m είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για τις μετρήσεις στον χρόνο T_m .

Μετά την φάση των μετρήσεων ο μικροεπεξεργαστής περνά στην φάση της επεξεργασίας των δεδομένων. Η χρονική διάρκεια $T_{proc}(f_{MCU})$ εξαρτάται από την συχνότητα λειτουργίας του επεξεργαστή f_{MCU} και από τον αριθμό των οδηγιών (instructions) $N_{ist}(T_{proc}(f_{MCU})) = \frac{N_{ist}}{f_{MCU}}$

Η κατανάλωση ενέργειας από την μονάδα επεξεργασίας δίνεται από :

$$E_{proc} = P_{ON}(f_{MCU}) * T_{proc}(f_{MCU}) \quad (4.52)$$

Η κατανάλωση ενέργειας E_{WUT} κατά την διάρκεια της αφύπνισης T_{WUT} δίνεται από:

$$E_{WUT} = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_{WUT}) * T_{WUT} \quad (4.53)$$

όπου P_{WUT} είναι η κατανάλωση ενέργειας κατά την διάρκεια αφύπνισης του πομποδέκτη

Η κατανάλωση ενέργειας από την μετάδοση E_{Tr} δίνεται από:

$$E_{Tr} = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_{Tr}) * T_{Tr} \quad (4.54)$$

όπου P_{Tr} είναι η κατανάλωση ενέργειας κατά την μετάδοση το χρονικό διάστημα T_{Tr} και δίνεται από:

$$T_{Tr} = N_{bit} * T_{bit} \quad (4.55)$$

όπου N_{bit} και T_{bit} είναι ο αριθμός των μεταδιδόμενων bit και η διάρκεια μετάδοσης του bit αντίστοιχα.

Σε περίπτωση μετάδοσης acknowledgement η κατανάλωση ενέργειας στον αισθητήρα δίνεται

$$E_R = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_R) * T_R \quad (4.56)$$

όπου P_R είναι η κατανάλωση ενέργειας κατά την λήψη το χρονικό διάστημα T_R

Επιπλέον, η κατανάλωση του μικροεπεξεργαστή E_{MCU} σε κατάσταση on είναι

$$E_{MCU} = P_{ON}(f_{MCU}) * T_{MCU}(f_{MCU}) \quad (4.57)$$

όπου $T_{MCU}(f_{MCU})$ χρόνος διάρκειας του μικροεπεξεργαστή και εξαρτάται από το συνολικό χρόνο λειτουργίας σε διαφορετικές καταστάσεις και γράφεται και

$$T_{MCU}(f_{MCU}) = T_{WU} + T_m + T_{proc}(f_{MCU}) + T_{WUT} + T_{Tr} + T_R \quad (4.58)$$

Κεφάλαιο 5

Μελέτες και Μετρήσεις

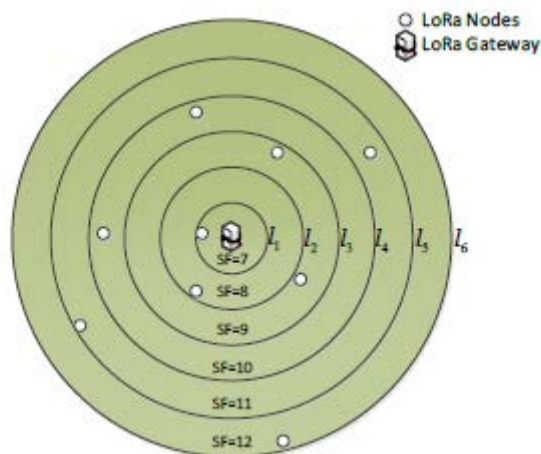
Παρεμβολών LoRa

5.1 Θεωρητική μελέτη παρεμβολών

5.1.1 Συνύπαρξη των δικτύων LoRa και άλλων τεχνολογιών

Στην θεωρητική αυτή μελέτη [34] μελετάται η συνύπαρξη των δικτύων LoRa και άλλων τεχνολογιών LPWAN. Οι LoRa κόμβοι με το ίδιο SF θα παρεμβάλλουν μεταξύ τους καθώς και οι κόμβοι άλλων τεχνολογιών θα παράγουν αντίστοιχες παρεμβολές.

Στο LoRa δίκτυο Φ οι LoRa κόμβοι που είναι τοποθετημένοι σε κυκλική μορφή μοντελοποιούνται σαν PCP (Poisson Cluster Process) ενώ τα LoRa gateways μοντελοποιούνται σαν PPP (Poisson Point Process) Φ_{out} και με πυκνότητα ρ_{out} . Οι κόμβοι των άλλων τεχνολογιών είναι και αυτοί μοντελοποιημένοι σαν PPP Φ_{other} με πυκνότητα ρ_{other} .



Διάγραμμα 32 Κατανομή των κόμβων LoRa για διαφορετικά SF

Το κυκλικό δίκτυο LoRa που αποτελείται από ένα gateway διαιρείται σε έξι διαφορετικά SF (7-12) και κάθε κόμβος κατανέμεται τυχαία σε διάφορες περιοχές με διαφορετικά

SF. Για το gateway που βρίσκεται στο κέντρο του δικτύου $S_y \in \Phi_{\text{out}}$ η συνάρτηση πυκνότητας για τους LoRa κόμβους σε (l_j, l_{j+1}) είναι:

$$f(r) = \frac{1}{\pi(l_{j+1}^2 - l_j^2)} \quad l_j < r < l_{j+1}, \quad j = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \quad (5.1)$$

ή

$$f(r) = 0$$

Ο τύπος με τον οποίο μπορεί να εκφραστεί η ισχύς μετάδοσης P_t για κάθε κόμβο είναι:

$$P = P_t h_0 L(d) \quad (5.2)$$

όπου $h_0 \sim \exp(1)$ εκθετική τυχαία μεταβλητή και $L(d)$ είναι η συνάρτηση εξασθένισης της απώλειας διαδρομής και $L(d) = \lambda / (4\pi d)^\eta$ όπου d η απόσταση των κόμβων και του gateway και λ το μήκος κύματος του φέροντος και $\eta \geq 2$ είναι ο εκθέτης της απώλειας διαδρομής.

Οι συνολικές παρεμβολές που προκαλούνται στα gateways περιγράφονται στο δίκτυο Φ σαν το άθροισμα τριών ανεξάρτητων όρων (i) των παρεμβολών $I_{\text{in-LoRa}}$ που προκαλούνται στο δίκτυο LoRa, από τους LoRa κόμβους του ίδιου δικτύου (ii) των παρεμβολών $I_{\text{out-LoRa}}$ που προκαλούνται από LoRa κόμβους που βρίσκονται έξω από το δίκτυο αυτό (iii) και των παρεμβολών I_{other} που προκαλούνται από κόμβους άλλων τεχνολογιών της ίδιας συχνότητας.

Έτσι, οι παρεμβολές που φτάνουν στον LoRa δέκτη S_{y0} από τους κόμβους LoRa που βρίσκονται μέσα στο δίκτυο δίνονται από τον τύπο:

$$I_{\text{in-LoRa}} = \sum_{x \in S_{y0/x0}} P_x h_{x,y0} L(x) \quad (5.3)$$

όπου P_x είναι η ισχύς μετάδοσης των κόμβων που βρίσκονται μέσα στο δίκτυο και x η απόσταση μεταξύ κόμβων και gateway.

Οι παρεμβολές από κόμβους που βρίσκονται έξω από το δίκτυο δίνονται από τον τύπο

$$I_{out-LoRa} = \sum_{y \in S/y_0} \sum_{x \in S_y} P_x h_{x,y} L(x + y) \quad (5.4)$$

Οι παρεμβολές από κόμβους άλλων τεχνολογιών δίνονται από τον τύπο:

$$I_{other} = \sum_{z \in \Phi_{other}} P_z h_{z,y_0} L(z) \quad (5.5)$$

Το SINR που είναι ο λόγος του ληφθέντος σήματος προς το άθροισμα της παρεμβολής και του θορύβου, για τον ζητούμενο LoRa κόμβο δίνεται από τον τύπο:

$$SINR = \frac{P_{x_0} h_{x_0,y_0} L(x_0)}{I_{in-LoRa} + I_{out-LoRa} + I_{other} + N} \quad (5.6)$$

Ο θερμικός θόρυβος στους κόμβους LoRa υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N(\text{dBm}) = 174 + 10 \log_{10}(\text{BW}) \quad (5.7) \quad \text{όπου το εύρος ζώνης BW είναι 125kHz}$$

Προκειμένου να μετρηθεί ο βαθμός παρεμβολής στο δίκτυο θα μελετάται η πιθανότητα κάλυψης P_{cov} και η απόδοση της φασματικής περιοχής. Το P_{cov} είναι η πιθανότητα να αποκωδικοποιηθούν με επιτυχία τα σήματα στον δέκτη με κατάλληλο SINR και όριο β . Ο τύπος που δίνει την πιθανότητα κάλυψης είναι ο παρακάτω:

$$P_{cov}(\beta) = E[\Pr\{SINR \geq \beta\}] \quad (5.8)$$

Εφαρμόζοντας τον τύπο (5.6) στον τύπο (5.8) παίρνουμε τους παρακάτω τύπους

$$\begin{aligned} P_{cov}(\beta) &= E\left[\Pr\left\{\frac{P_{x_0} h_{x_0,y_0} L(x_0)}{I_{in-LoRa} + I_{out-LoRa} + I_{other} + N} \geq \beta\right\}\right] \\ &= E\left\{e^{-\mu N} L_{I_{in-LoRa}}(\mu) L_{I_{out-LoRa}}(\mu) L_{I_{other}}(\mu)\right\} \end{aligned} \quad (5.9)$$

όπου $\mu = \frac{(4\pi d)^\eta \beta}{P_{xo\lambda}}$, $L_{I_{in-LoRa}}(\mu) = E\{e^{-\mu I_{in-LoRa}}\}$,

$L_{I_{out-LoRa}}(\mu) = E\{e^{-\mu I_{out-LoRa}}\}$, $L_{I_{other}}(\mu) = E\{e^{-\mu I_{other}}\}$

είναι οι μετασχηματισμοί Laplace των $I_{in-LoRa}$, $I_{out-LoRa}$ και I_{other}

Ο μετασχηματισμός Laplace σε τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές

1) της παρεμβολής από κόμβους μέσα στο δίκτυο LoRa είναι:

$$L_{I_{in-LoRa}}(s) = \exp\left(-\frac{2(m-1)}{l_{j+1}^2 - l_j^2} \int_{l_j}^{l_{j+1}} \frac{s P_x L(x)}{1 + s P_x L(x)} x dx\right) \quad (5.10)$$

2) της παρεμβολής που προκαλείται από κόμβους έξω από το δίκτυο είναι:

$$L_{I_{out-LoRa}}(s) = E\{e^{-s I_{out-LoRa}}\} = \exp(-2\pi \rho_{out} \int_0^{+\infty} (1 - \exp(-mS(x,y))) y dy) \quad (5.11)$$

όπου

$$S(x,y) = \frac{1}{\pi(l_{j+1}^2 - l_j^2)} \int_{l_j}^{l_{j+1}} \int_0^{2\pi} \frac{1}{1 + s P_x L(Q(x,y,\theta))} d\theta x dx \quad (5.12)$$

και το $Q(x,y,\theta) = \sqrt{x^2 + y^2 - 2xy \cos\theta}$, θ είναι η γωνία ανάμεσα στην απόσταση των δυο gateway y και την απόσταση του εσωτερικού κόμβου με τον αντίστοιχο δέκτη x .

3) της παρεμβολής που προκαλείται από κόμβους άλλων τεχνολογιών είναι:

$$L_{I_{other}}(s) = E\{e^{-s I_{other}}\} = \exp(-2\pi \rho_{other} \int_0^{+\infty} (1 - \frac{1}{1 + s P_z L(z)}) z dz) \quad (5.13)$$

Από τους τύπους (5.10) (5.11) (5.13) του μετασχηματισμού Laplace προκύπτει η ο τύπος της πιθανότητας κάλυψης.

Ο τύπος της πιθανότητας κάλυψης είναι:

$$P_{cov}(\beta) = \frac{2}{l_{j+1}^2 - l_j^2} \int_{l_j}^{l_{j+1}} e^{-\mu N} L_{I_{in-LoRa}}(\mu) L_{I_{out-LoRa}}(\mu) L_{I_{other}}(\mu) r dr$$

$$= \frac{2}{l_{j+1}^2 - l_j^2} \int_{l_j}^{l_{j+1}} e^{\frac{(4\pi d)^\eta \beta}{P_{x0\lambda}} \mu N} \bullet L_{In-LoRa} \left(\frac{(4\pi d)^\eta \beta}{P_{x0\lambda}} \right) \bullet L_{Out-LoRa} \left(\frac{(4\pi d)^\eta \beta}{P_{x0\lambda}} \right) \bullet \left(\frac{(4\pi d)^\eta \beta}{P_{x0\lambda}} \right) r dr \quad (5.14)$$

μπορούμε να βρούμε ότι η πιθανότητα κάλυψης είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του d , β , m (όπου m ο αριθμός των κόμβων) και υποδεικνύει τρία χαρακτηριστικά. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ κόμβου και δέκτη τόσο μικρότερη θα είναι η κάλυψη. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι η μετάδοση σε μεγάλη απόσταση μπορεί να βελτιωθεί μειώνοντας το όριο β . Και το τρίτο χαρακτηριστικό είναι ότι όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν σε μια περιοχή τόσο περισσότερες πηγές παρεμβολής παρεμβάλλονται, με αποτέλεσμα την χαμηλή πιθανότητα κάλυψης.

Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζει και η απόδοση της περιοχής φάσματος (Area Spectrum Efficiency) που υποδηλώνει τον μέσο αριθμό των bits που μπορούν οι κόμβοι να μεταδώσουν ανά μονάδα επιφάνειας. Το ASE είναι μια αύξουσα συνάρτηση της πιθανότητας κάλυψης και των αριθμών των κόμβων, όμως είναι και φθίνουσα συνάρτηση του m .

$$ASE = m \rho_{out} \log_{10}(1+\beta) P_{cov}(\beta) \quad (5.15)$$

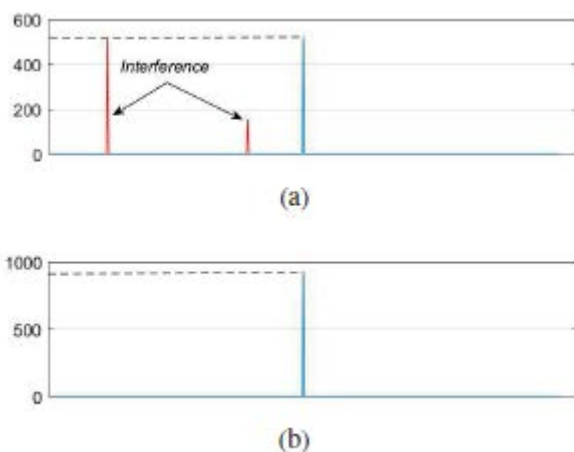
Επομένως, ένα κατάλληλο m δηλαδή, ένας κατάλληλος αριθμός κόμβων μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση της περιοχής φάσματος (ASE).

5.1.2 Λήψη σήματος και επιτυχής ακύρωση παρεμβολών

Η παρακάτω θεωρητική μελέτη παρεμβολών [35] μελετά την λήψη του σήματος με παρεμβολές και την επιτυχή ακύρωση των παρεμβολών.

Οι συσκευές του LoRaWAN class A χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο ALOHA MAC για πρόσβαση στο μέσο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του ALOHA είναι η μη αποτελεσματική χρήση του φάσματος με αποτέλεσμα οι ταυτόχρονες μεταδόσεις να προκαλούν απώλειες πακέτων. Επιπλέον, όταν συμβαίνουν συγκρούσεις όλα τα πακέτα θεωρούνται χαμένα. Ωστόσο, το φυσικό επίπεδο LoRa παρουσιάζει αποτελεσματική λήψη και ο δέκτης είναι ικανός να λαμβάνει επιτυχώς πακέτα ενώ υπάρχουν συγκρούσεις. Όταν υπάρχουν εκτός από τα μεταδιδόμενα σύμβολα και δυο σύμβολα παρεμβολής όπως φαίνεται στο διάγραμμα 33 (a) με τιμές 30 και 100 στον άξονα x τότε

αυτά προστίθενται στο μεταδιδόμενο σύμβολο με τιμή 128 στον άξονα x. Στην περίπτωση όμως που η παρεμβολή έχει την ίδια τιμή ή μεγαλύτερη από αυτή του ζητούμενου, τότε δημιουργείται πρόβλημα. Έτσι, στο διάγραμμα 33 (a) η πρώτη παρεμβολή έχει την ίδια τιμή με αυτή του ζητούμενου, ενώ στο διάγραμμα 33(b) όλες οι παρεμβολές έχουν την ίδια τιμή, προκαλώντας αύξηση της μέγιστης τιμής της συχνότητας.



Διάγραμμα 33 (a)FFT κωδικοποιημένων chirp στις τιμές 30, 100 και 128 αντίστοιχα με SF=8 (b) FFT τριών κωδικοποιημένων chirp στην τιμή 128 με SF=8

Σε ένα περιβάλλον με παρεμβολές το ζητούμενο σήμα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί επιτυχώς αν

$$SINR_x = \frac{P_x}{\sum P_i + \sigma^2} > Th \quad (5.16)$$

όπου P_x είναι η ισχύς του σήματος και εξαρτάται από την διάρκεια σύγκρουσης, $\sum P_i$ είναι η συνολική ισχύς της παρεμβολής από άλλες συσκευές του δικτύου, σ^2 είναι η ισχύς θορύβου στο κανάλι και Th είναι το ελάχιστο SINR όριο που απαιτείται για την επιτυχή αποκωδικοποίηση του σήματος X . Στην τεχνολογία LoRa μόνο η ισχύς του ισχυρότερου παρεμβολέα έχει σημασία επομένως θα έχουμε:

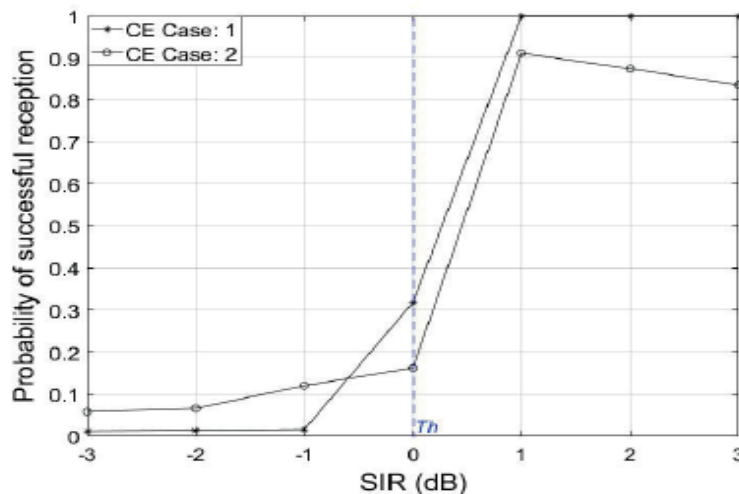
$$SIR_x = \frac{P_x}{P_I} > Th \quad (5.17)$$

Δημιουργήθηκαν τυχαίες συγκρούσεις στον δέκτη με την δημιουργία δυο πακέτων LoRa με διαφορά χρόνου ($T_o \leq \Delta T \leq T_{air}$). Το πρώτο σήμα έφτασε στον χρόνο T_o και το δεύτερο σήμα έφτασε μετά από τυχαίο χρόνο T_{air} από το πρώτο πακέτο. Η μετάδοση ενός πακέτου παρεμβολής μπορεί να ξεκινήσει οποιοδήποτε χρόνο και το μήκος του χρόνου

ΔT επικάλυψης ποικίλει τυχαία και για τα δυο πακέτα. Στόχος είναι να βρεθεί κάτω από ποιές ρυθμίσεις ισχύος θα λειτουργήσει η ανίχνευση συγκρούσεων και η επιτυχής λήψη.

Στα πακέτα χρησιμοποιήθηκε το ελάχιστο μέγεθος προοιμίου (preamble), φορτίο μήκους 20 bytes χωρίς κωδικοποίηση καναλιού και $SF = 8$. Υπολογίστηκε η πιθανότητα επιτυχούς λήψης με την μετάδοση 1000 πακέτων για κάθε ρύθμιση ισχύος και τυχαία επικάλυψη χρόνου ΔT . Σύμφωνα με το διάγραμμα 34 παρακάτω ο άξονας x δίνει το SIR ,τον λόγω σήματος προς παρεμβολή και ο άξονας y την πιθανότητα επιτυχούς λήψης. Επίσης μπορεί να θεωρηθεί, ότι αν η διαφορά της λαμβανόμενης ισχύος μεταξύ των δυο παρεμβολών είναι περίπου 1 dB , ο δέκτης μπορεί επιτυχώς να αποκωδικοποιήσει το ισχυρό πακέτο. Επομένως η εξίσωση (5.17)

$$SIR_x = \frac{P_x}{P_I} > Th \text{ μπορεί να εκφραστεί ως } SIR_x = \frac{P_x}{P_I} > 1 \text{ dB}$$



Διάγραμμα 34 Αποτελέσματα λήψης με $SF=8$, $CR=0$ (όπου CR το coding rate) και $BW=125\text{kHz}$ και CE (CE (Capture Effect) - αποτελεσματική λήψη)

Στις συγκρούσεις που συμβαίνουν στο LoRa όταν δυο ή περισσότερα πακέτα καταφθάνουν ταυτόχρονα με το ίδιο SF, συνήθως το ισχυρότερο πακέτο λαμβάνεται επιτυχώς, ενώ τα άλλα πακέτα θεωρούνται παρεμβολές. Η επιτυχής ακύρωση των παρεμβολών επιτρέπει την ανάκτηση των ασθενέστερων πακέτων. Πρώτα αποκωδικοποιείται το ισχυρότερο σήμα και αφαιρείται από το συνολικό ληφθέν σήμα και στη συνέχεια το ασθενέστερο σήμα αφαιρείται από το υπόλοιπο. Στην περίπτωση των πολλαπλών παρεμβολών αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια επαναληπτική διαδικασία. Ο δέκτης εντοπίζει πρώτα το ισχυρότερο σήμα και στην συνέχεια το επόμενο πιο ισχυρό κ.ο.κ.

Επομένως, θεωρούμε ένα δίκτυο LoRa που αποτελείται από ένα gateway και N πομπούς διασκορπισμένους γύρω από τον δέκτη σε πεδίο Poisson $\Phi = \{(L_i, H_i)\} \subset \mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^+$

όπου L_i αντιπροσωπεύει την θέση του κάθε κόμβου μετάδοσης και H_i είναι ο συντελεστής εξασθένισης καναλιού.

Κάθε σήμα x_r μπορεί να αποκωδικοποιηθεί επιτυχώς από το υπόλοιπο του λαμβανόμενου σήματος $Y(t) = \sum_{\text{active users}} X_i(t)H_i(t)$ αν η αναλογία σήματος προς την παρεμβολή συν τον θόρυβο SI_{rR_x} είναι :

$$SI_{rR_x} = \prod^n \frac{P_i}{P_{i+1}} \geq Th \quad (5.18) \quad \text{όπου } n \text{ ο αριθμός των bits εξόδου.}$$

5.1.3 Πακέτα που χάθηκαν από τις συγκρούσεις και πακέτα που ελήφθησαν με λανθασμένο φορτίο CRC

Σε αυτή την θεωρητική μελέτη [36] μελετώνται τα χαμένα πακέτα λόγω συγκρούσεων και τα πακέτα που ελήφθησαν με λανθασμένο φορτίο CRC.

Έτσι, δημιουργείται ένα διάνυσμα με spreading factors (SF) το οποίο χρησιμοποιείται από κάθε πομπό SF[i] με το $i = 1, \dots, N$ και όπου N ο συνολικός αριθμός των πομπών που εξυπηρετείται από το gateway. Το διάνυσμα συμπληρώνεται με τυχαίες τιμές του SF από 7 έως 12. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο διάδοσης Hata-Okumura για μεσαίου μεγέθους πόλεις, για τον προσδιορισμό της συνολικής περιοχής που μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα LoRa gateway. Το ύψος του gateway ήταν 25m και το ύψος της τελικής συσκευής 2.5m. Χρησιμοποιώντας τα εύρη ευαισθησίας για κάθε SF καθορίστηκε η περιοχή που καλύπτεται από κάθε SF, αν η ισχύς μετάδοσης του κάθε κόμβου είναι η υψηλότερη που επιτρέπεται 14 dBm. Στον πίνακα 5 παρακάτω, δίνονται το εύρος ευαισθησίας, το εύρος απόστασης και το ποσοστό της περιοχής που καλύπτεται από κάθε SF. Παρατηρείται με βάση το εύρος ευαισθησίας ότι η περιοχή που καλύπτεται από το SF12 είναι μεγαλύτερη από αυτή που καλύπτεται από το SF7.

SF	Sensitivity Range (dBm) [28]	Distance Range (km)	Total Area (km ²)	Percentage in Total Area
12	(-137, -135)	(8.13, 7.15)	47.02	22.65
11	(-135, -133)	(7.15, 6.28)	36.69	17.67
10	(-133, -130)	(6.28, 5.18)	39.58	19.07
9	(-130, -129)	(5.18, 4.86)	10.09	4.86
8	(-129, -124)	(4.86, 3.52)	35.25	16.99
7	(-124, -)	(3.52, 0)	38.91	18.75
Total area covered by the gateway			207.54	

Πίνακας 5 Ποσοστό της περιοχής που καλύπτεται για κάθε SF με τη χρήση του μοντέλου διάδοσης Okumura

Επιπλέον, δημιουργείται ένα δεύτερο διάνυσμα με τιμές RSSI στον δέκτη $RSSI[i]$ όπου $i=1, \dots, N$ και N ο αριθμός των πομπών που εξυπηρετούνται από το gateway. Το SF που θα χρησιμοποιηθεί από μια τελική συσκευή συσχετίζεται με το RSSI στο gateway για αυτή τη συσκευή. Όταν ο τελικός κόμβος είναι πολύ μακριά από το gateway και το σήμα του είναι εξασθενημένο, το RSSI θα είναι χαμηλό με αποτέλεσμα να ωθεί τον τελικό κόμβο να χρησιμοποιεί υψηλότερο SF.

Ακόμα, δημιουργείται ένα διάνυσμα καναλιών $CHAN[i]$ με $i=1, \dots, N$. Καθώς χρησιμοποιούμε τρία κανάλια 125-kHz από την ζώνη 868-MHz στο LoRaWAN δίκτυο, οι τιμές του διανύσματος του καναλιού θα επιλεγθούν τυχαία.

Στο τελευταίο βήμα δημιουργείται ο πίνακας του χρόνου εκκίνησης του πακέτου μετάδοσης $Time[i][j]$ με $i=1, \dots, N$ και $0 \leq j < n$, N ο αριθμός των πομπών που εξυπηρετούνται από το gateway και n ο αριθμός των πακέτων που έχει να στείλει κάθε πομπός. Θεωρούμε ότι το n είναι το ίδιο για κάθε πομπό. Προκειμένου να διατηρηθεί το 1% duty cycle (είναι αναλογία του χρόνου κατά τον οποίο λειτουργεί η τελική συσκευή και εκφράζεται σε ποσοστό) για το φυσικό επίπεδο, δυο συνεχόμενες μεταδόσεις πακέτων οι οποίες διαχωρίζονται με διαφορά $(\tau \times 100 - \tau)$ sec, όπου τ ο χρόνος που βρίσκεται στον αέρα η προηγούμενη μετάδοση. Το τ εξαρτάται από SF που χρησιμοποιείται, το μήκος του συμβόλου του προοιμίου (preamble), τον τύπο του header και το μήκος του φορτίου. Όλα τα n πακέτα θα σταλούν το συντομότερο που σημαίνει ότι ο χρόνος εκκίνησης της μετάδοσης των n πακέτων θα είναι:

$$t_n = \sum_{j=1}^n 100 \times \tau_{j-1} + \sum_{j=0}^n \delta_j \quad (5.19)$$

όπου τ ο χρόνος που βρίσκεται στον αέρα το πακέτο και δ είναι ένας τυχαίος αριθμός με εύρος $[0, \tau]$

Προκειμένου να καθοριστεί ο αριθμός των συγκρούσεων και ο αριθμός των πακέτων που έχει ληφθεί με λανθασμένο CRC φορτίο ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

1. Για κάθε πομπό $i=1, \dots, N$ και N ο αριθμός των πομπών που εξυπηρετούνται από το gateway, να γίνει επανάληψη για όλες τις πιθανές παρεμβολές k ($k > N$ & $k! = i$)
2. Αν $(SF[i] = SF[k])$ και $(CHAN[i] = CHAN[k])$ να ελεγχθεί ο χρόνος έναρξης μετάδοσης του k .

3. Να γίνει έλεγχος αν ο χρόνος έναρξης της παρεμβολής k λαμβάνει χώρα πριν το τον χρόνο λήξης του προοιμίου (preamble) και του header της μετάδοσης i ή αν η μετάδοση της παρεμβολής k τελειώνει μετά τα τελευταία έξι σύμβολα του προοιμίου της μετάδοσης i . Εάν αυτές οι συνθήκες διατηρούνται τότε έχει συμβεί σύγκρουση καθώς η παρεμβολή έχει παρεμβάλλει στο προοίμιο και στο header της μετάδοσης του i .
4. Διαφορετικά γίνεται έλεγχος αν ο χρόνος έναρξης της παρεμβολής k είναι μετά το τέλος του προοιμίου και του header της μετάδοσης παρεμβολής. Αν το RSSI της παρεμβολής είναι υψηλότερο από την μετάδοση παρεμβολής τότε το πακέτο λαμβάνεται με λανθασμένο CRC φορτίο.

Στο μοντέλο αυτό θεωρείται ότι όλοι οι πομποί στέλνουν πακέτα με το ίδιο μέγεθος φορτίου, ότι οι πομποί δεν αλλάζουν το SF και την ισχύ από το ένα πακέτο στο άλλο και έχουν να αποστείλουν τον ίδιο αριθμό πακέτων.

Ο τύπος που δίνει το ποσοστό των χαμένων πακέτων λόγω των συγκρούσεων είναι:

$$C_k = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N c_{ij}}{nN} \times 100 \quad (5.20)$$

όπου $c = 0$ αν τα πακέτα δεν συγκρουστούν και $c = 1$ αν τα πακέτα συγκρουστούν

Το συνολικό μέσο ποσοστό για κάθε περίπτωση θα δίνεται σαν το μέσο ποσοστό των δοκιμών

$$C_{tot} = \frac{\sum_{k=1}^K C_k}{K} \quad (5.21)$$

Το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των πακέτων που λαμβάνονται με λανθασμένο CRC φορτίο. Το ποσοστό των πακέτων που λαμβάνονται με λανθασμένο CRC φορτίο ανά δοκιμή BAD_CRC δίνεται:

$$BAD_CRC_k = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N bad_cric_{ij}}{nN} \times 100 \quad (5.22)$$

όπου το $bad_cric = 0$ αν το πακέτο λήφθηκε σωστά και $bad_cric = 1$ αν το πακέτο λήφθηκε με λανθασμένο CRC φορτίο

Το συνολικό μέσο ποσοστό των πακέτων που ελήφθησαν με λανθασμένο CRC φορτίο σε κάθε περίπτωση, δίνεται από:

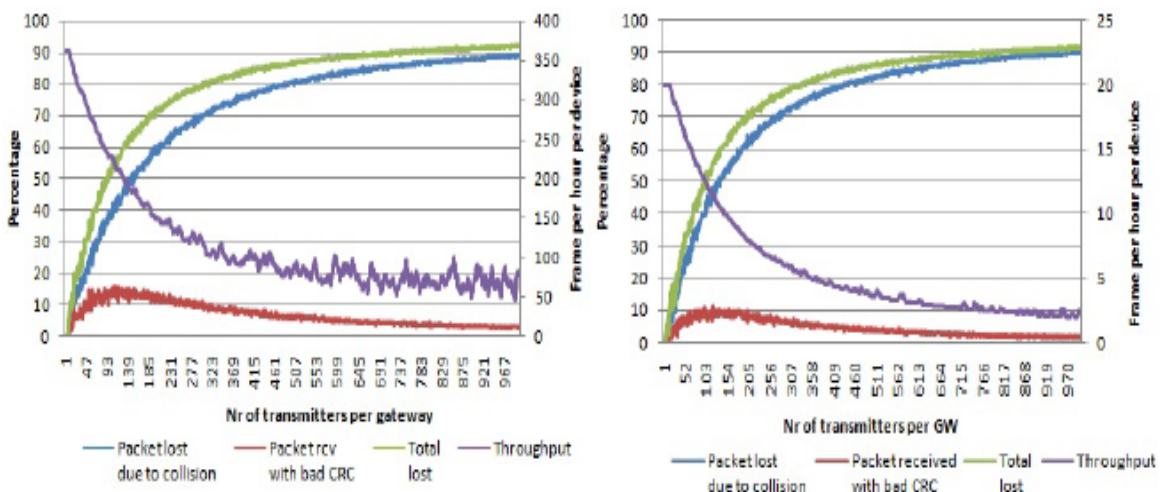
$$BAD_CRC_{tot} = \frac{\sum_{k=1}^K BAD_CRC_k}{K} \quad (5.23)$$

όπου K ο αριθμός των δοκιμών που διεξάχθηκαν

Το συνολικό μέσο ποσοστό των χαμένων πακέτων θα είναι το άθροισμα του συνολικού μέσου ποσοστού των χαμένων πακέτων και του συνολικού μέσου ποσοστού των πακέτων που ελήφθησαν με λανθασμένο CRC φορτίο.

Ο λόγος που γίνεται διάκριση μεταξύ χαμένων πακέτων εξαιτίας των συγκρούσεων και των πακέτων που ελήφθησαν με λανθασμένο CRC φορτίο στο LoRa, είναι ότι στην τελευταία περίπτωση ο δέκτης κατάφερε να λάβει επιτυχώς το προοίμιο και το header. Με αυτό τον τρόπο κατάφερε ο δέκτης να συγχρονιστεί με τον πομπό και μόνο το φορτίο λήφθηκε με σφάλματα.

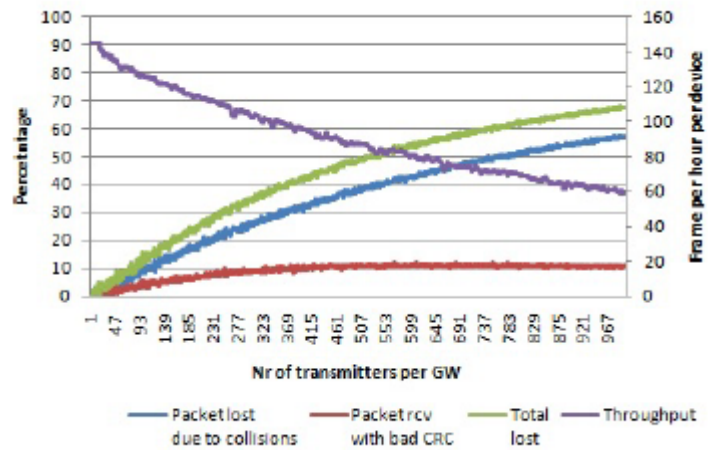
Στο παρακάτω διάγραμμα 35 απεικονίζεται το ποσοστό των χαμένων πακέτων από τις συγκρούσεις και των ληφθέντων πακέτων με λάθος CRC για φορτίο 20 bytes, μονό κανάλι και για SF=7 και SF=12 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 35 Ποσοστό των χαμένων πακέτων από τις συγκρούσεις (μπλε) και των ληφθέντων πακέτων με λάθος CRC ανά αριθμό πομπών ανά gateway (κόκκινο). Μέση απόδοση ανά συσκευή (μωβ). Συνολική απώλεια (πράσινο). Μονό κανάλι, σταθερό SF και φορτίο 20 byte Στο αριστερό διάγραμμα το SF=7 και στο δεξί διάγραμμα το SF=12.

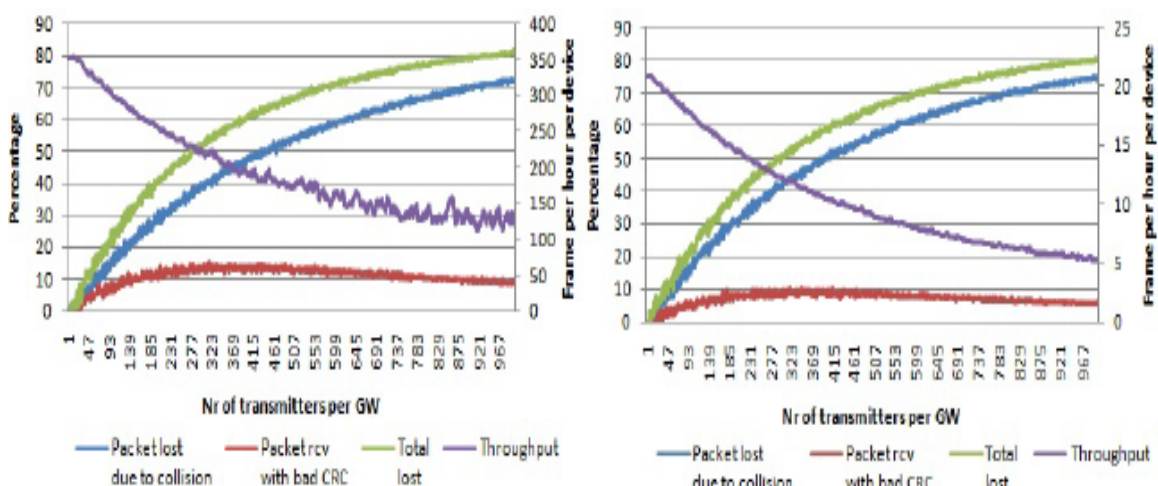
Όταν ο αριθμός των πομπών αυξηθεί πάνω από 1000 το 90% περίπου των πακέτων συγκρούονται. Τα πακέτα με λανθασμένο CRC έχουν peak 15% όταν SF=7 για 120 πομπούς ανά gateway.

Με την χρήση πολλαπλών SF (7 έως 12) το ποσοστό των συγκρούσεων μειώνεται σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Στο διάγραμμα 36 παρακάτω το συνολικό ποσοστό των χαμένων πακέτων (πράσινο) είναι γύρω στο 68% για 1000 κόμβους ανά gateway το οποίο είναι χαμηλότερο αν συγκριθεί με το 92% που είναι για SF 12.



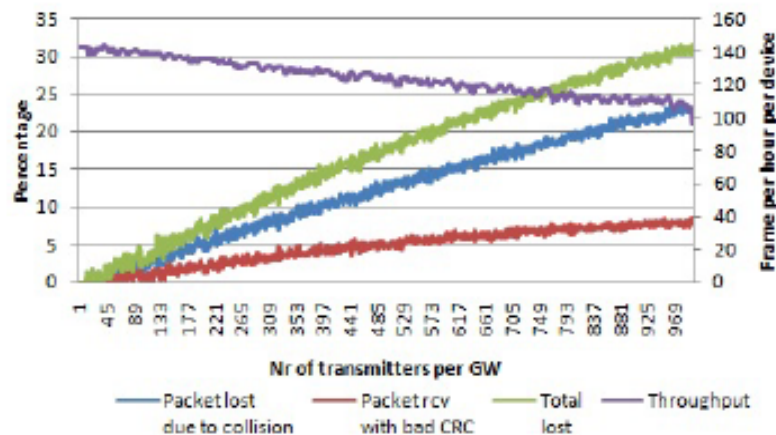
Διάγραμμα 36 Ποσοστό χαμένων πακέτων λόγω συγκρούσεων (μπλέ) και ποσοστό πακέτων που ελήφθησαν με λανθασμένο φορτίο CRC ανά αριθμό πομπών ανά gateway (κόκκινο). Μέση απόδοση ανά συσκευή (μωβ). Φορτίο 20 bytes , μονό κανάλι, πολλαπλά SF.

Στην περίπτωση πολλαπλών καναλιών και SF 7 και SF 12 αντίστοιχα στο διάγραμμα 37 παρακάτω φαίνεται ότι για 1000 κόμβους ανά gateway το 75% των πακέτων χάνονται από τις συγκρούσεις, το οποίο είναι χαμηλότερο από την περίπτωση του μονού καναλιού και υψηλότερο από την περίπτωση του μονού καναλιού με πολλαπλά SF.



Διάγραμμα 37 Ποσοστό χαμένων πακέτων λόγω συγκρούσεων (μπλε) και ποσοστό πακέτων που ελήφθησαν με λανθασμένο φορτίο CRC ανά αριθμό πομπών ανά gateway (κόκκινο). Μέση απόδοση ανά συσκευή (μωβ). Το φορτίο είναι 20 bytes , πολλαπλά κανάλια, αριστερά SF7 δεξιά SF12.

Τέλος, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλα τα SF και πολλαπλά κανάλια τότε σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα 38 για 1000 κόμβους ανά gateway το 24% των πακέτων χάνονται από τις συγκρούσεις όταν το 8% των πακέτων λαμβάνονται με λανθασμένο CRC. Συνολικά 32% (πράσινο) των πακέτων χάνονται, ποσοστό που είναι χαμηλότερο σε σχέση με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.



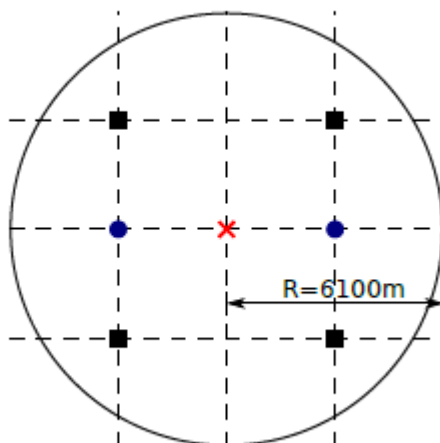
Διάγραμμα 38 Ποσοστό χαμένων πακέτων λόγω συγκρούσεων (μπλε) και ποσοστό πακέτων που ελήφθησαν με λανθασμένο φορτίο CRC ανά αριθμό πομπών ανά gateway (κόκκινο). Μέση απόδοση ανά συσκευή (μωβ). Φορτίο 20 bytes, πολλαπλά κανάλια, πολλαπλά SF.

Προκειμένου οι παραπάνω θεωρητικές μελέτες να αποδειχθούν και πρακτικά έγιναν μετρήσεις και προσομοίωση. Στην προσομοίωση παρακάτω υπολογίζονται τα πακέτα που χάνονται λόγω των συγκρούσεων σε συνάρτηση με το SF, τον αριθμό των gateway και των κόμβων.

5.2 Προσομοίωση παρεμβολών

Η προσομοίωση [37] έγινε με τον ns-3 προσομοιωτή και στην συγκεκριμένη προσομοίωση τα gateway και οι τελικοί κόμβοι ρυθμίστηκαν ώστε να χρησιμοποιούν το bandwidth (BW) των 125kHz. Οι θέσεις των τελικών κόμβων καθώς και των gateways παρέμειναν σταθερές. Η προσομοίωση διεξήχθη για τρεις διαφορετικές περιόδους upstream δεδομένων 600 sec, 6000 sec και 60000 sec. Τα πακέτα είχαν φορτίο εφαρμογής 8 bytes, που συνεπάγεται σε PHY φορτίο 21 bytes. Σε όλες τις προσομοιώσεις μετρήθηκε το packet delivery ratio (PDR) που είναι ο λόγος των πακέτων που παραδόθηκαν επιτυχώς στον δέκτη προς το συνολικό αριθμό των

πακέτων που εστάλησαν. Στην προσομοίωση, τα μη επιβεβαιωμένα πακέτα δεδομένων θεωρούνται ότι έχουν παραδοθεί, μόνο όταν έχουν ληφθεί επιτυχώς από τον δέκτη και επιβεβαιωμένα πακέτα δεδομένων θεωρούνται αυτά, όπου μια από τις μεταδόσεις τους λήφθηκε επιτυχώς από τον δέκτη και ο τελικός κόμβος έλαβε επιβεβαίωση από τον Network Server.

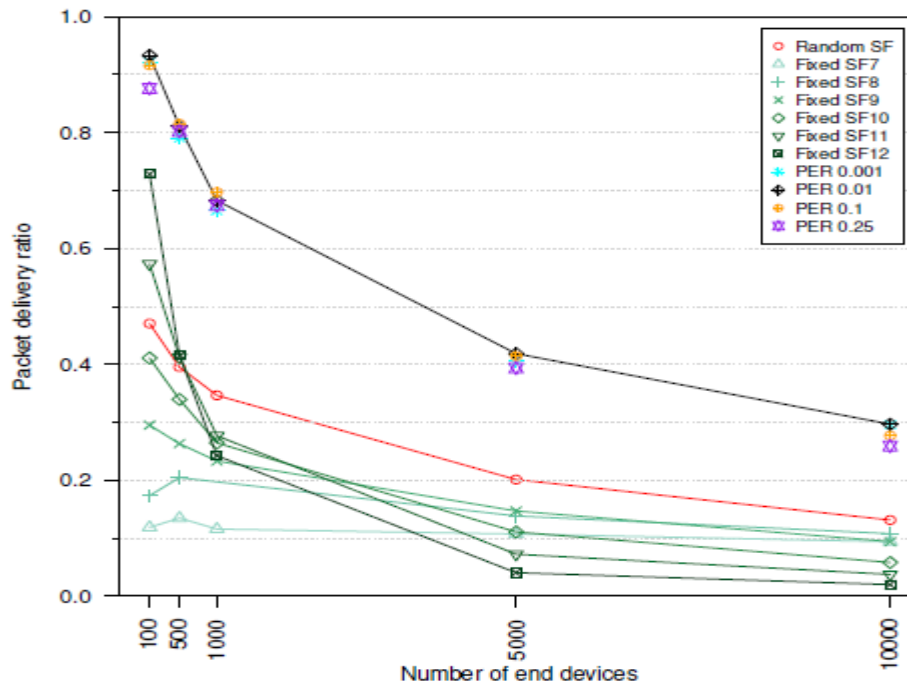


Διάγραμμα 39 Οι θέσεις για ένα (σταυρός), δυο (κύκλοι) και τέσσερα gateway στον προσομοιωτή ns-3

Στην προσομοίωση έγιναν οι ακόλουθες μελέτες, στα SFs (Spreading Factors) τα οποία έχουν επίδραση στο PDR, σε απλό δίκτυο LoRaWAN με ένα gateway και σε δίκτυο LoRaWAN με πολλαπλά gateway.

Όσον αφορά την μελέτη ανάθεσης των SF, χρησιμοποιήθηκαν τρεις στρατηγικές. Στην πρώτη έγινε τυχαία ανάθεση του SF σε κάθε συσκευή, στην δεύτερη όλες οι συσκευές στο δίκτυο έχουν το ίδιο SF και στην τρίτη έγινε ανάθεση του χαμηλότερου SF για το οποίο το PER (Packet Error Ratio) πέφτει κάτω από συγκεκριμένο όριο. Για την στρατηγική PER ελέχθησαν διάφορα PER όρια όπως 0.001, 0.01 και 0.25.

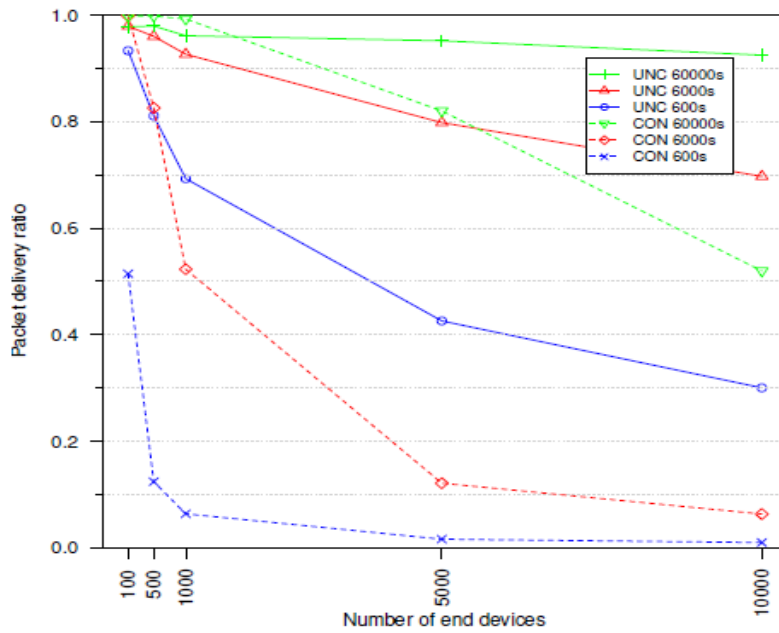
Σύμφωνα με το διάγραμμα 40 παρακάτω και συγκρίνοντας τα δεδομένα η στρατηγική του PER όσον αφορά το PDR είναι η καταλληλότερη. Τα τέσσερα διαφορετικά όρια του PER αποδίδουν τα υψηλότερα PDR σε σύγκριση με τις άλλες δυο στρατηγικές.



Διάγραμμα 40 Το PDR (packet delivery ratio) για διάφορα SF (7 έως 12) σε συνάρτηση με τον αριθμό των κόμβων

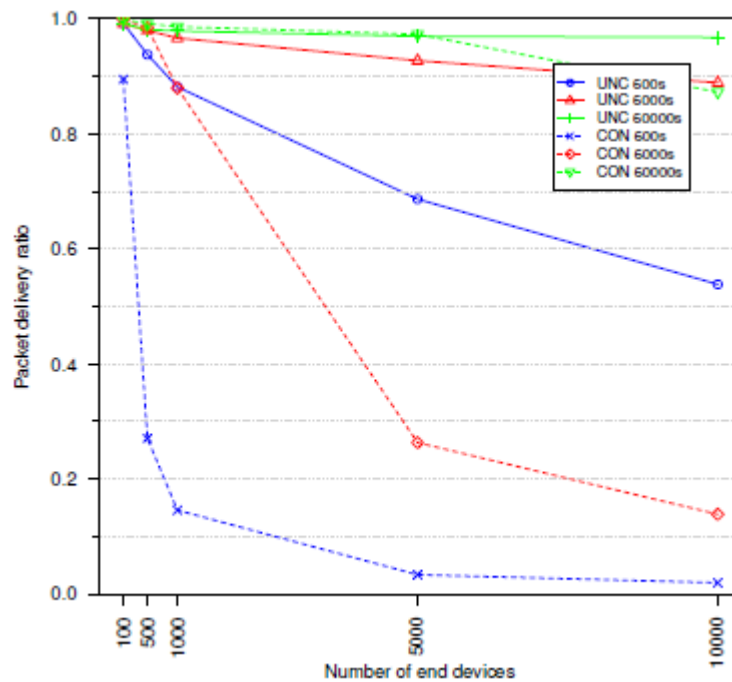
Στο διάγραμμα 41 που προκύπτει από την προσομοίωση μελέτης μη επιβεβαιωμένων δεδομένων (UNC) και επιβεβαιωμένων δεδομένων (CON) σε απλό δίκτυο με ένα gateway, το PDR μειώνεται όταν αυξάνει η συχνότητα αποστολής δεδομένων και αυξάνει ο αριθμός των τελικών συσκευών.

Στην περίπτωση των μη επιβεβαιωμένων MAC μηνυμάτων, η κύρια αιτία που δεν παραδίδονται τα πακέτα είναι οι συγκρούσεις που δημιουργούνται καθώς το gateway είναι απασχολημένο από άλλη μετάδοση και επομένως κατά την διάρκεια αυτή οποιαδήποτε άλλη μετάδοση με τα ίδια δεδομένα δεν λαμβάνεται. Στην περίοδο των 600 sec η απόρριψη λόγω συγκρούσεων των μη παραδομένων πακέτων φτάνει στο 90% και άλλο ένα κομμάτι της τάξης του 9% καταστρέφεται λόγω των παρεμβολών. Όπως φαίνεται και παραπάνω, στο διάγραμμα 41 τα επιβεβαιωμένα μηνύματα δεν είναι πάντα περισσότερα από τα μη επιβεβαιωμένα. Στα επιβεβαιωμένα το PDR είναι υψηλό μόνο σε περιπτώσεις όπου η κίνηση του φορτίου είναι πολύ χαμηλή, δηλαδή στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των συσκευών είναι μικρός. Αυτό συμβαίνει διότι όταν το gateway στέλνει ACK, (acknowledgment) όλες οι λήψεις στο gateway απορρίπτονται με αποτέλεσμα να επηρεάζεται το PDR.



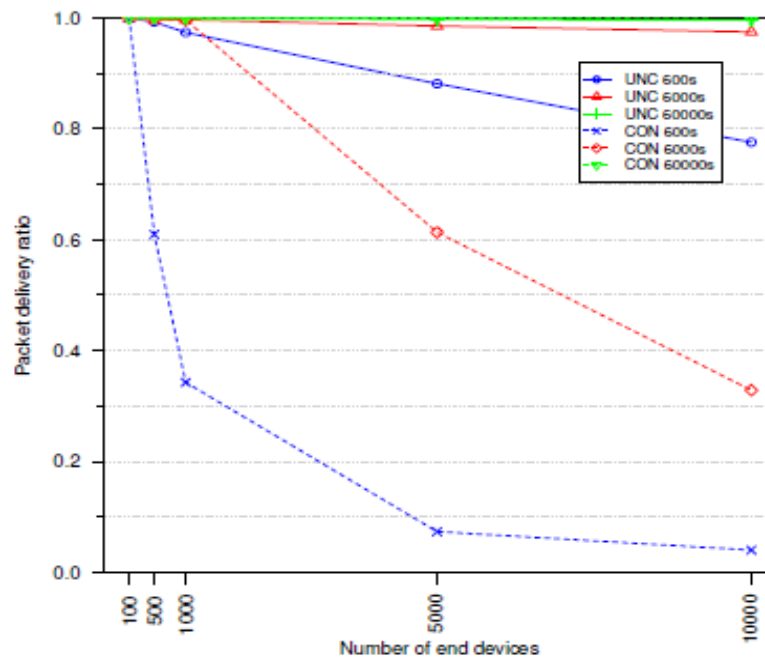
Διάγραμμα 41 Το PDR για μη επιβεβαιωμένα (UNC) και επιβεβαιωμένα (CON) upstream μηνύματα σε ένα gateway ενός LoRaWAN δικτύου.

Στην περίπτωση των πολλαπλών gateway μελετάται η επίδραση τους στο LoRaWAN δίκτυο καθώς και στο PDR. Τα παρακάτω διαγράμματα 42 και 43 δίνουν το PDR στο δίκτυο με δυο και τέσσερα gateway αντίστοιχα.



Διάγραμμα 42 PDR για μη επιβεβαιωμένα (UNC) και επιβεβαιωμένα (CON) μηνύματα σε δίκτυο με 2 gateway

Το PDR αυξάνει κατά πολύ καθώς αυξάνει ο αριθμός των gateway.



Διάγραμμα 43 PDR για μη επιβεβαιωμένα (UNC) και επιβεβαιωμένα (CON) μηνύματα σε δίκτυο με 4 gateway.

Επίσης, στα διαγράμματα 42 και 43 η αύξηση του PDR στα επιβεβαιωμένα μηνύματα είναι αισθητή αλλά δεν είναι τόσο απότομη όσο είναι στα μη επιβεβαιωμένα. Παρακάτω ο πίνακας 6 δείχνει ότι ο αριθμός των χαμένων Received Windows (RW) (μετά την αποστολή uplink μηνύματος από τον κόμβο προς το gateway, ο κόμβος ανοίγει 2 Received Windows στα οποία ανταποκρίνεται το gateway στέλνοντας ACK, ότι δηλαδή έλαβε το μήνυμα) αυξάνεται καθώς αυξάνει η κίνηση του φορτίου και ότι ο αριθμός των ACK αυξάνει όσο αυξάνει και ο αριθμός των GW. Η σχέση μεταξύ των χαμένων Received Windows (RW) και του αριθμού των gateway εξηγείται ως εξής, ο αριθμός των μηνυμάτων που ελήφθησαν επιτυχώς αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας των gateway. Όταν τα gateway δεν είναι σε θέση να στέλνουν στις συσκευές received windows ο αριθμός των χαμένων received windows αυξάνει. Ο αριθμός των χαμένων Received Windows μειώνεται μόνο όταν αυξάνει η πυκνότητα των gateway. Έτσι, ο αριθμός των χαμένων RW μειώνεται οπότε και αποστέλλονται περισσότερα ACK τα οποία ωφελούν το PDR.

GW	DP	#ED	Ack RW1	Ack RW2	Missed RWs	#packets message
1	60000	100	8798	1354	0 ***	1.05
1	60000	1000	47500	53162	7968 **	1.19
1	60000	10000	91950	438343	1604427 *	3.08
1	6000	100	4741	5316	1122	1.21
1	6000	1000	9542	43767	155513	3.07
1	6000	10000	17078	52033	1465697	3.90
1	600	100	943	4315	15052 †††	3.08
1	600	1000	1623	5199	143153 ††	3.90
1	600	10000	6880	5273	262385 †	3.98
2	60000	100	9896	174	0 ***	1.02
2	60000	1000	75062	24590	1026 **	1.07
2	60000	10000	248682	631806	877387 *	2.09
2	6000	100	7926	2170	0	1.03
2	6000	1000	25400	63095	84263	2.04
2	6000	10000	42798	103371	2229616	3.79
2	600	100	2513	6477	8502 †††	2.02
2	600	1000	4838	10327	216539 ††	3.77
2	600	10000	13117	10577	645143 †	3.97
4	60000	100	10012	0	0 ***	1.00
4	60000	1000	95350	4866	201 **	1.01
4	60000	10000	646058	355183	128053 *	1.17
4	6000	100	9380	656	2	1.00
4	6000	1000	66712	33302	12972	1.16
4	6000	10000	135780	201664	2433131	3.47
4	600	100	6568	3470	1360 †††	1.15
4	600	1000	14906	20085	242954 ††	3.45
4	600	10000	26866	21163	1306882 †	3.94

Πίνακας 6 Μετάδοση επιβεβαίωσης ACK για ένα , δυο και τέσσερα gateway κατά την προσομοίωση σε LoRaWAN δίκτυο

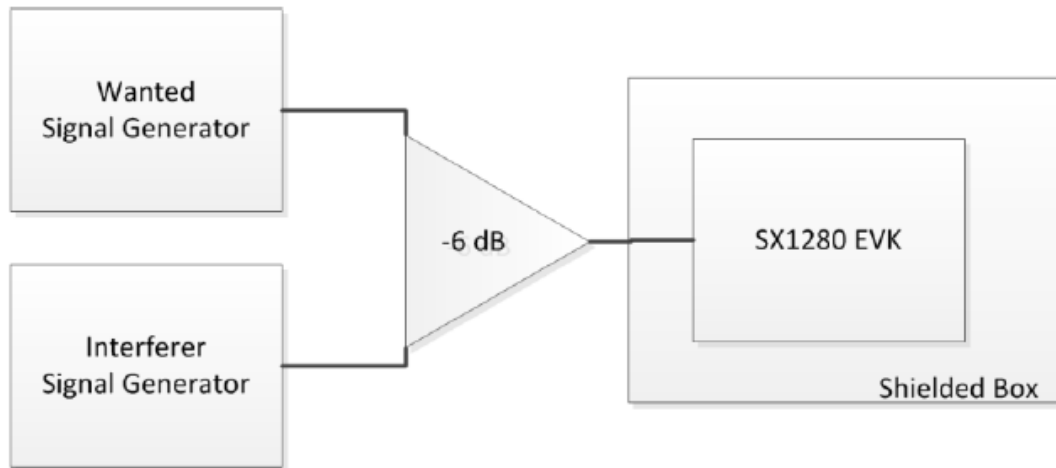
Στον πίνακα 6 παραπάνω το σύμβολο † δίνει τις περιπτώσεις προσομοίωσης κατά τις οποίες τα gateways δεν είναι σε θέση , λόγω του περιορισμένου duty cycle, να στείλουν στον κόμβο, Received Windows. Τέλος, όπου υπάρχει το σύμβολο * ο αριθμός των χαμένων received windows μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των gateway.

5.3 Μετρήσεις παρεμβολών

5.3.1 Μετρήσεις παρεμβολών WiFi σε LoRa

Ομοκαναλική παρεμβολή

Στην δοκιμή για να γίνουν οι μετρήσεις [38] της ομοκαναλικής παρεμβολής και της παρεμβολής μέσα στην ζώνη χρησιμοποιήθηκαν δυο γεννήτριες παραγωγής σήματος, του ζητούμενου σήματος και του σήματος παρεμβολής αντίστοιχα. Οι τρεις τύποι σημάτων παρεμβολής που παρήχθησαν, δοκιμάστηκαν σε διάφορες μορφές διαμόρφωσης LoRa στα 2.45GHz. Τα σήματα συνδυάστηκαν μέσω ενός -6dB passive splitter και στάλθηκαν στον δέκτη SX 1280.



Διάγραμμα 44 Διάγραμμα πειραματικών ρυθμίσεων

Τα αποτελέσματα των δοκιμών της ομοκαναλικής παρεμβολής περιγράφονται παρακάτω.

Τα 5 modem (SF12 200kHz, SF6 200kHz, SF12 1600kHz, SF6 200kHz, GFSK 1Mbps) ρυθμίστηκαν ως εξής, 20 byte φορτίο, μεγάλο interleaving, το ζητούμενο σήμα +3dB πάνω από την ευαισθησία του δέκτη και το packet error rate (PER) 10%.

Τα σήματα που παρεμβάλλουν είναι τα 3 ακόλουθα, συνεχές σήμα CW, σήμα WiFi (802.11b) PBCC και σήμα WiFi (802.11g) OFDM.

Ο παρακάτω πίνακας 7 δίνει τα αποτελέσματα του ελέγχου αντοχής του LoRa απέναντι στα σήματα παρεμβολής.

Setup	Modem	Data Rate	BW [kHz]	CW [dB]	PBCC [dB]	OFDM [dB]
1	LoRa®	SF12	200	22	47	61
2	LoRa®	SF6	200	6	19	33
3	LoRa®	SF12	1600	20	27	34
4	LoRa®	SF6	200	4	20	33
5	GFSK	1 Mbps	1200	-8	-8	-10

Πίνακας 7 Ομοκαναλική αντοχή σε Wi-Fi παρεμβολή για διάφορες ρυθμίσεις του SX1280 Modem

Οι αριθμοί στον πίνακα 7 αναφέρονται στην διαφορά ισχύος μεταξύ του ζητούμενου σήματος και του σήματος παρεμβολής της ομοκαναλικής παρεμβολής. Στον δέκτη GFSK η απόδοση της αρνητικής τιμής είναι αναμενόμενη, διότι στο εύρος ζώνης 1.2MHz και

για ρυθμό δεδομένων 1Mbps, ο δέκτης περιλαμβάνει μεγάλο μέρος της ισχύς του σήματος παρεμβολής.

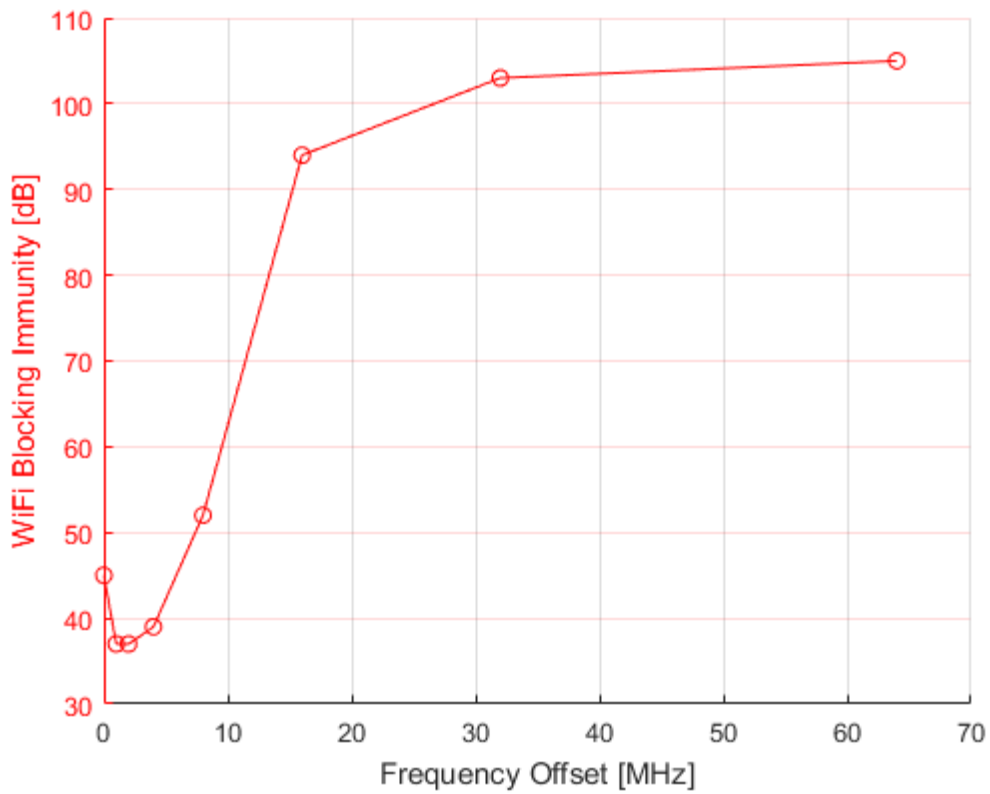
Η θετική τιμή 61dB που προκύπτει στην περίπτωση του σήματος παρεμβολής OFDM και του δέκτη LoRa SF12 BW200, οφείλεται στο χαμηλό BW το οποίο μειώνει περαιτέρω την ισχύ του σήματος παρεμβολής. Ενώ σημειώνεται μείωση της τιμής σε 34 dB από 61 dB στην περίπτωση του σήματος παρεμβολής OFDM και του δέκτη LoRa με SF12 αλλά μεγαλύτερο BW σε σχέση με το προηγούμενο, στα 1600 kHz. Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζει και η ρύθμιση του SF στον δέκτη LoRa και αυτό παρατηρείται στην περίπτωση του σήματος παρεμβολής OFDM στις ρυθμίσεις 1 και 2 όταν στον δέκτη LoRa γίνονται διαφορετικές ρυθμίσεις στο SF ενώ το BW παραμένει σταθερό στα 200 kHz, η τιμή μειώνεται σε 33dB όταν το SF είναι 6, ενώ αυξάνεται σε 61dB όταν το SF είναι 12.

Επομένως, σύμφωνα με τις μετρήσεις, οι τεχνικές με τις οποίες μπορούν να μετριάστουν οι παρεμβολές είναι η αύξηση του Spreading Factor που επιτρέπει την λήψη κάτω από την ισχύ του σήματος παρεμβολής και η μείωση του εύρους ζώνης bandwidth (BW) που μειώνει την ισχύ του σήματος παρεμβολής.

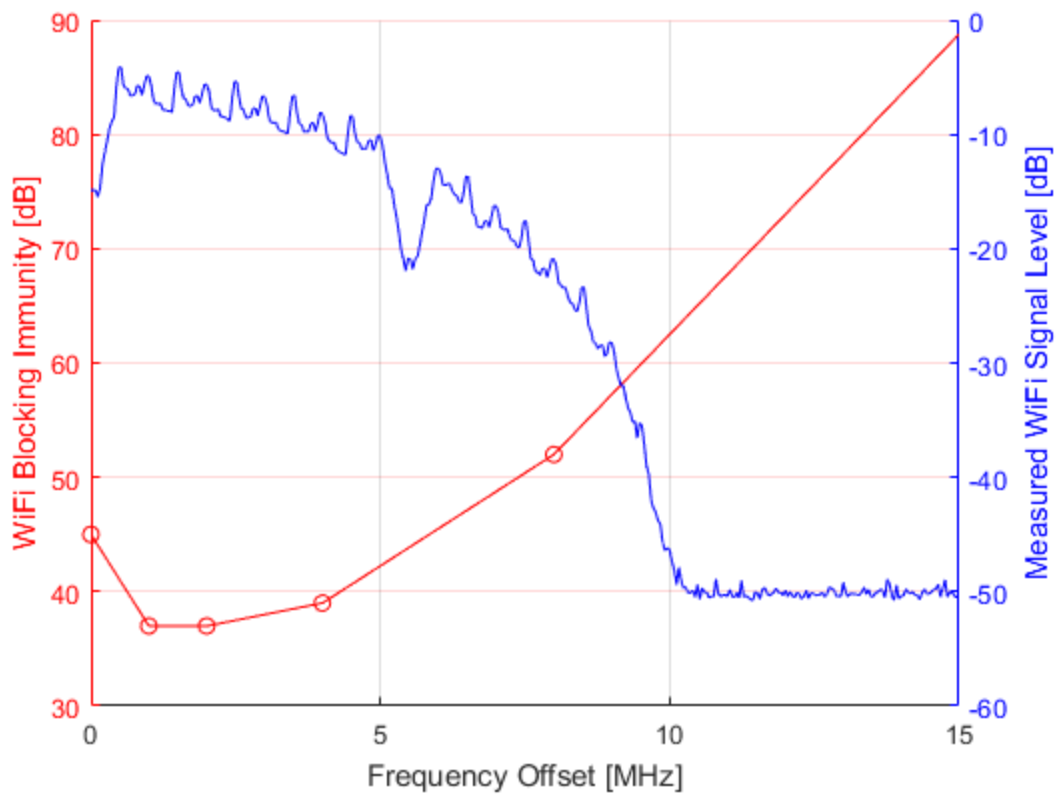
Μέσα στη ζώνη (in-band) παρεμβολή

Στον έλεγχο ανοχής του LoRa σε παρεμβολή WiFi μέσα στη ζώνη χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια παραγωγής σήματος παρεμβολής WiFi και δέκτης LoRa με ρυθμίσεις SF12 BW 200kHz και φορτίο 20 byte. Το σήμα παρεμβολής WiFi εξαπλώθηκε στην συχνότητα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 45.

Στο διάγραμμα 45, στο κέντρο της συχνότητας σημειώνεται ανοδική τάση της ανοχής του σήματος στη WiFi παρεμβολή. Αυτό εξηγείται με το παρακάτω διάγραμμα στο οποίο φαίνεται ότι τα πραγματικά σημεία μέτρησης στο κέντρο συμπίπτουν με ελάχιστα σημεία στο φάσμα ισχύος του παρεμβολέα.



Διάγραμμα 45 Ανοχή του δέκτη SX1280 (SF12 BW200 kHz) σε WiFi παρεμβολή σαν συνάρτηση της συχνότητας αντιστάθμισης



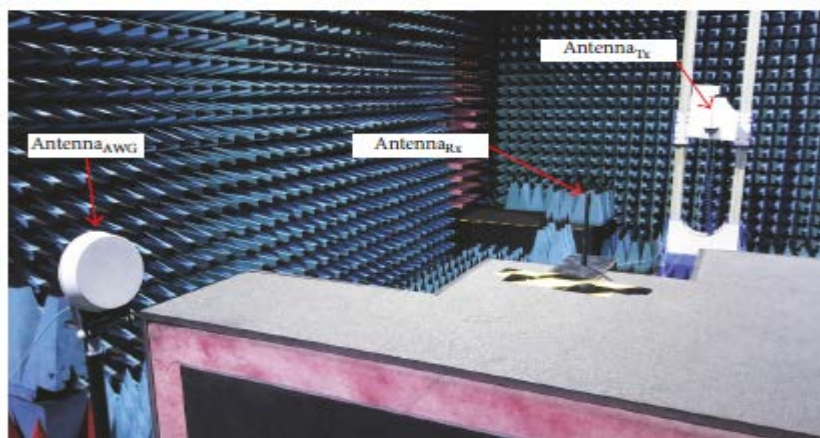
Διάγραμμα 46 Ανοχή WiFi Blocking και μετρήσεις του επιπέδου σήματος WiFi έναντι συχνότητας αντιστάθμισης

Στο διάγραμμα 46 σε μεγάλες αντισταθμίσεις η ανοχή αυξάνει σταθερά από τα 36dB αποτελεί δηλαδή την ικανότητα να λάβει το ζητούμενο σήμα παρουσία σήματος WiFi κατά 36dB δυνατότερο και σύμφωνα με το προηγούμενο διάγραμμα 45 αυτό αυξάνει από 90 dB στα 16MHz και πάνω από 100 dB στα 25MHz περίπου.

Επομένως, οι προσαρμοστικοί μηχανισμοί αποφυγής παρεμβολών εκμεταλλεύονται τα αχρησιμοποίητα τμήματα των 80MHz με αποτέλεσμα να αποτελούν την καταλληλότερη στρατηγική αποφυγής παρεμβολών μέσα στη ζώνη.

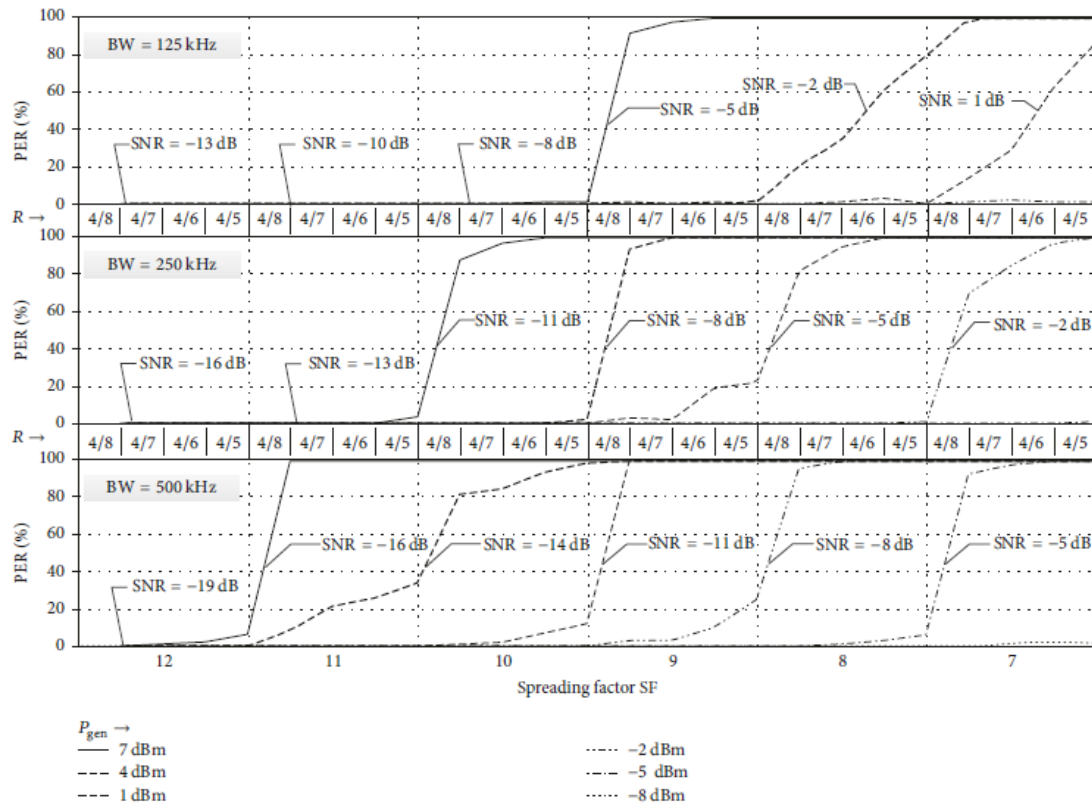
5.3.2 Μετρήσεις της ευαισθησίας LoRa σε παρεμβολές

Στην μέτρηση [39] αυτή η πηγή παρεμβολής ήταν ένα συνεχές σήμα 1000-kHz AWGN από μια γεννήτρια τυχαίων σημάτων Tektronix AWG 7000 με ισχύ εξόδου $P_{gen} = 7\text{dBm}$ και ένας δέκτης LoRa. Επιλέχθηκε η ισχύς αυτή ώστε με τις εναλλαγές του SF να παρατηρούνται και εναλλαγές στο PER από 0% μέχρι 100%. Στην συνέχεια μειώθηκε η ισχύς εξόδου P_{gen} με βήμα 3dB στα -8dBm ώστε να επιτρέψει την επίδραση του SNR στο PER. Σκοπός αυτής της μέτρησης ήταν να παράσχει αποτελέσματα σχετικά με τις διαφορετικές ρυθμίσεις που μπορούν να γίνουν στα BW, SF, R. Οι μετρήσεις έγιναν σε ένα ανηχοϊκό θάλαμο του Εργαστηρίου της Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητα (LKE) στο Πανεπιστήμιο Wroclaw Τεχνολογίας (WUST) και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1). Για την αποφυγή τυχόν άλλων ακτινοβολιών τοποθετήθηκαν μόνο τρεις κεραίες μέσα στον χώρο. Ο ανηχοϊκός θάλαμος παρέχει 85dB αποτελεσματικότητα θωράκισης από το εξωτερικό περιβάλλον ώστε να επιτευχθεί παρεμβολή μόνο από το AWGN σήμα. Οι συσκευές LoRa που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν πλατφόρμες Eiger βασισμένες στο Semtech SX1276 chipsets.



Εικόνα 1 Μετρήσεις σε ανηχοϊκό θάλαμο

Σε κάθε μέτρηση έγινε χρήση ενός μοναδικού συνδυασμού των παραμέτρων { BW, SF, R}. Έτσι, οι ρυθμίσεις για το BW ήταν {125kHz, 250kHz, 500kHz}, για το SF (7-12), για το R(0.8, 0.67, 0.57 και 0.5) και για το P_{AWG} (7dBm, 4dBm,...,-8dBm).



Διάγραμμα 47 Μετρήσεις PER για LoRa

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα 47 είναι:

- Μέσα σε κάθε BW καθώς οι κατανομές μετατοπίζονται από υψηλό SF 12 σε χαμηλότερο (από αριστερά προς τα δεξιά) και καθώς το SNR αυξάνει και μειώνεται η ισχύς παρεμβολής P_{gen} , παρατηρείται μια σχετική κανονικότητα στην συμπεριφορά του PER σε συνάρτηση με το SNR, δηλαδή περιοχές με

χαμηλό PER κοντά στο 0% τείνουν να μετακινηθούν κατά ένα SF προς τα δεξιά και ανά 3dB παρατηρείτε αύξηση στο SNR.

- Το SNR μπορεί να αλλάξει όχι μόνο με την μείωση ισχύος της παρεμβολής αλλά και με την αλλαγή του BW. Στο διάγραμμα παραπάνω φαίνεται ότι με κάθε μείωση του BW όπως από 500 kHz σε 250kHz ή από 250 kHz σε 125kHz προκαλεί την χαμηλή περιοχή PER να επεκταθεί προς τα δεξιά κατά ένα SF. Πιο απλά όταν το BW= 500 kHz η περιοχή με το χαμηλότερο PER είναι αυτή με SF=12, όταν το BW= 250 kHz η περιοχή με το χαμηλότερο PER είναι αυτή με SF={11,12} και όταν το BW= 125 kHz η περιοχή με το χαμηλότερο PER είναι αυτή με SF= {10,11,12}.
- Ο ρυθμός κωδικοποίησης R μεταβάλλεται μέσα στην περιοχή του SF και παίρνει τιμές μεταξύ 0.5 και 0.8. Το PER αυξάνει καθώς αυξάνει το R σε κάθε περιοχή του SF όπως φαίνεται στο διάγραμμα.

Μέτρηση της ευαισθησίας LoRa σε διάδοση πολλαπλών διαδρομών

Το σήμα εκπομπής κατά την διάδοση πολλαπλών διαδρομών λόγω των εμποδίων και των μηχανισμών διάδοσης αποτελείται από μια δέσμη σημάτων με διαφορετικές φάσεις, διαφορετικές γωνίες άφιξης και καθυστερήσεις. Μόλις τα αντίγραφα αυτά συλληχθούν σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε έναν δέκτη, η παρεμβολή μπορεί να είναι εποικοδομητική αλλά και καταστροφική προκαλώντας διαλείψεις.

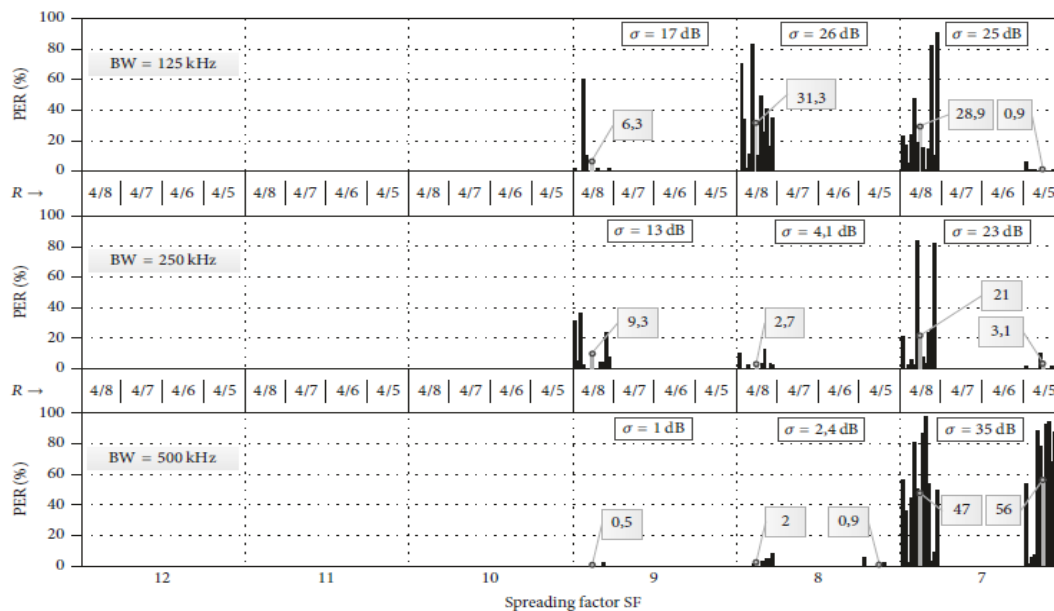
Στην μέτρηση που έγινε πομπός και δέκτης διαχωρίστηκαν με μεταλλικό φύλλο ώστε να αποφευχθεί η απευθείας οπτική επαφή και η διάδοση να γίνει μέσω πολλαπλών διαδρομών. Όπως και στην προηγούμενη μελέτη έτσι και τώρα έγινε χρήση ενός μοναδικού συνδυασμού των παραμέτρων { BW, SF, R }. Οι ρυθμίσεις ήταν για το BW = {125kHz, 250kHz, 500kHz }, για το SF= {7-12} και για R = {0.5, 0.8}. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα 48

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα 48 είναι:

- Όπως είναι προφανές οι υψηλές τιμές SF οδηγούν σε αυξημένη ανοχή του LoRa στην διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Το LoRa στις υψηλές τιμές SF (10-12) παύει να είναι ευαίσθητο και το PER έχει απόδοση 0% ανεξάρτητα από το BW του καναλιού.

- Όσον αφορά το BW και την επίδραση του στην ευαισθησία LoRa κατά την διάδοση πολλαπλών διαδρομών δεν είναι και τόσο προφανές όπως ήταν στο SF. Σε χαμηλές τιμές του BW 125kHz παρατηρείται ότι για SF (9,8) οι τιμές του PER είναι 6.3% και 31.3% αντίστοιχα ενώ για υψηλότερο BW 500kHz και SF (9,8) οι τιμές του PER είναι 0.5% και 2% αντίστοιχα. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου BW 500kHz και SF7 υπάρχει αύξηση του PER με τιμές 47% και 56% για R 0.5 και 0.8 αντίστοιχα κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τα προηγούμενα συμπεράσματα ότι δηλαδή όταν το εύρος του καναλιού είναι μεγάλο και το SF μικρό, μειώνεται η ανοχή του LoRa.

Επομένως, σύμφωνα με τις μετρήσεις το SF έχει εμφανή επίδραση στο PER και επομένως και στην ανοχή του LoRa στις διαδόσεις πολλαπλών διαδρομών.

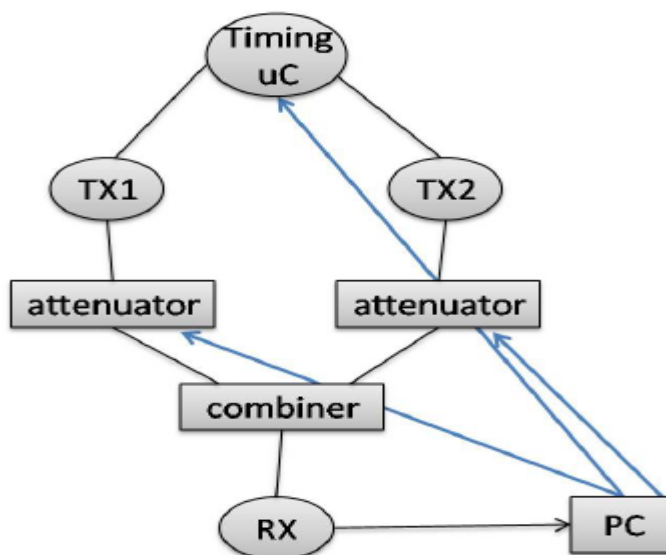


Διάγραμμα 48 Packet Error Rate μετρήσεις για διάδοση πολλαπλών διαδρομών

5.3.3 Μετρήσεις παρεμβολών με κόμβους LoRa

Στη μέτρηση αυτή [36] για να προσδιοριστεί ποσοτικά το αντίκτυπο των ενδο-παρεμβολών, των παρεμβολών που δημιουργούνται από τους κόμβους του ίδιου του δικτύου και το πως η παρεμβολή αυτή θα επηρεάσει τον αριθμό των κόμβων. Χρησιμοποιήθηκαν δυο πομποί LoRa, όπου ο παρεμβαλλόμενος πομπός αναφέρεται σαν Tx1 και ο πομπός παρεμβολής σαν Tx2 καθώς και ένα gateway. Οι πομποί συνδέθηκαν με έναν microcontroller που ελέγχει τον χρόνο μετάδοσης τους. Επιπλέον, ένας

εξασθενητής σήματος συνδέθηκε μεταξύ του πομπού και του combiner για να αλλάζει και να μειώνει το RSSI από την πλευρά του δέκτη ενώ ο combiner θα συνδυάζει τα σήματα προς τον δέκτη. Η εγκατάσταση έγινε σε θωρακισμένα κιβώτια ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές από το εξωτερικό περιβάλλον.



Διάγραμμα 49 Ελεγχόμενη ρύθμιση για μετρήσεις με πραγματικούς κόμβους

Οι ανάπτυξη της εγκατάστασης έγινε μέσα σε θωρακισμένα κιβώτια Qosmotec RF, ώστε να μην υπάρχει καμία παρεμβολή από άλλες μεταδόσεις μέσα στο περιβάλλον, καθώς και να μην παρεμβάλει το εξωτερικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το κουτί εξασθένησης ήταν τύπου PAH-6000 / 80-2 και με μέγιστη απώλεια εισόδου 14 dB. Το κουτί splitter / combiner ήταν από το MTS Systemtechnik και μέγιστη απώλεια εισόδου 6 dB. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κόμβοι IMST iM880A σαν πομποί LoRa και ένα gateway LoRank.

Οι παράμετροι του φυσικού επιπέδου δίνονται στον παρακάτω πίνακα 8 για τις δυο διαφορετικές ρυθμίσεις.

Parameter	Setting 1	Setting 2
Spreading Factor	12	7
Bandwidth	125 kHz	125 kHz
Code Rate	4/8	4/8
Explicit header	On	On
Channel	868.3 MHz	868.3 MHz
Payload CRC	On	On
Programmable preamble symbol length	8	14
Low Data Rate optimization	On	Off
Payload size	17 bytes	17 bytes
Equivalent bit rate	183.11 bps	3417.97 bps
On-air time	1712.13 ms	76.03
Preamble time duration	401.41 ms	18.69 ms
Symbol time	32.77 ms	1.02 ms

Πίνακας 8 Παράμετροι φυσικού στρώματος για την ρύθμιση των μετρήσεων

Όταν ο παρεμβολέας λήφθηκε με RSSI όμοιο με την παρεμβαλλόμενη μετάδοση

Η εξασθένιση μεταξύ πομπού και δέκτη ήταν η ίδια 100dB και η ισχύς μετάδοσης και για τους δυο πομπούς 14dBm. Η συνολική εξασθένιση ήταν 120 dB \pm 2 dB και η τιμές RSSI σε δέκτη και πομπούς ήταν -110dBm \pm 2dB.

Τα πακέτα που χάθηκαν κατά την σύγκρουση αναφέρονται σαν πακέτα που δεν ελήφθησαν ποτέ, ενώ τα πακέτα που ελήφθησαν με κακό CRC (Cyclic Redundancy Code) αναφέρονται σαν πακέτα που έχουν σφάλματα αλλά δεν μπορούν να διορθωθούν. Στον πίνακα 9 παρουσιάζονται οι στατιστικές των πακέτων συγκρούσεων για την πρώτη ρύθμιση ενώ στον πίνακα 10 για την δεύτερη ρύθμιση. Όταν η μετάδοση παρεμβολής ξεκινάει μόνο 100ms μετά από την παρεμβαλλόμενη μετάδοση, το 25% των συγκρουόμενων πακέτων από τον πομπό που δέχεται την παρεμβολή, λαμβάνονται με λάθος CRC στο φορτίο τους καθώς ο απώλειες πακέτων ήταν χαμηλές και μόνο 2%. Όταν η μετάδοση παρεμβολής καθυστερεί περισσότερο από 300ms μετά την έναρξη εκπομπής του πομπού που δέχεται την παρεμβολή τα περισσότερα συγκρουόμενα πακέτα λαμβάνονται με σωστό CRC ο αριθμός των πακέτων με λανθασμένο CRC είναι λιγότερος από 5%. Εκτός από τις περιπτώσεις όπου η μετάδοση παρεμβολής μετατοπίζεται κατά 500ms και 800ms όπου έχουμε πακέτα με λανθασμένο CRC 7% και 8.4% αντίστοιχα. Και στην δεύτερη ρύθμιση καταγράφηκε η ίδια συμπεριφορά, όταν η μετατόπιση ήταν μικρότερη από το μήκος του preamble χρόνου

18.69ms υπήρχαν πακέτα που ελήφθησαν με λάθος CRC. Για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από preamble χρόνο τα περισσότερα πακέτα ελήφθησαν σωστά.

Shift in ms	100		200		300		400		500		600	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	2.2	100	4	100	3.2	100	3	100	4.4	100	2	100
Packet received with BAD_CRC (%)	25	NA	9	NA	4.4	NA	1	NA	7	NA	4.3	NA
Average of SNR (dB)	2	NA	2	NA	2.1	NA	2.2	NA	1.7	NA	1.8	NA

Shift in ms	700		800		900		1000		1100		1200	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	3.4	100	2.4	100	0.8	100	0.8	100	2	100	2	100
Packet received with BAD_CRC (%)	3.5	NA	8.4	NA	4.3	NA	2.5	NA	5.4	NA	3.2	NA
Average of SNR (dB)	2.1	NA	2.4	NA	2.4	NA	2.5	NA	3	NA	3.4	NA

Shift in ms	1300		1400		1500		1600	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	1	100	2.2	84	1	24	2	5.2
Packet received with BAD_CRC (%)	2.1	NA	0	0	2.1	1	4.5	0
Average of SNR (dB)	4	NA	5	8.4	6.5	8.5	8.6	8.9

Πίνακας 9 Στατιστικές συγκρούσεων πακέτων που αφορά την πρώτη ρύθμιση

Shift in ms	5		10		20		30	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	2.3	100	2.1	100	2.8	100	2.5	100
Packet received with BAD_CRC (%)	18	NA	7	NA	4	NA	5.2	NA
Average of SNR (dB)	3	NA	3.1	NA	3.2	NA	3.1	NA

Shift in ms	40		50		60		70	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	2.1	100	2	100	0	100	0	0
Packet received with BAD_CRC (%)	3.1	NA	2.1	NA	2	NA	0	0
Average of SNR (dB)	4	NA	5	NA	8	NA	9.1	9.1

Πίνακας 10 Στατιστικές συγκρούσεων πακέτων που αφορά την δεύτερη ρύθμιση

Όταν ο πομπός παρεμβολής καθυστερήσει λιγότερο από 1400ms, χάνονται όλα τα πακέτα. Αυτό συμβαίνει διότι το preamble της μετάδοσης παρεμβολής πάντα συγκρούεται με την παρεμβαλλόμενη μετάδοση και ο δέκτης δεν μπορεί να συγχρονιστεί με το preamble της παρεμβολής καθώς είναι συγχρονισμένος με την προηγούμενη μετάδοση. Έτσι ο δέκτης δεν θα συγχρονιστεί με τον πομπό καθώς το

RSSI της μετάδοσης παρεμβολής είναι στην ίδια περιοχή όπως και η παρεμβαλλόμενη μετάδοση και επομένως η τελευταία θα το δει σαν θόρυβο.

Στην περίπτωση που η καθυστέρηση μετάδοσης είναι μεγαλύτερη από 1400ms από την αρχή της παρεμβαλλόμενης μετάδοσης, τότε η μετάδοση παρεμβολής θα ληφθεί από τον δέκτη και από τον παρεμβαλλόμενο πομπό. Δεδομένου, ότι στην πρώτη ρύθμιση το χρονικό μήκος του preamble είναι 404.41ms, όταν η μετάδοση παρεμβολής καθυστερεί 1500ms και ο χρόνος στον αέρα είναι 1721.13ms ($1712.13 - 1500 = 212.12$ και $404.41 - 212.13 = 189.28$ ms) τα τελευταία 189.28ms του preamble της μετάδοσης παρεμβολής δεν συγκρούονται. Το χρονικό αυτό διάστημα αντιστοιχεί σε έξι μη συγκρουόμενα σύμβολα, επομένως η μετάδοση παρεμβολής μπορεί να ληφθεί σωστά. Το ίδιο συμβαίνει και στην δεύτερη ρύθμιση για μετατόπιση 70ms τα έξι τελευταία σύμβολα του προοιμίου (preamble) της παρεμβολής δεν συγκρούονται. Επομένως, αν ο παρεμβολέας ξεκινήσει μετά το preamble και το RSSI της παρεμβολής είναι το ίδιο ή χαμηλότερο από αυτό της παρεμβαλλόμενης μετάδοσης, τότε η παρεμβαλλόμενη μετάδοση θα ληφθεί σωστά. Τέλος, τουλάχιστον τα έξι σύμβολα πρέπει να ληφθούν χωρίς καμία σύγκρουση ώστε ο δέκτης να συγχρονιστεί με τον πομπό.

Όταν η μετάδοση παρεμβολής λήφθηκε με υψηλότερο RSSI από την παρεμβαλλόμενη μετάδοση

Η εξασθένιση μεταξύ πομπού και δέκτη ήταν 100dB ενώ μεταξύ δεύτερου πομπού και δέκτη 90dB. Η ισχύς μετάδοσης και στους δυο πομπούς ρυθμίστηκε στα 14dBm. Η RSSI διαφορά μεταξύ παρεμβολέα και παρεμβαλλόμενου ήταν από 6 dB έως 14dB.

Οι πίνακες 11 και 12 παρακάτω δείχνουν τα στατιστικά για την πρώτη και για την δεύτερη ρύθμιση αντίστοιχα. Και στις δυο ρυθμίσεις παρατηρείται ότι χάνονται πακέτα και από τους δυο πομπούς, στην πρώτη ρύθμιση στις τρεις πρώτες μετατοπίσεις (100, 200, 300ms) και στην δεύτερη ρύθμιση στις δυο πρώτες μετατοπίσεις. Αυτό συμβαίνει διότι ο πομπός παρεμβολής έχει υψηλότερο RSSI στον δέκτη και κάνει τον συγχρονισμό ανάμεσα στον παρεμβαλλόμενο πομπό και στον δέκτη να χαθεί. Ανάκαμψη παρατηρείται στη μετατόπιση 400ms και 500 ms στην πρώτη ρύθμιση και στην δεύτερη ρύθμιση στη μετατόπιση 20 ms και αυτό συμβαίνει διότι καθώς το physical header έχει δικό του CRC ο δέκτης θα σταματήσει να λαμβάνει πακέτα σε περίπτωση που το CRC είναι λάθος.

Shift in ms	100		200		300		400		500		600	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	100	100	100	100	100	100	100	0	62	50	2	100
Packet received with BAD_CRC (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	38	0	98	NA
Average of SNR (dB)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10.3	1.01	9.7	1.3	NA

Shift in ms	700		800		900		1000		1100		1200	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
Packet received with BAD_CRC (%)	100	NA	100	NA	100	NA	100	NA	100	NA	100	NA
Average of SNR (dB)	1.3	NA	1.1	NA	1.1	NA	1.7	NA	1.6	NA	1.7	NA

Shift in ms	1300		1400		1500		1600	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	0	100	0	48	0	0	0	0
Packet received with BAD_CRC (%)	100	NA	99	2	73	0	1	0
Average of SNR (dB)	5.1	NA	6	10.4	6.8	10.4	8.2	11.3

Πίνακας 11 Στατιστικές συγκρούσεων πακέτων όταν ο παρεμβολέας έχει 12dB υψηλότερο RSSI και αφορά την πρώτη ρύθμιση

Shift in ms	5		10		20		30	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	100	100	100	100	72	41	0	100
Packet received with BAD_CRC (%)	NA	NA	NA	NA	28	0	100	NA
Average of SNR (dB)	NA	NA	NA	NA	1.8	9.1	1.91	NA

Shift in ms	40		50		60		70	
Transmitters	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2	Tx1	Tx2
Packet lost due to collisions (%)	0	100	0	100	0	100	0	0
Packet received with BAD_CRC (%)	100	NA	100	NA	100	NA	0	0
Average of SNR (dB)	2.1	NA	2.08	NA	6.19	NA	8.99	9.1

Πίνακας 12 Στατιστικές συγκρούσεων πακέτων όταν ο παρεμβολέας έχει 12dB υψηλότερο RSSI και αφορά την δεύτερη ρύθμιση

Ωστόσο για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από 600ms που είναι μεγαλύτερες από το preamble συν τον header χρόνο, ο δέκτης θα συνεχίσει να λαμβάνει την μετάδοση της παρεμβολής, καθώς είναι ήδη συγχρονισμένος με αυτή και το header λήφθηκε σωστά. Όμως σε αυτές τις μετατοπίσεις δεν θα συμβούν λήψεις και αυτό επειδή ο δέκτης θα

λαμβάνει πακέτα με λανθασμένο πακέτο CRC. Η μετάδοση του παρεμβολέα θα αρχίσει να λαμβάνεται όταν η μετατόπιση του χρόνου είναι μεγαλύτερη από 1400ms και για μετατοπίσεις από 1500ms έως 1600ms δεν υπάρχουν χαμένα πακέτα που προέρχονται από την μετάδοση της παρεμβολής.

Επομένως, αν η παρεμβολή ξεκινήσει μετά το τέλος του χρόνου του preamble και του header και έχει υψηλό RSSI στον δέκτη, τότε η πρώτη μετάδοση θα ληφθεί με λάθος CRC φορτίο. Στην περίπτωση που τα τελευταία έξι σύμβολα από το preamble του πομπού λαμβάνονται σωστά, τότε ο δέκτης θα μπορεί να συγχρονιστεί με τον πομπό.

5.3.4 Μετρήσεις παρεμβολών IEEE 802.15.4g σε LoRa

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη [40] παρεμβολών LoRa από το IEEE 802.15.4g. Η τεχνολογία IEEE 802.15.4g που ονομάζεται και SUN (Smart Utility Network) χρησιμοποιεί και αυτή την ζώνη των 863-870MHz επικαλύπτοντας τις συχνότητες LoRa.

Τα μεταδιδόμενα πακέτα σε LoRa δίκτυο εκτίθενται σε συνεχή παρεμβολή από το 802.15.4g δίκτυο ώστε να είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση των παρεμβολών στο Packet Reception Rate (PRR) δηλαδή ο λόγος των πακέτων έχουν ληφθεί προς τα πακέτα που αποστάλθηκαν. Οι μετρήσεις έγιναν σε ανηχοϊκό θάλαμο απομονωμένο από το περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκαν συσκευές LoRa Semtech SX1272 με 3dBi κεραία. Τα πακέτα LoRa περιείχαν τυχαίο φορτίο 59 bytes implicit header και CRC checksum. Ο χρόνος μετάδοσης εξαρτάται από τον συνδυασμό των LoRa παραμέτρων (SF, BW, CR), το CR που χρησιμοποιήθηκε είναι 4/5 και το διάστημα μεταξύ του πακέτου διάδοσης είναι 576μsec. Οι συσκευές IEEE 802.15.4g που χρησιμοποιήθηκαν ήταν Texas Instruments CC1310 με 3.61dBi κεραία. Το πακέτο είχε τυχαίο φορτίο 106 bytes και ο χρόνος μετάδοσης κάθε πακέτου είναι 21.18msec και το διάστημα μεταξύ των πακέτων 416μsec.

Η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη στο δίκτυο LoRa ήταν 11.7m. Ο παρεμβολέας 802.15.4g βρισκόταν σε απόσταση 1.5m από τον LoRa δέκτη. Όλοι οι κόμβοι είχαν οπτική επαφή (LOS). Στον πίνακα 13 έχουμε τις ρυθμίσεις του πομπού LoRa και την ισχύ μετάδοσης καθώς και την ισχύ παρεμβολής του παρεμβολέα 802.15.4g

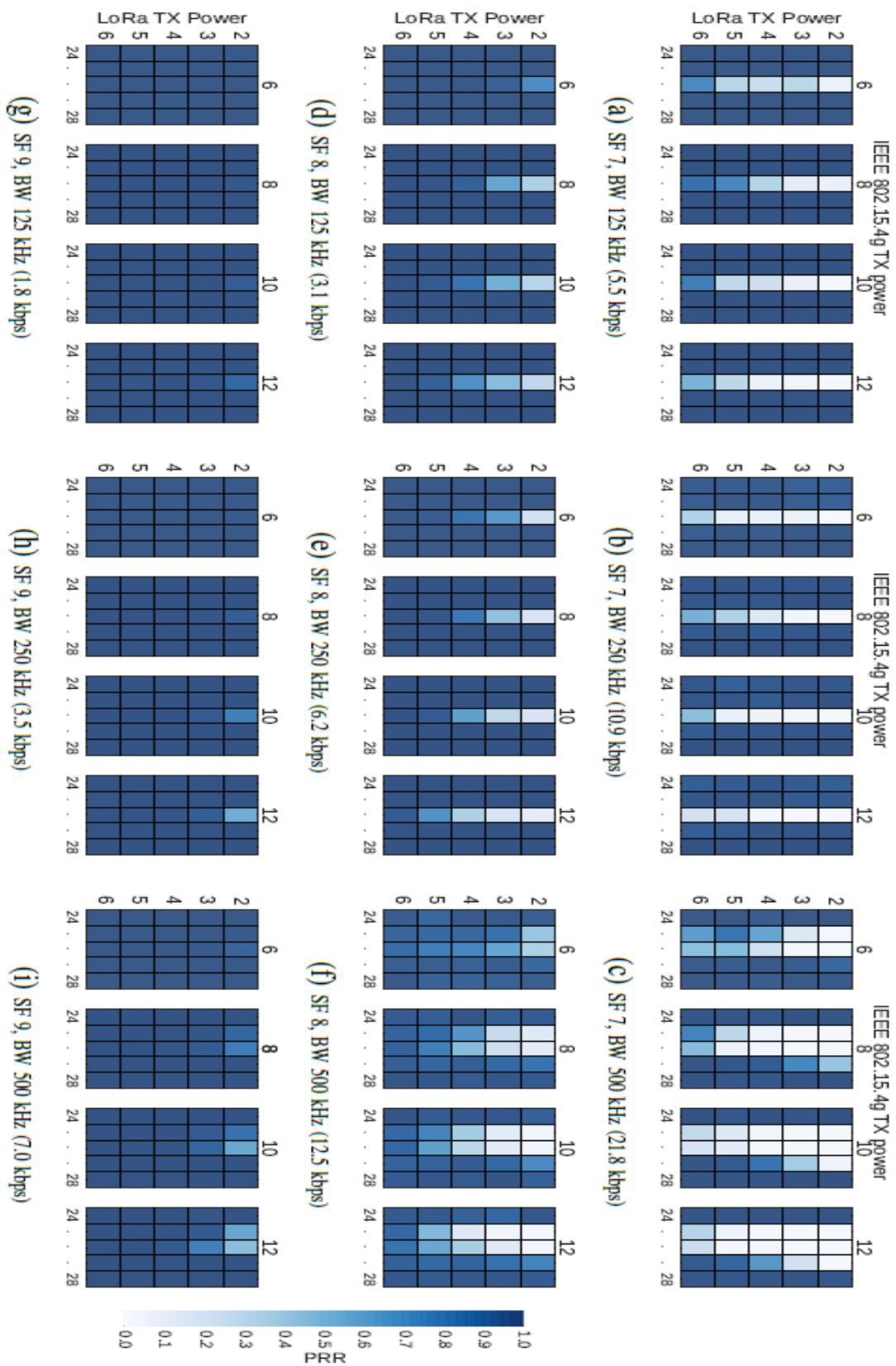
output	LoRa TX power measured (dBm)			IEEE 802.15.4g interference power measured (dBm)
	BW 125	BW 250	BW 500	
12	-34	-35	-36	-29
10	-36	-38	-37	-31
8	-38	-39	-40	-31
6	-41	-41	-42	-34
4	-43	-43	-44	-36
2	-44	-45	-45	-40

Πίνακας 13 Ρυθμίσεις του πομπού LoRa Tx και μετρήσεις της ισχύος μετάδοσης και της ισχύος παρεμβολής από το IEEE 802.15.4g

Το Packet Reception Rate κάτω από την παρεμβολή του 802.15.4g δίνεται από ένα σύνολο θερμικών χαρτών παρακάτω. Στους θερμικές αυτούς χάρτες έχουμε διαφορετικές ρυθμίσεις LoRa όπως είναι το SF και το BW και απεικονίζουν το επίπεδο ισχύος μετάδοσης του παρεμβολέα στα κανάλια 24 έως 28 στον άξονα x και τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης LoRa στον άξονα y.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνουν ότι τα πακέτα LoRa είναι πιο ανθεκτικά στις παρεμβολές σε σχέση με τα αυτά του IEEE 802.15.4g σύμφωνα με το διάγραμμα 50. Για SF 9 και μεγαλύτερο οι απώλειες πακέτων είναι αμελητέες ακόμα και όταν ο παρεμβολέας είναι ~16dB ισχυρότερος. Ακόμα και σε χαμηλότερα SF και BW, το LoRa επιτυγχάνει αποδεκτό PRR όταν ο παρεμβολέας είναι 6dB ισχυρότερος.

Η ανθεκτικότητα LoRa μπορεί να εξηγηθεί με την χρήση υψηλότερων SF που έχουν σαν αντίκτυπο τα χαμηλά data rates. Η χρήση χαμηλού εύρους ζώνης BW και μικρού SF καθιστά το LoRa πιο ευάλωτο στις παρεμβολές, περίπτωση 5e και 5i ή 5f και 5b του διαγράμματος 50. Τέλος, το LoRa χρησιμοποιεί την CSS διαμόρφωση που εξαπλώνει την ενέργεια του συμβόλου σε όλο το εύρος της ζώνης σε αντίθεση με το 802.15.4g που χρησιμοποιεί το GFSK όπου η ενέργεια συγκεντρώνεται σε δυο συχνότητες μετατόπισης καθιστώντας το έτσι ευάλωτο στις παρεμβολές στενής ζώνης.



Διάγραμμα 50 Θερμικοί χάρτες απόδοσης PRR από την παρεμβολή του IEEE 802.15.4g στο LoRa

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση στο λογισμικό CupCarbon

6.1 Εισαγωγή στο CupCarbon

Η προσομοίωση των δικτύων αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για τον έλεγχο των πρωτοκόλλων και την ανάλυση της απόδοσης τους πριν την υλοποίησή τους. Οι ερευνητές συνήθως χρησιμοποιούν προσομοιωτές για να ελέγξουν και για να επικυρώσουν προτεινόμενους αλγορίθμους και πρωτόκολλα. Η εγκατάσταση ενός δικτύου προϋποθέτει μεγάλο κόστος ειδικά όταν αυτό αποτελείται από μεγάλο αριθμό κόμβων οι οποίοι είναι κατανομημένοι σε μεγάλη κλίμακα και επομένως ο προσομοιωτής θα πρέπει να είναι αξιόπιστος, ακριβής και γρήγορος. Η ακρίβεια που μπορεί να δώσει ο προσομοιωτής εξαρτάται κυρίως από το μοντέλο των παρεμβολών. [28]

Οι ήδη υπάρχοντες προσομοιωτές όπως NS-2/3, OMNET, TOSSIM, RIVERBED κ.τ.λ. χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων δρομολόγησης χωρίς όμως να λαμβάνουν υπόψη το πραγματικό περιβάλλον των πόλεων. Επιπλέον, σε αυτούς τους προσομοιωτές δεν ενσωματώνεται η απεικόνιση ώστε να είναι δυνατή η επικύρωση του αλγορίθμου. [29]

Το CupCarbon είναι ένας προσομοιωτής δικτύων ασύρματων αισθητήρων (WSN) έξυπνων πόλεων (smart cities) και IoT. Αποτελεί έναν προσομοιωτή ανοιχτού κώδικα που έχει υλοποιηθεί με την γλώσσα προγραμματισμού Java και διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο. Στόχος του είναι ο σχεδιασμός, η απεικόνιση, ο εντοπισμός σφαλμάτων, η συλλογή δεδομένων καθώς και η επικύρωση κατανομημένων αλγορίθμων παρακολούθησης για την δημιουργία περιβαλλοντικών σεναρίων όσον αφορά εκπαιδευτικά και επιστημονικά έργα. Συμβάλλει στην οπτική επεξήγηση της

λειτουργίας των δικτύων αισθητήρων. Επιπλέον, υποστηρίζει τους επιστήμονες να ελέγξουν τις ασύρματες τοπολογίες, τα πρωτόκολλα κτλ. [29]

Το CupCarbon προσφέρει δυο περιβάλλοντα προσομοίωσης, το πρώτο περιβάλλον επιτρέπει τον σχεδιασμό σεναρίων κινητικότητας και την δημιουργία φυσικών εκδηλώσεων όπως πυρκαγιές, φυσικό αέριο όπως και την προσομοίωση οχημάτων και ιπτάμενων αντικειμένων (UAV, έντομα κ.τ.λ.). Το δεύτερο περιβάλλον προσομοίωσης αντιπροσωπεύει την προσομοίωση γεγονότος από ασύρματους αισθητήρες δικτύου, το οποίο λαμβάνει υπόψη το σενάριο που σχεδιάστηκε στο πρώτο περιβάλλον.

Τα δίκτυα μπορούν να σχεδιαστούν εύκολα με τη χρήση του περιβάλλοντος εργασίας OpenStreetMap (OSM), ώστε οι αισθητήρες να τοποθετηθούν απευθείας στον χάρτη. Επιπλέον, κάθε κόμβος μπορεί να ρυθμιστεί ξεχωριστά από την γραμμή εντολών με τη χρήση μιας ειδικά σχεδιασμένης γλώσσας προγραμματισμού για το CupCarbon, της SenScript. Επίσης, είναι δυνατή η δημιουργία κωδικών για πλατφόρμες υλικού όπως Arduino /XBee. Το CupCarbon βασίζεται κυρίως στο στρώμα εφαρμογής των κόμβων κάνοντας το έτσι ένα πραγματικό συμπλήρωμα των ήδη υπάρχων προσομοιωτών. Το CupCarbon, ενσωματώνει το πρωτόκολλο CSMA και ACK όμως δεν προσομοιώνει όλα τα επίπεδα πρωτοκόλλου λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα αστικά δίκτυα, όπου θα πρέπει να ενσωματωθούν πολύπλοκες πληροφορίες όπως κτίρια, δρόμοι, κινητικότητα κ.τ.λ.[30]

Το CupCarbon προσφέρει την δυνατότητα να προσομοιωθούν αλγόριθμοι και σενάρια σε διάφορα βήματα. Υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων και μπορεί να την απεικονίσει γραφικά σαν συνάρτηση του χρόνου προσομοίωσης. Αυτό επιτρέπει την αποσαφήνιση της δομής, της δυνατότητας να εφαρμοστεί και της ρεαλιστικής υλοποίησης του δικτύου πριν από την πραγματική του ανάπτυξη. Επίσης, επιτρέπει την παρακολούθηση των μοντέλων διάδοσης και παρεμβολών. Το CupCarbon είναι σε θέση να προσομοιώσει τα πρωτόκολλα ZigBee, LoRa και Wi-Fi. Τέλος καθώς έχει υλοποιηθεί με την γλώσσα προγραμματισμού Java, επιτρέπει την δημιουργία διαφορετικών πρωτοκόλλων. [31]

Επομένως, η πλατφόρμα του CupCarbon έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να:

- Μελετήσει την ανάπτυξη των αισθητήρων των ασύρματων δικτύων λαμβάνοντας υπόψη την κινητικότητα και την διαθεσιμότητα του φάσματος.

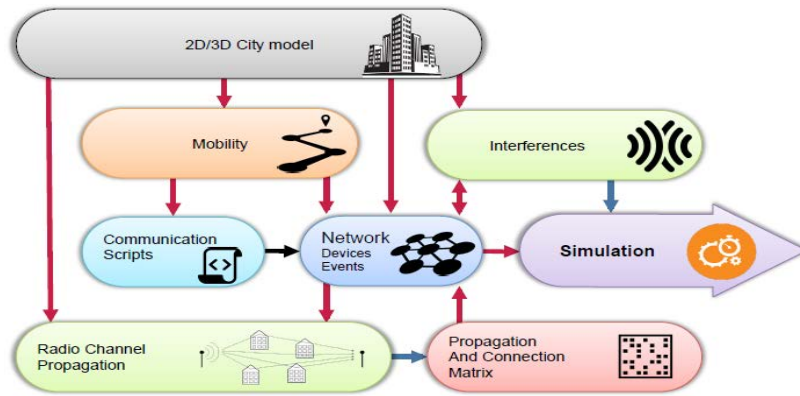
- Να προσομοιώσει την σκοπιμότητα της επικοινωνίας, την αξιοπιστία του δικτύου και το κόστος.
- Να εντοπίσει ζώνες παρεμβολών ώστε να βελτιώσει την ποιότητα του δικτύου.
- Να προσομοιώσει με ακρίβεια και γρήγορα την διάδοση σε πραγματικό αστικό περιβάλλον.
- Να απεικονίσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ώστε να εντοπίσει τα λάθη και να επικυρώσει τον αλγόριθμο.

Οι συσκευές που μπορούν να εμφανιστούν στους διάφορους χάρτες του προσομοιωτή CupCarbon είναι οι ακόλουθες:

- Sensor nodes (κόμβοι αισθητήρων) συσκευές υπεύθυνες για την λήψη των μεταβλητών του μέσου
- Media Sensor nodes αισθητήρας με δυνατότητα να λαμβάνει τις μεταβλητές από το περιβάλλον
- Base Station (Sink) κόμβος αισθητήρα με ιδιαίτερο χαρακτηριστικό την μπαταρία του με άπειρη ενέργεια
- Mobile η κινητή συσκευή μπορεί να οδηγηθεί μέσω μιας διαδρομή που δημιουργήθηκε από markers
- Markers τα markers μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εργασίες όπως η τυχαία προσθήκη αισθητήρων οριοθετώντας την περιοχή στην οποία θα γίνει η ανάπτυξη του δικτύου, η δημιουργία διαδρομών και η προσθήκη ή σχεδίαση κτιρίων.[31]

6.2 Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας CupCarbon

Στο παρακάτω διάγραμμα 51 παρουσιάζονται τα βασικά μέρη της αρχιτεκτονικής του προσομοιωτή CupCarbon [29]



Διάγραμμα 51 Αρχιτεκτονική πλατφόρμας CupCarbon

Το μέρος του 2D/3D μοντέλου πόλης αντιπροσωπεύει την ψηφιακή μορφή της πόλης. Περιέχει διάφορες πληροφορίες που αφορούν την πόλη όπως κτίρια, δρόμοι, διάφοροι χώροι κ.τ.λ. Αποτελεί το βασικό κομμάτι του προσομοιωτή που πρωτοπαρουσιάζεται στον χρήστη. Επιτρέπει την ανάπτυξη των διαφόρων αισθητήρων του δικτύου και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παρεμβολών και των διαδόσεων του σήματος.

Το μέρος της κινητικότητας επιτρέπει την δημιουργία διαδρομών του κινητού κόμβου. Ένας κινητός κόμβος μπορεί να είναι μια συσκευή χωρίς κανένα επικοινωνιακό σύστημα ή μπορεί να είναι ένας κόμβος αισθητήρα. Η κινητικότητα μπορεί να διορθωθεί εκ των προτέρων. Μπορεί να καθοριστεί στο script σύμφωνα με μια δεδομένη κατάσταση όπως εντοπισμός ενός στόχου, ανίχνευση μιας ανώμαλης τιμής κ.τ.λ. το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση μια ευφυούς κινητικότητας.

Το μέρος του δικτύου, επιτρέπει τον σχεδιασμό του δικτύου των ασύρματων αισθητήρων που πρόκειται να προσομοιωθούν.

Το μέρος της script επικοινωνίας, αντιπροσωπεύει τον διερμηνέα της SenScript γλώσσας που χρησιμοποιείται για προγραμματίσει κάθε κόμβο του δικτύου. Ο προσομοιωτής θα εκτελέσει κάθε εντολή του script για κάθε κόμβο.

Το μέρος της μετάδοσης του ράδιο καναλιού, υπολογίζει την εξασθένηση του καναλιού και την παλμική απόκριση. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν να καθοριστεί για κάθε ζεύγος αισθητήρων ποιο είναι το επίπεδο παρεμβολής ή αν έχει ληφθεί το μεταδιδόμενο πακέτο ή όχι.

Το μέρος της παρεμβολής χρησιμοποιείται ώστε να καθορίσει για κάθε μήνυμα που έχει αποσταλεί αν αυτό έχει ληφθεί ή όχι από τον δέκτη.

Το μέρος της προσομοίωσης αποτελεί τον πυρήνα της αρχιτεκτονικής. Βασίζεται σε διακριτή προσομοίωση συμβάντων. Τα συμβάντα παράγονται είτε εκτελώντας την κάθε εντολή του script του κάθε αισθητήρα είτε από ένα πραγματικό γεγονός όπως κινητικότητα ή ένα φυσικό γεγονός όπως θερμοκρασία, αέριο κτλ.

6.3 Υπολογισμός παρεμβολών στο CupCarbon^[32]

Το CupCarbon είναι ένας προσομοιωτής που υποστηρίζει μοντέλα παρεμβολών των ασύρματων επικοινωνιών και μοντέλα διάδοσης σήματος, όπως είναι τα μοντέλα Gaussian και Alpha-Stable.

Η παρεμβολή οφείλεται την συσσώρευση σημάτων στον δέκτη που προέρχονται από άλλους πομπούς μέσα στο δίκτυο. Η παρεμβολή παραμορφώνει το ληφθέν σήμα. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων οι παρεμβολές μπορούν να συμβούν λόγω των γειτονικών κόμβων ή από άλλες συσκευές που μεταδίδουν ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα.

Σε ένα ασύρματο περιβάλλον ο θόρυβος παρεμβολής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στον Additive White Gaussian Noise (AWGN) και Impulsive Noise (Alpha-Stable Noise).

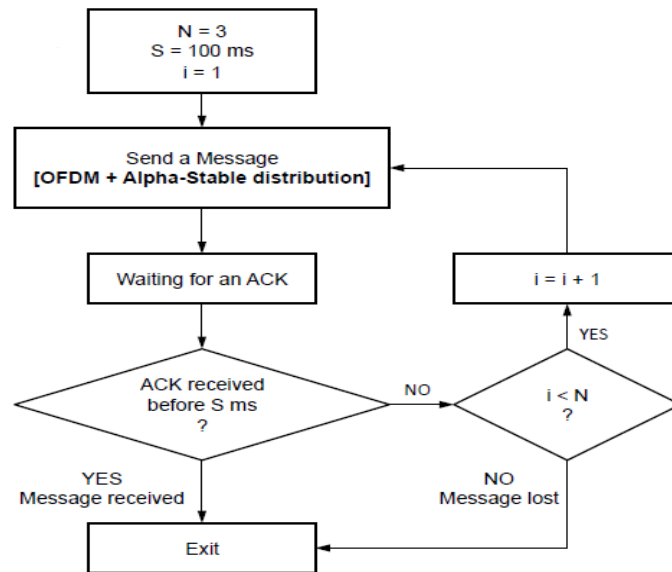
Ο Additive White Gaussian Noise ονομάζεται additive (προσθετικός), διότι το ληφθέν σήμα αποτελεί το άθροισμα του μεταδιδόμενου σήματος και του θορύβου. Ο White Noise (λευκός θόρυβος) σημαίνει ότι ο θόρυβος αυτός έχει ομοιόμορφο φάσμα συχνότητας πάνω στην συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Έχει επίπεδη φασματική πυκνότητα ισχύος και γι αυτό η αυτό η συσχέτιση του θορύβου είναι μηδενική στο πεδίο του χρόνου. Τέλος, το Gaussian σημαίνει ότι τα δείγματα θορύβου ακολουθούν την Gaussian κατανομή.

Ο Alpha-Stable Noise αποτελείται από ακανόνιστους παλμούς που συμβαίνουν για σύντομο διάστημα και έχουν υψηλό πλάτος. Οι θόρυβοι Alpha-Stable και Additive White Gaussian είναι σχεδόν ίδιοι με την μόνη διαφορά ότι στον Alpha-Stable το πλάτος των παλμών είναι υψηλό.

Επομένως, με τον προσομοιωτή CupCarbon μπορεί να γίνει ανάλυση της απόδοσης ενός OFDM ασύρματου επικοινωνιακού συστήματος με Gaussian Alpha-Stable θόρυβο.

Η συμπεριφορά του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με Alpha-Stable παρεμβολή αξιολογείτε με την χρήση του Carrier Sense Multiple Access (CSMA) MAC πρωτόκολλου

το οποίο ενσωματώνεται στο CupCarbon. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο CSMA, αν το πακέτο δεδομένων παραδοθεί στον κόμβο αυτός με την σειρά του θα στείλει acknowledgment ACK στον κόμβο που έστειλε το πακέτο, διαφορετικά ο κόμβος θα περιμένει για χρόνο S και θα ξαναστείλει το πακέτο των δεδομένων, αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί έως και τρεις φορές. Αν και την τρίτη φορά ο κόμβος δεν λάβει το πακέτο τότε αυτός θα χαρακτηριστεί νεκρός κόμβος από τον κόμβο αποστολής.



Διάγραμμα 52 Διάγραμμα ροής για μετάδοση δεδομένων από κόμβο σε κόμβο στο CupCarbon

6.4 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας στο CupCarbon[33]

Οι αισθητήρες αποτελούνται από έναν μικροελεγκτή, μια μπαταρία, μια κεραία και μια μονάδα αισθητήρα. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του αισθητήρα στα WSN δίκτυα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα καθώς θα πρέπει να έχει μεγάλη διάρκεια. Το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό του CupCarbon για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η ικανότητα του να απεικονίσει μέσω γραφήματος την κατανάλωση ενέργειας και το επίπεδο της μπαταρίας του κάθε αισθητήρα μετά την προσομοίωση.

Ο πυρήνας του CupCarbon είναι το WiSeN για την προσομοίωση συμβάντων (events) που σχετίζονται με τους αισθητήρες. Υποστηρίζει και διαχειρίζεται την εξέλιξη της κατάστασης του κάθε αντικειμένου στο σύστημα (ενέργεια, θέση κτλ.). Ο

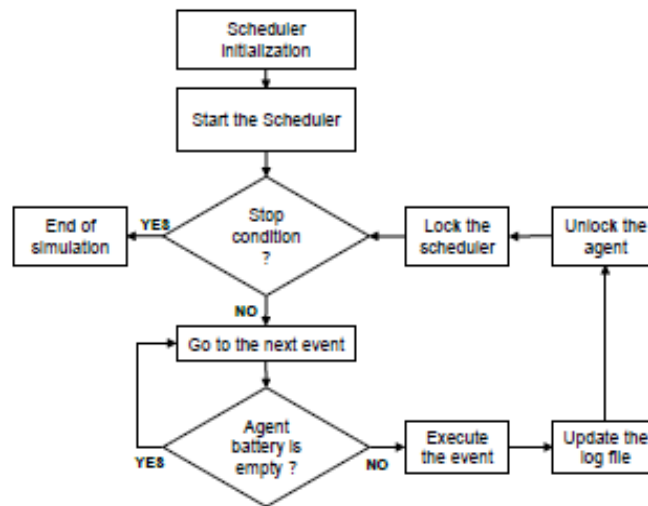
προσομοιωτής οργανώνει συμβάντα (events) που δημιουργούνται από τους agents σύμφωνα με την ημερομηνία δημιουργίας τους, τα εκτελεί με την ίδια σειρά και ενημερώνει την κατάσταση τους (ενέργεια, θέση κτλ.). Έτσι εξάγονται αυτόματα δυο τύποι αρχείων κατά την προσομοίωση:

- Το log file είναι ένα αρχείο στο οποίο όλα τα events που εκτελούνται από τον προσομοιωτή αποθηκεύονται για σκοπούς εκσφαλμάτωσης.
- Το rst file είναι ένα αρχείο αποτελεσμάτων που δημιουργείτε για κάθε αισθητήρα και περιέχει την κατανάλωση ενέργειας του κάθε αισθητήρα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Για να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση απαιτούνται οι αισθητήρες (agents) και ο προγραμματιστής (scheduler). Ο κάθε agent ξεκινά να δημιουργεί events σύμφωνα με το script και ο προγραμματιστής τα ταξινομεί για την επόμενη φάση επεξεργασίας. Ο προγραμματιστής αποτελεί μια ανεξάρτητη μονάδα που τρέχει παράλληλα με τους agents και οργανώνει τα events που έχουν δημιουργήσει οι agents προκειμένου να τα εκτελέσει.

Επομένως, ο προγραμματιστής συλλέγει τα events και ελέγχει αν ο agent που παράγει αυτά τα events έχει την απαραίτητη ενέργεια ώστε να τα εκτελέσει, διαφορετικά μεταβαίνει στο επόμενο event της λίστας. Μετά την εκτέλεση ο scheduler ενημερώνει όλους τους agents που σχετίζονται με το event και τα προσθέτει στο log file . Ο προγραμματιστής υποδεικνύει το event στον agent ώστε να δημιουργήσει το επόμενο event και να προστεθεί στην λίστα του προγραμματιστή. Στην συνέχεια μεταβαίνει σε κατάσταση αδράνειας όσο η λίστα χρησιμοποιείται από τον agent. Ο προγραμματιστής επαναλαμβάνει αυτόν τον κύκλο μέχρι να εκπληρωθούν οι συνθήκες να σταματήσει. Η συνολική προσομοίωση θα σταματήσει όταν εκπληρωθεί μια από τις τρεις παρακάτω συνθήκες:

- δεν υπάρχουν events για να εκτελεστούν στην λίστα του προγραμματιστή
- ο χρόνος προσομοίωσης έχει ξεπεραστεί
- υπάρχει αναγκαστική διακοπή ή όριο πραγματικού χρόνου προσομοίωσης

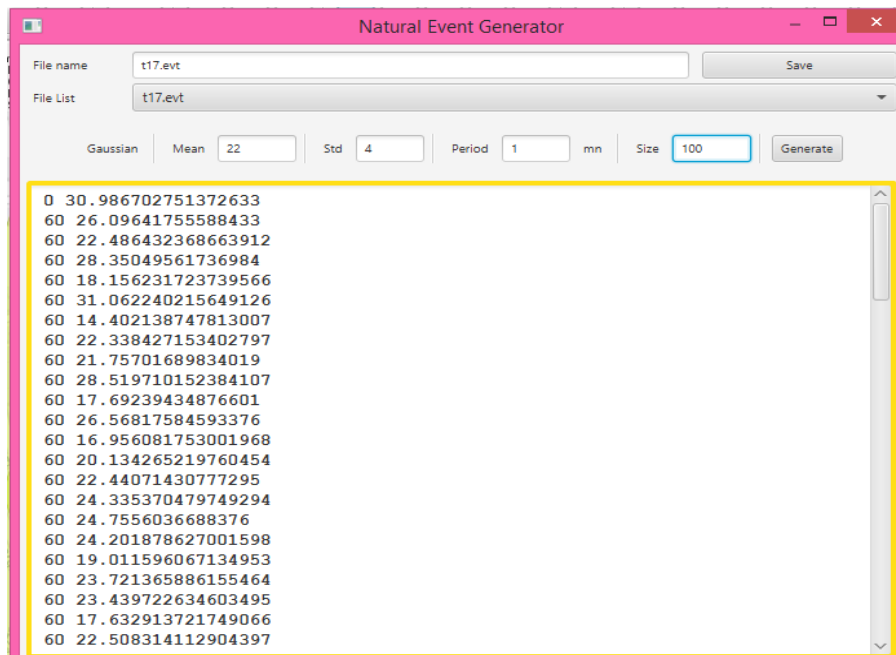


Διάγραμμα 53 Ο προγραμματιστής

6.5 Προσομοίωση κατανάλωσης ενέργειας δικτύων LoRa και WiFi

Στο πρόγραμμα προσομοίωσης CupCarbon σχεδιάστηκαν δυο WSN δίκτυα, ένα δίκτυο με έξι κόμβους Wi-Fi (S10, S11, S12, S13, S14, S15) και ένα Base Station (Sink_23) και ένα δίκτυο με τέσσερις κόμβους LoRa (S1, S2, S3, S4) και ένα Base Station (Sink_5). Οι κόμβοι έχουν οπτική επαφή (LOS) μεταξύ τους και έχουν τοποθετηθεί σε ελεύθερο χώρο χωρίς εμπόδια.

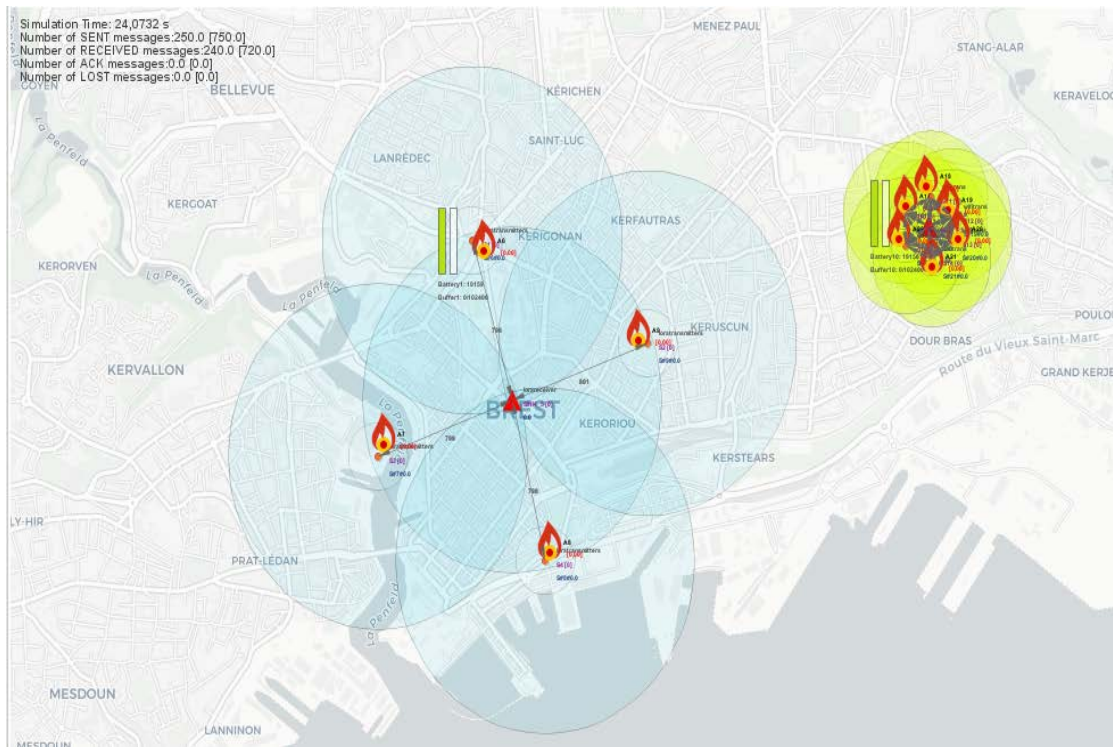
Κάθε αισθητήρας του LoRa και του Wi-Fi δικτύου λαμβάνει τιμές από τους analog gas αισθητήρες, οι οποίοι παράγουν τυχαίες τιμές ακολουθώντας την κατανομή Gaussian. Ο transmitter από κάθε δίκτυο θα διαβάζει κάθε 100ms την τιμή του αισθητήρα (gas) και θα στέλνει την τιμή στον receiver. Ο receiver που στην περίπτωση μας είναι τα Base Station (Sink) θα γίνει marked κάθε φορά που θα λαμβάνει τιμές.



Εικόνα 2 Δημιουργία 100 τιμών που παράγονται κάθε δευτερόλεπτο από Gaussian κατανομή με την βοήθεια του Natural Event Generator



Εικόνα 3 Script receiver κάθε φορά που λαμβάνει τιμές γίνει marked



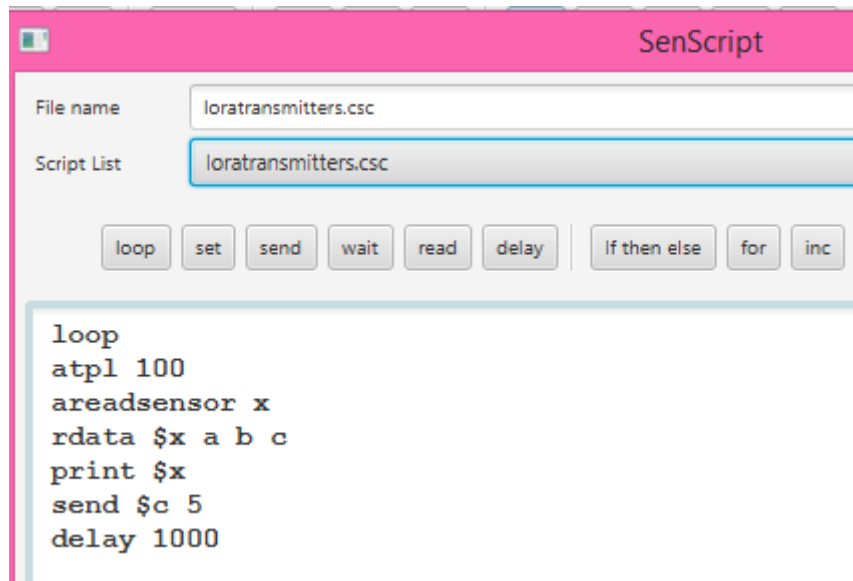
Εικόνα 4 Δίκτυα LoRa και WiFi στον προσομοιωτή CupCarbon

Στην πρώτη προσομοίωση η ισχύς εκπομπής (PL) έχει ρυθμιστεί για κάθε κόμβο και στα δυο δίκτυα στο 100%. Το data rate σε όλους τους κόμβους έχει ρυθμιστεί στα 250Kbps ενώ το SF για τους LoRa κόμβους είναι 7 (Εικόνα 5).

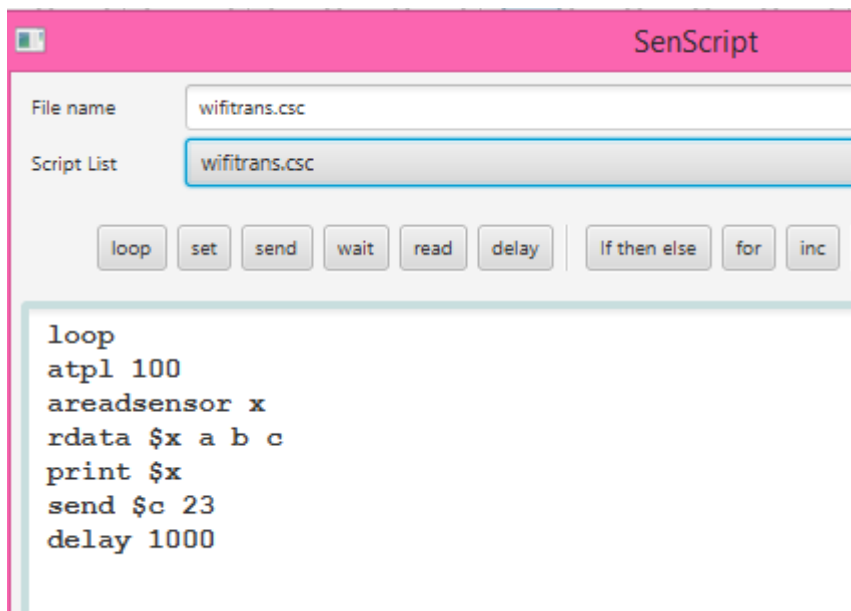
Παρακάτω (Εικόνα 6-Εικόνα 7) δίνονται τα Script των κόμβων μετάδοσης LoRa και Wi-Fi. Ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 240 sec.

Network Id (NID)	13108	▶
MY	0	▶
CH	0	▶
PL	100.0	▶
Radius	1000.0	▶
E_Tx	5.92E-5	▶
E_Rx	2.86E-5	▶
Sleeping Energy	1.0E-7	▶
Listening Energy	1.0E-6	▶
Data Rate	250000	▶
Spreading Factor	7	▶

Εικόνα 5 Radio Parameters αισθητήρων LoRa



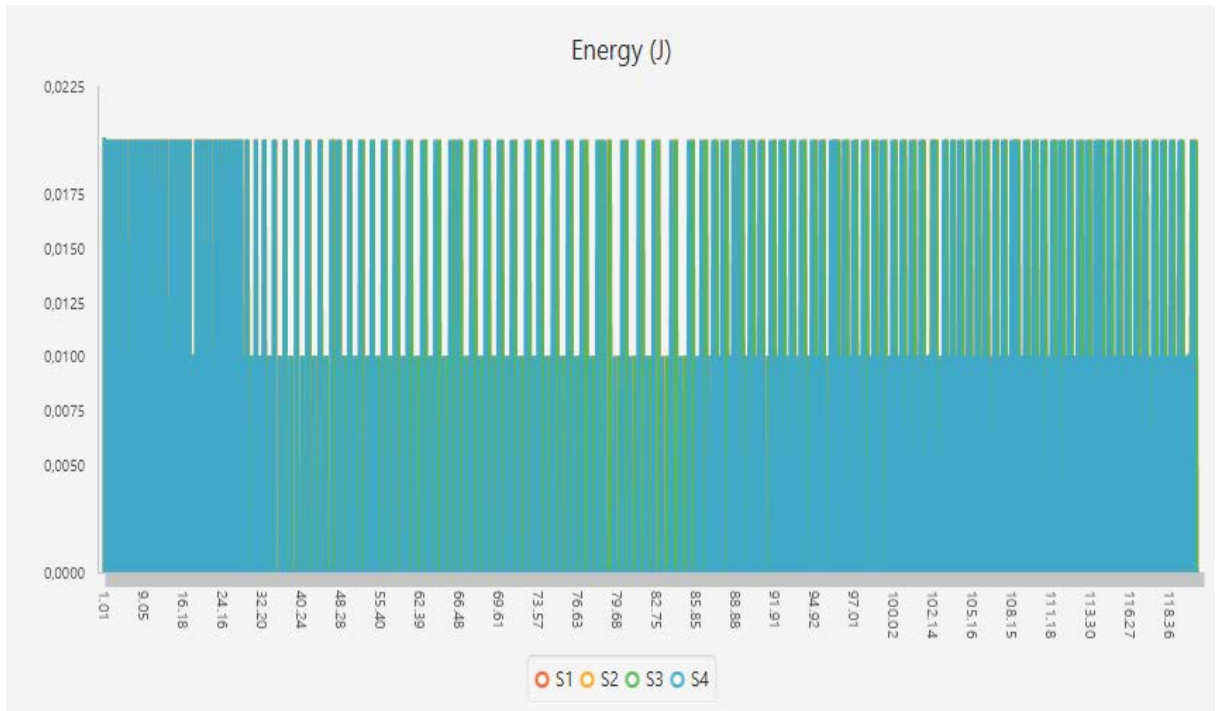
Εικόνα 6 Script LoRa συσκευές μετάδοσης με ισχύ 100%



Εικόνα 7 Script για Wi-Fi συσκευές μετάδοσης με ισχύ 100%

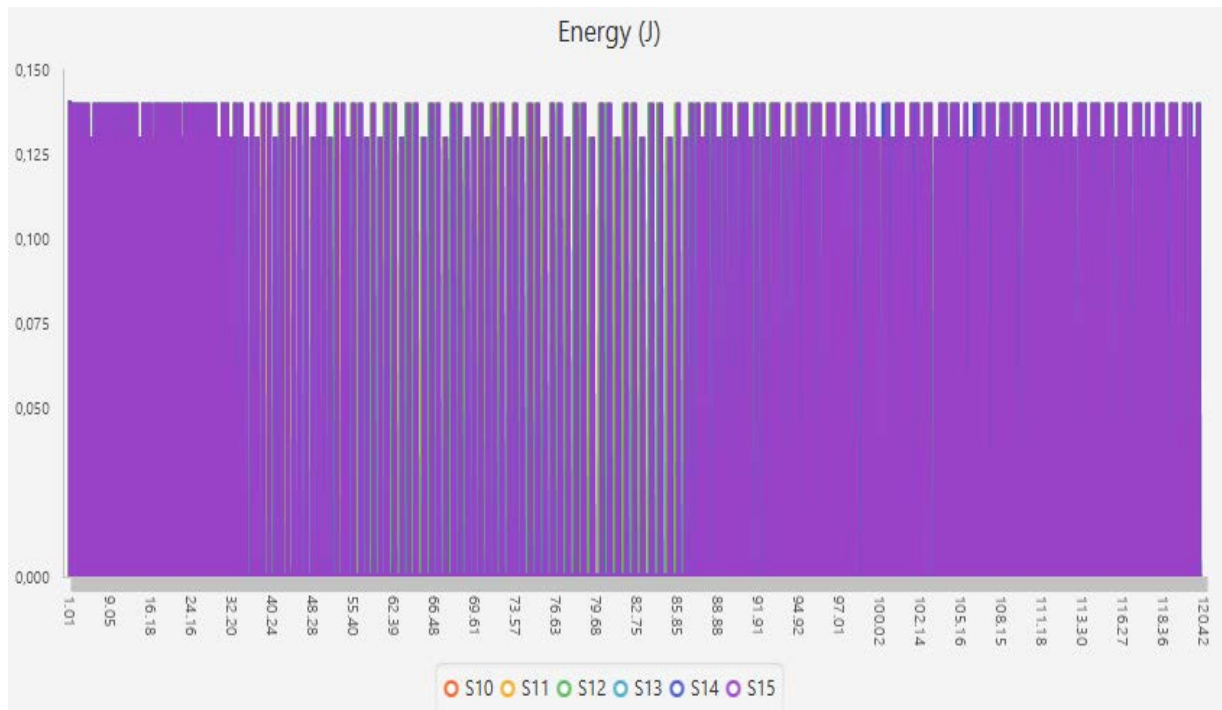
Σύμφωνα με το Script η εκπομπή ισχύος είναι 100% (atpl 100) και οι πομποί LoRa και WiFi διαβάζουν τις τιμές των αισθητήρων gas (areadsensor x) και στέλνουν την τιμή αυτή στο Base Station (Sink) του κάθε δικτύου αντίστοιχα.

Το CupCarbon μετά το πέρας της προσομοίωσης και αφού επιλεγθούν οι αντίστοιχοι αισθητήρες, υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων S1, S2, S3, S4 του δικτύου LoRa και την απεικονίζει παρακάτω γραφικά ως συνάρτηση του χρόνου προσομοίωσης διάγραμμα 54.



Διάγραμμα 54 Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων LoRa για ισχύ εκπομπής 100%

Από το παραπάνω διάγραμμα 54 παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων LoRa είναι 0.02 Joule .



Διάγραμμα 55 Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων Wi-Fi για ισχύ εκπομπής 100%

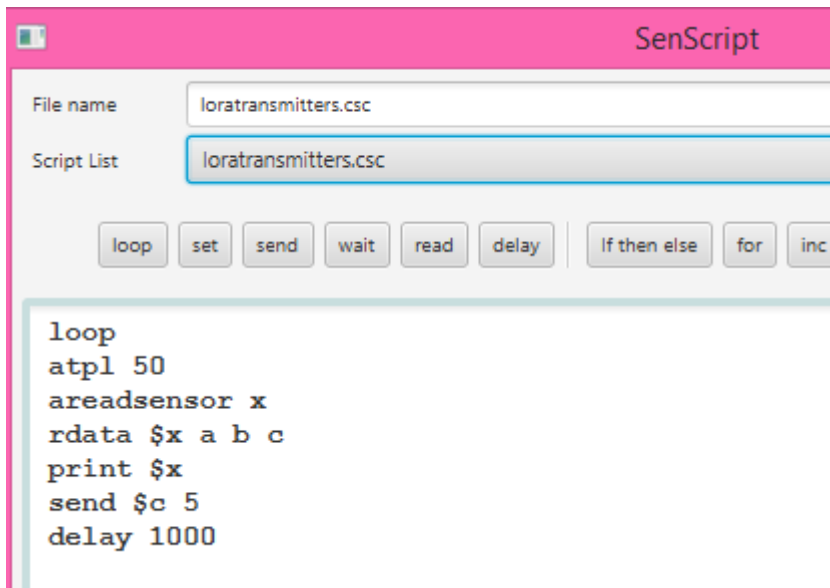
Στο διάγραμμα 55 παραπάνω έχουμε την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου Wi-Fi των κόμβων S10, S11, S12, S13, S14, S15 σε συνάρτηση με τον χρόνο προσομοίωσης.

Στο διάγραμμα 55 παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων Wi-Fi είναι 0.1375 Joule .

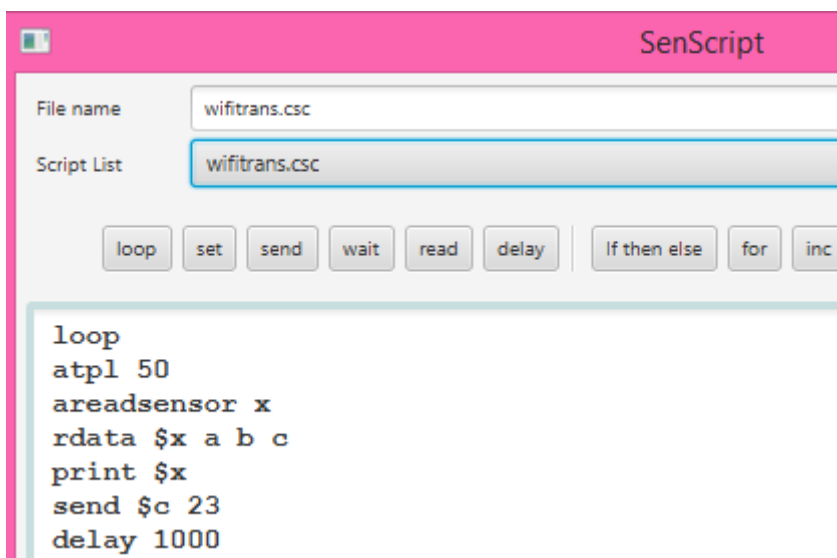
Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων δικτύου LoRa είναι κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων δικτύου Wi-Fi για ισχύ εκπομπής 100%.

Στην δεύτερη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε η ισχύς εκπομπής (PL) ρυθμίστηκε για κάθε κόμβο και στα δυο δίκτυα στο 50%. Το data rate σε όλους τους κόμβους είναι 250Kbps ενώ το SF για τους LoRa κόμβους είναι 7.

Παρακάτω δίνονται τα Script των κόμβων μετάδοσης LoRa και WiFi για ισχύ εκπομπής 50%. Ο χρόνος προσομοίωσης παρέμεινε ίδιος 240 sec.

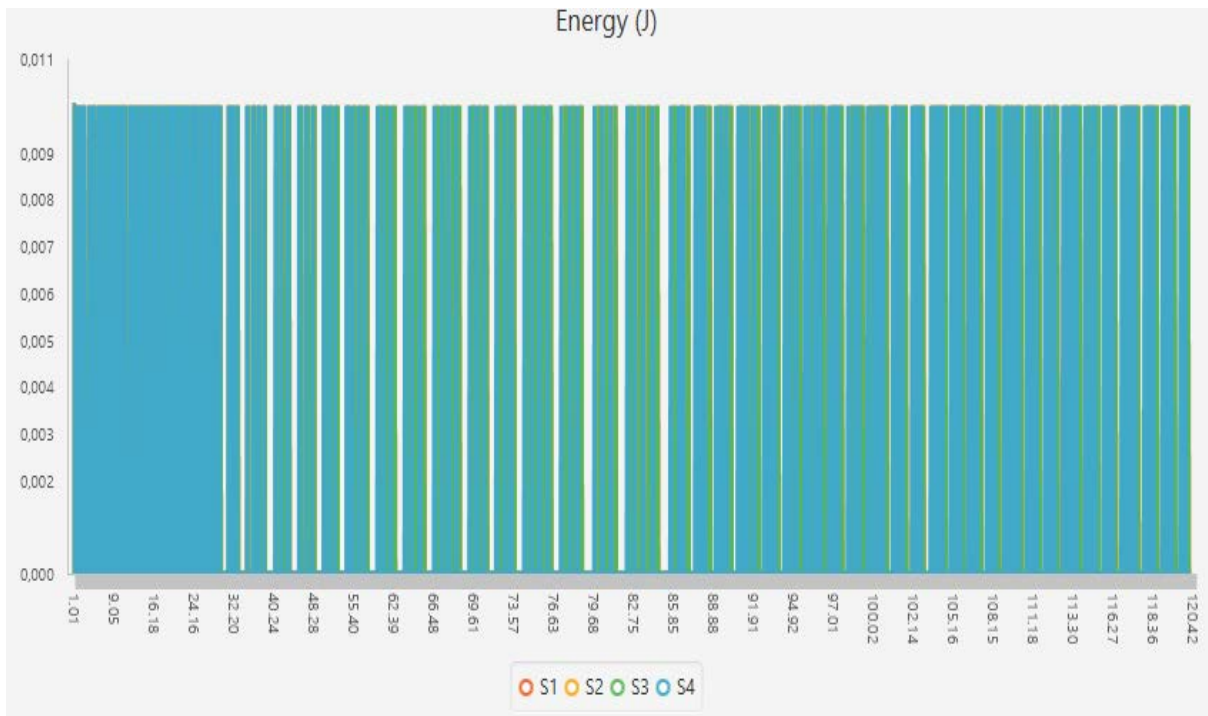


Εικόνα 8 Script LoRa συσκευές μετάδοσης με ισχύ 50%

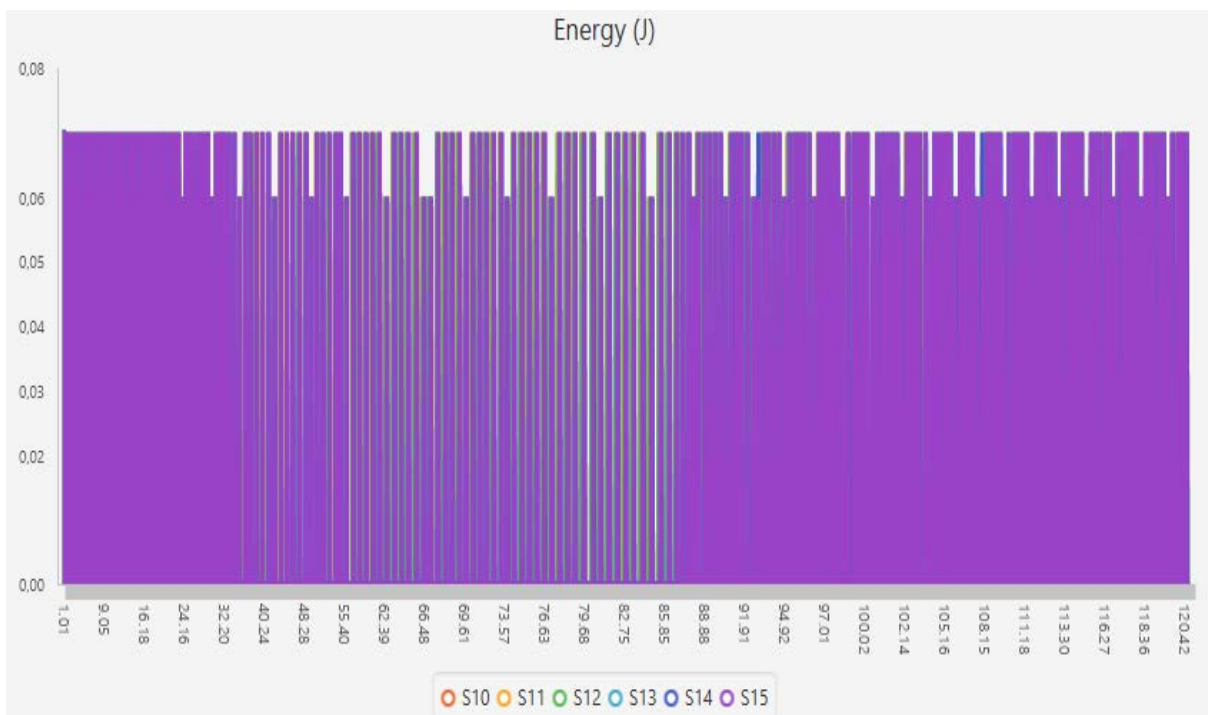


Εικόνα 9 Script για WiFi συσκευές μετάδοσης με ισχύ 50%

Μετά το πέρας της προσομοίωσης 240 sec υπολογίζεται η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων S1, S2, S3, S4 του δικτύου LoRa καθώς και η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων S10, S11, S12, S13, S14, S15 του δικτύου Wi-Fi σε συνάρτηση με τον χρόνο προσομοίωσης.



Διάγραμμα 56 Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων LoRa για ισχύ εκπομπής 50%



Διάγραμμα 57 Γράφημα κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων Wi-Fi για ισχύ εκπομπής 50%

Η κατανάλωση ενέργειας όπως φαίνεται στο διάγραμμα 56 που προέκυψε για τους κόμβους LoRa είναι 0.010 Joule ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα 57 η κατανάλωση ενέργειας για τους κόμβους WiFi είναι 0.07 Joule.

Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων δικτύου LoRa είναι μικρότερη σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων δικτύου Wi-Fi για ισχύ εκπομπής 50%. Τέλος, παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας και στα δυο δίκτυα τόσο στο LoRa όσο και στο Wi-Fi μειώνεται κάθε φορά που μειώνεται η εκπομπή ισχύος .

Οι δοκιμές κατανάλωσης ενέργειας έγιναν και σε αστικό περιβάλλον τα αποτελέσματα που προέκυψαν και στα δυο δίκτυα τόσο στο LoRa όσο και στο Wi-Fi, όταν η ισχύς εκπομπής ήταν 100% η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους ήταν 0.02 Joule και 0.1375 Joule αντίστοιχα. Ενώ όταν η ισχύς εκπομπής και στα δυο δίκτυα LoRa και Wi-Fi ήταν 50% η κατανάλωση ενέργειας στους κόμβους ήταν 0.01 και 0.07 Joule αντίστοιχα.



Εικόνα 10 Δίκτυα LoRa και WiFi στον προσομοιωτή CupCarbon σε αστικό περιβάλλον

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή την διατριβή έγινε μελέτη της τεχνολογίας LoRa και διαπιστώθηκε ότι αποτελεί ένα σημαντικό και χρήσιμο μέρος των IoT εφαρμογών. Το LoRaWAN είναι ένα LPWAN (Low Power Wide Area Network) πρωτόκολλο, χαμηλής ενέργειας, μεγάλου εύρους και χαμηλού κόστους κατάλληλο για εφαρμογές IoT.

Η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί την διαμόρφωση CSS καθώς και τρία διαφορετικά εύρη ζώνης (bandwidth) 125kHz, 250 kHz και 500kHz. Επίσης, χρησιμοποιεί τους συντελεστές εξάπλωσης SF (7...12) που όσο υψηλότεροι είναι επιτρέπουν το σήμα να ταξιδέψει σε μεγαλύτερη απόσταση με κόστος την αύξηση του χρόνου μετάδοσης (ToA) και την μείωση του ρυθμού δεδομένων, καθώς και την λήψη από δέκτη χωρίς λάθη. Επιπλέον, χρησιμοποιεί τεχνικές διόρθωσης και ανάκτησης πληροφοριών κάνοντας τα δεδομένα ανθεκτικά στις παρεμβολές.

Επίσης, έγινε μελέτη παρεμβολών μεταξύ των αισθητήρων ίδιας και διαφορετικής τεχνολογίας. Η θεωρητική μελέτη μας οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη τόσο μικρότερη είναι η κάλυψη με αποτέλεσμα να απαιτείται η χρήση υψηλότερου συντελεστή εξάπλωσης (SF).
- Όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν σε μια περιοχή τόσο περισσότερες παρεμβολές δημιουργούνται.
- Όταν ο αριθμός των πομπών αυξάνεται ανά gateway αυξάνει και το ποσοστό των πακέτων που συγκρούονται.
- Όταν γίνεται χρήση πολλαπλών καναλιών και πολλαπλών συντελεστών εξάπλωσης (SF) το ποσοστό των πακέτων που χάνονται είναι χαμηλότερο σε σχέση με τις περιπτώσεις που είτε το SF ήταν σταθερό ή το κανάλι ήταν ένα.

Η μελέτη προσομοίωσης οδήγησε στο εξής συμπέρασμα:

- Όταν ο αριθμός των τελικών συσκευών ανά gateway σε ένα δίκτυο LoRa αυξάνεται οπότε αυξάνεται και η συχνότητα αποστολής δεδομένων, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του PDR (Packet Delivery Rate). Αν όμως αυξηθούν τα gateway θα αυξηθεί το PDR καθώς και αριθμός των επιβεβαιωμένων μηνυμάτων διότι στην περίπτωση αυτή τα gateway είναι σε θέση να στείλουν ACK επιβεβαίωση.

Τέλος, και οι μετρήσεις οδήγησαν σε πολύ ενδιαφέρον συμπεράσματα όσον αφορά τις παρεμβολές.

- Οι ομοκαναλικές παρεμβολές μεταξύ των δικτύων LoRa και WiFi μετριάζονται με την αύξηση του συντελεστή εξάπλωσης SF και την μείωση του εύρους ζώνης (bandwidth).
- Οι παρεμβολές που δημιουργούνται μέσα στην ζώνη (in-band) μεταξύ LoRa και WiFi μπορούν να αποφευχθούν με την εκμετάλλευση των αχρησιμοποίητων τμημάτων των 80 MHz.
- Στις παρεμβολές μεταξύ LoRa συσκευών με οπτική επαφή (LOS) και με διαφορετικές ρυθμίσεις BW, SF και R το χαμηλότερο PER (Packet Error Rate) παρατηρείται όταν το BW είναι χαμηλό και το SF υψηλό. Ενώ στην περίπτωση που το coding rate R αυξηθεί, θα αυξηθεί και το PER.
- Στις παρεμβολές πολλαπλών διαδρομών (NLOS) όταν το SF αυξηθεί αυξάνεται και η ανοχή του LoRa στην διάδοση των πολλαπλών διαδρομών, με το PER να έχει απόδοση 0% ανεξάρτητα από το BW.
- Στις παρεμβολές με κόμβους LoRa διαπιστώθηκε ότι αν η παρεμβολή ξεκινήσει μετά το τέλος του χρόνου του preamble και του header και έχει υψηλό RSSI στον δέκτη, τότε η πρώτη μετάδοση θα ληφθεί με λάθος CRC φορτίο. Στην περίπτωση που τα τελευταία έξι σύμβολα από το preamble του πομπού λαμβάνονται σωστά, τότε ο δέκτης θα μπορεί να συγχρονιστεί με τον πομπό.
- Τέλος στην παρεμβολή μεταξύ των δικτύων 802.15.4g και LoRa συμπεραίνεται ότι τα πακέτα LoRa είναι πιο ανθεκτικά στις παρεμβολές σε σχέση με τα αυτά του IEEE 802.15.4g.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας μεταξύ των δικτύων LoRa και WiFi αυτό που διαπιστώθηκε είναι ότι η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων LoRa είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με αυτή των κόμβων WiFi και στην περίπτωση όπου η ισχύς

εκπομπής είναι 100% αλλά και στην περίπτωση που η ισχύς είναι 50% τόσο σε αστικό περιβάλλον όσο και σε περιβάλλον ελευθέρου χώρου.

7.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Μελλοντικά, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη των δικτύων LoRa και 802.11ah, διότι το 802.11ah λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ζώνη στα 900MHz που είναι παραπλήσια με αυτή του LoRaWAN στα 868 MHz. Επομένως, θα μπορούσε να γίνει μελέτη παρεμβολών και ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ αυτών των δύο δικτύων . Βέβαια, μεγαλύτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε, αν θα γινόταν η προσομοίωση των παρεμβολών και της ενεργειακής κατανάλωσης στο λογισμικό CupCarbon , καθώς και σε συνδυασμό (συν-προσομοίωση) με άλλα λογισμικά (π.χ. NS-3, Riverbed).

Βιβλιογραφία

- [1] A. Samy Nassar, A. Hossam Montasser and N. Abdelbaki, "A Survey on Smart Cities' IoT", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 639, p.p. 856-863, 2018.
- [2] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini and I. Chlamtac, "Internet of things: Vision, applications and research challenges", *Ad Hoc Networks*, vol.10, pp. 1497–1516, 2012.
- [3] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol.17, no. 4, pp. 2347-2376, 2015.
- [4] K. Ponnusamy and N. Rajagopalan, "Internet of Things: A Survey on IoT Protocol Standards", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 564, pp. 651-663, 2018.
- [5] K. Mekkia, E. Bajica, F. Chaxela and F. Meyerb, "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment", *ICT Express*, vol.5, pp. 1-7, 2017.
- [6] S. Al-Sarawi, M. Anbar , K. Alieyan and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) Communication Protocols: Review" in *8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, pp. 685-690, 2018.
- [7] R. P. Shelkikar and N. S.Wagh, "Review paper based on women tracking device using concept of "Internet of Things"", *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, vol. 5, 2016.
- [8] W. Stallings, "Wireless LANs" in *Data and Computer Communications*, New Jersey: Pearson, 2007, pp.528-548.
- [9] S. Gorshe, A. R. Raghavan, T. Starr and S. Galli, "WiFi: IEEE 802.11 Wireless LAN", *Broadband Access: Wireline and Wireless– Alternatives for Internet Services*, pp.305-321, 2014.

- [10] V. Baños-Gonzalez, M. Shahwaiz Afaqui, E. Lopez-Aguilera and E. Garcia-Villegas, "IEEE 802.11ah: A Technology to Face the IoT Challenge", *Sensors*, vol.16, no. 11, 2016.
- [11] D. Magrin, M. Centenaro and L. Vangelista, "Performance Evaluation of LoRa Networks in a Smart City Scenario", *IEEE ICC 2017 SAC Symposium Internet of Things Track*, 2017.
- [12] Migrating an Internet of Things (IoT) Sensor Design to LoRaWAN, Semtech White Paper
- [13] H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Motta-Cruz and G. Rouyer, "Analytical and Simulation study for LoRa Modulation" in *International Conference on Telecommunications*, France, 2018.
- [14] SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem, Designer's Guide, AN1200.13
- [15] U. Noreen, A. Bounceur and L. Clavier, "A Study of LoRa Low Power and Wide Area Network Technology" in the *3rd IEEE International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing*, Morocco, 2017.
- [16] J. Petäjälärvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen and J. Iinatti, "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 3, 2017.
- [17] AN1200.22 LoRa Modulation Basics
- [18] C. El Fehria, M. Kassab, S. Abdellatif, P. Berthouc and A. Belghith, "LoRa technology MAC layer operations and Research issues", *Procedia Computer Science*, vol. 130, pp. 1096-1101, 2018.
- [19] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen and W. M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things", *Sensors*, vol.16, no. 9, 2016.
- [20] C. Vallélian and L. Bassang, "LoRa White Paper Project NPR: LPWAN-VPN", 2018
- [21] J. de Carvalho Silva, Joel J. P. C. Rodrigues, A. M. Alberti, P. Solic and A. L. L. Aquino, "LoRaWAN - A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities", in *2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, 2017.

- [22] LoRaWAN Security full End-to-End encryption for IoT application providers, LoRa Alliance, 2017.
- [23] S. R. Saunders, A. Aragón-Zavala, “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems”, UK: John Wiley & Sons, 2007.
- [24] A. M. Yousuf, E. M. Rochester, B. Ousat and M. Ghaderi, “Throughput, Coverage and Scalability of LoRa LPWAN for Internet of Things”, in 2018 IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service (IWQoS), Canada, 2018.
- [25] T. Voigt, M. Bor, U. Roedig, J. Alonso, “Mitigating Inter-network Interference in LoRa Networks”, in Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Network, Sweden, 2017, pp. 323-328.
- [26] M. Bor, U. Roedig, “LoRa Transmission Parameter Selection”, in 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Canada, 2017.
- [27] T. Bouguera, J.-F. Diouris, J.-J. Chaillout, R. Jaouadi and G. Andrieux, “Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN”, *Sensors*, vol.18, no. 7, 2018.
- [28] U. Noreen, A. Bounceur and L. Clavier, “Modeling Interference for Wireless Sensor Network Simulators”, in Proceedings of the International Conference on Big Data and Advanced Wireless Technologies, Bulgaria, 2016.
- [29] A. Bounceur, L. Clavier, P. Combeau, O. Marc, R. Vauzelle, A. Masserann, J. Soler, R. Euler, T. Alwajeih, V. Devendra, U. Noreen, E. Soret and M. Lounis, “CupCarbon: A New Platform for the Design, Simulation and 2D/3D Visualization of Radio Propagation and Interferences in IoT Networks”, in 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, 2018.
- [30] CupCarbon® User Guide Version U-One 3.8
- [31] C. López-Pavón, S. Sendra, J. F. Valenzuela-Valdés, “Evaluation of CupCarbon Network Simulator for Wireless Sensor Networks”, *Network Protocols and Algorithms*, vol.10, no.2, 2018.

- [32] U. Noreen, A. Bounceur and L. Clavier, "Integration of OFDM Based Communication System with Alpha-Stable Interference using CupCarbon Simulator", in the ACM International Conference on Internet of things and Cloud Computing (ICC'2016), University of Cambridge, 2016.
- [33] K. Mehdi, M. Lounis, A. Bounceur, T. Kechadi, "CupCarbon: A Multi-Agent and Discrete Event Wireless Sensor Network Design and Simulation Tool", 2014
- [34] Z. Nie and L. Jiang, "Interference Modeling and Analysis of LoRa Network", in 14th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2018), China, 2018, pp.227-240.
- [35] U. Noreen ,L. Clavier, A. Bounceur, "LoRa-like CSS-based PHY layer, Capture Effect and Serial Interference Cancellation", in European Wireless 2018, 24th European Wireless Conference, Catania, 2018, pp.68-73.
- [36] J. Haxhibeqiri, F. Van den Abeele, I. Moerman and J. Hoebeke "LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements", Sensors, vol.17, 2017.
- [37] F. Van den Abeele, J. Haxhibeqiri, I. Moerman, J. Hoebeke, "Scalability analysis of large-scale LoRaWAN in ns3 ", IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, pp. 2186 – 2198, 2017.
- [38] Application Note: Wi-Fi Immunity of LoRa at 2.4 GHz, Semtech, 2017.
- [39]K. Staniec and M. Kowal , "LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions", Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.
- [40] C. Orfanidis, L. M. Feeney, M. Jacobsson, P. Gunningberg, "Investigating interference between LoRa and IEEE 802.15.4g networks" in IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2017.