

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη δυνατοτήτων και παραμέτρων του δικτύου
LoRaWAN

Γεώργιος Μπαγκατζούνης ΑΜ: 529

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης

Κοζάνη, Μάρτιος 2020

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη δυνατοτήτων και παραμέτρων του δικτύου
LoRaWAN

Γεώργιος Μπαγκατζούνης AM: 529

Επιβλέπων Καθηγητής: Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης

Κοζάνη, Μάρτιος 2020

Περίληψη

Στις μέρες μας το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) έχει τραβήξει το επιστημονικό αλλά και το εμπορικό ενδιαφέρον, και έχουν παρουσιαστεί πολλές προτάσεις για να καλυφθεί η αυξημένη ζήτηση. Μια από τις προτάσεις που προέκυψαν είναι τα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας περιοχής (LPWAN). Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε το LoRaWAN ως LPWAN λύση, καθώς και το φυσικό του επιπέδου LoRa. Η τεχνολογία αυτή συνεχώς προκαλεί ενδιαφέρον λόγω της ικανότητας της παρέχει κάλυψη σε μεγάλες αποστάσεις και αποτελεί μια οικονομική λύση. Επίσης αναφέρθηκαν οι και άλλες LPWAN τεχνολογίες και έγινε σύγκριση με το LoRaWAN. Παρουσιάστηκαν οι επιδόσεις του δικτύου και προτάσεις για βελτίωση του πρωτοκόλλου σύμφωνα με δημοσιεύσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας προσομοιωτής ανοιχτού κώδικα γραμμένο σε python όπου έγιναν κάποιες προσομοιώσεις.

Λέξεις κλειδιά: IoT, LPWAN, LoRa, LoRaWAN, προσομοιωτής

Abstract

Nowadays Internet of Things (IoT) has attracted both scientific and commercial interest. Many proposals have been presented to meet the increased demand. One of the proposals that has been emerged was Low Power Wireless Area Networks (LPWAN). In this thesis, LoRaWAN was studied as an LPWAN solution, as well as its physical level LoRa. This technology constantly inspires interest because of its ability to provide long distance coverage and its low cost. Also the other LPWAN technologies available were mentioned and compared with LoRaWAN. Network performance and suggestions for improving the protocol according to publications were presented. Finally, some simulations were performed with an open source simulator written in python.

Keywords: IoT, LPWAN, LoRa, LoRaWAN, simulator

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

«Μελέτη δυνατοτήτων και παραμέτρων του δικτύου LoRaWAN»

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Σαρηγιαννίδη Παναγιώτη αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Μπαγκατζούνης Γεώργιος, Σαρηγιαννίδης Παναγιώτης, 2020, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων	9
Περιεχόμενα	11
Λίστα εικόνων	12
Κατάλογος Ακρωνυμίων	15
Κατάλογος Πινάκων	17
1 Εισαγωγή	19
1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)	19
1.2 Τεχνολογίες στο IoT	19
1.2.1 RFID	20
1.2.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)	20
1.2.3 Big Data	21
1.2.4 Υπολογιστική νέφους (Cloud Computing)	21
1.2.5 Υπολογιστική Ομίχλη (Fog Computing)	22
1.3 Εφαρμογές που χρησιμοποιείτε το IoT	23
1.3.1 Μεταφορές / Logistics	23
1.3.2 Έξυπνη μεταφορά και αυτοκινητοβιομηχανία	23
1.3.3 Έξυπνη πόλη	24
1.3.4 Ηλεκτρονική υγεία	25
2 Δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας περιοχής – LPWAN	27
2.1 Πρωτόκολλα LPWAN	27
2.2 Τα LPWAN σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες	28
2.3 Sigfox	29
2.4 Weightless	30
2.5 Narrow band Internet of Things (NB-IoT)	31
2.6 LoRa (Long Range)	32
2.7 Σύγκριση τεχνολογιών LPWAN	34
3 LoRa παράμετροι φυσικού επιπέδου	37

3.1	Πακέτα LoRa	40
3.2	Βασικές Ιδιότητες LoRa	41
4	LoRaWAN	43
4.1	Δίκτυο LoRaWAN	43
4.2	Ενεργοποίηση της συσκευής και Ασφάλεια	44
4.2.1	Ενεργοποίηση με εξατομίκευση (Activation by Personalization - ABP)	44
4.2.2	Ενεργοποίηση μέσω του αέρα (Over the Air Activation - OTAA)	45
4.3	Ασφάλεια	45
4.3.1	Κλειδιά συνεδρίας - Session keys	46
4.3.2	Κλειδιά Lifetime Join Session	46
4.3.3	Παράμετροι	46
4.4	Μετάδοση δεδομένων	47
4.4.1	Κλάση A	47
4.4.2	Κλάση B	48
4.4.3	Κλάση Γ	49
4.5	Μορφή μηνύματος LoRaWAN	50
4.6	Adaptive Data Rate (ADR)	51
4.7	Ενέργεια	53
5	Σχετικές ερευνητικές εργασίες με σκοπό την βελτιστοποίηση	55
5.1	Μαθηματικό μοντέλο για βελτιστοποίηση των κόμβων	55
5.2	Βελτιστοποίηση με χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης	58
5.3	Εγκατάσταση δικτύου σε πανεπιστημιούπολη (Smart Energy Campus)	61
6	Προσομοιώσεις	67
6.1	Προσομοιωτής	67
6.1.1	Κόμβος	67
6.1.2	Διεπαφή Αέρα	69
6.1.3	Πύλη (Gateway)	70
6.2	Προσαρμογή κόμβων	71
6.3	Ποσοστό συγκρούσεων και χαμένων πακέτων	76
6.4	Κατανομή SF ανάλογα με την απόσταση από την GW	79
7	Σύνοψη και τελικά συμπεράσματα	83
	Βιβλιογραφία	85

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1 - Απαιτούμενο BW σε σύγκριση με την απόσταση των διάφορων τεχνολογιών [2]	28
Εικόνα 2 - BPSK διαμόρφωση	30
Εικόνα 3 - Λειτουργίες NB-IoT [05].	32
Εικόνα 4 -up - chirp (αριστερά), down - chirp (δεξιά) [25]	33
Εικόνα 5 -Διαφορά μεταξύ SF [25]	38
Εικόνα 6 - LoRa chirp σε σχέση με το χρόνο	38
Εικόνα 7 - Δομή πακέτου LoRa [11]	40
Εικόνα 8 - αριστερά, LoRa Chirp , άξονας x: Συχνότητα , άξονας y: χρόνος δεξιά αναδιαμορφωμένο σήμα [34]	41
Εικόνα 9 -Αρχιτεκτονική LoRaWAN [12]	43
Εικόνα 10 - Κατανομή των κλειδιών σε ολόκληρο το δίκτυο [33]	47
Εικόνα 11- Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ συσκευής και σταθμού βάσης για LoRaWAN κλάση A [12]	48
Εικόνα 12- Χρονοδιάγραμμα κλάσης B [12]	49
Εικόνα 13 - Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων δεδομένων της κλάσης Γ [12]	49
Εικόνα 14- Μορφή πλαισίου LoRaWAN. Τα μεγέθη των πεδίων είναι σε bits [12]	51
Εικόνα 15 - ADR στην πλευρά του κόμβου [5]	52
Εικόνα 16 -ADR στην πλευρά του server [26]	53
Εικόνα 17– Ενέργεια κατά την λειτουργία κόμβου [10]	54
Εικόνα 18 - Μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας σε ψηφιακό παλμογράφο [36]	54
Εικόνα 19 - Μαρκοβιανό μοντέλο TDC. Κύκλος ανίχνευσης $T=5$ s, DC 1%, $T_{on}=0.05$ s	56
Εικόνα 20 - Διάγραμμα παραγωγής συμβάντων, οι αριθμοί των καταστάσεων δηλώνουν την προτεραιότητα των γεγονότων	57
Εικόνα 21 - Ρυθμιζόμενη 500 κόμβων με διάφορες μεθόδους επιλογής παραμέτρων μετάδοσης και την επιλεγμένη λύση (SA)	58
Εικόνα 22- Απόδοση του βασικού μοντέλου LoRa, , $N=500$, duty cycle 1% και 5%	60
Εικόνα 23 - Αντίκτυπος της αναπαραγωγής μηνυμάτων στην ανερχόμενη ζεύξη LoRa, $N=500$, duty cycle 5%	60
Εικόνα 24 - Αντίκτυπος πολλαπλών κεραιών λήψης στην πύλη LoRa, $N=500$, duty cycle 5%, και ένα αντίγραφο μηνύματος, a) 1 b) 2 c) 4 κεραιές λήψης	60
Εικόνα 25– Ισχύ του ληφθέντος σήματος, με μπλε εμφανίζονται δεδομένα που μετρήθηκαν και με κόκκινο αυτά που υπολογιστήκαν.	62
Εικόνα 26 - Ισχύ του ληφθέντος σήματος σε μεικτό περιβάλλον	63
Εικόνα 27 - Κατανομή κόμβων	64
Εικόνα 28 – Παράδοση πακέτων με διαφορετικό αριθμό κόμβων.	64
Εικόνα 29 – Παράδοση πακέτων με διαφορετικά SF και αριθμό κόμβων.	65
Εικόνα 30 - PDR σε σχέση με τον χρόνο για την μετάδοση των πακέτων	66
Εικόνα 31 - Βασικό μοντέλο προσομοιωτή	67
Εικόνα 32 - Αρχική διάταξη κόμβων τυχαία στο χώρο	71
Εικόνα 33 - Κατανομή SF στους κόμβους ανάλογα με την απόστασή τους από το κέντρο	72
Εικόνα 34 - Διαμοιρασμός των SF κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με καθορισμένη τιμή κατά την αρχή της προσομοίωσης. a) συνολική έκταση 12000 μ, b) συνολική έκταση 24000 μ	73

Εικόνα 35 - Διαμοιρασμός των SF κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με τυχαία τιμή κατά την αρχή της προσομοίωσης. a) συνολική έκταση 12000 μ, b) συνολική έκταση 24000 μ	74
Εικόνα 36 – Διαμοιρασμός των SF κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με επιλογή SF ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο στην αρχή της προσομοίωσης. a) Συνολική έκταση 12000 μ, b) συνολική έκταση 24000 μ	75
Εικόνα 37– Ποσοστό συγκρούσεων των διαφόρων SF για διαφορετικούς αριθμούς κόμβων	77
Εικόνα 38 – Ποσοστό συγκρούσεων για διάφορα SF σε σχέση με την έκταση του δικτύου	78
Εικόνα 39 – Ποσοστό χαμένων πακέτων για διάφορα μεγέθη έκτασης.	78
Εικόνα 40 - Ποσοστό συγκρούσεων	80
Εικόνα 42 – Ποσοστό μοναδικών πακέτων	81
Εικόνα 43- Συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε από τους κόμβους του συστήματος σε mJ	81

Κατάλογος Ακρωνυμίων

3GPP	
3rd Generation Partnership Project.....	30, 38
ABP	
Activation By Personalization	43, 44, 45
ADR	
Adaptive Data Rate	49, 50, 51, 69, 70, 75, 78, 79
BPSK	
Binary phase - shift keying.....	28, 30, 38
BT	
Bandwidth - Time.....	40
BW	
Bandwidth.....	36, 55, 76
CC	
Cloud Computing.....	20, 21
CF	
Carrier Frequency.....	36, 76
CR	
Coding Rate	36, 55, 56
CRC	
Cyclic Redundancy Check.....	39, 49, 78
CSS	
Chirp Spread Spectrum	31, 32, 38
FEC	
Forward Error Correction.....	32
FFT	
Fast Fourier Transform.....	40
GA	
Genetic Algorithm.....	56, 57
GMSK	
Gaussian Minimum Shift Keying	30, 38
GPRS	
General Packet Radio Service	28
GSM	
Global System for Global System for Mobile communications	27
IoT	
Internet of Things.....	5, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 38, 54, 56, 84, 85, 86, 87
IoV	
Internet of Vehicles.....	23
ISM	
Industrial, Scientific and Medical.....	28, 38, 55
LoRa	
Long Range.....	5, 20, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 49, 57, 58, 61, 62, 66, 76, 84, 85, 86, 87
LPWAN	
Low Power Wide Area Network.....	5, 19, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 38, 52, 84, 86, 87
LTE	
Long Term Evolution	27, 30, 31, 33, 38, 42
MCL	
Maximum Coupling Loss	32, 33, 34
MFSK	

Multiple frequency-shift keying.....	40
MIC	
Message Integrity Code	45, 49
NwkSEncKey	
Network Session Encryption Key.....	45, 46
OTAA	
Over The Air Activation	43, 44, 45
QPSK	
Quadrature phase-shift keying	30, 38
RFID	
Radio Frequency Identification	18, 19, 87
SA	
Simulated Annealing	56, 57
SF	
Spreading Factor	36, 38, 50, 51, 52, 55, 56, 58, 62, 67, 68, 69, 70, 74, 75, 76, 77, 78
SIG	
Special Interest Group.....	29, 38
SNR	
Signal to Noise Ratio	32, 51, 66, 68
SNwkSIntKey	
Serving Network Session Integrity Key	45, 46
TDC	
Transmission Duty Cycle	55, 56
TP	
Transmit Power.....	37, 50, 51
TVWS	
TV White Space	30
WLAN	
Wireless Local Area Network.....	23, 27
WSN	
Wireless Sensor Networks	18, 19, 26

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - MCL και εμβέλεια NB - IoT LoRaWAN [04]	35
Πίνακας 2 - Ρεύματα και καθυστέρηση [04]	35
Πίνακας 3- Κόστος LPWAN [3]	35
Πίνακας 4 - Χαρακτηριστικά Sigfox, LoRa / LoRaWAN, NB - IoT	39
Πίνακας 5 –Μέσες τιμές ρυθμαπόδοσης για ES, SA, GA	58
Πίνακας 6 – Ενεργειακά προφίλ	68
Πίνακας 7 – Αντιστοιχία ισχύς μετάδοσης με την μετρούμενη Ισχύ	69
Πίνακας 8 - Τελικές τιμές SF μετά το τέλος της προσομοίωσης	76
Πίνακας 9 - Απόδοση της iC880A [40]	79

1 Εισαγωγή

1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)

Με τον όρο Διαδίκτυο των Πραγμάτων αναφερόμαστε σε ένα δίκτυο που αποτελείται από συσκευές οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων. Αυτές οι «έξυπνες» συσκευές μπορεί να είναι οποιεσδήποτε ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές που έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω ενός τοπικού δικτύου ή με τη χρήση του διαδικτύου. Κάθε μια από αυτές τις συσκευές αποκαλείται «πράγμα (thing)», και μπορεί να είναι οτιδήποτε από ένα αυτοκίνητο έως ένας αισθητήρας υγρασίας. Στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, κάθε «πράγμα» συνδέεται σε μία πλατφόρμα όπου εκεί συλλέγονται όλα τα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάζονται με την κατάλληλη εφαρμογή η οποία εξυπηρετεί συγκεκριμένες ανάγκες. Έτσι αυτοματοποιούνται επαναλαμβανόμενες, χρονοβόρες ή ακόμα και επικίνδυνες εργασίες. Μερικές από αυτές τις εργασίες μπορεί να αφορούν την ασφάλεια, την παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων, την ιατρική πρόληψη, τις έξυπνες πόλεις, το έξυπνο σπίτι κ.α..

Ο όρος IoT επινοήθηκε από τον Kevin Ashton, βρετανός που δημιούργησε τα πρότυπα συστημάτων Radio Frequency Identification (RFID), όταν τα χρησιμοποίησε για να περιγράψει ένα σύστημα όπου ο φυσικός κόσμος συνδέεται με το διαδίκτυο μέσω αισθητήρων οι οποίοι έχουν τον ρόλο της περισυλλογής και αποστολής των δεδομένων μέσω του διαδικτύου σε διακομιστές [13]. Το RFID είναι μια από τις πρώτες τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στο IoT [15]. Όλες οι συσκευές που συνδέονται σε κάποιο δίκτυο πρέπει να έχουν κάποιο είδος κωδικού. Ο κωδικός αυτός λειτουργεί ως ηλεκτρονική ταυτότητα για τα αντικείμενα και είναι δυνατή η αναγνώριση και η καταγραφή τους από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ο Ashton ήταν υπεύθυνος στα Auto - ID εργαστήρια του MIT το 1999 μέσω των οποίων έγινε γνωστό το IoT το 2003. Τότε διάφορες εταιρίες εστίασαν σε αυτό, αναγνωρίζοντας την σημαντικότητά του και αρχίζοντας τις επενδύσεις πάνω σε μελλοντικές πτυχές [14].

1.2 Τεχνολογίες στο IoT

Για να μπορούν οι συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους στο διαδίκτυο των πραγμάτων είναι απαραίτητες κάποιες βασικές τεχνολογίες όπως το RFID, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN), τα «μεγάλα δεδομένα» ή όπως είναι ευρέως γνωστά ως Big Data, την υπολογιστική νέφους (Cloud Computing) και την υπολογιστική ομίχλης (Fog Computing).

1.2.1 RFID

Το RFID είναι μια αυτόματη τεχνολογία η οποία βοηθά μηχανές ή τους υπολογιστές να εντοπίζουν αντικείμενα και να καταγράφουν δεδομένα μέσω ραδιοκυμάτων. Ένα τυπικό σύστημα RFID αποτελείται από ετικέτες (πομποί) και αναγνώστες (δέκτες). Η ετικέτα είναι ένα microchip, το οποίο συνδέεται με κάποια κεραία και αποτελεί το αναγνωριστικό του συγκεκριμένου αντικειμένου. Ο δέκτης επικοινωνεί με την ετικέτα χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα. Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι η αναγνώριση και η συλλογή δεδομένων γίνεται αυτόματα. Για το λόγο αυτό το RFID αποτέλεσε σημαντική τεχνολογία στα πρώτα χρόνια του IoT [42].

1.2.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)

Το IoT αναπτύχθηκε παράλληλα με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN). Τα WSN αποτελούνται από αυτόνομους αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους για την παρακολούθηση φυσικών ή περιβαλλοντολογικών συνθηκών όπως θερμοκρασία, ήχος, ατμοσφαιρική πίεση κτλ. τα οποία τα μεταφέρουν μέσω του διαδικτύου σε μια τοποθεσία με σκοπό την ανάλυση και την επεξεργασία τους. Τα πιο σύγχρονα δίκτυα είναι ικανά να δέχονται και να στέλνουν πληροφορίες έτσι ώστε να ελέγχονται απομακρυσμένα. Ένα WSN μπορεί γενικά να περιγραφεί ως ένα δίκτυο κόμβων που αντιλαμβάνεται και ελέγχει το περιβάλλον, επιτρέποντας αλληλεπίδραση μεταξύ προσώπων ή υπολογιστών και του περιβάλλοντος [16]. Μεγάλη πρόκληση αποτελεί ο σχεδιασμός των αισθητήρων, οι οποίοι πρέπει να έχουν μικρό μέγεθος και η κατασκευή τους να είναι φθηνή. Στα WSN η εξοικονόμηση ενέργειας είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματική μακροχρόνια χρήση τους. Για αυτό το λόγο τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικά και να μειώνουν τις ενεργειακές σπατάλες και να έχουν ανοχή σε σφάλματα.

Οι εφαρμογές που αφορούν τα WSN επικοινωνούν με ένα τοπικό δίκτυο ή με ένα δίκτυο ευρείας περιοχής. Στην δεύτερη περίπτωση μία πύλη (gateway) λειτουργεί ως μεσολαβητής για να ενώσει τις τελικές συσκευές (αισθητήρες) που συνήθως έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με το άλλο δίκτυο (κάποιον απομακρυσμένο server) όπου εκεί γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που συλλεχθήκαν. Ένα τέτοιο δίκτυο ονομάζεται δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας περιοχής (Low Power Wide Area Network – LPWAN). Τα LPWAN πρωτόκολλα τα οποία υπάρχουν είναι το Sigfox, το Weightless, το NB – IoT, το Ingenu RPMA και το LoRa/LoRaWAN τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.

1.2.3 Big Data

Η τεχνολογία σήμερα οδήγησε στην παράγωγη μεγάλου όγκου δεδομένων από διάφορα μέσα όπως ιστότοποι κοινωνικής δικτύωσης, δίκτυα αισθητήρων, εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης, εταιρίες και επιχειρήσεις, και γενικότερα από την καθημερινή μας χρήση του διαδικτύου τα οποία παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων κατά τη λειτουργία τους. Όλη αυτή η παραγόμενη ποσότητα δεδομένων αποτελούν ένα μεγαλύτερο σύνολο γνωστό ως Big Data [23]. Όμως, ο όγκος του Big Data είναι πολύ μεγάλος και έτσι οι συνηθισμένες μέθοδοι αποθήκευσης και επεξεργασίας δεν είναι αρκετές για να τα επεξεργαστούν σε ένα αποδεκτό χρονικό διάστημα [17].

Το Big Data καθιστά δυνατή την εξαγωγή αναλυτικών στοιχείων και γνώσεων, με τις οποίες μια επιχείρηση μπορεί να επιτύχει ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Για αυτό τον σκοπό υπάρχουν κάποιες πλατφόρμες όπως Apache Hadoop και SciDB που επιτρέπουν την επεξεργασία αυτών των δεδομένων. Αλλά και πάλι αυτό δεν είναι αρκετό για να καλύψει τον μεγάλο όγκο δεδομένων του IoT. Εκτός από τους ισχυρούς εξυπηρετητές στα κέντρα δεδομένων, πολλές από τις έξυπνες συσκευές γύρω μας προσφέρουν υπολογιστικές δυνατότητες ικανές να εκτελούν παράλληλες αναλύσεις των δεδομένων που συλλέγονται συμβάλλοντας και αυτές [17]. Μέσω των Big Data υπάρχει δυνατότητα να παρέχονται αναλύσεις και υπηρεσίες στο IoT χωρίς την να είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιας στοχευόμενης εφαρμογής και αυτό αυξάνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος.

1.2.4 Υπολογιστική νέφους (Cloud Computing)

Τα δεδομένα που συλλέχτηκαν μέσω του Big Data μεταφέρονται σε μια υπηρεσία βασισμένη στο Cloud όπου οι όλες οι πληροφορίες συγκεντρώνονται και παρέχουν πληροφορίες στον τελικό χρήστη [15]. Οι υπολογιστικοί πόροι του Cloud μπορούν να προσεγγιστούν μέσω μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών που συνδέονται στο διαδίκτυο, όπως tablet, φορητές συσκευές και φορητοί υπολογιστές. Πράγμα που σημαίνει ότι η πρόσβαση από κάποιο χρήστη είναι εύκολη καθώς το μόνο που χρειάζεται είναι μία συσκευή με πρόσβαση στο internet [16].

Το Cloud Computing (CC) προσφέρει ένα νέο μηχανισμό διαχείρισης για τα Big Data που επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων και την εξαγωγή πολύτιμων γνώσεων από αυτό. Αλλά για να εφαρμοστεί σε συσκευές IoT υπάρχουν μερικές απαιτήσεις και δυσκολίες όπως:

- Το CC για το IoT απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών νέφους για την παροχή υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο, καθώς οι υπηρεσίες είναι χτισμένες πάνω από διάφορες πλατφόρμες του Cloud.

- Η τυποποίηση CC είναι επίσης σημαντική γιατί οι εφαρμογές που βασίζονται στο cloud πρέπει να δουλεύουν για όλους τους παρόχους.
- Η ασφάλεια των υπηρεσιών IoT που βασίζονται στο cloud παρουσιάζει μια πρόκληση λόγω των διαφορών στους μηχανισμούς ασφαλείας μεταξύ των συσκευών IoT και των πλατφορμών του Cloud.
- Η διαχείριση των συστημάτων CC και IoT είναι επίσης ένας προκλητικός παράγοντας λόγω των διαφορετικών πόρων του κάθε συστήματος.
- Η επικύρωση των υπηρεσιών IoT που βασίζονται στο σύννεφο είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί η παροχή καλών υπηρεσιών που ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των πελατών [17].

1.2.5 Υπολογιστική Ομίχλη (Fog Computing)

Η Υπολογιστική Ομίχλη επεκτείνει την Υπολογιστική Νέφος με σκοπό να είναι πιο κοντά στις συσκευές που λειτουργούν και παράγουν δεδομένα IoT. Η Υπολογιστική Ομίχλη αποτελείται από συσκευές που ονομάζονται Κόμβοι Ομίχλης (Fog Nodes) οι οποίες παρέχουν υπηρεσίες Cloud στις συσκευές IoT. Μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε υπάρχει σύνδεση δικτύου όπως σε πάτωμα εργοστασίου, σε κάποια κολώνα ρεύματος, σε ένα όχημα, κατά μήκος μιας σιδηροδρομικής γραμμής κτλ. Κάθε συσκευή με υπολογιστικές ικανότητες, αποθηκευτικό χώρο και σύνδεση στο διαδίκτυο μπορεί να είναι ένας κόμβος ομίχλης.

Πλεονεκτήματα της Υπολογιστικής Ομίχλης είναι:

- Μεγαλύτερη ευελιξία στις επιχειρήσεις: Με τα κατάλληλα εργαλεία, οι προγραμματιστές μπορούν γρήγορα να αναπτύξουν εφαρμογές ομίχλης και να τις χρησιμοποιήσουν όπου χρειάζεται. Οι κατασκευαστές μηχανημάτων μπορούν να προσφέρουν ένα μηχάνημα προγραμματισμένο στις ανάγκες του κάθε πελάτη.
- Καλύτερη ασφάλεια: Οι Κόμβοι ομίχλης μπορούν να προστατεύονται με τους ίδιους ελέγχους και πολιτικές προστασίας που εφαρμόζονται και στα υπόλοιπα συστήματα τα οποία χρησιμοποιεί ο εκάστοτε χρήστης.
- Έλεγχος απορρήτου: Τα ευαίσθητα δεδομένα αναλύονται τοπικά πριν σταλούν στο «σύννεφο» για ανάλυση.
- Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος: Καθώς επιλεγμένα δεδομένα επεξεργάζονται τοπικά γίνεται εξοικονόμηση στο εύρος ζώνης του δικτύου.

Αναλύοντας τα δεδομένα κοντά στο σημείο όπου συλλέγονται μειώνεται η καθυστέρηση, η κίνηση του κύριου δικτύου και διατηρεί τα ευαίσθητα δεδομένα εντός του δικτύου [18]. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι συνήθως υπάρχει σημαντική διαφορά κλίμακας μεταξύ της ομίχλης και του νέφους. Το σύννεφο έχει τεράστιες δυνατότητες επεξεργασίας, αποθήκευσης και επικοινωνίας σε σύγκριση με την ομίχλη [17].

Για να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη της υπολογιστικής ομίχλης αναπτύσσονται εφαρμογές για τους κόμβους ομίχλης με σκοπό να αποστέλλουν τα δεδομένα που συλλέχτηκαν από τις IoT συσκευές στον κατάλληλο προορισμό για ανάλυση και επεξεργασία ανάλογα με τον τύπο τους. Τα ευαίσθητα δεδομένα αναλύονται στο κόμβο ομίχλης που είναι κοντά εκεί όπου παράγονται και έτσι εντοπίζονται και αποτρέπονται πιθανά λάθη και προβλήματα [18]. Τα δεδομένα που μπορούν να περιμένουν μέχρι κάποια λεπτά, μεταδίδονται σε κάποιο κόμβο συγκέντρωσης με σκοπό να αναλυθούν και να γίνει κάποια ενέργεια. Στη συνέχεια αποστέλλονται στο σύννεφο για ανάλυση Big Data και μακροπρόθεσμη αποθήκευση [18].

1.3 Εφαρμογές που χρησιμοποιείτε το IoT

Το IoT παρέχει πολλές δυνατότητες και προκλήσεις για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Οι εφαρμογές του IoT μπορεί να είναι οτιδήποτε καθώς προσαρμόζονται συνεχώς στις ανάγκες των χρηστών και στις νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται συνεχώς. Οι εφαρμογές έχουν σκοπό την διευκόλυνση της καθημερινής ζωής ή/και την μεγιστοποίηση του κέρδους. Παρακάτω αναφέρονται κάποια παραδείγματα εφαρμογών.

1.3.1 Μεταφορές / Logistics

Με την χρήση του IoT στις μεταφορές δεν βελτιώνεται μόνο η μεταφορά των προϊόντων/ υλικών από το ένα σημείο στο άλλο, αλλά και η παρακολούθησή τους κατά διαδρομή, καθώς και τον αυτόματο προσδιορισμό των εμπορευμάτων έτσι ώστε να αποθηκευτούν κατάλληλα και αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.

Το IoT αναμένεται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού μέσω της ευφυούς κίνησης του φορτίου. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω του συνεχούς συγχρονισμού των πληροφοριών της αλυσίδας εφοδιασμού και της απρόσκοπτης ανίχνευσης και ανίχνευσης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Θα καταστήσει την αλυσίδα εφοδιασμού διαφανή, ορατή και ελεγχόμενη, επιτρέποντας την έξυπνη επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων και φορτίου / αγαθών [19].

1.3.2 Έξυπνη μεταφορά και αυτοκινητοβιομηχανία

Στο διαδίκτυο των πραγμάτων το συνδεδεμένο όχημα είναι το καλύτερο παράδειγμα για τις εφαρμογές του IoT στις αυτοκινητοβιομηχανίες [16].

Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία IoT έχουμε συνδέσει αυτοκίνητα μεταξύ τους, εμφανίστηκαν αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα και έξυπνα συστήματα μεταφοράς. Είναι δυνατό να αποτραπούν ατυχήματα και να σωθούν ανθρώπινες ζωές, να μειωθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση και να ελαχιστοποιηθούν η επιπτώσεις του οχήματος στο περιβάλλον [16].

Αυτό πραγματοποιείται μετατρέποντας τα οχήματα σε ασύρματα router ή σε κινητούς κόμβους έτσι ώστε να συνδέονται μεταξύ τους και να δημιουργούν ένα δίκτυο μεγάλης εμβέλειας. Ο τρόπος αυτός είναι γνωστός ως VANET όμως η κάλυψη και ο αριθμός των οχημάτων που συμμετέχουν είναι περιορισμένος και αυτό επιβαρύνεται από τα χαρακτηριστικά των μεγάλων πόλεων. Για το λόγο αυτό γίνεται αλλαγή στο Internet of Vehicles (IoV). Το IoV χρησιμοποιεί τους αισθητήρες των αυτοκινήτων, που συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον, άλλα οχήματα και από τον οδηγό και όλα αυτά συμβάλουν σε για την ασφαλέστερη πλοήγηση, διαχείριση κυκλοφορίας και έλεγχο της ρύπανσης. Τα οχήματα επικοινωνούν μεταξύ τους, συλλέγουν πληροφορίες από τον δρόμο, από πεζούς και από τους αισθητήρες που διαθέτουν. Έτσι δημιουργείτε ένα σύστημα με έξυπνες συσκευές. Για να συνδεθούν μεταξύ τους τα οχήματα χρησιμοποιούν WLAN, Bluetooth, Wi - Fi ή 5G. Τέλος συνδυάζει τα παραπάνω για πάρει αποφάσεις σχετικά με όλες τις πιθανότητες των κινδύνου που μπορεί να προκύψουν. Το IoV είναι μια νέα τεχνολογία στην αυτοκινητοβιομηχανία που αναμένεται να συμβάλει στην οδική ασφάλεια [44].

1.3.3 Έξυπνη πόλη

Η έξυπνη πόλη καλύπτει μια μεγάλη ποικιλία περιπτώσεων χρήσης, από τη διαχείριση της κυκλοφορίας μέχρι την διανομή νερού, τη διαχείριση αποβλήτων, την αστική ασφάλεια και την παρακολούθηση του περιβάλλοντος [15]. Το IoT χρησιμοποιεί το διαδίκτυο για την ενσωμάτωση των διάφορων συσκευών μεταξύ τους. Για να επιτευχτεί αυτός ο σκοπός πρέπει όλες οι συσκευές να έχουν πρόσβαση στο internet. Οι κύριες εφαρμογές για μια έξυπνη πόλη είναι:

- Έξυπνα σπίτια, τα οποία θα παρακολουθούνται μέσω των δεδομένων που παράγονται από αισθητήρες.
- Έξυπνες θέσεις στάθμευσης, η άφιξη και η αναχώρηση των οχημάτων μπορεί να εντοπιστεί για τους διάφορους χώρους στάθμευσης της πόλης.
- Συστήματα για τον καιρό και το νερό, μπορούν να χρησιμοποιήσουν αισθητήρες για να παρέχουν κατάλληλες πληροφορίες όπως θερμοκρασία, βροχή, ταχύτητα ανέμου και πίεση συμβάλλοντας στην ενίσχυση της αποδοτικότητας των έξυπνων πόλεων.
- Σύστημα παρακολούθησης της κυκλοφορίας οχημάτων, όπου εφαρμόζοντας την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από οι πολίτες και η κυβέρνηση μπορεί να επωφεληθεί. Επίσης χρησιμοποιώντας τα

στοιχεία αυτά είναι ευκολότερο να καθοριστεί η ώρα άφιξης σε έναν προορισμό.

- Παρακολούθηση μόλυνσης του περιβάλλοντος, με σκοπό την ενημέρωση των πολιτών.
- Συστήματα επιτήρησης, όπου η πόλη παρακολουθείτε συνεχώς με σκοπό την ασφάλεια των πολιτών της. Ωστόσο, η ανάλυση των δεδομένων και η ανίχνευση εγκλημάτων είναι πολύ δύσκολη [43].

1.3.4 Ηλεκτρονική υγεία

Ο έλεγχος και η πρόληψη είναι δύο από τους κύριους στόχους της μελλοντικής υγειονομικής περίθαλψης. Η ανίχνευση του ιστορικού των ανθρώπων είναι μια άλλη πτυχή που καθιστά την ηλεκτρονική υγεία που βασίζεται στο IoT πολύ ευέλικτη. Στον τομέα αυτό, το IoT κάνει την ανθρώπινη αλληλεπίδραση πολύ πιο αποτελεσματική, διότι επιτρέπει όχι μόνο την διάγνωση, αλλά και την παρακολούθηση των ασθενών. Η παροχή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση ενός ασθενούς καθιστά την όλη διαδικασία πιο αποτελεσματική. Οι σημαντικότεροι ενδιαφερόμενοι σε αυτό το σενάριο θα είναι δημόσια και ιδιωτικά νοσοκομεία [18].

Οι εφαρμογές για το IoT είναι πάρα πολλές. Το κάθε ένα από τα παραπάνω παραδείγματα μπορεί να επεκταθεί σε πιο εξειδικευμένους τομείς όπως για παράδειγμα την παρακολούθηση και μετριάσμός των διατροφικών διαταραχών, όπου ασθενείς με Parkinson να μπορούν να τρώνε με ευκολία. Σε αυτό το σενάριο, ένα γάντι μπορεί να εξοπλιστεί με μικροσκοπικούς δονητικούς κινητήρες MEMS για να εξουδετερώσει την αστάθεια της κίνησης των χεριών που καταγράφεται από τα επιταχυνσιόμετρα. Σε αυτή την εφαρμογή, οι αισθητήρες επιταχυνσιομέτρου και οι κινητήρες δόνησης πρέπει να επικοινωνούν με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση για την επίτευξη της απαιτούμενης λειτουργικότητας [17].

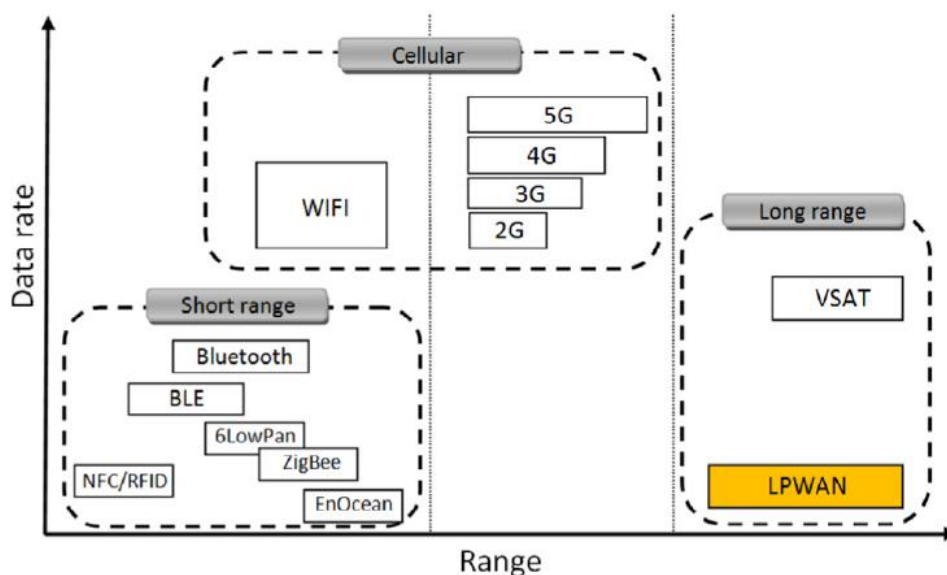
2 Δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας περιοχής – LPWAN

Οι απαιτήσεις των εφαρμογών IoT οδήγησαν στην εμφάνιση μίας νέας κατηγορίας δικτύων ασύρματης μετάδοσης, τα οποία έχουν την δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η κατηγορία είναι γνωστή με το όνομα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας περιοχής (Low Power Wide Area Network – LPWAN). Οι άλλες χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες μικρής εμβέλειας (π.χ. ZigBee, Bluetooth) δεν είναι κατάλληλες για σενάρια που απαιτούν μετάδοση μεγάλης εμβέλειας και οι επιλογές που βασίζονται σε κυψελοειδής επικοινωνίες (π.χ. 2G, 3G, 4G) μπορεί να καλύπτουν μεγάλη εμβέλεια αλλά σπαταλούν πολύ ενέργεια από την συσκευή [2]. Το LPWAN βρίσκει συνεχώς νέες εφαρμογές καθώς η αγορά και η τεχνολογία εξελίσσεται. Στις μεταφορές, για παράδειγμα, μπορούμε να παρακολουθούμε την κίνηση των μεγάλων οχημάτων (φορτηγά, πλοία, κ.α.) μέσω των κυψελοειδών δικτύων, αλλά όχι και τα στοιχεία μικρότερης αξίας όπως είναι αποσκευές και φορτίο. Με τα LPWAN δίνεται η ικανότητα να γίνονται περιοδικές μεταδώσεις της τοποθεσίας και της κατάστασης του οχήματος και να ελέγχεται η κατάσταση του φορτίου, καθώς απαιτούν χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Επίσης τα LPWAN μπορούν να βρουν χρησιμότητα και στις έξυπνες πόλεις στο οτιδήποτε, κάνοντας την στάθμευση των αυτοκινήτων ευκολότερη, μέχρι την καταγραφή του αστικού θορύβου, του επιπέδου ρύπανσης και της πυκνότητας του πληθυσμού [25].

2.1 Πρωτόκολλα LPWAN

Πολλές εφαρμογές που αφορούν το IoT απαιτούν τις συσκευές να είναι απλές, να έχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας, και να επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα σε μεγάλες αποστάσεις. Τα LPWAN είναι σχεδιασμένα για εφαρμογές και αισθητήρες που στέλνουν μικρό όγκο δεδομένων, σε μεγάλες αποστάσεις κάθε μερικές ώρες ή μερικές φορές την ώρα στοχεύοντας έτσι στην εξοικονόμηση ενέργειας, σε αντίθεση με τα 3G/4G ή Wi - Fi τα οποία έχουν ως σκοπό τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης [1]. Τα LPWANs έχουν προσελκύσει σημαντική προσοχή από την ερευνητική κοινότητα και τη βιομηχανία ως ισχυρές λύσεις για την ικανοποίηση των απαιτήσεων διαφόρων εφαρμογών IoT. Αν και ο όρος LPWAN είναι σχετικά νέος, οι σχεδιαστικοί στόχοι αυτής της τεχνολογίας έχουν επιδιωχθεί για αρκετό καιρό υπό διαφορετικούς όρους, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) και το IoT [21]. Οι τερματικές συσκευές στα IoT δίκτυα λειτουργούν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων με μπαταρία. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να σχεδιαστούν με ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να έχουν μεγάλη αυτονομία και να καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή. Τα LPWAN μπορούν να καλύψουν 10 – 40 χλμ. σε αγροτικές περιοχές και 1 – 5 χλμ σε αστικές περιοχές.

Οι εφαρμογές IoT λειτουργούν παραδοσιακά σε ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας, π.χ. ZigBee, Bluetooth και Z - Wave ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), π.χ. Wi - Fi και κυψελοειδή δίκτυα, π.χ. το παγκόσμιο σύστημα για κινητές επικοινωνίες (GSM) και μακροπρόθεσμη εξέλιξη (5G) [21]. Στην **εικόνα 1** φαίνεται πως οι LPWAN τεχνολογίες μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τις υπόλοιπες υπάρχουσες, μεταδίδοντας μικρό μέγεθος δεδομένων. Τέτοιες τεχνολογίες που υπάρχουν στην αγορά είναι SigFox, Weightless, NB - IoT και το LoRaWAN.



Εικόνα 1 - Απαιτούμενο BW σε σύγκριση με την απόσταση των διάφορων τεχνολογιών [2]

Οι τεχνολογίες LPWAN εξακολουθούν να είναι σε πρώιμο στάδιο, ενώ μερικές ακόμη αναπτύσσονται (π.χ. 5G, NB - IoT, LTE Cat M1, Weightless - P), μερικές έχουν μόνο την δυνατότητα για μηνύματα ανερχόμενης ζεύξης (π.χ. SigFox, Weightless - N). Οι υπάρχουσες τεχνολογίες LPWAN δημιουργούν ορισμένες προκλήσεις όσον αφορά τον περιορισμό του φάσματος, τη συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες, την κινητικότητα, την επεκτασιμότητα, την κάλυψη, την ασφάλεια και τις απαιτήσεις που παρουσιάζει η κάθε εφαρμογή, όπως οι ταχύτητες δεδομένων και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο [22].

2.2 Τα LPWAN σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες

Πριν από το LPWAN, πολλές εμπορικές εφαρμογές IoT εκτελούνταν σε δίκτυα GPRS. Η τεχνολογία GPRS αναφέρεται συνήθως ως κινητή επικοινωνία "2.5G" το οποίο ακολουθήθηκε από τις 3G και 4G και στοχεύουν σε υψηλές ταχύτητες δεδομένων ανά συσκευή ή σε ελάχιστη καθυστέρηση, προκειμένου να υποστηρίξουν υψηλής ποιότητας μετάδοση φωνής, εικόνας, και βίντεο. Οι τερματικές συσκευές στα LPWAN αναμένεται

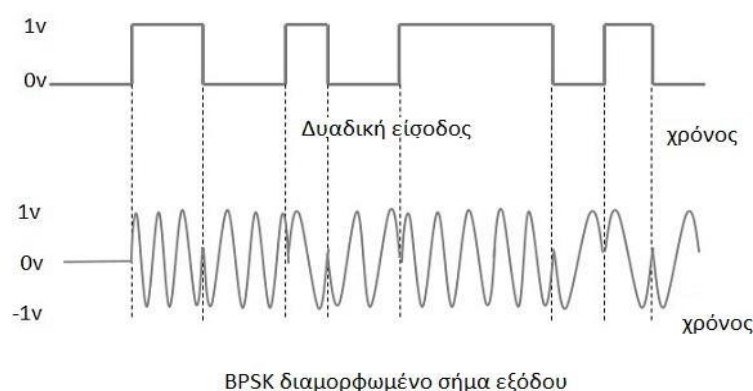
να έχουν το ένα δέκατο της κατανάλωσης ενέργειας και μια βελτίωση της τάξης των 20 dB σε σχέση με τα δίκτυα GPRS. Επιπλέον, η χωρητικότητα των δικτύων GPRS περιορίζεται από τα κανάλια επικοινωνίας, ενώ τα δίκτυα NB - IoT και LoRa έχουν βελτιστοποιήσει τη χρήση του καναλιού, προκειμένου να επεκτείνουν τις δυνατότητες σύνδεσης με χαμηλότερες ταχύτητες δεδομένων [1].

Για συνδέσεις μεταξύ προσωπικών συσκευών, το ZigBee και το Wi - Fi έχουν κυριαρχήσει στην τρέχουσα αγορά IoT. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και επιδόσεις. Το Wi - Fi επωφελείται από υψηλό ρυθμό δεδομένων και την χαμηλή καθυστέρηση, αλλά η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του ZigBee. Το ZigBee έχει σχεδιαστεί για έργα μικρής κλίμακας που χρειάζονται ασύρματες συνδέσεις και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δικτύων προσωπικής περιοχής με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, όπως για οικιακό αυτοματισμό, συλλογή δεδομένων ιατρικών συσκευών και άλλων σεναρίων χαμηλής κατανάλωσης δεδομένων και χαμηλής ταχύτητας. Τα LPWAN μπορεί να παρέχει πολύ μεγαλύτερη απόσταση κάλυψης και μεγαλύτερη δυνατότητα σύνδεσης για τα δίκτυα IoT [1].

2.3 Sigfox

Η Sigfox είναι μια διαχειρίστρια δικτύου IoT που παρέχει σημείο προς σημείο επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Επεκτείνεται σε παγκόσμιο επίπεδο σε συνεργασία με άλλους παρόχους δικτύου. Η Sigfox για να λαμβάνει δεδομένα από τις συνδεδεμένες συσκευές έχει εγκαταστήσει κεραιές. Οι μεταδώσεις χρησιμοποιούν τις ελεύθερες Βιομηχανικές, Επιστημονικές και Ιατρικές (Industrial, Scientific and Medical - ISM) ζώνες συχνοτήτων (915 MHz για την Αμερική, 868 MHz για την Ευρώπη) και συνδέουν τα σήματα στο server με ένα IP δίκτυο. Για να μεταδοθεί το σήμα από της συσκευές στους σταθμούς βάσης χρησιμοποιείτε δυαδική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Binary phase - shift keying - BPSK) (εικόνα 2) σε εξαιρετικά στενή ζώνη (100 Hz) στις μπάντες των sub - GHz. Με τη χρήση της εξαιρετικά στενής ζώνης, η Sigfox χρησιμοποιεί αποτελεσματικά το εύρος ζώνης συχνοτήτων και έχει πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου, οδηγώντας σε πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλή ευαισθησία του δέκτη και κεραία χαμηλού κόστους με αντάλλαγμα τη μέγιστη απόδοση μόνο 100 bps. Ο αριθμός των μηνυμάτων μέσω της ανερχόμενης ζεύξης περιορίζεται σε 140 μηνύματα την ημέρα. Το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου για κάθε μήνυμα ανερχόμενης ζεύξης είναι 12 byte και παραμένει στον αέρα κατά μέσω όρο 2 δευτερόλεπτα. Ωστόσο, ο αριθμός των μηνυμάτων στην κατερχόμενη ζεύξη περιορίζεται σε τέσσερα μηνύματα την ημέρα, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υποστηρίζεται η αναγνώριση κάθε μηνύματος ανερχόμενης ζεύξης. Το μέγιστο μήκος ωφέλιμου φορτίου για κάθε μήνυμα κατερχόμενης ζεύξης είναι οκτώ byte. Χωρίς την επαρκή υποστήριξη των αναγνώρισεων, η αξιοπιστία της επικοινωνίας ανερχόμενης ζεύξης διασφαλίζεται χρησιμοποιώντας ποικιλία χρόνου και συχνότητας καθώς και διπλότυπο μετάδοσης. Κάθε μήνυμα τελικής συσκευής μεταδίδεται πολλές φορές (τρεις από προεπιλογή) σε διαφορετικά κανάλια συχνότητας.

Για το σκοπό αυτό, στην Ευρώπη, για παράδειγμα, η ζώνη μεταξύ 868.180 MHz και 868.220 MHz χωρίζεται σε 400 κανάλια των 100 Hz (μεταξύ των οποίων 40 κανάλια διατηρούνται και δεν χρησιμοποιούνται). Καθώς οι σταθμοί βάσης μπορούν να λαμβάνουν ταυτόχρονα μηνύματα σε όλα τα κανάλια, η τερματική συσκευή μπορεί να επιλέξει τυχαία ένα κανάλι συχνότητας για να μεταδώσει τα μηνύματά τους. Αυτό απλοποιεί τον σχεδιασμό της τερματικής συσκευής και μειώνει το κόστος του. Το πρωτόκολλο του Sigfox μειώνει το μέγεθος πλαισίου του σήματος και δεν χρειάζεται συγχρονισμό με το δίκτυο. Η χαμηλή στάθμη των εκπομπών και η μικρή διάρκεια της εκπομπής (λιγότερο από ένα λεπτό την ημέρα) επιτρέπει στις συσκευές μέγιστη αυτονομία [2][9].



Εικόνα 2 - BPSK διαμόρφωση

2.4 Weightless

Η τεχνολογία αυτή παρέχει ασύρματη επικοινωνία για LPWAN δίκτυα, και είναι σχεδιασμένη για το IoT. Είναι επίσης και το όνομα του οργανισμού, Weightless Special Interest Group (SIG). Το weightless μπορεί να λειτουργήσει τόσο στο sub - 1 GHz ελεύθερο φάσμα, όσο και στο αδειοδοτημένο. Ο weightless SIG προσφέρει 3 διαφορετικά πρωτόκολλα: Weightless - N, Weightless - W, και το Weightless - P, τα οποία χρησιμοποιούνται για διαφορετικές περιπτώσεις.

Το Weightless - W λειτουργεί στο αχρησιμοποίητο φάσμα που διατίθεται για την τηλεόραση (TV White Space - TVWS), του οποίου οι κανονισμοί αλλάζουν ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας και έτσι το εύρος εκπομπής διαφοροποιείται μεταξύ 400 MHz και 800 MHz. Η χρήση του TVWS για το IoT έχει δυσκολίες καθώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιοχές λόγω των περιορισμών που ισχύουν στην καθεμία. Επίσης οι τερματικές συσκευές είναι κατασκευασμένες να λειτουργούν σε ένα μικρό εύρος του φάσματος και είναι αδύνατο να χτιστεί μια μικρή κεραία που μπορεί να πάει οπουδήποτε από 400 mHz έως 800 mHz.

Το Weightless – N είναι παρόμοιο με το Sigfox, διαμορφώνει το σήμα με BPSK και χρησιμοποιεί frequency hopping για να μειώσει τις παρεμβολές, αλλά αντί να είναι κλειστό σύστημα αποτελείται από ένα δίκτυο συνεργατών. Παρέχει κρυπτογράφηση AES – 128 bit και υποστηρίζει κινητικότητα.

Το Weightless - P προσφέρει χαρακτηριστικά αμφίδρομης επικοινωνίας και καλό επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών. Λειτουργεί σε κανάλι συχνότητας 12,5 kHz και χρησιμοποιεί GMSK ή QPSK διαμόρφωση. Το Weightless – P είναι ιδανικό για ιδιωτικά δίκτυα, όπου είναι αναγκαίος ο έλεγχος των uplink και των downlink δεδομένων. Δεν είναι κατάλληλο για δίκτυα ευρείας περιοχής.

Η περιοχή κάλυψης του Weightless - N και του Weightless – W είναι περίπου πέντε χιλιόμετρα σε αστικό περιβάλλον ενώ το Weightless-P μπορεί να καλύψει περίπου δύο χιλιόμετρα [35].

2.5 Narrow band Internet of Things (NB-IoT)

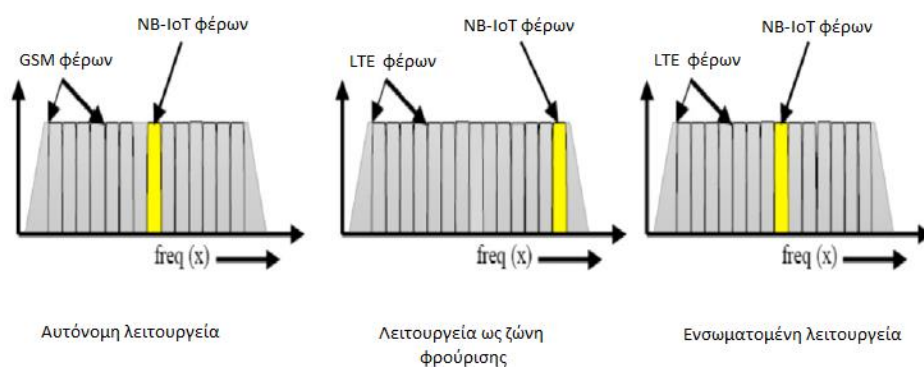
Το Narrow Band Internet of Things (NB-IoT), είναι μια από τις LPWAN τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Είναι βασισμένο στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) την οποία εφαρμόζεται για την ασύρματη δικτύωση και την επικοινωνία κινητών συσκευών μεταξύ τους με υψηλές ταχύτητες και χρησιμοποιεί τις ίδιες μη ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων. Αναπτύσσεται από έναν όμιλο συνεργασίας μεταξύ τηλεπικοινωνιακών οργανισμών ανά τον κόσμο, τον 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Ο 3GPP εισήγαγε στην αγορά το NB-IoT, το οποίο επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων με χαμηλό ρυθμό, την μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, χαμηλό κόστος των συσκευών του και επέκταση της εμβέλειας κάλυψης όπου οι εφαρμογές δεν επηρεάζονται από την καθυστέρηση των δεδομένων.

Το NB-IoT απαιτεί ένα ελάχιστο εύρος ζώνης στα 180 kHz, έχοντας αυτό ως ελάχιστη απαίτηση φάσματος αναπτύσσεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας:

- A. Ως αυτόνομο φέρων σήμα
- B. Ως ενσωματωμένο σε κάποιο άλλο LTE σήμα
- C. Ως ενσωματωμένο στην ζώνη φρούρησης (guard band) κάποιου LTE σήματος [3].

Οι τρεις παραπάνω λειτουργίες φαίνονται στην [εικόνα 3](#). Για να απλουστευθεί η μορφή του πρωτοκόλλου, και να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το κόστος των συσκευών, αφαιρούνται πολλά από χαρακτηριστικά του LTE όπως η διαδικασία αλλαγής σε άλλο κανάλι μετάδοσης, οι μετρήσεις που αφορούν την παρακολούθηση ποιότητας του καναλιού και του Carrier Aggregation μιας τεχνικής που εφαρμόζεται από το LTE έτσι ώστε να επιτευχθούν οι υψηλές ταχύτητες δεδομένων στο 4G και της διπλής

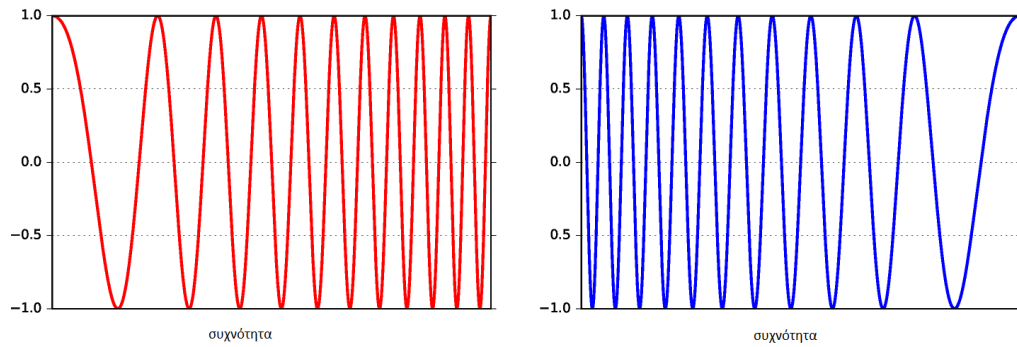
συνδεσιμότητας (Dual Connectivity). Το NB-IoT χρησιμοποιεί τις ίδιες μη ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων, που είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιεί το LTE. [4]



Εικόνα 3 - Λειτουργίες NB-IoT [05].

2.6 LoRa (Long Range)

Το LoRa είναι μια συντομογραφία των λέξεων «Long Range», «Μεγάλη Εμβέλεια», προωθείται και αναπτύσσεται από την Semtech και την LoRa Alliance. Χρησιμοποιεί τεχνολογία ασύρματης διαμόρφωσης σήματος, γνωστή ως Chirp Spread Spectrum (CSS) [6]. Ένα chirp είναι ένα σήμα όπου η συχνότητα αυξάνεται (up - chirp) ή μειώνεται (down - chirp) με το χρόνο (εικόνα 4). Το πρωτόκολλο LoRa αναφέρεται στο φυσικό επίπεδο [7]. Στις ψηφιακές επικοινωνίες, το CSS είναι μια τεχνική εξάπλωσης φάσματος που χρησιμοποιεί ευρυζωνικές γραμμικές συχνότητες που διαμορφώνονται με συχνότητα για να κωδικοποιήσουν τις πληροφορίες. Με τον όρο εξάπλωση φάσματος εννοούμε τις μεθόδους με τις οποίες ένα σήμα διασκορπίζεται σκόπιμα στην περιοχή συχνοτήτων, με αποτέλεσμα ένα σήμα με μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Με την τεχνική αυτή εξασφαλίζεται η καλύτερη ποιότητα του σήματος και καλύτερη επικοινωνία μεταξύ συσκευών, αυξάνοντας την αντίσταση σε φυσικές παρεμβολές, σε θόρυβο [3].



Εικόνα 4 -up - chirp (αριστερά), down - chirp (δεξιά) [25]

Το LoRa επιτρέπει τις συσκευές να μεταδίδουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις καταναλώνοντας ελάχιστη ενέργεια, αφού το χρησιμοποιούν συσκευές οι οποίες λειτουργούν με μπαταρία. Λειτουργεί στις ελεύθερες συχνότητες έτσι ώστε δεν χρειάζεται άδεια από την πολιτεία για να γίνει η μετάδοση. Ελεύθερες μπάντες συχνοτήτων είναι 868 MHz για την Ευρώπη, 915 MHz για τη Νότια Αμερική, 433 MHz για την Ασία [3]. Η τεχνολογία LoRa είναι κατάλληλη για κάλυψη αποκεντρωμένων περιοχών, και για δημιουργία ιδιωτικών δικτύων με συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας και ασφάλειας.

Η τεχνολογία αυτή έκανε σημαντικές βελτιώσεις στην ήδη υπάρχουσα για να επιτύχει το σκοπό της. Μία από αυτές είναι ίδια η μορφοποίηση CSS που χρησιμοποιεί το LoRa, η οποία κωδικοποιεί τα δεδομένα προς αποστολή αυξομειώνοντας την συχνότητα σε ευρυζωνικούς γραμμικούς παλμούς και συμπεριλαμβάνει ολοκληρωμένη διόρθωση σφαλμάτων προώθησης (Forward Error Correction - FEC) [8].

Συμφώνα με το θεώρημα Shannon – Hartley η αύξηση στο εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης είναι ένας τρόπος ώστε να ξεπεραστεί η κακή αναλογία σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR). Η CSS, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ραντάρ από τη δεκαετία το 1940, επιλέχθηκε για την ικανότητά της στην υποβάθμιση του καναλιού όπως η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών και το φαινόμενο Doppler. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η LoRa να έχει μεγίστη απώλεια σύζευξης (Maximum Coupling Loss - MCL) 148 dB, 20 dB μεγαλύτερη από αυτή των ήδη υπάρχοντων επικοινωνιών sub - GHz προκειμένου να επεκταθεί η απόσταση κάλυψης σε χιλιόμετρα και να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου [1].

Η άλλη βελτίωση του πρωτοκόλλου LoRa είναι η προσαρμογή του να λειτουργεί σε αισθητήρες με περιορισμένους πόρους ενέργειας, επειδή η κίνηση κατά το uplink είναι

στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μεγαλύτερη από το downlink στα IoT δίκτυα. Η LoRa έχει ορίσει τρεις διαφορετικούς τύπους μετάδοσης των δεδομένων για διαφορετικά σενάρια, τα οποία αναλύονται σε παρακάτω ενότητα. Επιπλέον η τεχνολογία LoRa έχει κρυπτογράφηση AES - 128 δεδομένων με ζεύγος κλειδιών για την ασφάλεια του καναλιού [1].

2.7 Σύγκριση τεχνολογιών LPWAN

Στα LPWAN κατατάσσονται αρκετές τεχνολογίες, μεταξύ αυτών το LoRa, το Sigfox και το NB-IoT αποτελούν τρεις από τις πιο σημαντικές. Τα δύο πρώτα μπορούν να προσφέρουν επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας τις ελεύθερες ISM μπάντες, ενώ το τρίτο μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα υπηρεσιών. Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια σύντομη σύγκριση αυτών των τεχνολογιών.

Το Sigfox και το LoRa χρησιμοποιούν το ελεύθερο φάσμα συχνοτήτων και πρωτόκολλα ασύγχρονης επικοινωνίας. Μπορούν να αγνοούν τις παρεμβολές και δεν επηρεάζονται από την εξασθένιση σήματος. Το sigfox μπορεί να καλύψει μια πόλη με έναν σταθμό βάσης (έκταση μεγαλύτερη των 40 χλμ). Το LoRa μπορεί να εξυπηρετήσει μικρότερη έκταση απ' ό τι το Sigfox (< 20 χλμ). Το NB-IoT έχει την μικρότερη εμβέλεια από τις τρεις τεχνολογίες (< 10 χλμ). Το LoRa και το sigfox έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις με έναν σταθμό βάσης. Το NB-IoT περιορίζεται σε σταθμούς βάσης 4G / LTE και αυτό το κάνει δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε αγροτικές περιοχές της επαρχίας όπου δεν υπάρχει κάλυψη. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του LoRaWAN είναι η ευελιξία του. Το LoRaWAN μπορεί να έχει μεγαλύτερη κάλυψη από ένα NB - IoT δίκτυο. Η μέγιστη απώλεια ζεύξης (Maximum Coupling Loss - MCL), είναι η οριακή απώλεια που μπορεί να έχει μια ζεύξη έτσι ώστε να μπορεί να υφίσταται μία υπηρεσία, πράγμα που σημαίνει ότι καθορίζει την εμβέλεια της υπηρεσίας. Στον [πίνακα 1](#) φαίνονται η εμβέλεια και η MCL και των δύο [3] [7].

Παρά τις βελτιώσεις και τις τεχνολογίες που φέρει το LoRa η ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχει είναι μικρότερη από αυτήν του NB-IoT. Το NB-IoT χρησιμοποιεί δανειοδοτημένο φάσμα και το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί είναι βελτιστοποιημένο έτσι ώστε να παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Αλλά αυτό έρχεται εις βάρος του κόστους, καθώς οι άδειες για αυτό το φάσμα στις δημοπρασίες φτάνουν και τα 500 εκατομμύρια δολάρια ανά MHz. Λόγο αυτού, το NB-IoT το επιλέγουν εφαρμογές που χρειάζονται υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, ενώ οι υπόλοιπες προτιμούν το LoRa [7].

Πίνακας 1 - MCL και εμβέλεια NB - IoT LoRaWAN [04]

	Uplink MCL	Downlink MCL	εμβέλεια
LoRaWAN	165 dB	165 dB	<15 km
NB-IoT	145–169 dB	151 dB	<35 km

Στο LoRaWAN οι συσκευές μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής για όσο χρονικό διάστημα είναι απαραίτητο από την εφαρμογή για τι είναι βασισμένο σε ασύγχρονο αλγόριθμο. Στο NB-IoT γίνεται συγχρονισμός και έτσι οι συσκευές καταναλώνουν επιπλέον μπαταρία. Οι διαδικασίες της πολυπλεξίας και της πρόσβασης του καναλιού απαιτούν περισσότερο ρεύμα για τον πομπό. Από αυτά φαίνεται ότι η διάρκεια της μπαταρίας της συσκευής NB-IoT είναι μικρότερη αυτή των συσκευών που βασίζονται στο LoRa. Από την άλλη πλευρά, αυτές οι απαιτήσεις προσφέρουν στο NB-IoT το πλεονέκτημα της χαμηλής καθυστέρησης και των υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Επομένως για τις εφαρμογές που δεν επηρεάζονται από καθυστέρηση και δεν στέλνουν μεγάλο όγκο δεδομένων το LoRa είναι η καλύτερη επιλογή. Για τις εφαρμογές που χρειάζεται χαμηλή καθυστέρηση και υψηλός όγκος δεδομένων το NB-IoT είναι καλύτερη επιλογή. Στον [πίνακα 2](#) φαίνονται τα ρεύματα και η καθυστέρηση για τις δύο τεχνολογίες

Πίνακας 2 - Ρεύματα και καθυστέρηση [04]

	Μέγιστο ρεύμα	Ρεύμα κατάστασης αναμονής	Καθυστέρηση
LoRa/LoRaWAN	32 mA	1 μ A	Δεν επηρεάζεται
NB-IoT	120/130mA	5 μ A	<10 s

Ακόμα μια σημαντική διαφορά είναι ότι το LoRa είναι πιο ευέλικτο. Προσφέρει την ικανότητα να αναπτυχθεί ως τοπικό δίκτυο, δηλαδή LAN που χρησιμοποιεί πύλες LoRa, ή ως δημόσιο δίκτυο μέσω των σταθμών βάσης.

Τέλος στον [πίνακα 3](#) φαίνεται το αντίστοιχο κόστος για την κάθε μία τεχνολογία.

Πίνακας 3- Κόστος LPWAN [3]

	Κόστος φάσματος	Κόστος ανάπτυξης	Κόστος τερματικής συσκευής
Sigfox	Δωρεάν	>4000€/σταθμό βάσης	<2€
LoRa	Δωρεάν	>100€/πύλη >1000€/σταθμό βάσης	3 – 5€
NB-IoT	>500 εκ.€/MHz	>15000€/σταθμό βάσης	>20€

3 LoRa παράμετροι φυσικού επιπέδου

Το LoRa έχει παραμέτρους διαμόρφωσης, τη φέρουσα συχνότητα (Carrier Frequency), τον παράγοντα εξάπλωσης (Spreading Factor), το εύρος ζώνης (Bandwidth), ρυθμό κωδικοποίησης (Coding Rate) και την ισχύ μετάδοσης (Transmission Power). Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών διαφορετικά μεταδιδόμενων σημάτων στο ίδιο κανάλι συχνότητας, και επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και την ακτίνα μετάδοσης.

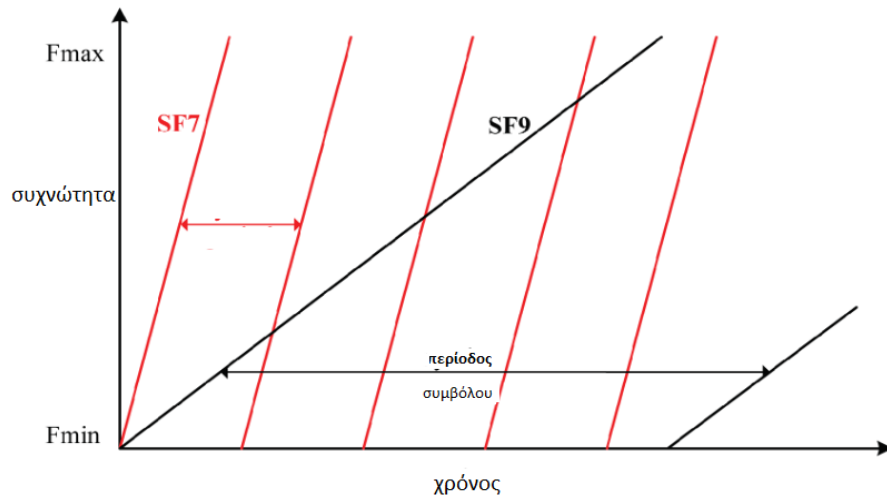
Η φέρουσα συχνότητα (CF) είναι η κεντρική συχνότητα της ζώνης μετάδοσης. Μπορεί να τροποποιηθεί μεταξύ 137 MHz και 1020 MHz, με βήμα 61 Hz. Ανάλογα με το LoRa chirp το εύρος αυτό μπορεί να περιοριστεί μεταξύ 860 MHz και 1020 MHz [9].

Ο παράγοντας εξάπλωσης (SF) είναι ο αριθμός των chirps αν σύμβολο και παίρνει τιμές από 7 μέχρι 12. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο παράγοντας τόσο πιο εύκολο είναι για τον δέκτη να απομακρύνει θόρυβο από το σήμα, έτσι οι μεγαλύτερες τιμές του SF είναι καταλληλότερες για μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις. Παρόλα αυτά το πακέτο χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να μεταδοθεί [10]. Όπως φαίνεται στην [εικόνα 5](#) η συχνότητα φτάνει την μέγιστη τιμή της σε λιγότερο χρόνο για τις μικρότερες τιμές SF.

Το εύρος ζώνης (BW) αντιπροσωπεύει το εύρος συχνοτήτων στη ζώνη μετάδοσης. Στο LoRa οι συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ των 7,8 kHz και των 500 kHz. Παρόλα αυτά οι πιο δημοφιλείς είναι 125 kHz, 250 kHz και 500 kHz. Για τις πιο γρήγορες μεταδόσεις χρησιμοποιείτε η τιμή των 500 kHz, ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις επιλέγεται τιμή στα 125 kHz. Το εύρος ζώνης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας της διαμόρφωσης LoRa. Ένα μεγάλο εύρος ζώνης επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με λιγότερο χρόνο παραμονής του μηνύματος στον αέρα και χαμηλότερη ευαισθησία· αντιθέτως χαμηλότερο BW προσφέρει υψηλότερη ευαισθησία αλλά χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων. Ένα σύμβολο LoRa αποτελείται από 2^{SF} chirps που καταλαμβάνουν ολόκληρη την ζώνη συχνοτήτων. Ξεκινά με μια σειρά από ανοδικά chirps. Όταν επιτευχθεί η μέγιστη συχνότητα, τότε μειώνεται και ξεκινά ξανά από την ελάχιστη συχνότητα. Στην [εικόνα 6](#) παρουσιάζεται η διακύμανση της συχνότητας σε σχέση με τον χρόνο μίας μετάδοσης LoRa. Η περιοχή με τις ασυνέχειες είναι εκεί όπου κωδικοποιούνται τα δεδομένα. Το preamble αποτελεί ένα είδος επικεφαλίδας και επιτρέπει στον δέκτη να αποκτήσει το σήμα και να συγχρονιστεί με τον πομπό [20] [21].

Ο ρυθμός κωδικοποίησης (CR) είναι η παράμετρος που καθορίζει τον μηχανισμό διόρθωσης σφάλματος, προσθέτοντας επιπλέον πληροφορία στο μήνυμα. $CR = \frac{4}{4+n}$, $n \in \{1, 2, 3, 4\}$. Κάθε τέσσερα χρήσιμα bits κωδικοποιούνται από 5, 6, 7 ή 8 bits μετάδοσης. Η τιμή $\frac{4}{4+1}$ είναι η καλύτερη επιλογή αν το σήμα είναι αδύναμο. Όσο μικρότερος είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης, τόσο υψηλότερος είναι ο χρόνος στον αέρα για τη μετάδοση δεδομένων [21] [22].

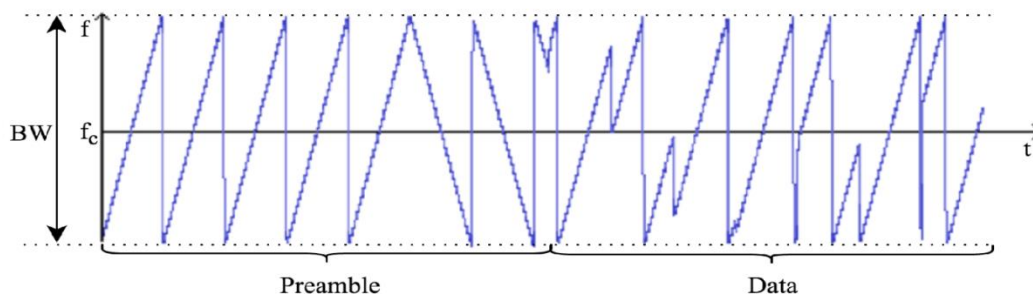
Η Ισχύς Μετάδοσης (Transmission Power - TP) στο LoRa διαμορφώνεται από -4 dBm έως 20 dBm με βήμα 1 dB. Στην Ευρώπη η νομοθεσία περιορίζει την ισχύ στα 14 dBm (εκτός από τη ζώνη των 869.4 - 869.65 όπου το όριο είναι 500 mW) [08].



Εικόνα 5 - Διαφορά μεταξύ SF [25]

Η επόμενη εξίσωση επιτρέπει σε κάποιον να υπολογίσει την ρυθμαπόδοση (R_b) [10].

$$R_b = \frac{SF * BW}{2^{SF}} * CR \frac{bits}{s}$$



Εικόνα 6 - LoRa chirp σε σχέση με το χρόνο

Στο LoRa, ο ρυθμός chirp εξαρτάται μόνο από το εύρος ζώνης. Αυτό έχει πολλές συνέπειες στη διαμόρφωση: μια αύξηση του παράγοντα εξάπλωσης διαιρεί το εύρος συχνότητας που μπορεί να καλύψει ένα chirp κατά 2 (αφού 2^{SF} chirp καλύπτουν ολόκληρο το εύρος) και διπλασιάζει την διάρκεια του συμβόλου. Παρόλα αυτά δεν πρόκειται να διαιρέσει το ρυθμό των bit κατά 2 καθώς ένα επιπλέον bit μεταδίδεται σε κάθε σύμβολο. Επιπλέον, η αναλογία των συμβόλων και η αναλογία των δυαδικών ψηφίων σε ένα συγκεκριμένο παράγοντα εξάπλωσης είναι ανάλογα του εύρους ζώνης

συχνοτήτων, οπότε ο διπλασιασμός του εύρους ζώνης θα διπλασιάσει αποτελεσματικά τον ρυθμό μετάδοσης. Η παρακάτω εξίσωση συνδέει την διάρκεια ενός συμβόλου (T_s) με το εύρος ζώνης και τον SF [11].

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

Τέλος στον παρακάτω πίνακα (πίνακα 4) παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά για τις LPWAN τεχνολογίες

Πίνακας 4 - Χαρακτηριστικά Sigfox, LoRa / LoRaWAN, NB - IoT

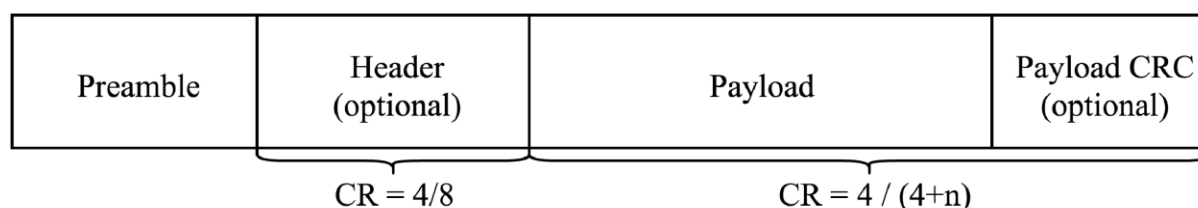
	SigFox	LoRa / LoRaWAN	NB - IoT	Weightless
Κωδικοποίηση	BPSK	CSS	QPSK	GMSK, QPSK, BPSK (P)
Εύρος ζώνης	100 Hz	250 kHz και 125 kHz	200 kHz	400 - 800 mHz (M) 12.5 kHz (P)
Συχνότητα	Ελεύθερες ISM ζώνες συχνοτήτων (868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 433 MHz στην Ασία)	Ελεύθερες ISM ζώνες συχνοτήτων (868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 433 MHz στην Ασία)	Συχνότητες LTE (απαιτείτε άδεια χρήσης)	Ελεύθερες ISM ζώνες συχνοτήτων (868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και 433 MHz στην Ασία) και συχνότητες LTE (απαιτείτε άδεια χρήσης)
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	100 bps	50 kbps	200 kbps	100kbps
Έκταση κάλυψης	10 χλμ (αστικό περιβάλλον), 40 χλμ (αγροτικό περιβάλλον)	5 χλμ (αστικό περιβάλλον), 20 χλμ (αγροτικό περιβάλλον)	1 χλμ (αστικό περιβάλλον), 10 χλμ (αγροτικό περιβάλλον)	5 χλμ (N,M) (αστικό περιβάλλον) 2 χλμ (P)
Τυποποίηση	Η εταιρεία Sigfox συνεργάζεται με την ETSI για την τυποποίηση του δικτύου	LoRa - Alliance	3GPP	SIG

3.1 Πακέτα LoRa

Το κάθε πακέτο LoRa ξεκινά με ένα preamble το οποίο χρησιμοποιείτε για να συγχρονιστεί ο δέκτης με τον πομπό. Το preamble ξεκινά με σταθερά up - chirp καλύπτοντας ολόκληρη τη ζώνη συχνοτήτων. Τα τελευταία δύο up - chirps κωδικοποιούν τη λέξη συγχρονισμού. Η λέξη συγχρονισμού είναι μια μοναδική τιμή που χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση των δικτύων LoRa που χρησιμοποιούν τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων. Μια συσκευή σταματά την ακρόαση ενός σήματος αν η λέξη συγχρονισμού δεν ταυτίζεται με την δική της. Η λέξη συγχρονισμού ακολουθείται από δύο και ένα τέταρτο down - chirps για διάρκεια 2,25 συμβόλων. Η συνολική διάρκεια αυτού του preamble μπορεί να οριστεί από 10,25 έως και 65.539,25 σύμβολα [11].

Αμέσως μετά ακολουθεί, προαιρετικά, μια επικεφαλίδα όπου υπάρχουν καταγεγραμμένες πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος του πακέτου και πληροφορίες σχετικά με την διαμόρφωση LoRa. Η επικεφαλίδα κωδικοποιείται πάντα με $CR = \frac{4}{8}$, αυτό υποδεικνύει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου (σε bytes), ενώ στο φορτίο ο ρυθμός κωδικοποίησης μπορεί να διαφέρει. Το header επιπλέον περιλαμβάνει ένα κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check - CRC), μια τεχνική ανίχνευσης σφαλμάτων κατά τη διάρκεια μετάδοσης ή αποθήκευσης δεδομένων, για να μπορεί ο δέκτης να απορρίπτει πακέτα με μη έγκυρες επικεφαλίδες. Το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου αποθηκεύεται χρησιμοποιώντας ένα byte, περιορίζοντας το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου σε 255 bytes. Η επικεφαλίδα μπορεί να παραληφτεί όταν το μήκος του ωφέλιμου φορτίου η ταχύτητα κωδικοποίησης και η παρουσία CRC είναι γνωστά εκ των προτέρων [11].

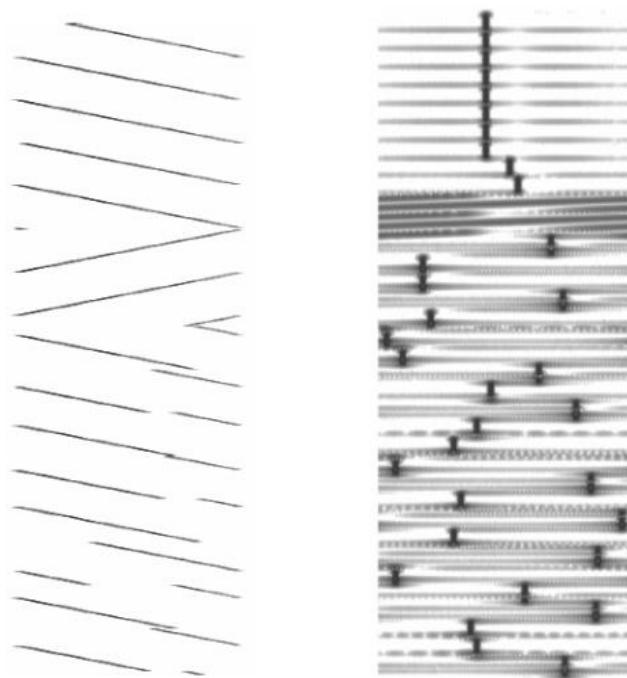
Έπειτα ακολουθεί το ωφέλιμο φορτίο. Στο τέλος του πακέτου προστίθεται προαιρετικά ένας CRC [11]. Στην εικόνα 7 φαίνεται η δομή ενός πακέτου LoRa.



Εικόνα 7 - Δομή πακέτου LoRa [11]

Στην εικόνα 8 φαίνεται το φάσμα της μετάδοσης ενός πακέτου LoRa: στην αρχή εμφανίζονται τα up - chirp που αποτελούν το preamble, στη συνέχεια ακολουθεί η κωδικοποίηση των δεδομένων. Ο Matt Knight και ο Balint Seeber από την Bastille Networks πρότειναν μία διαδικασία αποκωδικοποίησης [34], που συνιστά πρώτα να γίνει dechirp (αποδιαμόρφωση) του σήματος, πολλαπλασιάζοντας το με τον συζυγή του και

στην συνέχεια εφαρμόζοντας γρήγορους μετασχηματισμούς Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) στο αποτέλεσμα, πλέον μπορούμε να υπολογίζουμε το σήμα σαν να έχει διαμορφωθεί με MFSK [34].



Εικόνα 8 - αριστερά, LoRa Chirp , άξονας x: Συχνότητα , άξονας y: χρόνος δεξιά αναδιαμορφωμένο σήμα [34]

3.2 Βασικές Ιδιότητες LoRa

Η Semtech στο έγγραφο που έχει δημοσιεύσει όπου αναγράφει βασικά στοιχεία για την διαμόρφωση LoRa αναφέρει τις βασικές ιδιότητες του LoRa οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

- Κλιμακωτό εύρος ζώνης. Στην διαμόρφωση LoRa το εύρος ζώνης και η συχνότητα μπορεί να κλιμακωθούν. Για αυτό τον λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές διακύμανσης συχνότητας στενής ζώνης (frequency hopping), και για ευρείας ζώνης συνεχούς ακολουθίας (direct sequence). Σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες το LoRa μπορεί να προσαρμοστεί και στους δύο τρόπους λειτουργίας με απλές αλλαγές.
- Χαμηλή κατανάλωση Ενέργειας. Λόγω του κέρδους επεξεργασίας που σχετίζεται με το LoRa, η ισχύς που καταναλώνει ο πομπός μπορεί να μειωθεί σε σύγκριση με αυτήν που ισχύει για επικοινωνίες που χρησιμοποιούν FSK ενώ διατηρείται ο ίδιος ή καλύτερος προϋπολογισμός ζεύξης.
- Υψηλή ανθεκτικότητα. Το LoRa είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στις παρεμβολές εξαιτίας του υψηλού bandwidth - time ($BT > 1$) και της ασύγχρονης φύσης του

σήματος. Η περίοδος συμβόλου του LoRa είναι μεγαλύτερη από την τυπική την τυπική περίοδο του άλλων τεχνολογιών, παρέχει προστασία στις παρεμβολές AM.

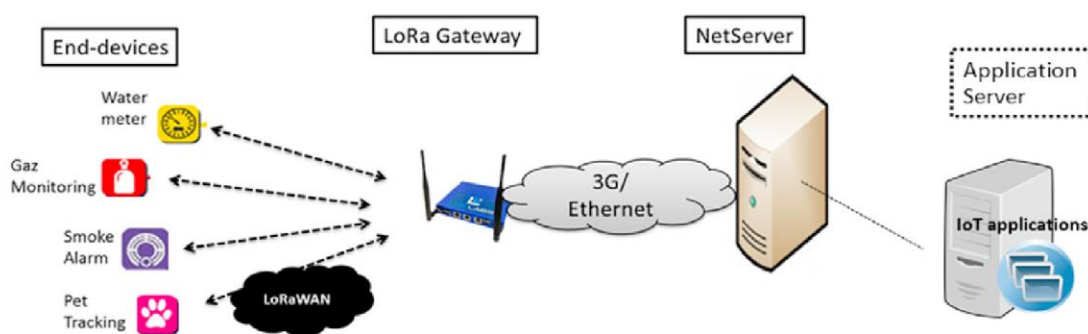
- Χαμηλότερη εξασθένιση. Λόγο του ευρυζωνικού παλμού είναι ανθεκτικό κατά της εξασθένισης του σήματος καθιστώντας την ιδανική για χρήση σε αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα.
- Δυνατότητα για μεγάλες αποστάσεις. Για σταθερή ισχύ εξόδου και ταχύτητα μεταφοράς της πληροφορίας, το LoRa έχει βελτιωμένο link budget. Σε συνδυασμό με τις άλλες ιδιότητές του, βελτιώνει την περιοχή κάλυψης μέχρι και τέσσερις φορές, 5 χλμ σε αστικό περιβάλλον και περισσότερα από 10 σε αγροτικό περιβάλλον [30].

4 LoRaWAN

Με τον όρο LoRaWAN αναφερόμαστε στο πρωτόκολλο επικοινωνίας και στην αρχιτεκτονική του συστήματος. Είναι το μόνο πρωτόκολλο επιπέδου MAC που δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιεί το φυσικό επίπεδο LoRa. Είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί κυρίως με δίκτυα αισθητήρων, όπου αυτοί ανταλλάσσουν πακέτα με τον network server με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης μεταξύ των οποίων μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα (μια μετάδοση την ώρα ή ακόμα μια μετάδοση κάθε μερικές μέρες).

4.1 Δίκτυο LoRaWAN

Χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική αστέρα [12], με πύλες (Gateways) για να μεταδώσει μηνύματα μεταξύ των τελικών συσκευών (end devices) και το κεντρικό δίκτυο. Σε ένα LoRaWAN δίκτυο ο κάθε τελικός κόμβος δεν είναι συνδεδεμένος με μία συγκεκριμένη πύλη (gateway), αλλά τα δεδομένα που αποστέλλονται λαμβάνονται από όλες τις γειτονικές πύλες. Η κάθε πύλη προωθεί το πακέτο, μέσω κάποιας σύνδεσης (LTE δίκτυα, Ethernet, Wi - Fi), σε έναν διακομιστή δικτύου (network server) μέσω IP σύνδεσης [10]. Αυτός έχει την ικανότητα να ελέγχει την ασφάλεια, να αποστέλλει επιβεβαιώσεις στην τερματική συσκευή και να αποστέλλει μηνύματα στον αντίστοιχο διακομιστή εφαρμογών. Αργότερα σύμφωνα με τις προδιαγραφές του LoRaWAN v1.1 στον διακομιστή του δικτύου εισήχθησαν οι “home”, “forwarding” και “serving” διακομιστές με σκοπό επιτραπεί η περιαγωγή των συσκευών σε μεγαλύτερη κλίμακα μέχρι και σε παγκόσμιο επίπεδο [33]. Η αρχιτεκτονική του δικτύου φαίνεται στην [εικόνα 9](#). Περαιτέρω, το LoRaWAN για τον γεωγραφικό εντοπισμό των τελικών συσκευών χρησιμοποιεί πολλαπλές λήψεις του ίδιου μηνύματος από διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Για το σκοπό αυτό, η διαφορά ώρας κατά την άφιξη του μηνύματος όπου βασίζεται η τεχνική εντοπισμού απαιτεί τον ακριβή συγχρονισμό των τερματικών συσκευών.



Εικόνα 9 -Αρχιτεκτονική LoRaWAN [12]

4.2 Ενεργοποίηση της συσκευής και Ασφάλεια

Κάθε συσκευή ενεργοποιείται όταν συνδέεται σε ένα LoRaWAN δίκτυο. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για να γίνει αυτό: Ενεργοποίηση με Εξατομίκευση (Activation By Personalization - ABP) και Ενεργοποίηση Μέσω του Αέρα (Over The Air Activation - OTAA). Οι σχεδιαστές των συσκευών μπορούν να επιλέξουν μεταξύ αυτών των μεθόδων. Οι συσκευές λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο ανεξάρτητος την μεθόδου ενεργοποίησης τους [27].

Όπως και στις υπόλοιπες εφαρμογές έτσι και στο LoRaWAN η ασφάλεια είναι απαραίτητη. Περιλαμβάνει ως επί το πλείστο κρυπτογραφικούς μηχανισμούς και έχει σχεδιαστεί να συμβαδίζει με τα στάνταρ του πρωτοκόλλου, να είναι εύκολη η υλοποίηση της, να έχει χαμηλό κόστος και μεγάλη επεκτασιμότητα. Επίσης εφόσον οι συσκευές θα λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα πρέπει να είναι μελλοντικά βιώσιμη. Οι βασικές ιδιότητες που υποστηρίζονται είναι: αμοιβαία πιστοποίηση ταυτότητας, προστασία ακεραιότητας και εμπιστευτικότητα. Ο αμοιβαίος έλεγχος ταυτότητας δημιουργείται μεταξύ μιας τελικής συσκευής και του δικτύου ως μέρος της διαδικασίας σύνδεσης στο δίκτυο. Αυτό εξασφαλίζει ότι μόνο εγκεκριμένες συσκευές θα συνδεθούν σε κάποιο συγκεκριμένο δίκτυο. Το κάθε LoRaWAN μήνυμα λαμβάνεται από την πύλη και τον network server μια μόνο φορά, είναι κρυπτογραφημένο, και είναι γνωστό από ποιόν κόμβο προέρχεται. Όλα τα παραπάνω μαζί εξασφαλίζουν ότι το μήνυμα έχει ληφθεί σωστά στον προορισμό του και ότι δεν έχει αλλοιωθεί από κάποιον τρίτο [31].

4.2.1 Ενεργοποίηση με εξατομίκευση (Activation by Personalization - ABP)

Οι ABP συσκευές διαθέτουν όλα τα αναγνωριστικά της συσκευής και τα κλειδιά κρυπτογράφησης αποθηκευμένα στην μνήμη και έχουν τοποθετηθεί χειροκίνητα στον server του δικτύου. Οι συσκευές αυτές δεν πραγματοποιούν κάποια χειραγία για να γίνει η σύνδεση απλά μπορούν να αρχίσουν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν μηνύματα αμέσως μετά την ενεργοποίηση. Για τον λόγο αυτό δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζουμε πότε μια συσκευή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο. Αν μία τέτοια βγει εκτός λειτουργίας (από εξάντληση της μπαταρίας) οι μετρητές πακέτων που υπάρχουν σε κάθε συσκευή μηδενίζονται, και πρέπει να υπάρχουν σε κάποια άλλη μνήμη. Όταν η συσκευή επανέρθει, ο server θα αγνοήσει τα μηνύματα της συσκευής μέχρι οι μετρητές των πακέτων να είναι μεγαλύτεροι ή ίσοι με τις τιμές που αναμένει. Σε αυτή την περίπτωση για να αποκατασταθεί η σύνδεση αντικαθιστούνται οι μετρητές στον εξυπηρετητή [27].

4.2.2 Ενεργοποίηση μέσω του αέρα (Over the Air Activation - OTAA)

Οι συσκευές OTAA εκτελούν μια χειραψία με το διακομιστή για να συμμετάσχουν στο δίκτυο. Μετά τη σύνδεση, οι συσκευές συμπεριφέρονται ακριβώς όπως οι συσκευές ABP. Οι διαφορές εμφανίζονται σε καταστάσεις διακοπής ρεύματος [27].

Η τελική συσκευή ξεκινά τη διαδικασία σύνδεσης με την αποστολή ενός μηνύματος Join - Request στο διακομιστή δικτύου με τα απαιτούμενα κλειδιά κρυπτογράφησης. Εάν τα κλειδιά είναι σωστά, ο διακομιστής δικτύου θα απαντήσει με ένα μήνυμα Join - Accept το οποίο περιέχει τα πραγματικά κλειδιά κρυπτογράφησης. Λαμβάνοντας αυτό το μήνυμα, η τελική συσκευή γνωρίζει ότι η σύνδεση με τον server έχει πραγματοποιηθεί. Για το λόγο αυτό κατά τις προδιαγραφές της έκδοσης 1.1 προστέθηκε ένας “Join Server” ο οποίος καθιστά την σύνδεση ασφαλέστερη. Οι μετρητές των πακέτων στη συσκευή και στον διακομιστή έχουν συγχρονιστεί.

4.3 Ασφάλεια

Για να γίνεται η ενεργοποίηση και η σύνδεση των κόμβων στο δίκτυο με ασφάλεια χρησιμοποιούνται κάποια αναγνωριστικά κλειδιά:

- JoinEUI, ενσωματώνεται στις τελικές συσκευές κατά την κατασκευή τους. Χρησιμοποιείται κατά την διαδικασία Join της συσκευής και μόνο για την OTAA.
- DevEUI, είναι αναγνωριστικό των τερματικών συσκευών το οποίο αναγράφεται στην ετικέτα της συσκευής από τον κατασκευαστή (το αναγνωριστικό είναι μοναδικό για την κάθε συσκευή και πρέπει να φυλάσσεται). Στην OTAA το αναγνωριστικό αυτό είναι απαραίτητο, αλλά ενώ συνιστάται και για την ABP.
- AppKey και NwkKey, είναι τα βασικά κλειδιά του AES-128, από όπου παράγονται τα κλειδιά συνεδρίας (Session keys). Τα κλειδιά αυτά είναι συγκεκριμένα για κάθε κόμβο και ενσωματώνονται στις συσκευές κατά την κατασκευή τους. Είναι απαραίτητα για την OTAA, αλλά όχι για την ABP. Αυτά τα κλειδιά πρέπει να αποθηκεύονται με ασφαλή τρόπο στο υλικό (hardware – secure).
- AppSKey, είναι το κλειδί συνεδρίας που χρησιμοποιείται μεταξύ μιας τελικής συσκευής και του διακομιστή. Δημιουργείται από το βασικό κλειδί του AppKey. Αυτό το κλειδί χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση / αποκρυπτογράφηση των ωφέλιμων φορτίων.

Από το βασικό κλειδί NwkKey, δημιουργούνται αρκετά lifetime κλειδιά και κλειδιά συνεδρίας (Session keys) [33]. Στην [εικόνα 10](#) φαίνεται η κατανομή των κλειδιών στο δίκτυο.

4.3.1 Κλειδιά συνεδρίας - Session keys

Για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των μηνυμάτων που μεταδίδονται από τους διακομιστές δικτύου, εφαρμόζεται ένας κωδικός ακεραιότητας μηνυμάτων (Message Integrity Code - MIC) σε όλα τα μηνύματα ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Σε κάθε συσκευή του δικτύου αντιστοιχεί ένα κλειδί συνεδρίας τα οποία συμπληρώνουν τα NwkKey και JoinEUI. Αυτά τα κλειδιά είναι τα παρακάτω:

- Forwarding Network Session Integrity Key (FNwkSIntKey), είναι ένα session key για τις τελικές συσκευές που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του MIC των μηνυμάτων ανερχόμενης ζεύξης. Το κλειδί αυτό είναι δημόσιο και μπορεί να μοιράζεται με τον διακομιστή του δικτύου.
- Serving Network Session Integrity Key (SNwkSIntKey), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του MIC των μηνυμάτων κατερχόμενης ζεύξης στις τελικές συσκευές. Το κλειδί αυτό είναι ιδιωτικό και δεν πρέπει να μοιράζεται με τον διακομιστή του δικτύου.
- Network Session Encryption Key (NwkSEncKey), χρησιμοποιείται για κρυπτογράφηση / αποκρυπτογράφηση των εντολών επιπέδου MAC (ωφέλιμο φορτίο). Το NwkSEncKey θα πρέπει επίσης να φυλάσσεται μυστικό από τους ξένους, αποθηκευόντάς το με ασφαλή τρόπο [33].

4.3.2 Κλειδιά Lifetime Join Session

Τα Join Session κλειδιά χρησιμοποιούνται για να επανασυνδέονται οι συσκευές στο δίκτυο σε περίπτωση αποσύνδεσης. Κατά την παραγωγή τους εκτός από το βασικό κλειδί NwkKey, χρησιμοποιείται και το DevEUI. Αυτά τα κλειδιά απαιτούνται από την OTAA και όχι από την ABP [33].

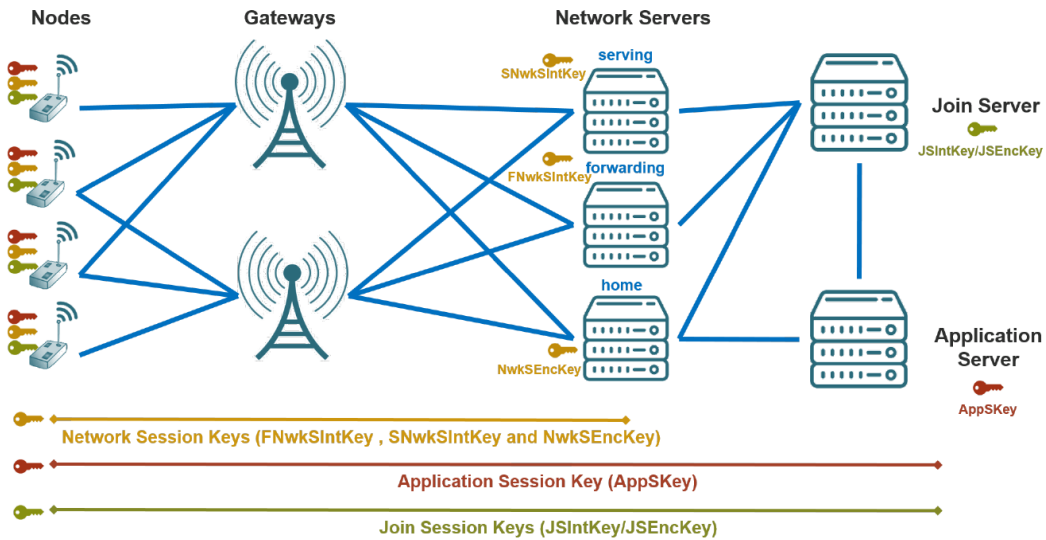
- Session Integrity Key (SIntKey), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του MIC των μηνυμάτων αιτήματος επανασύνδεσης και των σχετικών απαντήσεων του Join Accept.
- Joining Session Encryption Key (JSEncKey), χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση των μηνυμάτων Join Accept που απαντάνε τα μηνύματα αίτησης επανασύνδεσης (Rejoin Request) [33].

4.3.3 Παράμετροι

Μετά την ενεργοποίηση όλες οι συσκευές πρέπει να έχουν αυτά τα στοιχεία:

- Διεύθυνση συσκευής DevAddr, αυτή η παράμετρος κατανέμεται από τον εξυπηρετητή του δικτύου.

- Τα κλειδιά συνεδρίας (session), FNwkSIntKey , SNwkSIntKey και NwkSEncKey
- Το κλειδί της εφαρμογής AppSKey.



Εικόνα 10 - Κατανομή των κλειδιών σε ολόκληρο το δίκτυο [33]

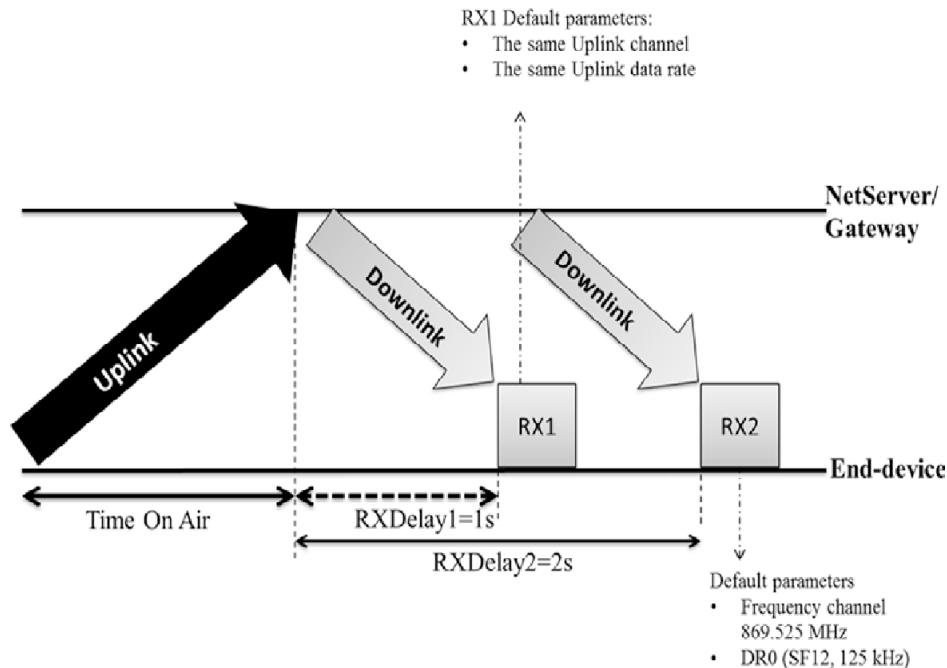
4.4 Μετάδοση δεδομένων

Για να καλυφθούν οι διάφορες απαιτήσεις των LoRaWAN συστημάτων που αφορούν, την ανταλλαγή δεδομένων, την αυτονομία και την κατανάλωση ενέργειας των τελικών συσκευών, είναι προκαθορισμένες να λειτουργούν σύμφωνα με μια από τις τρεις κατηγορίες (κλάσεις A, B ή Γ). Οι συσκευές όλων των κατηγοριών στέλνουν μηνύματα στον διακομιστή με τον ίδιο τρόπο αλλά λαμβάνουν με διαφορετικό. Παρακάτω παρουσιάζονται οι λειτουργίες τους και οι διαφορές μεταξύ τους.

4.4.1 Κλάση A

Οι συσκευές σε αυτήν την κλάση είναι αμφίδρομες (εικόνα 11) και αποτελούν την βασική κλάση για κάθε τερματική συσκευή. Οι συσκευές αυτές επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία όπου σε κάθε συσκευή μετά από κάθε μετάδοση (uplink) υπάρχουν δύο σύντομες περιόδους όπου η συσκευή αναμένει να λάβει κάποιο μήνυμα. Οι μεταδόσεις, στις συσκευές αυτές, προγραμματίζονται ανάλογα με τις ανάγκες της του κάθε δικτύου. Οι συσκευές αυτές καταναλώνουν την χαμηλότερη ενέργεια και από τις τρεις κλάσεις και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστο downlink μετά την αποστολή κάποιου πακέτου. Τα downlink μηνύματα πρέπει να περιμένουν το επόμενο μήνυμα ανερχόμενης ζεύξης (uplink). Όπως φαίνεται στην εικόνα 11 μόλις η συσκευή

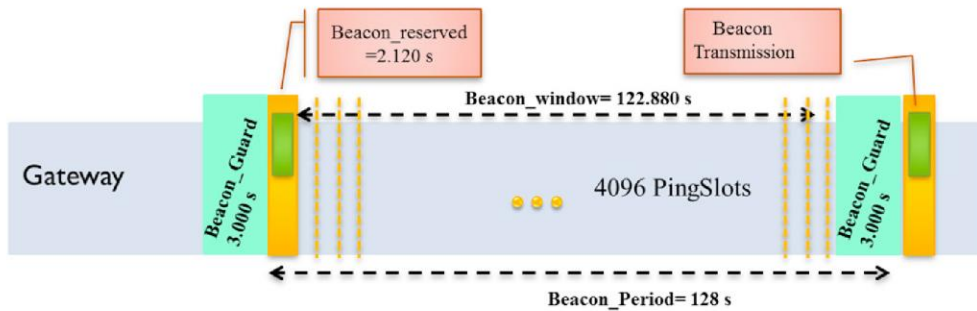
μεταδώσει περιμένει για ένα χρονικό διάστημα $RXDelay1$, και κατά το πέρας του χρόνου αυτού λαμβάνει τα μηνύματα κατερχόμενης ζεύξης (downlink) αν υπάρχουν. Διαφορετικά περιμένει λίγο περισσότερο $RXDelay2$ και ελέγχει αν της έχουν αποσταλεί δεδομένα για να παραλάβει. Για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη 863 – 870 MHz τα προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ($RXDelay1$, $RXDelay2$) για την αναμονή της λήψης είναι ένα και δύο δευτερόλεπτα αντίστοιχα. Αμέσως μετά η συσκευή απενεργοποιείται μέχρις ότου μεταδώσει ξανά.



Εικόνα 11- Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ συσκευής και σταθμού βάσης για LoRaWAN κλάση A [12]

4.4.2 Κλάση B

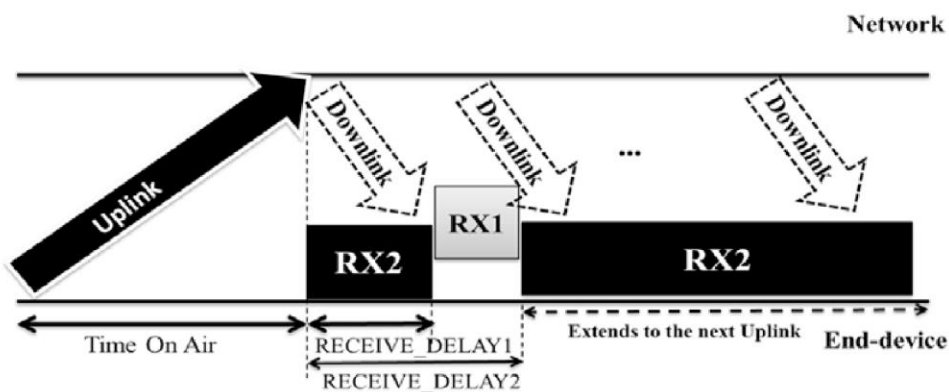
Η κλάση B αποτελείται από αμφίδρομες τερματικές συσκευές με προγραμματισμένες περιόδους λήψης (εικόνα 12). Χρησιμοποιούνται από συσκευές που απαιτούν συχνό downlink. Η γενική διαδικασία βασίζεται σε μια περιοδική μετάδοση εκπομπής μηνυμάτων beacon από την πύλη σε σταθερό κανάλι downlink. Οι συσκευές αυτής της κλάσης πέρα από τα παράθυρα παραλαβής των συσκευών της κλάσης A, ανοίγουν και επιπλέον παράθυρα σε προγραμματισμένο χρόνο. Κάθε περίοδος beacon χωρίζεται σε ένα σύνολο από slots που κατανέμονται μεταξύ των τελικών συσκευών ως ευκαιρίες λήψης για downlink. Για να ενεργοποιηθούν οι συσκευές την προγραμματισμένη ώρα λαμβάνουν από τον σταθμό βάσης ένα μήνυμα συγχρονισμού. Αυτό επιτρέπει τον διακομιστή του δικτύου να γνωρίζει ποιες χρονικές στιγμές "ακούει" κάθε συσκευή.



Εικόνα 12- Χρονοδιάγραμμα κλάσης B [12]

4.4.3 Κλάση Γ

Τέλος η κλάση Γ αποτελείται από αμφίδρομες τερματικές συσκευές με μέγιστο αριθμό χρονοθυρίδων λήψης (εικόνα 13). Οι συσκευές αυτής της κατηγορίας έχουν την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από τις τρεις και τροφοδοτούνται από κάποια σταθερή πηγή ρεύματος. Μετά από μια μετάδοση Uplink, η τελική συσκευή ανοίγει άμεσα ένα παράθυρο σύντομης λήψης RX2 κατά τη διάρκεια του RECEIVE_DELAY1. Αμέσως μετά ανοίγει το παράθυρο RX1. Όταν λήξει το RECEIVE_DELAY2, η τελική συσκευή ανοίγει ξανά το RX2 μέχρι το επόμενο uplink. Τα RX1 και RX2 έχουν τις ίδιες παραμέτρους όπως ορίζονται στην κλάση Α. Στο σχήμα παρουσιάζει τον τρόπο ανταλλαγής μηνυμάτων στην κλάση Γ. Οι συσκευές αυτής της κλάσης μπορούν ανά πάσα στιγμή να λάβουν κάποιο μήνυμα, εκτός της στιγμής κατά την οποία μεταδίδουν [12].



Εικόνα 13 - Διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων δεδομένων της κλάσης Γ [12]

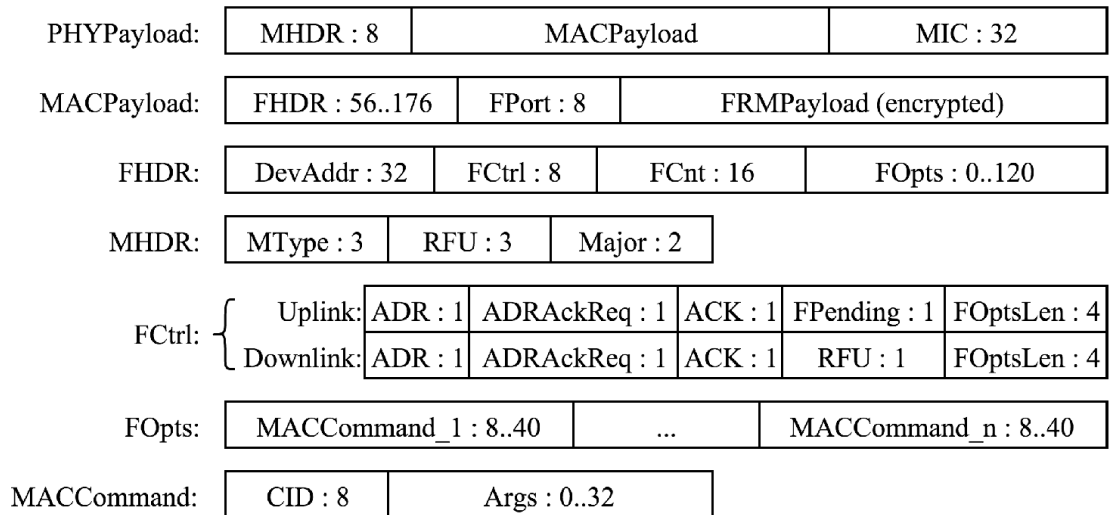
4.5 Μορφή μηνύματος LoRaWAN

Το LoRaWAN χρησιμοποιεί τα πακέτα LoRa που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα downlink μηνύματα συμπεριλαμβάνουν την επικεφαλίδα, αλλά όχι το CRC. Στην [εικόνα 14](#) φαίνεται η μορφή του μηνύματος και αποτελείται από τα παρακάτω:

- Το DevAddr, είναι η σύντομη διεύθυνση της συσκευής.
- Το FPort είναι ένα πεδίο θύρας πολυπλεξίας. Η τιμή μηδέν σε αυτό το πεδίο σημαίνει ότι το ωφέλιμο φορτίο περιέχει μόνο εντολές MAC. Όταν συμβαίνει αυτό, το πεδίο FOptsLen πρέπει να είναι μηδέν.
- Το FCnt είναι ένας μετρητής πλαισίων.
- Το MIC είναι κωδικός ακεραιότητας του κρυπτογραφημένου μηνύματος, ο οποίος υπολογίζεται στα πεδία MHDR, FHDR, FPort και το κρυπτογραφημένο FRMPayload.
- Το MType υποδεικνύει τον τύπο του μηνύματος, αν πρόκειται για ένα uplink ή downlink, επιβεβαιωμένο ή όχι.
- Το ADR και το ADRAckReq ελέγχουν τον μηχανισμό του ADR το οποίο αναλύεται παρακάτω.
- Το ACK αναγνωρίζει το τελευταίο ληφθέν πλαίσιο.
- Το FPending υποδεικνύει ότι ο διακομιστής δικτύου έχει επιπλέον δεδομένα για αποστολή και ότι η τερματική συσκευή πρέπει να στείλει ένα πλαίσιο το συντομότερο δυνατόν και έτσι ανοίγει παράθυρα λήψης.
- Το FOptsLen είναι το μήκος του FOpts σε byte.
- Το FOpts χρησιμοποιούνται για τις εντολές MAC σε ένα μήνυμα δεδομένων.
- Το CID είναι το αναγνωριστικό εντολής MAC. Τα Args είναι τα προαιρετικές τιμές της εντολής.
- Το FRMPayload είναι το ωφέλιμο φορτίο, το οποίο είναι κρυπτογραφημένο χρησιμοποιώντας AES με μήκος κλειδιού 128 bits.

Το ελάχιστο μέγεθος της επικεφαλίδας MAC είναι 13 byte ενώ το μέγιστο είναι 28 byte.

[\[11\]](#)



Εικόνα 14- Μορφή πλαισίου LoRaWAN. Τα μεγέθη των πεδίων είναι σε bits [12]

4.6 Adaptive Data Rate (ADR)

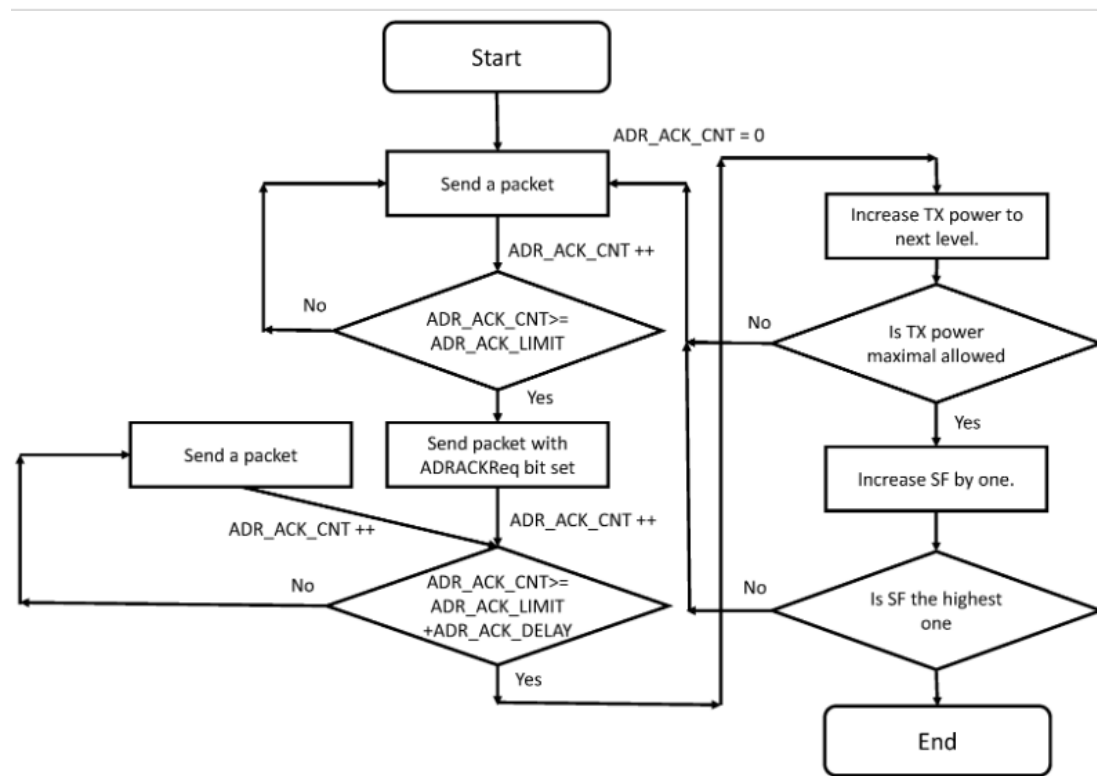
Ο μηχανισμός ADR (Adaptive Data Rate), είναι ενσωματωμένος στο LoRaWAN, και κάνει δυναμική διαχείριση των παραμέτρων του κάθε κόμβου έτσι ώστε να αυξάνεται η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς των πακέτων. Ο ADR διαχειρίζεται τον ρυθμό και την ισχύ μετάδοσης των συσκευών του δικτύου. Με τον μηχανισμό αυτόν δίνεται δυνατότητα στην κάθε συσκευή να ρυθμίζει τις παραμέτρους εκπομπής. Διαφορετικά επιτρέπεται στον network server να διαχειρίζεται αυτός τις παραμέτρους θέτοντας ένα ADR bit στο uplink πακέτο του. Και τα δύο μέρη του μηχανισμού εκτελούνται ασύγχρονα και στον εξυπηρετητή και στον τελικό κόμβο [5]. Ο μηχανισμός ADR μπορεί να εφαρμοστεί μόνο αν οι συσκευές είναι σταθερές σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο και δεν μετακινούνται [27]. Αν η συσκευή αντιληφθεί ότι η συνθήκες μετάδοσης είναι ασταθή (για παράδειγμα κάποιο όχημα έχει παρκάρει πάνω από κάποιον αισθητήρα), ο ADR πρέπει να απενεργοποιείται προσωρινά [31].

Ο αλγόριθμος του ADR στον κόμβο περιλαμβάνει δύο παραμέτρους, την ADR_ACK_LIMIT που είναι ρυθμισμένη στα 64, και την ADR_ACK_DELAY που είναι στα 32. Οι παράμετροι αυτοί ελέγχουν τον αριθμό των μηνυμάτων ανερχόμενης ζεύξης, μετά τα οποία εάν δεν ληφθεί κάποιο downlink πακέτο ο κόμβος πρέπει είτε να αυξήσει την ισχύ εκπομπής (TP) είτε το SF προσπαθώντας να συνδεθεί στο δίκτυο. Οι κόμβοι προσαρμόζουν τις ρυθμίσεις τις επικοινωνίας για να δημιουργήσουν μια αξιόπιστη, αλλά όχι απαραίτητα, ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία με το δίκτυο [5] [26]. Ωστόσο, οι κόμβοι έχουν την ικανότητα να ζητήσουν από το δίκτυο να παρακολουθήσει την ποιότητα των uplink πακέτων που έχει δεχθεί στο πρόσφατο παρελθόν [26]. Εάν η ποιότητα σύνδεσης που υπολογίστηκε στα τελευταία πακέτα, είναι

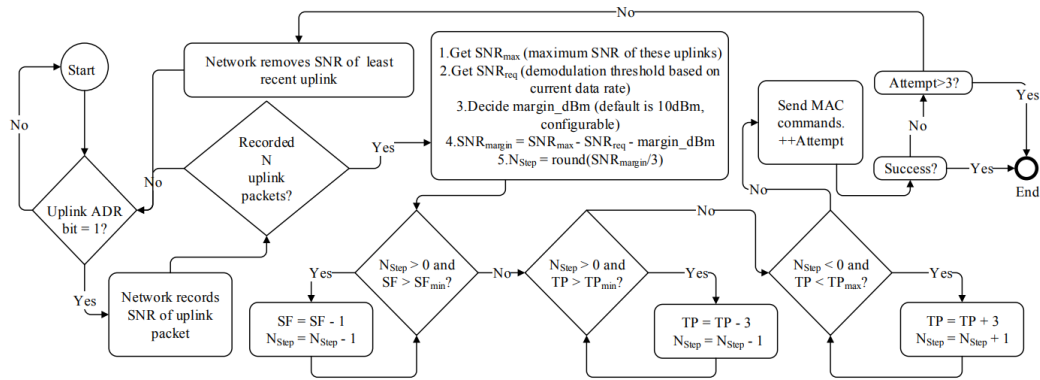
πολύ υψηλή σε σύγκριση με το κατώτατο όριο ευαισθησίας του δέκτη, το δίκτυο αποφασίζει να μειώσει το SF ή το TP ή και τα δύο. Η μείωση των SF και TP θα επιτρέψει ταχύτερες μεταδόσεις που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια [26].

Ο αλγόριθμος από την μεριά του κόμβου είναι απλός. Η τελική συσκευή αυξάνει το ADR_ACK_CNT για κάθε πακέτο uplink που αποστέλλεται. Μόλις το ADR_ACK_CNT γίνει υψηλότερο από το ADR_ACK_LIMIT, η τελική συσκευή ρυθμίζει το ADRACKReq bit και περιμένει μια επιβεβαίωση από το δίκτυο για τα επόμενα ADR_ACK_DELAY uplink πακέτα. Εάν δεν έχουν ληφθεί τα προκαθορισμένα ADR_ACK_DELAY πακέτα ο κόμβος μειώνει τον ρυθμό δεδομένων προσπαθώντας να ανακτήσει τη συνδεσιμότητα στο δίκτυο [5]. Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για τον αλγόριθμο ADR που εφαρμόζεται σε έναν κόμβο.

Ο μηχανισμός ADR στην μεριά του εξυπηρετητή είναι υπεύθυνος για τις παραμέτρους μετάδοσης, SF και την ισχύ μετάδοσης του κάθε κόμβου βάση της εκτίμησης του link budget κατά την ανερχόμενη ζεύξη και το επιτρεπτό ορίου SNR [5]. Το link budget αποτελείται από άθροισμα όλων των κερδών και των αποσβέσεων ενός συστήματος επικοινωνιών. Η εικόνα 16 δείχνει το διάγραμμα ροής στον εξυπηρετητή.



Εικόνα 15 - ADR στην πλευρά του κόμβου [5]



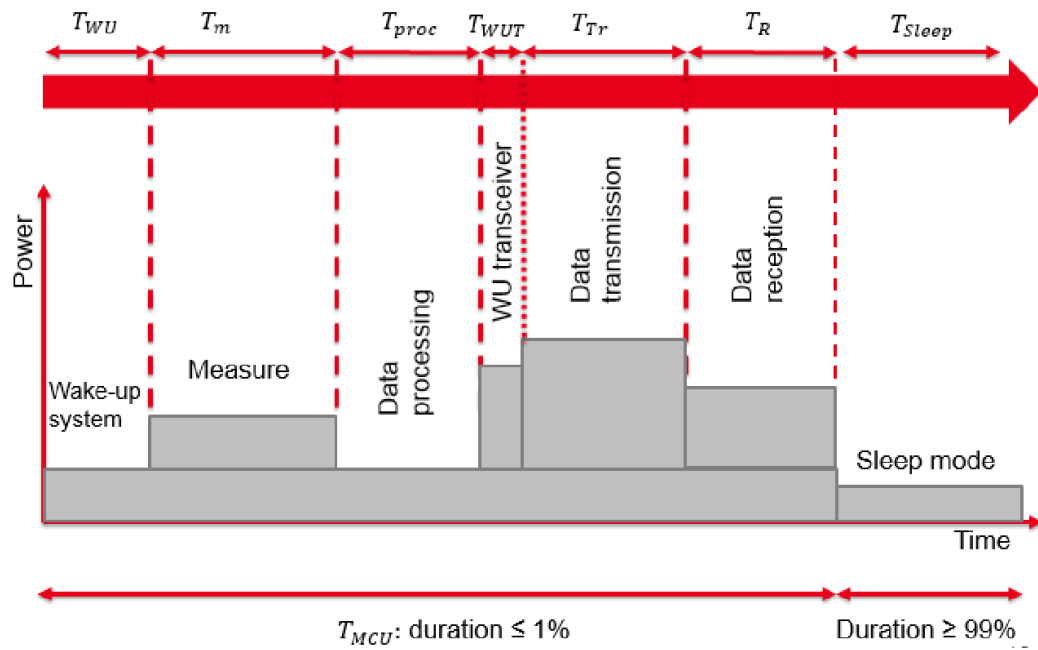
Εικόνα 16 -ADR στην πλευρά του server [26]

4.7 Ενέργεια

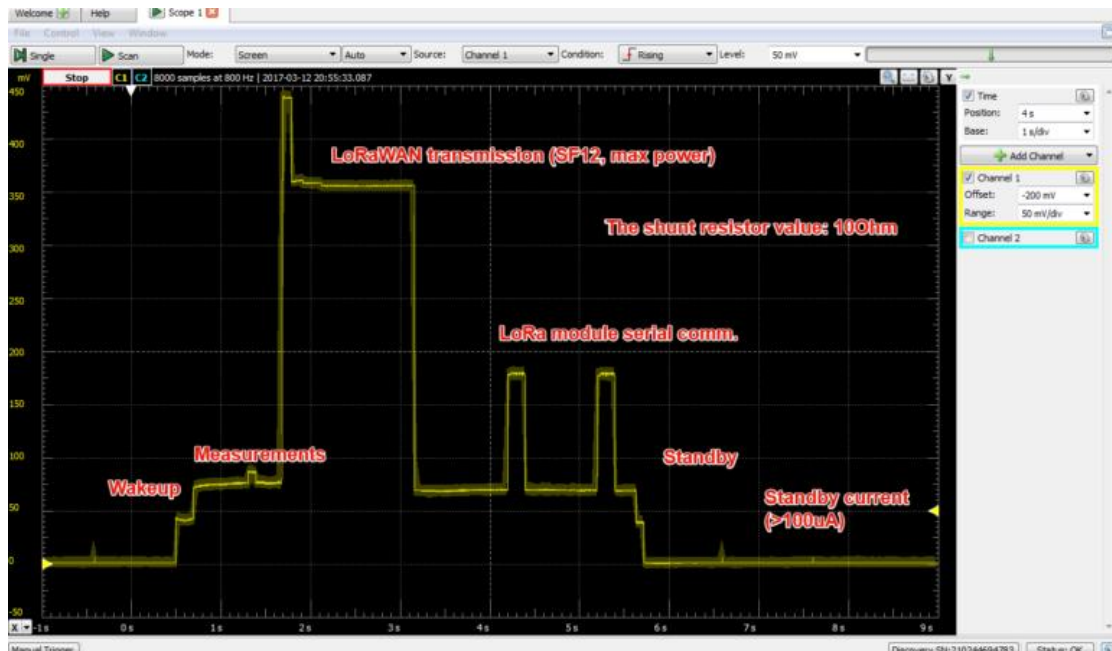
Στα δίκτυα LPWAN και κατ' επέκταση στο LoRaWAN, η κατανάλωση και η διαχείριση της ενέργειας είναι σημαντικός παράγοντας για την λειτουργία ενός συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι συσκευές είναι αδύνατον να έχουν πρόσβαση σε εξωτερική πηγή ενέργειας και τροφοδοτούνται από μπαταρίες. Εφόσον οι συσκευές αναγκάζονται να είναι ενεργειακά αυτόνομες εφαρμόζεται ένα αυστηρό μοντέλο ενεργειακής διαχείρισης [29].

Οι κόμβοι σε ένα σύστημα κατά την λειτουργία τους συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον γύρω τους, τα επεξεργάζονται τοπικά και τέλος τα μεταδίδουν στο GW. Η όλη διαδικασία ξεκινά με το ξύπνημα της συσκευής, συνεχίζεται με την λήψη των απαραίτητων μετρήσεων και την μετάδοση των πληροφοριών στην πύλη. Στην συνέχεια, ο κόμβος, περιμένει να λάβει τυχόν πληροφορίες από την πύλη και τελικά επιστρέφει στην κατάσταση αναμονής. Κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες καταναλώνουν ενέργεια. Η εικόνα 17 παρουσιάζει τον χρόνο και την ενεργεία που καταναλώνεται κατά την κάθε εργασία. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, κατά την λειτουργία του κόμβου, η περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται όταν πρέπει να μεταδοθούν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν. Η τιμή του SF επηρεάζει την κατανάλωση, όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερη είναι η κατανάλωση. Η όλη διαδικασία της λειτουργίας η οποία καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια αποτελεί το λιγότερο από το 1% του συνολικού χρόνου [10].

Στην εικόνα 18 φαίνεται μια μέτρηση κατανάλωσης της μπαταρίας μιας τερματικής συσκευής, κατά την διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας της χρησιμοποιώντας SF 12 (μεγίστη κατανάλωση). Η κατανάλωση της συσκευής υπολογίζεται βρίσκοντας το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη, το οποίο υπολογίζεται προσεγγιστικά σε 0.1 mA το δευτερόλεπτο. Μια μπαταρία AA έχει χωρητικότητα 2500 mAh ή $2.5 \cdot 3600 = 9000$ As σε δευτερόλεπτα. Άρα υπάρχει δυνατότητα για την αποστολή 90.000 μηνυμάτων [36].



Εικόνα 17- Ενέργεια κατά την λειτουργία κόμβου [10]



Εικόνα 18 - Μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας σε ψηφιακό παλμογράφο [36]

5 Σχετικές ερευνητικές εργασίες με σκοπό την βελτιστοποίηση

Τεχνολογίες του IoT όπως το LoRaWAN, βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στην καθημερινότητά μας λύνοντας διάφορα προβλήματα και βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι «έξυπνες» πόλεις και οι «έξυπνες» βιομηχανίες. Αυτό επιβάλλει στις τεχνολογίες αυτές να είναι όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερες και οικονομικότερες. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός όσο το δυνατόν καλύτερα, γίνεται μεγάλη προσπάθεια και έρευνα για να μεγιστοποιηθούν τρεις παράγοντες:

- A. Απόδοση του δικτύου: οι πληροφορίες πρέπει να μεταδίδονται χωρίς καθυστερήσεις.
- B. Αξιοπιστία του δικτύου: το δίκτυο πρέπει να είναι ανθεκτικό σε λάθη που μπορεί να συμβούν κατά την μεταφορά των πακέτων τα οποία πρέπει να μεταδίδονται κάτω από όλες τις συνθήκες.
- C. Το κόστος του δικτύου: μειώνοντας τις λειτουργικές και τις κατασκευαστικές δαπάνες που απαιτεί το δίκτυο. Για παράδειγμα βελτιώνοντας την κατανάλωση ενέργειας το κόστος για την αντικατάσταση των μπαταριών είναι μικρότερο, ή υποστηρίζοντας μεγαλύτερη κάλυψη χρειάζονται λιγότερες πύλες μειώνοντας επιπλέον το κόστος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορες προτάσεις σχετικά με αυτό.

5.1 Μαθηματικό μοντέλο για βελτιστοποίηση των κόμβων

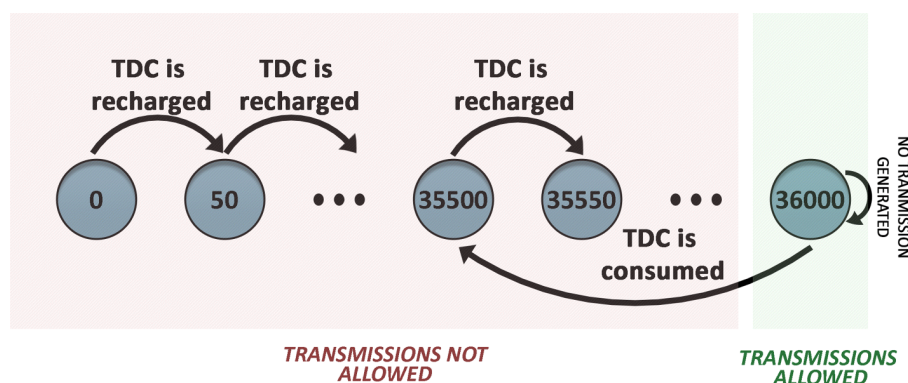
Σε δίκτυα όπως το LoRaWAN, η μετάδοση των πακέτων ποικίλει ανά περιοχή λόγω των περιορισμών, στις συχνότητες μετάδοσης και της ισχύος, που επιβάλλονται ανά περιοχή. Οι περιορισμοί αυτοί και τα υπόλοιπα στοιχεία μετάδοσης πρέπει να συνδυαστούν έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση του δικτύου. Για τον λόγο αυτό όταν βελτιώνεται η απόδοση των κόμβων πρέπει να ληφθεί υπόψη εκτός από την χρήση της ζώνης μετάδοσης και οι παράγοντες που σχετίζονται με αυτή, όπως η κατανάλωση ενέργειας και οι σχετικές συχνότητες. Η επέκταση της διάρκειας ζωής του δικτύου οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του λειτουργικού κόστους, γεγονός που με τη σειρά του μειώνει το κόστος ανάπτυξης.

Στην δημοσίευση [37] παρουσιάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο όπου συμπεριλαμβάνει όλους τους γεωγραφικούς περιορισμούς με σκοπό την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των κόμβων και την καλύτερη διαχείριση ενέργειας από αυτούς. Ο υπολογισμός των κατάλληλων παραμέτρων γίνεται με την εφαρμογή δύο μεταερευνητικών (metaheuristic) αλγορίθμων οι οποίοι ενσωματώνονται στις συσκευές. Τέτοιοι

αλγόριθμοι συνήθως στοχεύουν στην εύρεση της βέλτιστης λύσης σε προβλήματα μεγάλης έκτασης.

Στην παρούσα πρόταση το TDC (Transmission Duty Cycle), η μέγιστη διάρκεια κατάληψης της ISM ζώνης ανά ώρα, το οποίο υπολογίζεται σαν μια πεπερασμένη ποσότητα η οποία καταναλώνεται με τις μεταδόσεις πακέτων και «επαναφορτίζεται» όσο περνά η ώρα. Αναλόγως την διαμόρφωση της μετάδοσης της κάθε συσκευής (BW/CR/SF) ξοδεύεται ένα μέρος του TDC κατά την λειτουργία της. Μια διαδικασία Markov μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιηθεί μαθηματικά την υπολειπόμενη τιμή του TDC σε έναν τυχαίο κόμβο. Στην αρχή ο κάθε κόμβος θεωρείται ότι έχει στη διάθεσή του 36 δευτερόλεπτα, λόγω του περιορισμού χρόνου για τον κάθε κόμβο που καταλαμβάνει κάποια από τις ISM συχνότητες. Όταν μεταδίδει ο κόμβος (T_{on}) καταναλώνει το αντίστοιχο TDC. Αντιστρόφως, στην αρχή κάθε κύκλου ανίχνευσης, ο κόμβος ανακτά $T \cdot DC$ δευτερόλεπτα του μέγιστου TDC (T είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρις ότου να ξεκινήσει ένας νέος κύκλος $TDC_{max} = 36$ δευτ.). Η μετάδοση επιτρέπεται να συμβεί μόνο όταν οι κόμβοι φτάσουν στην κατάσταση TDC_{max} , γνωστή ως κατάσταση εκπομπής, έτσι ώστε οι κόμβοι να αναγκαστούν να έχουν μια ανενεργή κατάσταση (T_{off}). Η κατάσταση αυτή αποτελεί περιορισμό που ορίζεται από τον [ETSI](#) και δεν επιτρέπεται να γίνεται μετάδοση όσο υπάρχει διαθέσιμο TDC.

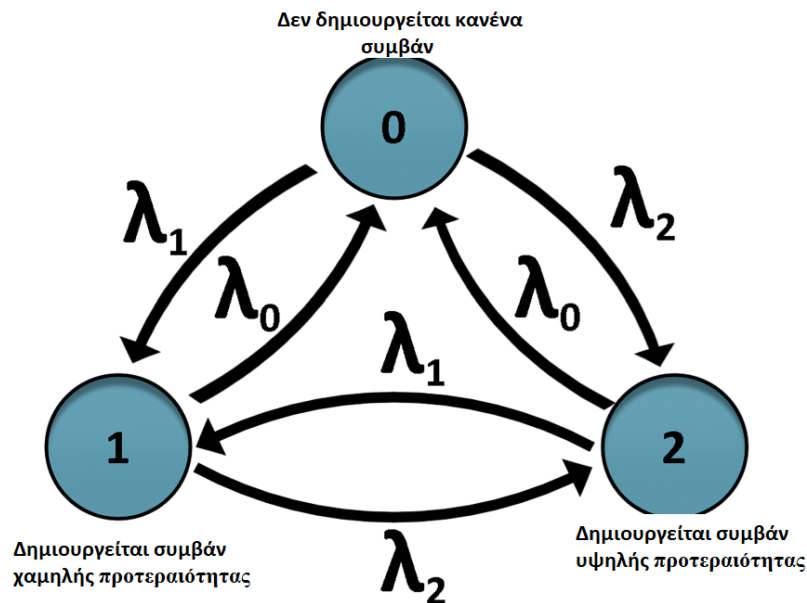
Το αποθηκευμένο TDC ερμηνεύεται σε Μαρκοβιανές καταστάσεις. Στην [εικόνα 19](#) φαίνεται σχηματικά το μοντέλο. Οι καταστάσεις παρουσιάζονται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Στην αρχή ενός κύκλου ανίχνευσης γίνεται «επαναφόρτιση» του TDC από τα αριστερά προς τα δεξιά μέχρις ότου να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος χρόνος ($TDC_{max} = 36$ δευτ) και να είναι επιτρεπτή η μετάδοση. Με την αποστολή ενός πακέτου, ο κόμβος μεταβαίνει από τη δεξιά κατάσταση στην προηγούμενη κατάσταση TDC (από τα δεξιά προς τα αριστερά). Το μέγεθος των βημάτων της μετάβασης αυτής εξαρτάται από τον τύπο και το μήκος του πακέτου, καθώς και τη διαμόρφωση μετάδοσης.



Εικόνα 19 - Μαρκοβιανό μοντέλο TDC. Κύκλος ανίχνευσης $T = 5$ s, DC 1%, $T_{on} = 0.05$ s

Για να μοντελοποιηθούν τα γεγονότα, θεωρείται ότι ένα γεγονός δημιουργείται τυχαία στην αρχή κάθε κύκλου ανίχνευσης με πιθανότητα λ_i . Το λ μπορεί να ερμηνευτεί

ως ο μέσος αριθμός των γεγονότων που παράγονται κάθε μια περίοδο λειτουργίας (T δευτερόλεπτα) και είναι πάντα μικρότερος ή ίσος του 1. Το κάθε γεγονός είναι διαφορετικής σημασίας και διαφορετικής προτεραιότητας. Το διάνυσμα G δηλώνει την προτεραιότητα των γεγονότων. Η προτεραιότητα των γεγονότων που δεν έχουν παραχθεί ακόμα (G_0) είναι μηδέν. Η παραγωγή των γεγονότων είναι ανεξάρτητη η μία από την άλλη. Στην [εικόνα 20](#) φαίνεται η παραγωγή των πακέτων. Κάθε κατάσταση $j \in \{0, 1, 2\}$ δείχνει ότι έχει οριστεί μια προτεραιότητα του κάθε γεγονότος.



Εικόνα 20 - Διάγραμμα παραγωγής συμβάντων, οι αριθμοί των καταστάσεων δηλώνουν την προτεραιότητα των γεγονότων

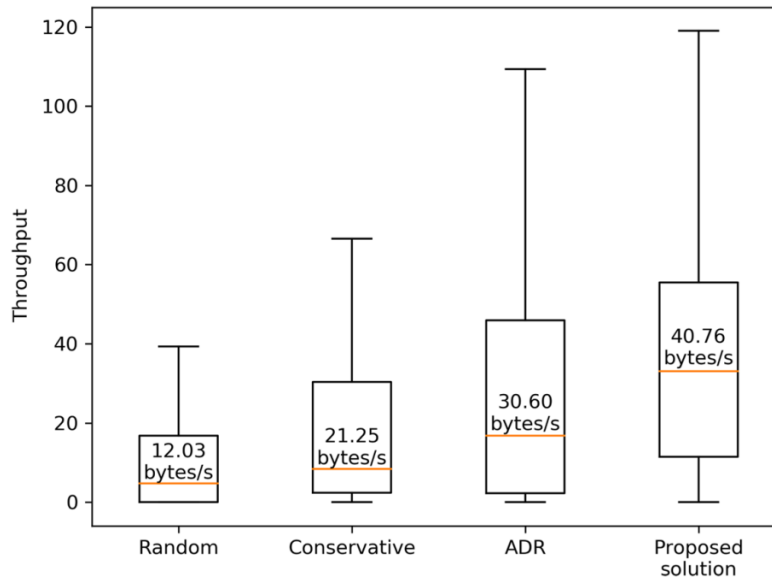
Οι δύο Markov αλυσίδες που παρουσιάζονται στις εικόνες 19 και 20 περιγράφουν πλήρως την κατάσταση ενός κόμβου από την άποψη της μετάδοσης. Ένας κόμβος είναι σε κατάσταση μετάδοσης μόνο όταν έχει αρκετό TDC, και έχει δημιουργηθεί κάποιο συμβάν (χαμηλής ή υψηλής προτεραιότητας) κατά την κατάσταση ανίχνευσης.

Δοκιμάστηκαν είναι ένας Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA) και ένας Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing - SA). Οι αλγόριθμοι αυτοί συνεχώς αξιολογούν και βελτιώνουν μία υποψήφια λύση έχοντας περιορισμένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, και η υλοποίησή τους είναι απλή, πράγμα που τους κάνει ιδανικούς για συσκευές IoT. Εφαρμόστηκαν σε LoPy κόμβους για να αποδειχτεί ότι είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε συσκευές με περιορισμένο hardware. Έγινε προσομοίωση με 500 τυχαίους κόμβους και διεξήχθησαν οι βέλτιστες ρυθμίσεις μετάδοσης (CR, SF, TXP) με τρεις τρόπους SA, GA, και Exhaustive Search. Στον [πινάκα 5](#) φαίνονται οι μέσες τιμές ρυθμαπόδοσης και από τους 3 τρόπους.

Πίνακας 5 – Μέσες τιμές ρυθμοαπόδοσης για ES, SA, GA

Αλγόριθμος υπολογισμού	Ρυθμοαπόδοση
Exhaustive search	41.280 bytes/s
Simulated annealing (SA)	40.760 bytes/s
Genetic algorithm (GA)	40.691 bytes/s

Στην [εικόνα 21](#) φαίνεται η ρυθμοαπόδοση της προτεινόμενης λύσης συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους για την επιλογή παραμέτρων μετάδοσης



Εικόνα 21 - Ρυθμοαπόδοση 500 κόμβων με διάφορες μεθόδους επιλογής παραμέτρων μετάδοσης και την επιλεγμένη λύση (SA)

5.2 Βελτιστοποίηση με χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης

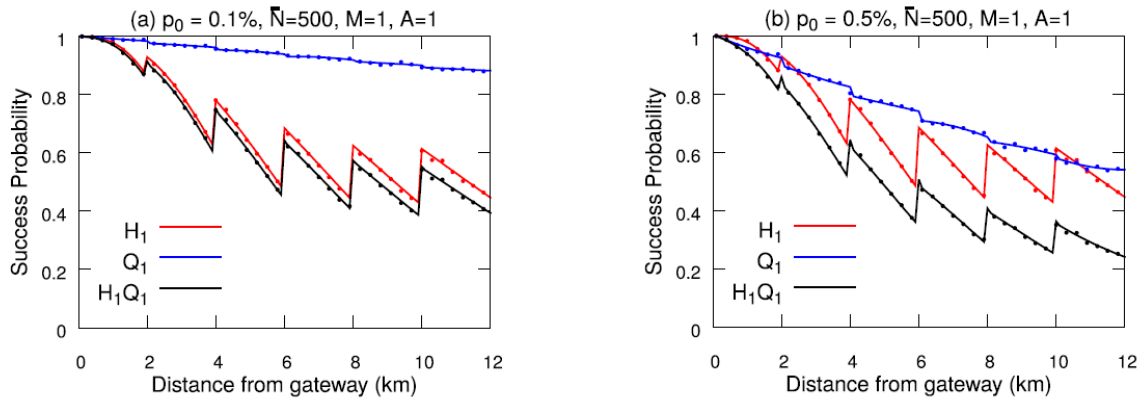
Για την επίτευξη χρονικής και χωρικής ποικιλομορφίας στα δίκτυα LoRaWAN έγινε χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης στις πύλες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δίκτυα LoRa είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην αύξηση της πυκνότητας των χρηστών και της κυκλοφορίας, αλλά με την κατάλληλη αναπαραγωγή των μηνυμάτων και με πολλαπλές κεραιές λήψης στις πύλες μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση. Η αναπαραγωγή μηνυμάτων έχει έναν βέλτιστο αριθμό αντιγράφων για κάθε ένα μήνυματος σε οποιαδήποτε διαμόρφωση και τα δίκτυα χαμηλής πυκνότητας επωφελούνται περισσότερο ενώ η χρήση πολλαπλών κεραιών είναι ευεργετική για όλες τις περιπτώσεις [38].

Η συμπεριφορά του δικτύου LoRa διαμορφώνεται μέσω της κατάλληλης αναπαραγωγής των μηνυμάτων, έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται η ποικιλομορφία του χρόνου. Χρησιμοποιώντας μια ενιαία πύλη με πολλαπλές κεραιές λήψης γίνεται εκμετάλλευση της χωρικής ποικιλομορφίας προσπαθώντας να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου. Εξετάζεται η περίπτωση όπου πολλαπλές κεραιές λήψης σε μια πύλη δημιουργούν ποικιλία σήματος ικανή να βελτιώσει την ποιότητά του.

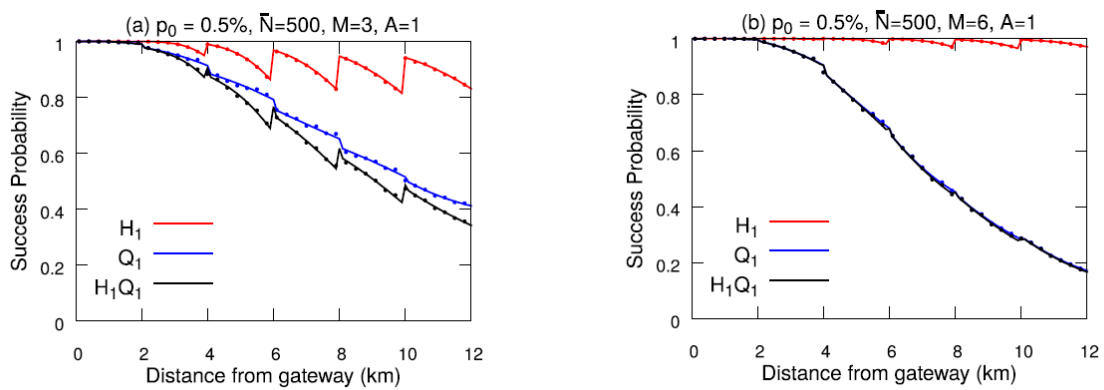
Χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη 500 κόμβων ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε μία περιοχή με ακτίνα 12000 μέτρα. Οι κόμβοι αυτοί μεταδίδουν πακέτα σε τυχαίες στιγμές. Ξεκινώντας από τις κοντινότερες στην πύλη συσκευές με SF 7, ανά 2000 μέτρα αυξάνεται η τιμή του SF έτσι ώστε οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι να έχουν SF 12. Κατά την ανερχόμενη ζεύξη υπάρχει εξασθένηση του σήματος και μπορεί να υπάρξει διακοπή λειτουργίας του LoRa αν δεν πραγματοποιηθεί σύνδεση μεταξύ του κόμβου και της πύλης. Το σήμα μπορεί να είναι πολύ αδύναμο λόγω απόστασης και θορύβου από εξωτερικούς παράγοντες ή αν συμβεί κάποια σύγκρουση [38].

Κατά την επικοινωνία με LoRa, για να αυξηθεί η αξιοπιστία του δικτύου μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιείται είναι η αναπαραγωγή μηνυμάτων (message replication). Με αυτή τη τεχνική κάθε μήνυμα μεταδίδεται Μ φορές εντός του ίδιου χρονικού διαστήματος, αυξάνοντας τη χρονική ποικιλομορφία του σήματος και καθιστώντας πιθανότερο τουλάχιστον ένα αντίγραφο του μηνύματος να φτάσει στην πύλη. Η αύξηση στην πιθανότητα επιτυχίας συνδεσιμότητας εξαρτάται από τον αριθμό αντιγράφων Μ. Με άλλα λόγια, μια σύνδεση μπορεί να χαθεί ή να σταματήσει να λειτουργεί όταν όλα τα Μ μηνύματα χαθούν, ή όταν κανένα από τα Μ μηνύματα δεν είναι αρκετά ισχυρό ώστε να μπορεί να γίνει λήψη.

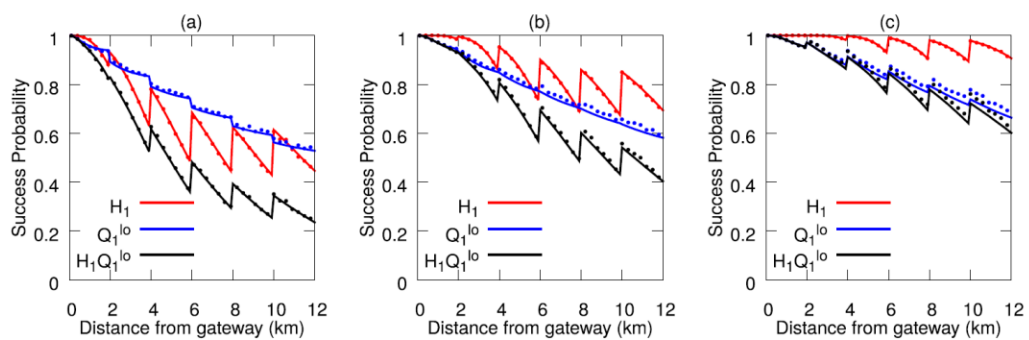
Στην [εικόνα 22](#) φαίνονται τα αποτελέσματα από 500 κόμβους με διαφορετικά duty cycles. Όπως φαίνεται από την εικόνα η πιθανότητα σύνδεσης (H) δεν εξαρτάται από το duty cycle ή τον αριθμό των κόμβων, αλλά από τη απόσταση. Αυτό καθιστά την πιθανότητα λήψης (Q) υπεύθυνη για την υποβάθμιση του σήματος, επειδή λαμβάνει υπόψη την παρεμβολή, η οποία επηρεάζεται από την αυξανόμενη χρήση του μέσου. Στην [εικόνα 23](#) δείχνει την επίδραση της μεθόδου αναπαραγωγής μηνυμάτων για 3 και 6 μηνύματα χρησιμοποιώντας την ίδια διαμόρφωση δικτύου. Αυτό έχει θετική επίδραση στην H, επειδή μειώνει εκθετικά την κατάσταση διακοπής. Η θετική επίδραση της πιθανότητας λήψης (Q) υπάρχει μόνο εφόσον τα αντίγραφα μηνυμάτων δεν πλημμυρίζουν το δίκτυο, φθάνοντας σε ένα σημείο όπου ο αριθμός των συγκρούσεων είναι πολύ υψηλός. Η αναπαραγωγή μηνυμάτων έχει καλύτερες επιδόσεις σε χαμηλότερα SF από ότι σε υψηλότερα SF. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χρόνος κατά τον οποίο βρίσκονται στον αέρα τα πακέτα (Time on Air – ToA) σχεδόν διπλασιάζεται για κάθε αύξηση του SF, καθιστώντας πιο γρήγορο να πλημμυρίσει το δίκτυο με μηνύματα που έχουν αναπαραχθεί. Τέλος στην [εικόνα 24](#) φαίνονται οι επιδόσεις για του συστήματος για 1 (εικόνα 24a) , 2 (εικόνα 24b) και 4 (εικόνα 24c) κεραιές λήψης. Οι πιθανότητες σύνδεσης και λήψης αυξάνονται αναλόγως με τον αριθμό κεραιών που υπάρχουν.



Εικόνα 22- Απόδοση του βασικού μοντέλου LoRa, $\bar{N}=500$, duty cycle 1% και 5%



Εικόνα 23 - Αντίκτυπος της αναπαραγωγής μηνυμάτων στην ανερχόμενη ζεύξη LoRa, $\bar{N}=500$, duty cycle 5%



Εικόνα 24 - Αντίκτυπος πολλαπλών κεραιών λήψης στην πύλη LoRa, $\bar{N}=500$, duty cycle 5%, και ένα αντίγραφο μηνύματος, a) 1 b) 2 c) 4 κεραιές λήψης

5.3 Εγκατάσταση δικτύου σε πανεπιστημιούπολη (Smart Energy Campus)

Σε μια πανεπιστημιούπολη στην Κορέα έγινε εγκατάσταση ενός δικτύου LoRa με κύριο στόχο την αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας. Η έκταση που έχει καλυφθεί αποτελείται από 600 * 600 μέτρα περίπου και οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες. Οι συσκευές, είναι τοποθετημένες σε διάφορα εσωτερικά και εξωτερικά σημεία. Κάποια από τα εξωτερικά σημεία δεν καλύπτονται από τα συνηθισμένα δίκτυα (Wi – Fi, Ethernet) και η επέκτασή αυτών είναι μη επιτρεπτή λόγω κόστους. Για να μπορεί να καλυφθεί ολόκληρη η έκταση πρέπει η πύλη να τοποθετηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να μπορεί να επικοινωνεί με κάποια απομακρυσμένη συσκευή μέσα σε κτήριο. Για να είναι αποτελεσματική η εγκατάσταση πρέπει να εξεταστεί η απόδοση στο μεικτό αυτό περιβάλλον, το οποίο επηρεάζεται από τους εκάστοτε περιορισμούς της κάθε περιοχής και διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή [39].

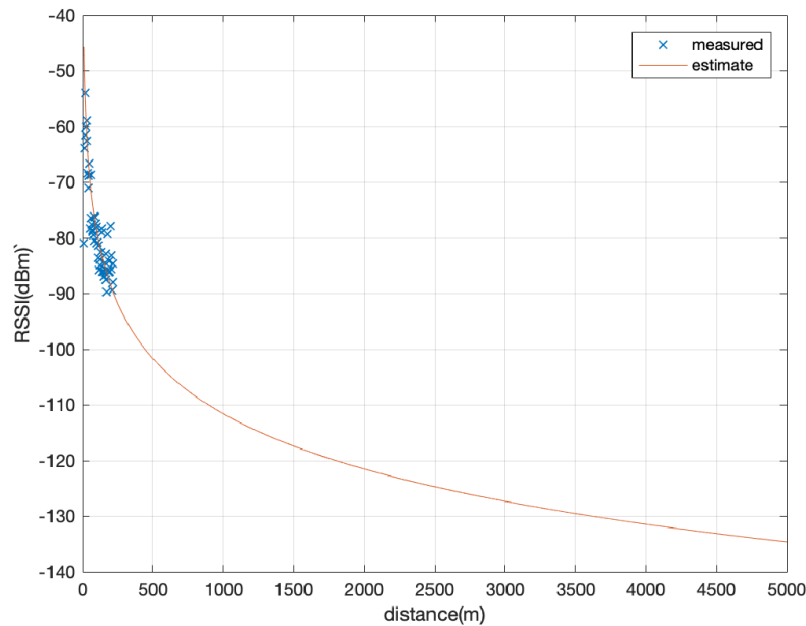
Στις δοκιμές που έγιναν, ένας κόμβος στέλνει περιοδικά τα πακέτα δεδομένων στην πύλη που τα προωθεί στον διακομιστή για περαιτέρω ανάλυση. Ο κόμβος μετακινείται σε διάφορες τοποθεσίες είτε εσωτερικές είτε εξωτερικές ενώ η πύλη είναι εγκατεστημένη στην οροφή ενός κτιρίου πέντε ορόφων ύψους περίπου 15 μέτρων χωρίς εμπόδια κοντά. Έτσι μπορούμε να αξιολογήσουμε πόσο καλά τα σήματα δεδομένων λαμβάνονται με επιτυχία και αποκωδικοποιούνται από την πύλη, όπου μετράται η ισχύ του σήματος που έχει ληφθεί. Για να εκτιμηθεί η απώλεια του καναλιού εφαρμόστηκε ένα απλό μοντέλο:

$$P_r = P_t K \left[\frac{d_0}{d} \right]^\gamma \text{ το οποίο προσαρμόζεται σε dB ως}$$

$$P_r [dBm] = P_t [dBm] + K - 10\gamma \frac{d_0}{d}.$$

Όπου P_r, P_t η ισχύς του ληφθέντος και εκπεμπόμενου σήματος. Το K είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κεραίας και τη μέση εξασθένηση του καναλιού. Το d_0 είναι μια απόσταση αναφοράς προς το μακρινό πεδίο της κεραίας και γ ένας εκθέτης απώλειας της διαδρομής που περιγράφει πόσο γρήγορα μειώνεται η ισχύς του σήματος με την απόσταση.

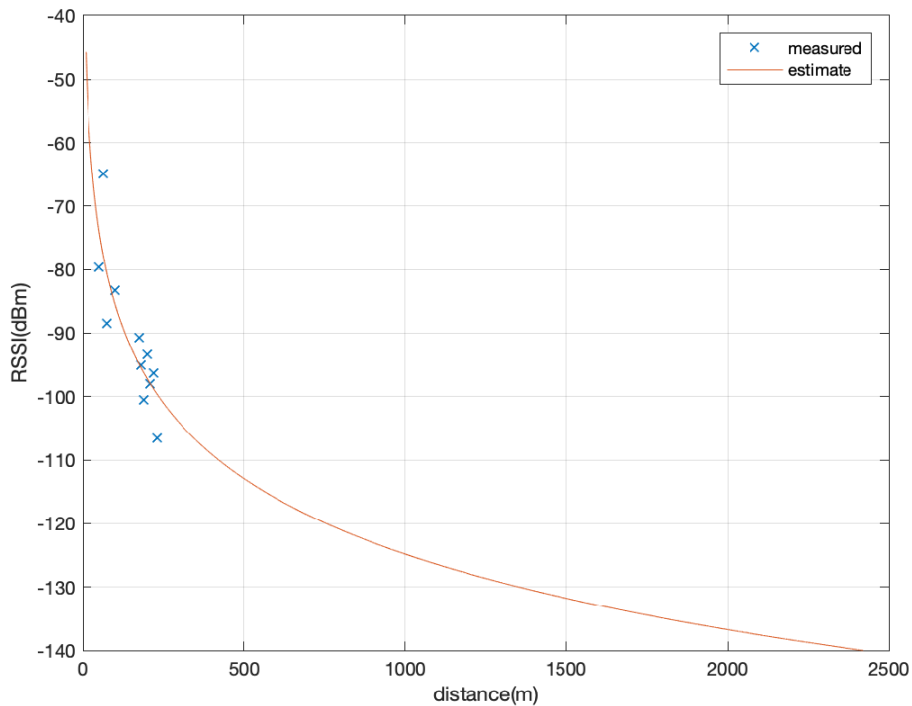
Η πρώτη δοκιμή που έγινε είχε ως σκοπό τον προσδιορισμό του εύρους επικοινωνίας για εξωτερικό περιβάλλον. Όταν ο κόμβος έχει μεταδώσει κάποια πακέτα απομακρύνεται για κάποια απόσταση και μεταδίδει ξανά. Στην [εικόνα 25](#) φαίνονται τα αποτελέσματα για την ισχύ του σήματος όταν η απόσταση αυξάνεται.



Εικόνα 25– Ισχύ του ληφθέντος σήματος, με μπλε εμφανίζονται δεδομένα που μετρήθηκαν και με κόκκινο αυτά που υπολογιστήκαν.

Συμπεράνουμε ότι το μέγιστο εύρος επικοινωνίας είναι περίπου 5,9 χλμ., που είναι σχεδόν ίδιο με την τιμή στις προδιαγραφές του LoRa.

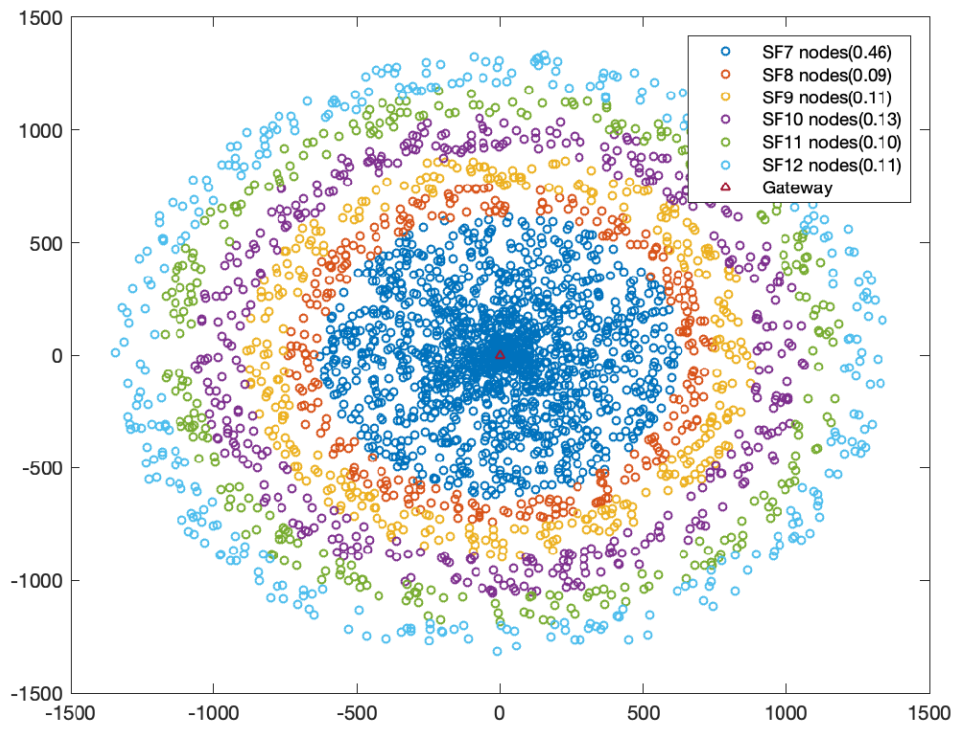
Στην επομένη δοκιμή προσδιορίστηκε η απόδοση σε περιβάλλον που συνδυάζει εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Στους χώρους υπήρχε και πλήθος κόσμου αναλόγως την ώρα της ημέρας που επηρέαζε την επικοινωνία με την πύλη. Τα αποτελέσματα, όπως δείχνει η [εικόνα 26](#), διαφέρουν από το προηγούμενο πείραμα. Η ισχύ του σήματος μειώνεται με γρηγορότερο ρυθμό όσο η απόσταση αυξάνεται. Αυτό οφείλεται σε παράγοντες όπως κτήρια και τοίχοι που παρεμβάλλονται. Με την τιμή του γ να υπολογίζεται 3.956, η μέγιστη απόσταση επικοινωνίας εκτιμάται μεταξύ 2,03 χλμ και 0,93 χλμ σε πραγματικές συνθήκες. Η απόκλιση αυτή συμβαίνει λόγω του αριθμού των ανθρώπων που θα βρίσκονται κάθε στιγμή στα κτήρια.



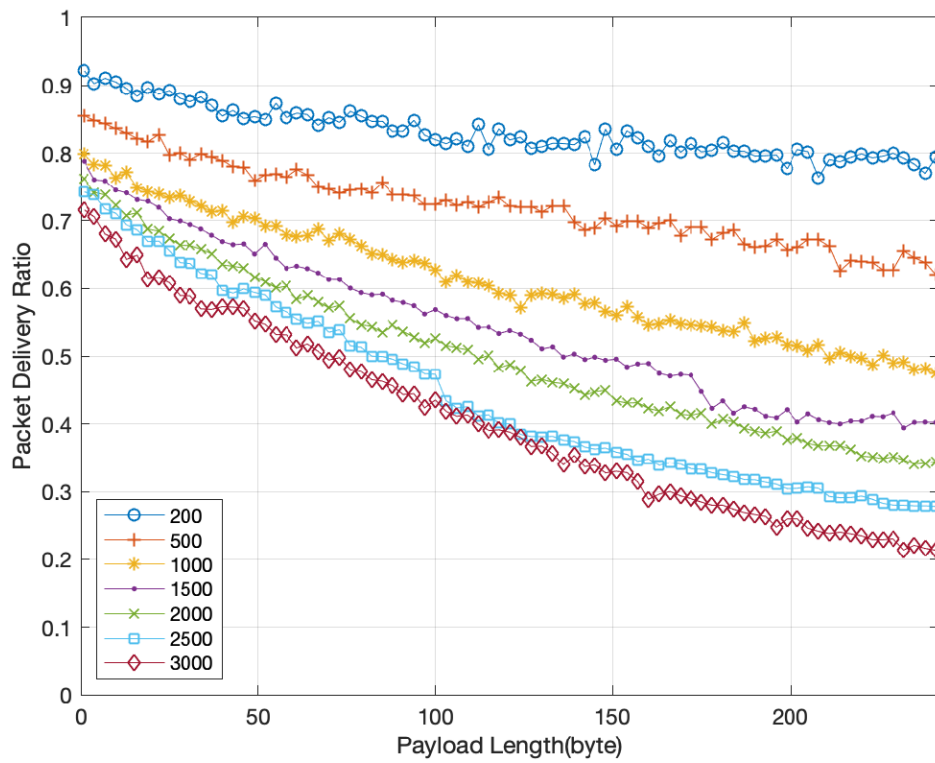
Εικόνα 26 - Ισχύ του ληφθέντος σήματος σε μεικτό περιβάλλον

Οι επιδόσεις του δικτύου σε επίπεδο MAC εξετάστηκαν με προσομοιώσεις. Η πύλη είχε τοποθετηθεί στο κέντρο σε μια έκταση με ακτίνα 2690 μ.. οι 3000 κόμβοι ήταν χωρισμένοι σε ίσες ζώνες ανάλογα με την απόσταση από την πύλη, με τους πιο κοντινούς να έχουν SF 7 και αυτούς στα άκρα SF 12 (εικόνα 27). Έτσι εξετάστηκαν οι επιπτώσεις που έχει το μήκος ωφέλιμου φορτίου (εικόνα 28) , και ο χρόνος μετάδοσης δεδομένων (εικόνα 30) στο LoRa.

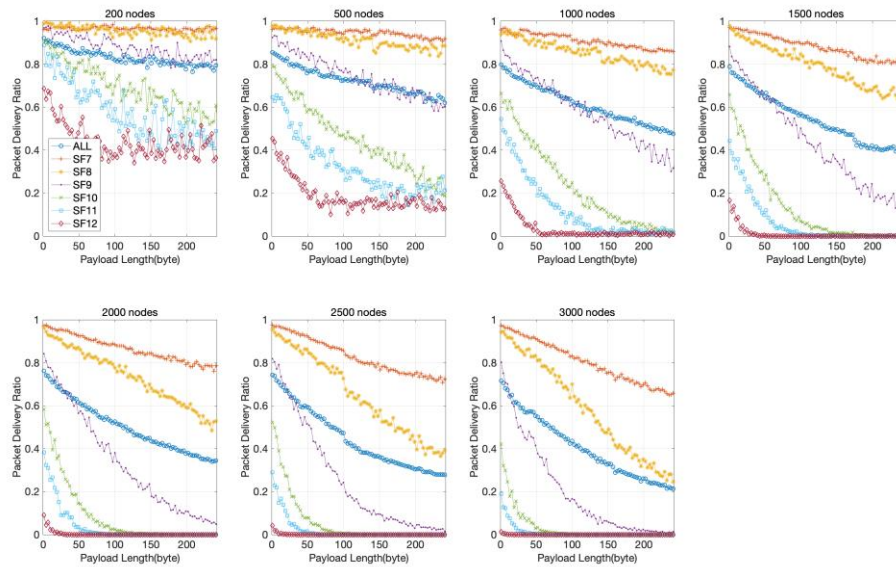
Καθώς το μήκος του πακέτου αυξάνεται, η αναλογία παράδοσης πακέτων (Packet Delivery Ratio - PDR) μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο εμφανές καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων. Η απόδοση σε υψηλότερο SF μειώνεται δραματικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων (εικόνα 29). Οι κόμβοι με SF 12 είναι συχνά πολύ μακριά ο ένας από τον άλλο, γεγονός που οδηγεί σε αποτυχία στην ανίχνευση καναλιών.



Εικόνα 27 - Κατανομή κόμβων

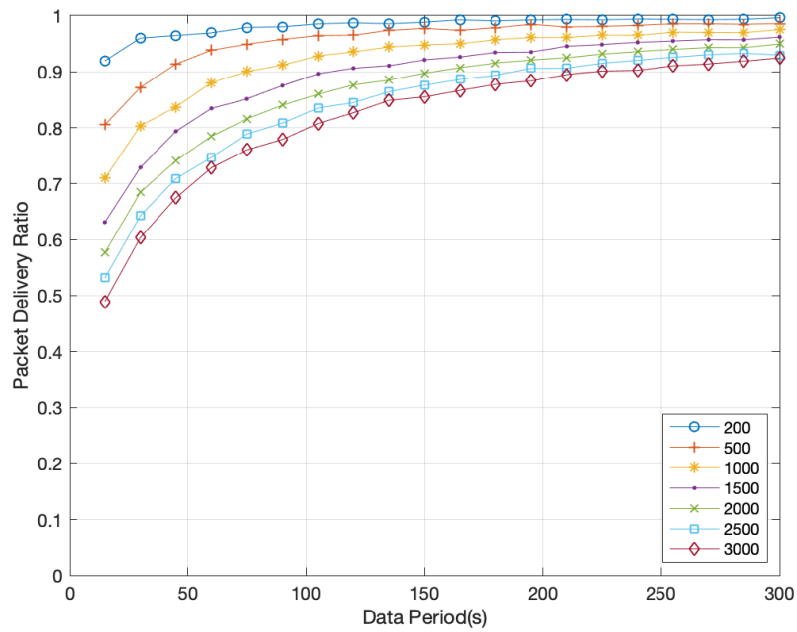


Εικόνα 28 – Παράδοση πακέτων με διαφορετικό αριθμό κόμβων.



Εικόνα 29 – Παράδοση πακέτων με διαφορετικά SF και αριθμό κόμβων.

Στο δεύτερο πείραμα, ο αριθμός των κόμβων πάλι κυμαίνεται από 200 έως 3000 κόμβους και η περίοδος για την μετάδοση των δεδομένων κυμαίνεται από 15 έως 300 δευτερόλεπτα με διαστήματα 15 δευτερολέπτων ώστε το ωφέλιμο φορτίο παραμένει σταθερό. Η εικόνα 30 δείχνει τα αποτελέσματα για τη σχέση μεταξύ της περιόδου δεδομένων και του PDR. Με 3000 κόμβους και περίοδο δεδομένων 15 δευτερόλεπτα το PDR μειώνεται κάτω του 50%. Η απόδοση του δικτύου αυξάνεται αυξάνετε όσο αυξάνεται η περίοδος μεγαλώνει, και φθάνει το 90% για χρόνους μεγαλύτερους των 225 δευτερολέπτων.



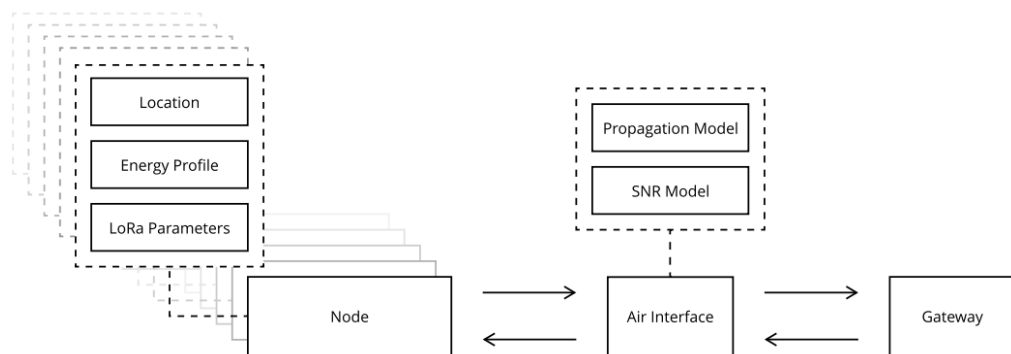
Εικόνα 30 - PDR σε σχέση με τον χρόνο για την μετάδοση των πακέτων

Συμφώνα με τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι αν η χρονική περίοδος των δεδομένων και ο αριθμός των κόμβων ρυθμιστούν από κοινού μπορεί να επιτευχθεί αξιοπιστία της επικοινωνίας.

6 Προσομοιώσεις

6.1 Προσομοιωτής

Ο προσομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από μεμονωμένα στοιχεία καθώς κάθε υποσύστημά του είναι υλοποιημένο ξεχωριστά και αποτελείται από τρεις κύριες οντότητες, τον κόμβο, την διεπαφή αέρα και την τερματική συσκευή. Ο κάθε κόμβος κλάσης A στέλνει πακέτα LoRa στη διεπαφή αέρα όπου εφαρμόζονται τα μοντέλα συγκρούσεων, διάδοσης και SNR, στα μηνύματα. Τέλος, η πύλη λαμβάνει και επεξεργάζεται τα πακέτα. Στην περίπτωση που τα μηνύματα είναι έγκυρα, η πύλη μεταδίδει ένα μήνυμα κατερχόμενης ζεύξης στον αντίστοιχο κόμβο για να επιβεβαιώσει ότι το πακέτο έχει ληφθεί [28]. Το μοντέλο του προσομοιωτή φαίνεται στην [εικόνα 31](#).



Εικόνα 31 - Βασικό μοντέλο προσομοιωτή

6.1.1 Κόμβος

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ο κάθε κόμβος (κλάσης A) χαρακτηρίζεται από κάποιες παραμέτρους LoRa, την τοποθεσία του, και το ενεργειακό του προφίλ. Σε κάθε κόμβο διανέμεται διαφορετικό προφίλ για να προσομοιωθούν διαφορετικοί κόμβοι. Οι διάφορες καταστάσεις φαίνονται στον [πίνακα 6](#). Εκτός από τις καταστάσεις της αποστολής και της λήψης λαμβάνονται και άλλες υπόψη. Προσομοιώνεται η επεξεργασία (κατάσταση 2), οι καταστάσεις πριν από τη μετάδοση και λήψη (κατάσταση 6), η οποία ετοιμάζει τις συσκευές

για την μετάδοση, και η κατάσταση που επεξεργάζεται το μήνυμα που έχει ληφθεί.

Για να γίνουν πιο ενεργειακά αποδοτικοί οι κόμβοι, μπορούν να λάβουν ένα downlink μήνυμα μόνο όταν έχουν μεταδώσει κάποιο uplink. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι συσκευές κλάσης A χρησιμοποιούν δύο παράθυρα παραλαβής και «ακούνε» μόνο για εισερχόμενα μηνύματα σε συγκεκριμένες ώρες. Ο ρυθμός δεδομένων και η κεντρική συχνότητα των μηνυμάτων downlink εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο παράθυρο λήψης, τον ρυθμό δεδομένων και την κεντρική συχνότητα του μηνύματος ανερχόμενης ζεύξης. Τα μηνύματα είναι από προεπιλογή προγραμματισμένα για το πρώτο παράθυρο λήψης (Rx 1). Αν δεν είναι διαθέσιμο τότε η λήψη γίνεται στο δεύτερο παράθυρο (Rx 2) με προκαθορισμένο SF.

Πίνακας 6 – Ενεργειακά προφίλ

Αρ. Κατάστασης	Κατάσταση	Ισχύ (mW)	Διάρκεια (ms)
1	αναμονή	5,7e-3	-
2	επεξεργασία	15	5
3	Προετοιμασία για αποστολή (Tx)	12,5	40
4	Αποστολή (Tx)	Πίνακας 6	$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$
5 ^α	Αναμονή λήψης Rx 1	5,7e-3	1000
5 ^β	Αναμονή λήψης Rx 2	5,7e-3	1000 - len(κατάσταση 7)
6	Προετοιμασία λήψης Rx		3,4
7	Λήψη Rx 1	36,96	airtime(DR=DR_tx)
8	Λήψη Rx 2	34,65	airtime(DR= 3)
9	Επεξεργασία ληφθέντος Rx	8,3	10,7

Πίνακας 7 – Αντιστοιχία ισχύς μετάδοσης με την μετρούμενη Ισχύ

Ισχύς μετάδοσης (dBm)	2	5	8	11	14
Ισχύς (mW)	91,8	95,9	101,6	120,8	146,5

6.1.2 Διεπαφή Αέρα

Η διεπαφή αέρα περιλαμβάνει τρία βασικά χαρακτηριστικά. Πρώτα, το κανάλι διάδοσης εισάγει μια απώλεια διαδρομής. Δεύτερον, ένα απλό μοντέλο μεταφράζει την ισχύ του ληφθέντος σήματος (Received Signal Strength - RSS) σε μια τιμή SNR. Τέλος ένα μοντέλο συγκρούσεων καθορίζει τα συγκρουόμενα πακέτα που συμβαίνουν κυρίως στα πακέτα ανερχόμενης ζεύξης [28].

Σύγκρουση συμβαίνει όταν δύο ή περισσότερες μη ορθογώνιες μεταδόσεις αλληλεπικαλύπτονται στον δέκτη. Οι μεταδόσεις με διαφορετικό παράγοντα εξάπλωσης είναι ορθογώνιες και δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους, παρόλο που συμβαίνουν ταυτόχρονα. Για μεταδόσεις οι οποίες διεξάγονται ταυτόχρονα με ίδιο SF, μπορούν να αποκωδικοποιούνται ξεχωριστά δεν θεωρούνται σύγκρουση όταν χρησιμοποιούν διαφορετική συχνότητα φορέα. Στην περίπτωση της σύγκρουσης στο LoRaWAN υπάρχει δυνατότητα ένα από τα σήματα τα οποία έχουν συγκρουστεί να ανιχνευθεί σωστά. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί αν η ισχύ μετάδοσης κάποιου από τα σήματα είναι μεγαλύτερη από τις άλλες. Συγκεκριμένα, ας υποθέσουμε τρία σήματα με ισχύ $P_1 > P_2 > P_3$ συγκρούονται. Η πρώτη μετάδοση μπορεί να ανακτηθεί από τη σύγκρουση εάν η διαφορά ισχύος μεταξύ των δύο ισχυρότερων σημάτων με την υψηλότερη ισχύ είναι υψηλότερη από ένα συγκεκριμένο όριο P_{thres} .

Το LoRaWAN ακολουθεί το πρωτόκολλο ALOHA. Η πιθανότητα σύγκρουσης για G προσπάθειες μετάδοσης σε k μεταδόσεις σε ένα διάστημα μετάδοσης, είναι:

$$\frac{1}{k!} G^k e^{-G}$$

Επομένως, όταν το διάστημα μετάδοσης είναι T, η πιθανότητα ακριβώς ένας κόμβος να ξεκινήσει την μετάδοση κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε εντός του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος από $t = 2nT$ μέχρι $t = 2(n+1)T$ είναι $G^k e^{-G}$ και για την αμέσως επόμενη περίοδο $t = 2(n+1)T$ έως $t = 2(n+2)T$ το να μην μεταδώσει κανένας κόμβος είναι e^{-G} . Για να θεωρηθεί πετυχημένη η μετάδοση ενός πλαισίου τα δύο αυτά γεγονότα πρέπει να συμβούν διαδοχικά. Άρα η πιθανότητα να συμβούν τα δύο ανεξάρτητα συμβάντα είναι $G^k e^{-2G}$ από όπου προκύπτει το ποσοστό παράδοσης των

πακέτων στο LoRaWAN. Αν μπορούν να επιλεγθούν f συχνότητες για την μετάδοση ενός uplink μηνύματος, τότε αυτό το ποσοστό μπορεί να βελτιωθεί κατά f και η πιθανότητα γίνεται $fG^k e^{-2G}$ [41].

Για την μετάδοση εφαρμόζονται μοντέλα που λειτουργούν για μεγάλες αποστάσεις, όπου η ισχύς του ληφθέντος σήματος μπορεί να παρουσιάσει διακυμάνσεις λόγω αντικειμένων του περιβάλλοντος που παρεμβάλλονται στο ενδιαμέσο και δίνεται από την σχέση:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 * n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma [dB].$$

Εξ' ορισμού παράμετροι έχουν τις παρακάτω τιμές:

$$d_0 = 1000 \text{ m},$$

$$PL(d_0) = 128.95 \text{ dB}$$

$$X_\sigma = 7.8 \text{ dB}$$

$$n = 2.32$$

Επίσης μπορεί να προσομοιωθεί και κάποιος κόμβος ο οποίος μπορεί να βρίσκεται σε κάποιο εσωτερικό σημείο όπου λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο θορύβου. Για το μοντέλο σύγκρουσης λαμβάνεται υπόψη η κεντρική συχνότητα, ο συντελεστής εξάπλωσης (SF) και η πιθανότητα να συγκρουστούν δύο πακέτα [28].

6.1.3 Πύλη (Gateway)

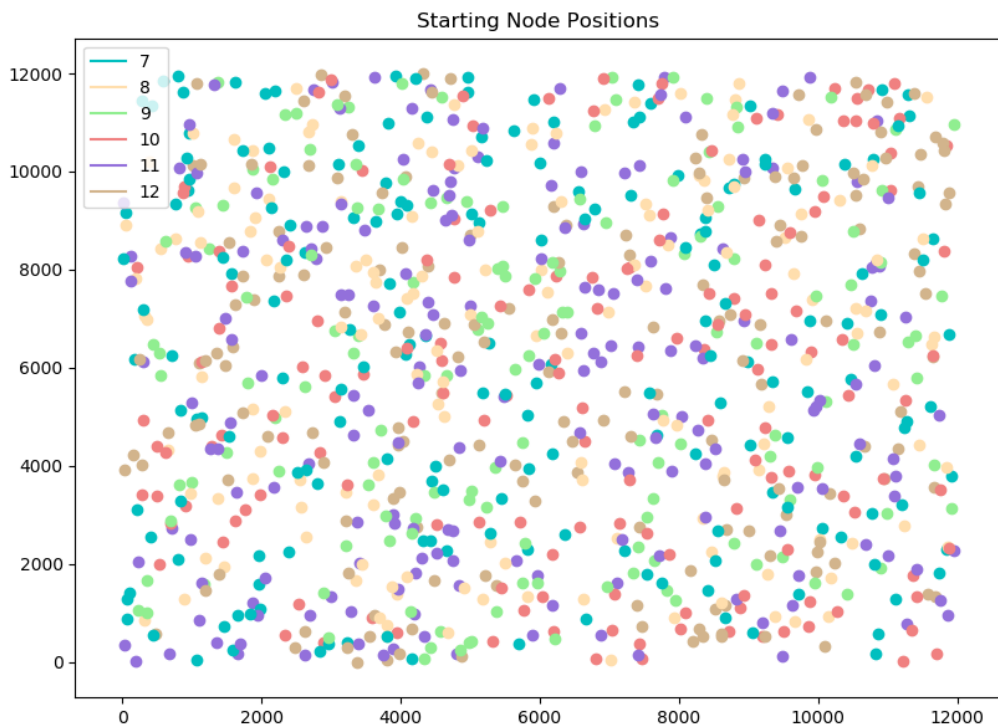
Το μοντέλο της πύλης είναι βασισμένο στο iC880A. Είναι ικανό να λάβει μέχρι και οκτώ πακέτα που αποστέλλονται ταυτόχρονα με διαφορετικά SF σε διαφορετικά κανάλια. Στο μοντέλο αυτό διαφέρει, καθώς ένα πακέτο μπορεί να ληφθεί αν δεν έχει συγκρουστεί και αν η ισχύς του σήματος είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία του δέκτη. Μετά την αναδιαμόρφωση του σήματος η πύλη εκτελεί το ADR.

Ανάλογα με τις παραμέτρους του μηνύματος ανερχόμενης ζεύξης, η πύλη ανταποκρίνεται με ένα μήνυμα κατερχόμενης ζεύξης που θα φτάσει στον κόμβο. Τα downlink μηνύματα, προγραμματίζονται από την πύλη έτσι ώστε να καταναλώνουν την λιγότερη δυνατή ενέργεια. Για παράδειγμα αν το uplink που έχει δεχθεί έχει SF 12 η πύλη προσπαθεί να προγραμματίσει ένα μήνυμα με SF 9 στην δεύτερη υποδοχή.

6.2 Προσαρμογή κόμβων

Ο προσομοιωτής που περιγράφεται παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για να παρατηρηθεί η κατανομή των SF καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Το πείραμα έγινε για 1000 κόμβους σε μία περιοχή με ακτίνα 12000 και 24000 μ.. Όλοι οι κόμβοι μετέδιδαν σε κάποια από τις φέρουσες συχνότητες των 868.1, 868.3 και 868.5 MHz, που επιλέχθηκε τυχαία, bandwidth 125 kHz, μεταβλητή απώλεια καναλιού $\sigma = 7,8 \text{ dB}$ και αρχική ισχύ μετάδοσης στα 5 dBm.

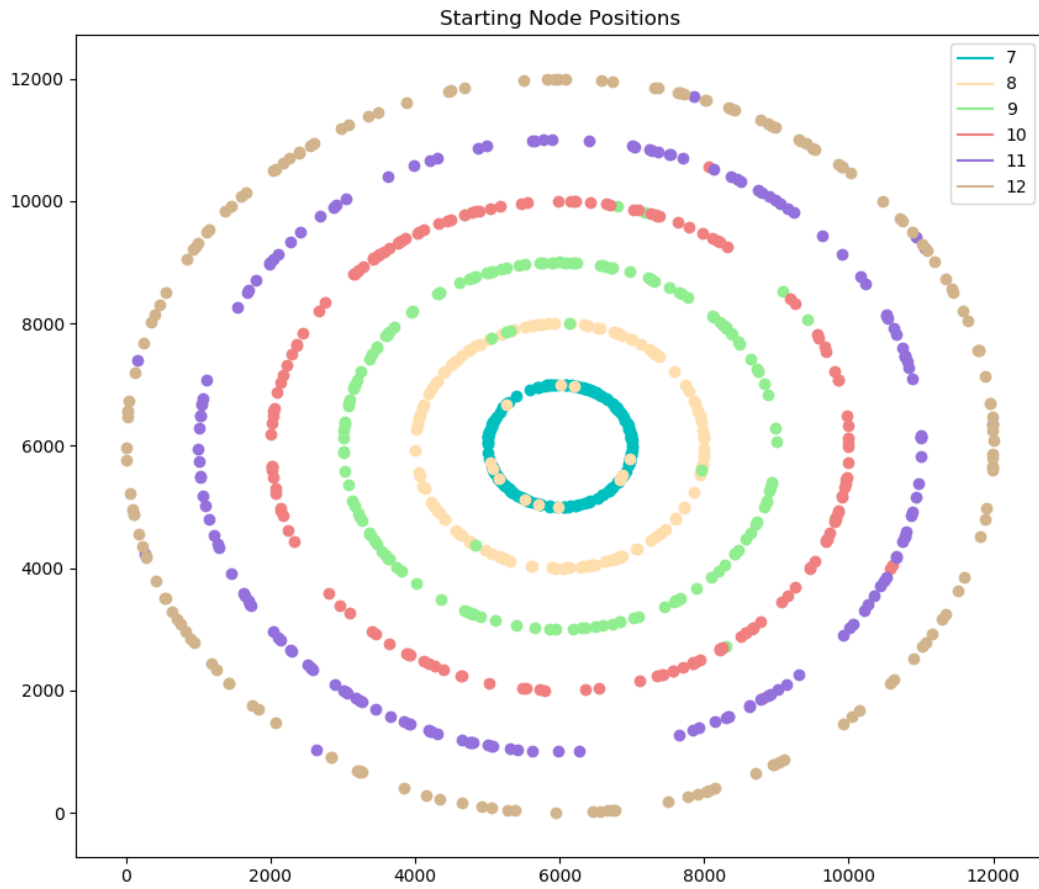
Για τις δύο πρώτες περιπτώσεις οι θέσεις των κόμβων τοποθετούνται τυχαία στην περιοχή έκτασης του πειράματος όπως φαίνεται στην [εικόνα 32](#). Για την τρίτη περίπτωση η διάταξη των κόμβων είναι λίγο διαφορετική. Οι κόμβοι τοποθετούνται σε ομόκεντρους κύκλους γύρο από την κεντρική πύλη, και σε κάθε έναν από αυτούς τους κύκλους η ακτίνα από το κέντρο αυξάνεται κατά μια σταθερή απόσταση μέχρι ο τελευταίος να έχει ακτίνα ίση με την ακτίνα της περιοχής.



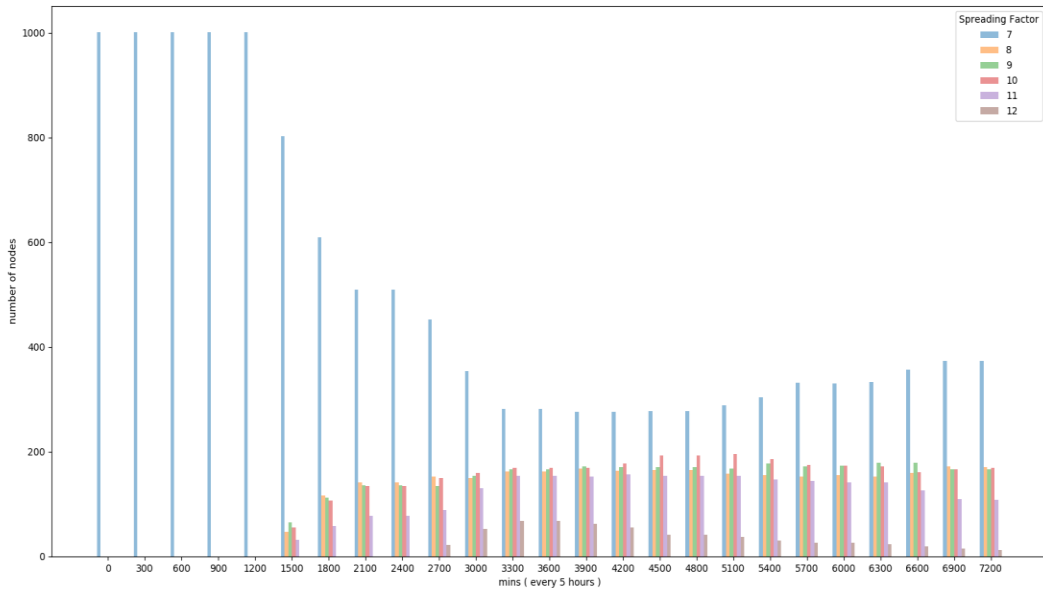
Εικόνα 32 - Αρχική διάταξη κόμβων τυχαία στο χώρο

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή και οι τιμές του SF που προέκυψαν με τις παραπάνω διατάξεις με ενεργοποιημένο το ADR για χρόνο προσομοίωσης 5 ημερών και η κάθε καταχώρηση που φαίνεται στα διαγράμματα είναι για με διαφορά 5 ωρών μεταξύ τους. Στην [εικόνα 34](#) η αρχική τιμή SF των συσκευών είχε καθορισμένη τιμή SF = 7, ενώ στην [εικόνα 35](#) οι τιμές καθορίστηκαν τυχαία. Κατά την τρίτη περίπτωση ([εικόνα 36](#)) στον κύκλο πιο κοντά στο κέντρο, το πρώτο 1/6 των κόμβων παίρνει την μικρότερη τιμή SF = 7, το επόμενο 1/6 των κόμβων την τιμή SF=8,

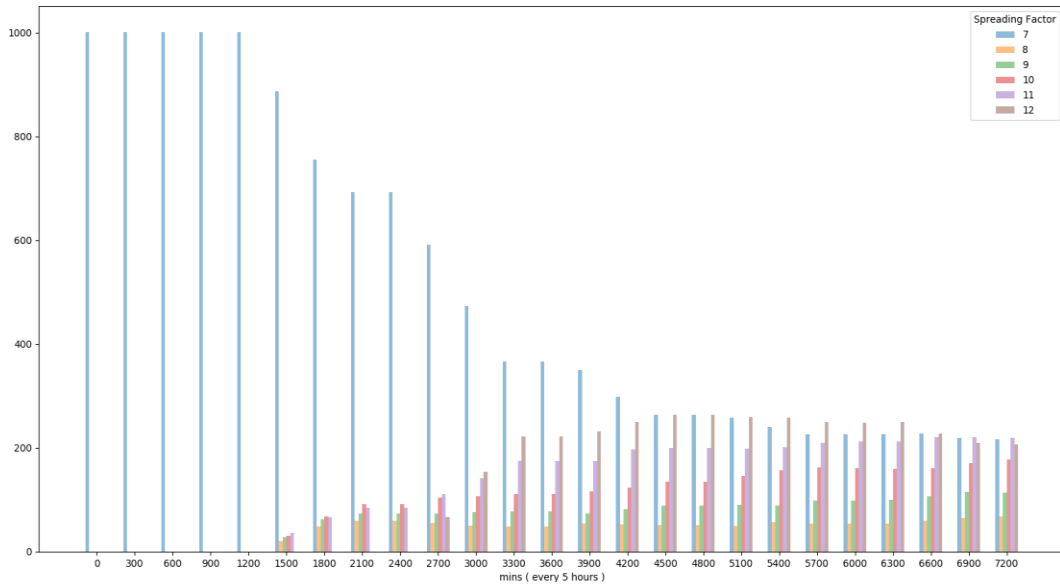
και συνεχίζει με αυτόν τον τρόπο. Οι κόμβοι τοποθετούνται τυχαία πάνω σε κάποιον από τους κύκλους και έτσι ο αριθμός τους δεν είναι ίδιος κάθε φορά. Αυτή η κατανομή των κόμβων φαίνεται στην [εικόνα 33](#).



Εικόνα 33 - Κατανομή SF στους κόμβους ανάλογα με την απόστασή τους από το κέντρο

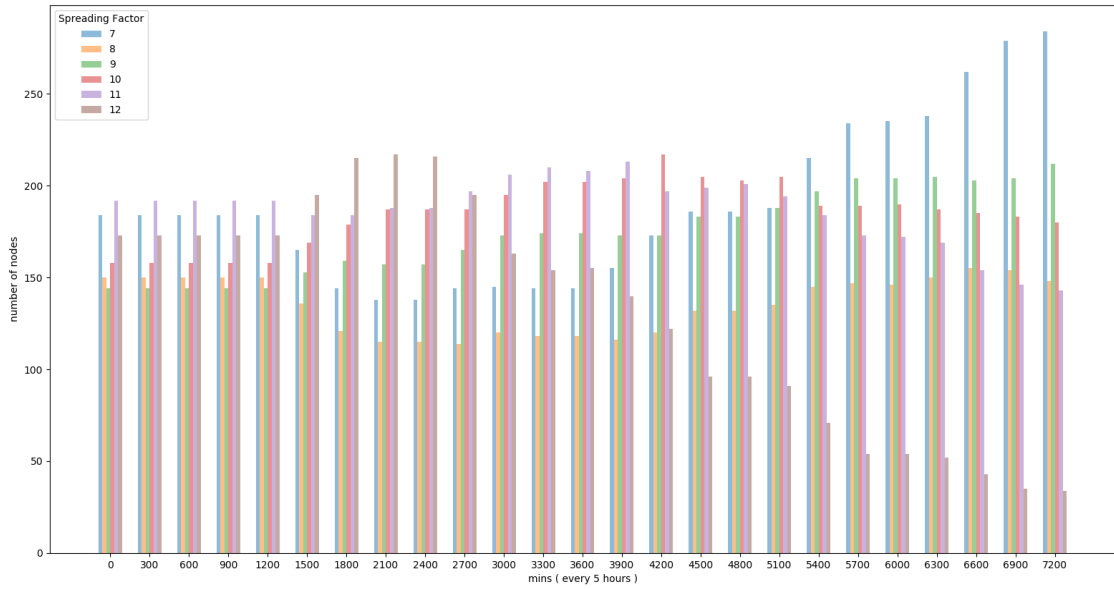


(a)

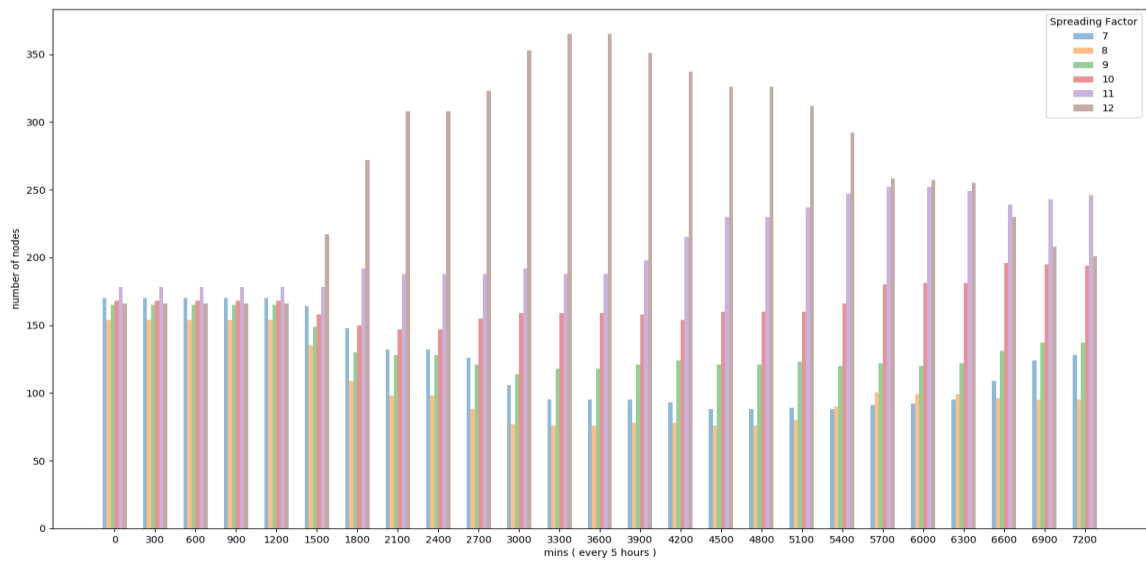


(b)

Εικόνα 34 - Διαμοιρασμός των SF κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με καθορισμένη τιμή κατά την αρχή της προσομοίωσης. a) συνολική έκταση 12000 μ, b) συνολική έκταση 24000 μ

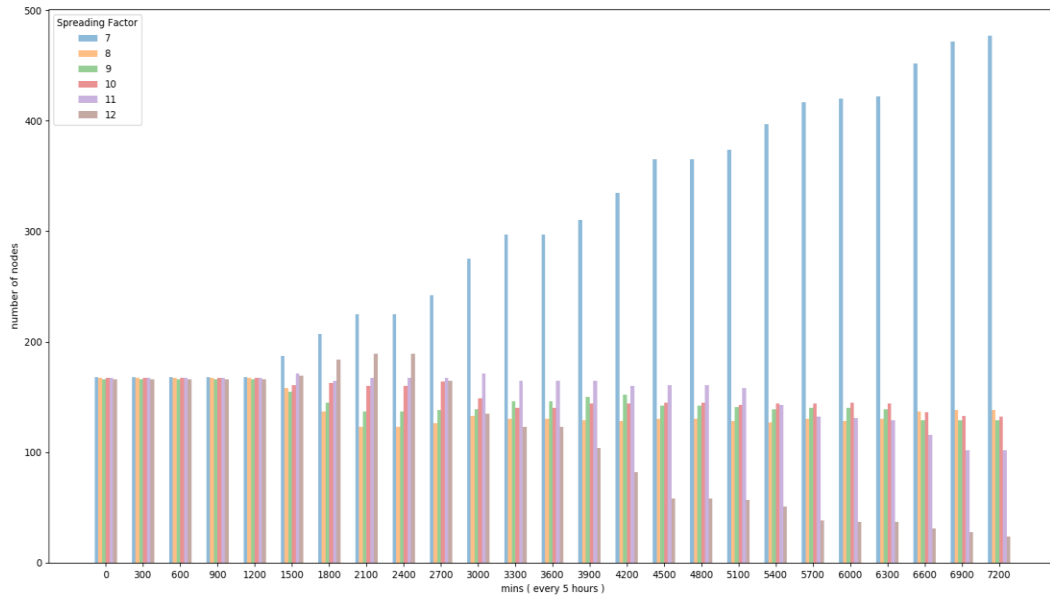


(a)

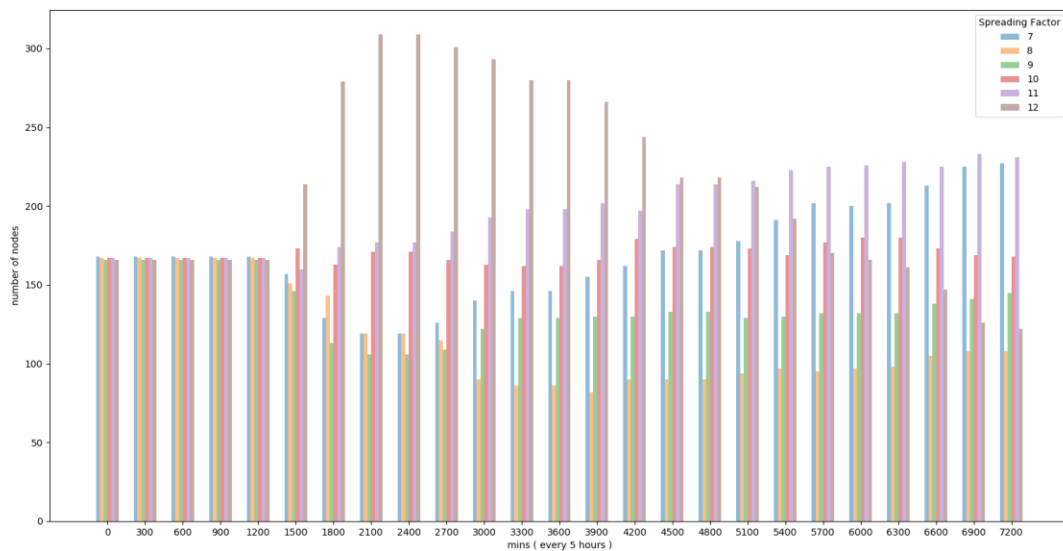


(b)

Εικόνα 35 - Διαμοιρασμός των SF κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με τυχαία τιμή κατά την αρχή της προσομοίωσης. α) συνολική έκταση 12000 μ, β) συνολική έκταση 24000 μ



(a)



(b)

Εικόνα 36 – Διαμοιρασμός των SF κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με επιλογή SF ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο στην αρχή της προσομοίωσης. a) Συνολική έκταση 12000 μ, b) συνολική έκταση 24000 μ

Και στις τρεις περιπτώσεις, στην πάνω εικόνα, οι περισσότεροι κόμβοι έχουν μικρό SF όταν ολοκληρώνεται η προσομοίωση. Τελικά οι κόμβοι με SF 7 είναι περισσότεροι και στις όλες τις περιπτώσεις, και αυτό γιατί η απόσταση τους από την κεντρική πύλη, η οποία βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής, είναι σχετικά μικρή. Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να έχει κάποιος κόμβος, στις δύο πρώτες περιπτώσεις, με βάση το πυθαγόρειο θεώρημα είναι 8485 μ. και για την άλλη περίπτωση είναι όσο η ακτίνα του μεγαλύτερου κύκλου 6000. Για την έκταση των 24000 μ., η μέγιστη απόσταση που μπορεί να έχει ένας

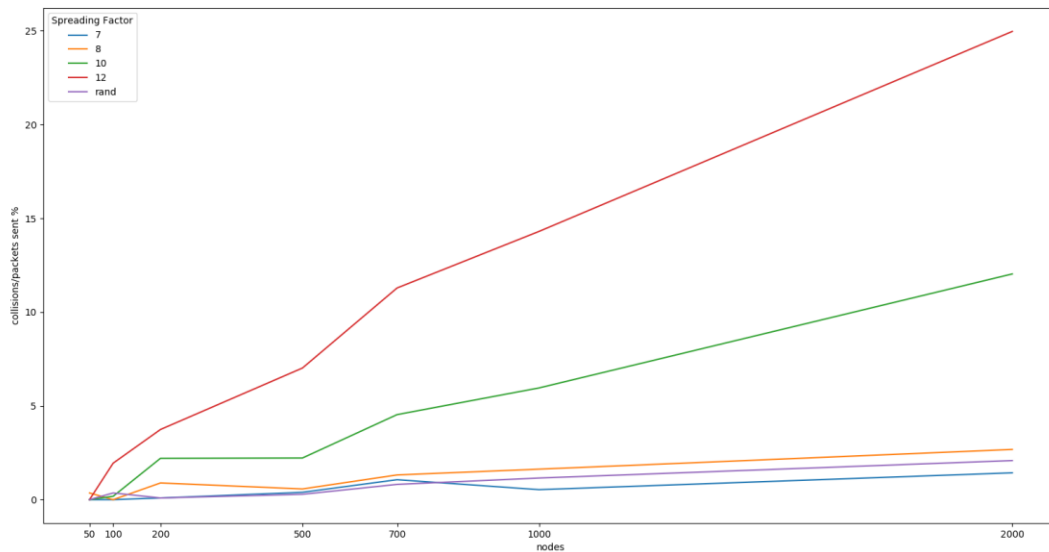
κόμβος είναι 16970 μ. και 12000 μ., αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση οι κόμβοι προσαρμόζονται σε μεγαλύτερες τιμές SF. Στον πίνακα 8 φαίνεται ο τελικός ο αριθμός των κόμβων για κάθε SF κατά το τέλος της προσομοίωσης .

Πίνακας 8 - Τελικές τιμές SF μετά το τέλος της προσομοίωσης

SF	Προκαθορισμένο αρχικό SF = 7		Τυχαίο αρχικό SF		Αρχικό SF σχετικά με την απόσταση	
	12000μ	24000μ	12000μ	24000μ	12000μ	24000μ
7	374	215	284	127	477	226
8	171	68	148	95	138	108
9	166	114	212	137	129	145
10	169	177	180	194	131	168
11	108	219	142	246	102	231
12	12	207	34	201	23	122

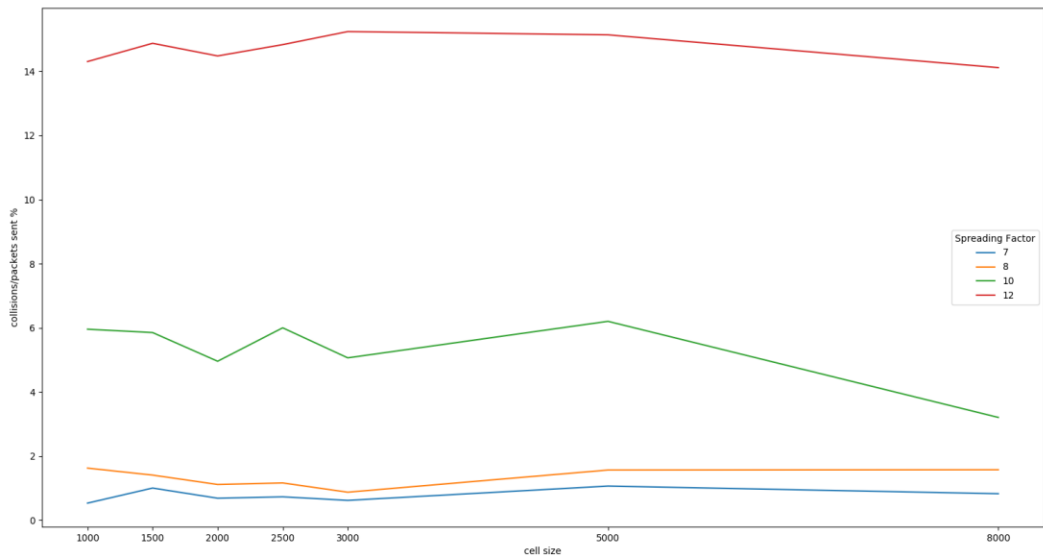
6.3 Ποσοστό συγκρούσεων και χαμένων πακέτων

Σε αυτήν την προσομοίωση καταγράφεται το ποσοστό των συγκρούσεων για διάφορα SF και κατά πόσο αυτό επηρεάζεται από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις οι κόμβοι ήταν τυχαία διασκορπισμένοι σε μια περιοχή 1000 * 1000 μ. παρόμοια με την [εικόνα 32](#). Οι κόμβοι μετάδιδαν κάθε φορά τυχαία σε κάποια από τις συχνότητες 868.1, 868.3 και 868.5 MHz με εύρος ζώνης τα 125 kHz, με βάση τους ευρωπαϊκούς περιορισμούς και αρχική ισχύ μετάδοσης των κόμβων μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή τα 14dB. Για το κάθε SF η προσομοίωση επαναλήφθηκε για 10 φορές για να πάρουμε την μέση τιμή για όλες τις παραμέτρους. Επίσης έγινε και μία προσομοίωση, όπου οι κόμβοι πήραν μία τυχαία τιμή SF. Ο συνολικός χρόνος της κάθε προσομοίωσης ήταν 10 ημέρες. Το ADR είναι απενεργοποιημένο αφού θέλουμε να ελέγξουμε ένα SF την φορά.



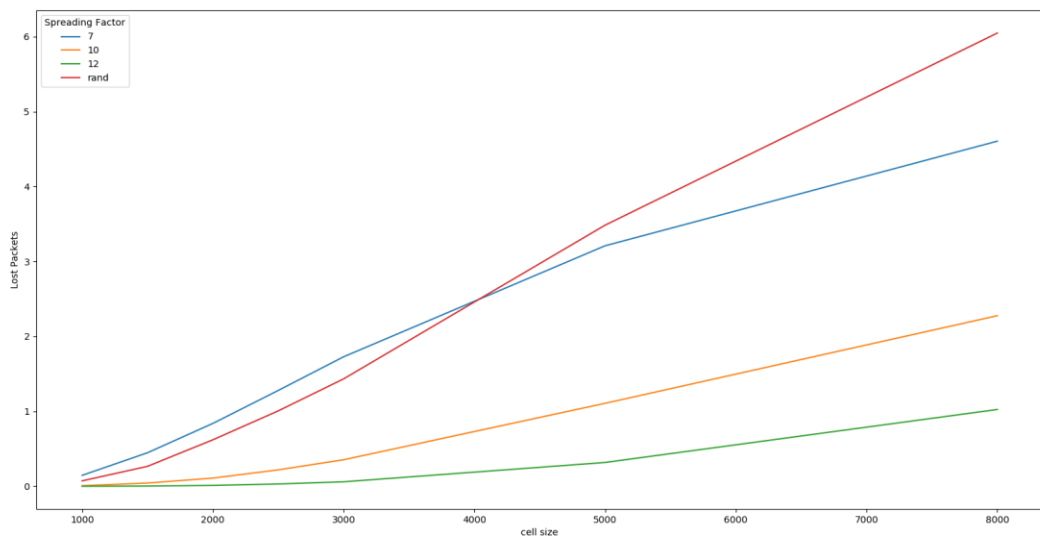
Εικόνα 37– Ποσοστό συγκρούσεων των διαφόρων SF για διαφορετικούς αριθμούς κόμβων

Στην [εικόνα 37](#) φαίνονται τα αποτελέσματα για την παραπάνω προσομοίωση. Το ποσοστό των συγκρούσεων για τα δίκτυα με 50 κόμβους είναι μηδενικό για όλες τις τιμές των SF. Καθώς όμως ο πληθυσμός του δικτύου αυξάνεται, οι συγκρούσεις των πακέτων γίνονται περισσότερες. Για τις μικρές τιμές των SF (7 και 8) αυτήν αύξηση γίνεται με μικρό βαθμό μέχρι μικρότερη του 1% για τους 200 κόμβους, ενώ για τα μεγαλύτερα SF η τιμή αυτή φτάνει το 4%. Τέλος για ένα αρκετά πυκνό δίκτυο με 2000 συσκευές παρατηρούμε ότι το ποσοστό των χαμένων πακέτων για την μεγαλύτερη τιμή SF, αγγίζει και το 25% σε αντίθεση με τα μικρότερα τα οποία δεν ξεπερνούν το 2%. Τα πακέτα όσο μεγαλύτερη τιμή SF έχουν τόσο περισσότερη ώρα μένουν στον αέρα καταλαμβάνοντας κάποιο από τα κανάλια και έτσι είναι πιθανότερο να προκύψουν συγκρούσεις κατά τη διάδοση. Στο LoRa, οι συγκρούσεις συμβαίνουν όταν δύο ή περισσότερα πακέτα αλληλεπικαλύπτονται και χρησιμοποιούν τις ίδιες παραμέτρους LoRa, δηλ. τον ίδιο παράγοντα εξάπλωσης (SF), εύρος ζώνης (BW) και συχνότητα φορέα (CF). Στην περίπτωσή μας το SF και το BW είναι σταθερό οπότε αν θα υπάρξει σύγκρουση καθορίζεται αν τα πακέτα έχουν την ίδια CF και από τον χρόνο που καταλαμβάνουν το κανάλι μετάδοσης. Στην [εικόνα 38](#) η κάθε προσομοίωση έγινε για 1000 και σε κάθε νέα προσομοίωση η ακτίνα της περιοχής μεγάλωνε. Βλέπουμε ότι οι καμπύλες είναι σχετικά παράλληλες με τον οριζόντιο άξονα. Οι συγκρούσεις δεν εξαρτώνται από το μέγεθος της έκτασης του δικτύου.



Εικόνα 38 – Ποσοστό συγκρούσεων για διάφορα SF σε σχέση με την έκταση του δικτύου

Στην [εικόνα 39](#) φαίνεται το ποσοστό των πακέτων τα οποία η μετάδοσή τους έγινε από την τερματική συσκευή αλλά δεν έφτασαν ποτέ στην GW. Στο συγκεκριμένο πείραμα οι κόμβοι ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους με πριν με μόνη διαφορά ότι σε αυτήν περίπτωση για την κάθε προσομοίωση μεγαλώνει η έκταση της περιοχής όπου σκορπίζονται οι κόμβοι. Στο διάγραμμα φαίνεται ότι η για τις μεγάλες αποστάσεις οι μεγαλύτερες τιμές SF είναι πιο αποτελεσματικές, καθώς για SF = 12 τα πακέτα που χάνονται είναι λιγότερα με ποσοστό μικρότερο του 1%, ενώ για SF = 7 το ποσοστό ανεβαίνει στα 4%. Λόγω της απόστασης το σήμα που έχει σταλεί εξασθενεί και δεν μπορεί να ληφθεί από τον δεκτή. Οι μεγαλύτερες τιμές SF έχουν χαμηλότερα bitrates και χαμηλότερη ευαισθησία δεκτή. Στον πίνακα 9 φαίνεται η ευαισθησία του iC880A δεκτή, ο οποίος χρησιμοποιείται στην προσομοίωση.



Εικόνα 39 – Ποσοστό χαμένων πακέτων για διάφορα μεγέθη έκτασης.

Πίνακας 9 - Απόδοση της iC880A [40]

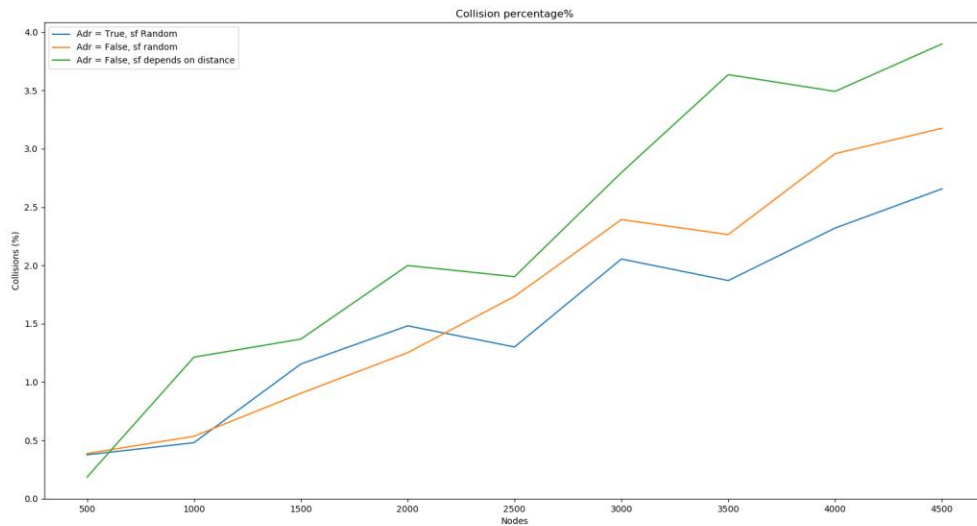
SF	Bandwidth (kHz)	Sensitivity (dBm)
7	125	-126
12	125	-137
7	250	-123
12	250	-136
7	500	-120
12	500	-134

Κατά την μετάδοση των πακέτων, ο δείκτης για την απώλειά τους αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την μέτρηση της απόδοσης του δικτύου. Η απώλεια πακέτων αναφέρεται σε πλαίσια που δεν έχουν ληφθεί από την GW του δικτύου. Τέτοια πακέτα είτε δεν λαμβάνονται καθόλου από την πύλη, είτε η λήψη τους γίνεται με αλλοιωμένο το CRC έτσι ώστε να μην είναι δυνατών να αποκωδικοποιηθούν.

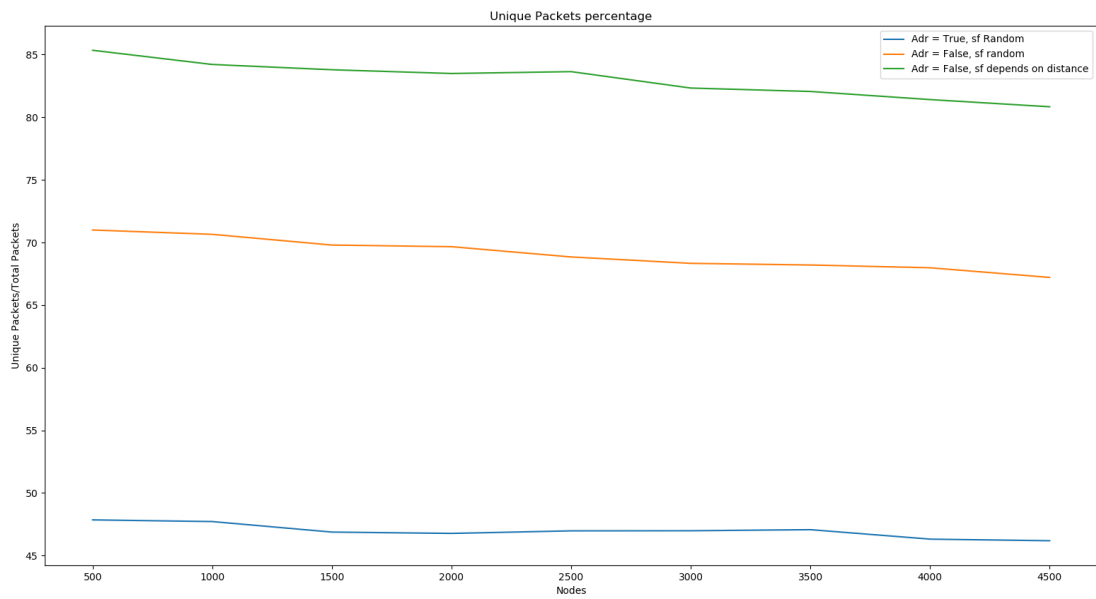
6.4 Κατανομή SF ανάλογα με την απόσταση από την GW

Στις παρακάτω εικόνες γίνεται σύγκριση το ποσοστό των συγκρούσεων και το ποσοστό των πακέτων τα οποία έφτασαν στον προορισμό τους χωρίς να χρειαστεί να γίνει αναμετάδοση τους από κάποιο κόμβο. Σε αυτή την περίπτωση εξετάζονται τρεις περιπτώσεις. Για την πρώτη περίπτωση έχουμε ενεργοποιημένο το ADR και οι κόμβοι έχουν μια τυχαία κατανομή SF, στην δεύτερη έχουμε τυχαία κατανομή των SF χωρίς το ADR και για την τρίτη περίπτωση ο κάθε κόμβος έχει πάρει ένα SF σχετικά με την απόστασή του από το κέντρο, όπου είναι τοποθετημένη η GW. Και στις τρεις περιπτώσεις οι τοποθεσίες των κόμβων είναι σε ομοκέντρους κύκλους γύρο από το κεντρικό σημείο όπως περιγράφεται παραπάνω (εικόνα 33). Στην εικόνα 40 φαίνεται ότι οι συγκρούσεις για λίγους κόμβους δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη του ADR. Η διαφορά αρχίζει να γίνεται συνειδητή για περισσότερους κόμβους. Δίνοντας εμείς συγκεκριμένο SF στους κόμβους οι συγκρούσεις είναι περισσότερες αλλά τα πακέτα τα οποία χάνονται είναι πολύ λιγότερα (εικόνα 41) καθώς ο SF είναι από την

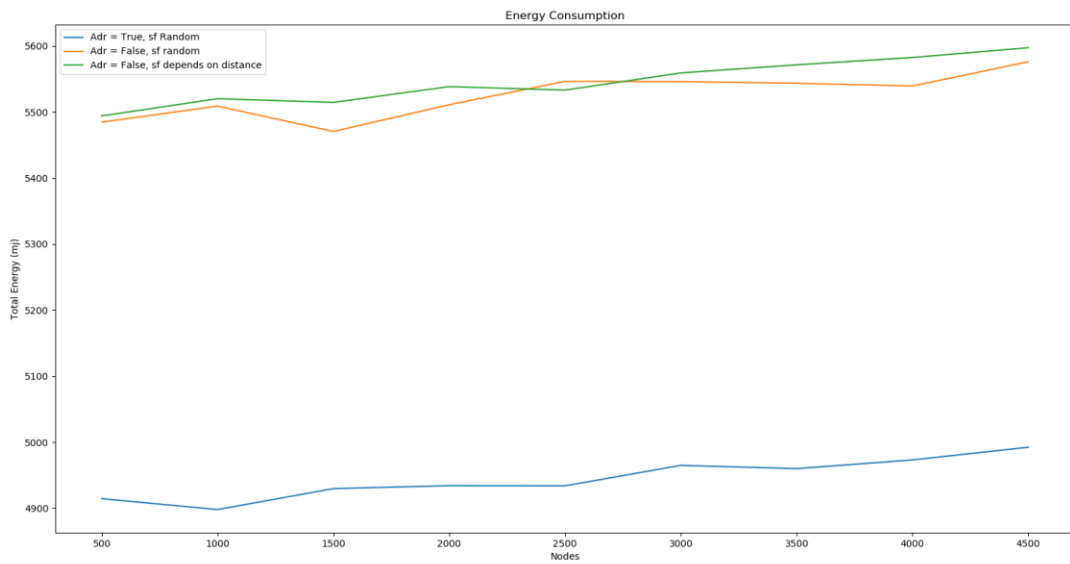
αρχή κατάλληλος. Τέλος στην [εικόνα 42](#) βλέπουμε τον μέσω όρο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για κάθε κόμβο σε κάθε προσομοίωση. Παρατηρείται ότι στο σύστημα με ενεργό το ADR η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρότερη από τις άλλες δύο περιπτώσεις στις οποίες η ισχύς μετάδοσης είναι καθ' όλη την διάρκεια στην μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή (14 dBm), το οποίο βοηθάει στην αποτελεσματικότητα του δικτύου αλλά όχι στην οικονομία ενέργειας που είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στα LoRaWAN δίκτυα. Βλέποντας τις [εικόνες 41](#) και [42](#) και παρατηρώντας την πράσινη καμπύλη όπου οι τερματικές συσκευές έχουν τοποθετηθεί ανάλογα με την απόστασή τα πακέτα που χάνονται είναι πολύ λιγότερα αλλά η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλή γιατί οι παράμετροι του δικτύου δεν έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα. Πρέπει πάντα να κρατείται μια ισορροπία ανάμεσα στην απόδοση και τη κατανάλωση πράγμα που κάνει το ADR.



Εικόνα 40 - Ποσοστό συγκρούσεων



Εικόνα 41 – Ποσοστό μοναδικών πακέτων



Εικόνα 42- Συνολική ενέργεια που καταναλώθηκε από τους κόμβους του συστήματος σε mJ

7 Σύνοψη και τελικά συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε μια από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες LPWAN, τη LoRa, και κατ' επέκταση το πρωτόκολλο που την συνοδεύει LoRaWAN. Το LoRa και το LoRaWAN αποτελούν μία αποτελεσματική και οικονομική λύση για δίκτυα τα οποία πρέπει να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις και να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για το λόγο αυτό το τεχνολογία αυτή έχει ήδη βρει πολλές εφαρμογές όπως στο IoT όπως είναι η παρακολούθηση των μεταβλητών του περιβάλλοντος στα πλαίσια μιας έξυπνης πόλης ή την απομακρυσμένη διάγνωση και παρακολούθηση ασθενών διευκολύνοντας την καθημερινή ζωή των πολιτών.

Μετά από μια εισαγωγή που κάλυψε εν συντομία το IoT και τις τεχνολογίες που το αποτελούν, αναφέρθηκαν κάποιοι από τους τομείς που το IoT έχει βρει εφαρμογή. Στην συνέχεια αναφέρονται το LoRa και οι υπόλοιπες τεχνολογίες LPWAN. Στην τρίτη ενότητα γίνεται εκτενέστερη κάλυψη του LoRa ακολουθεί η ανάλυση του LoRaWAN που τυποποιεί τα χαρακτηριστικά του στρώματος MAC, την τοπολογία του δικτύου, τις κατηγορίες συσκευών και τη διαδικασία αναμετάδοσης, μαζί με τις παραμέτρους των που καθορίζονται για την κάθε γεωγραφική περιοχή. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται μερικές προτάσεις βασισμένες στην βιβλιογραφία οι οποίες επικεντρώνονται στην βελτιστοποίηση του πρωτοκόλλου και στην καλύτερη απόδοση του δικτύου. Στη συνέχεια περιγράφεται μια υλοποίηση LoRaWAN ενός προσομοιωτή ανοικτού κώδικα. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται προσομοιώσεις σχετικές με την συμπεριφορά των κόμβων και την απόδοση του δικτύου σε διάφορα σενάρια.

Όπως είδαμε στις προσομοιώσεις και στην βιβλιογραφία η τεχνολογία LoRaWAN μπορεί φανεί χρήσιμη δίνοντας λύση σε πολλά προβλήματα. Παρόλα αυτά αποτελεί μια νέα τεχνολογία και γίνονται συνεχώς προσπάθειες για βελτίωση.

Βιβλιογραφία

- [1] Yonghua Song, Jin Lin, Shufeng Dong, “An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN”, *Engineering*, vol 3, Issue 4, Σελίδες 460 – 466, Αύγουστος, 1, 2017, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.011>
- [2] Kais Mekkia, Eddy Bajica, Frederic Chaxela, Fernand Meyerb, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”, *ICT Express*, Ιανουάριος, 4, 2018, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- [3] Hassan Malik, Muhammad Mahtab Alam, Yannick Le Moullec, Alar Kuusik, “Narrow Band - IoT Performance Analysis for Healthcare Applications”, *Pr. Comp. Sc.*, vol 130, Pages 1077-1083, 2018, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.156>
- [4] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung - Hoon Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT”, *ICT Express*, vol 3, τεύχος 1, Μάρτιος, 2017, σελ. 14 – 21, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>
- [5] Jetmir Haxhibeqiri, Eli De Poorter, Ingrid Moerman, Jeroen Hoebeke, “A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application”, *sensors*, vol 18, τεύχος 11, Νοέμβριος, 16, 2018, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/s18113995>
- [6] Dimitrios Zorbas, Georgios Z. Papadopoulos, Patrick Mailley, Nicolas Montavonty, Christos Douligeris, “Improving LoRa Network Capacity Using Multiple Spreading Factor Configurations”, παρουσιάστηκε στο 25th International Conference on Telecommunications, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1109/ICT.2018.8464901>
- [7] Alexandru - Ioan Pop, Usman Raza, Parag Kulkarniy, Mahesh Sooriyabandara, “Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based LPWA Networks?”, Διαθέσιμο: <https://arxiv.org/abs/1704.04174>
- [8] Akram H. Jebri, AduwatiSali, Alyani Ismail, Mohd Fadlee A. Rasid, “Overcoming Limitations of LoRa Physical Layer in Image Transmission”, *sensors*, vol 18, τεύχος 10, Σεπτέμβριος, 27, 2018, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/s18103257>
- [9] Martin Bor, UtzRoedig, Thiemo Voigt, Juan M. Alonso, “Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?”, παρουσιάστηκε στο *MSWiM '16*, Νοέμβριος, 2016, Διαθέσιμο: <http://doi.org/10.1145/2988287.2989163>
- [10] Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Randa Jaouadi, “Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN”, *sensors*, vol 18, τεύχος 7, Ιούνιος, 30, 2018, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/s18072104>

- [11] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, William Mark Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things”, *sensors*, vol 16, τεύχος 9, Σεπτέμβριος, 9, 2016, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- [12] Chékra El Fehri, Mohamed Kassab, Slim Abdellatif, Pascal Berthou, Abdelfettah Belghith, “LoRa technology MAC layer operations and Research issues”, *Pr. Com. Sc.*, vol 130, σελ 1096 – 1101, 2018, Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.162>
- [13] Andreea-Maria Tirziu, CatalinVrabie, “The role of Internet of Things in developing smart cities”, *MPRA*, Αύγουστος, 6, 2018, διαθέσιμο: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/88290/>
- [14] Krishan Kumar Goyal, Amit Garg, Ankur Rastogi, Saurabh Singhal, “A Literature Survey on Internet of Things (IoT)”, *Int. J. Advanced Networking and Applications*, vol 09 τεύχος 6, σελ 3663 - 3668, Μάρτιος , 2018, Διαθέσιμο: <http://oaji.net/articles/2017/2698-1528118826.pdf>
- [15] Suraj Choudhari, Tejas Rasal, Shubham Suryawanshi, Mayur Mane, Satish Yedge, “Survey Paper on Internet of Things: IoT”, *IJESC*, vol 7, τεύχος 4, διαθέσιμο: <http://ijesc.org/upload/c111abc7b56a07619a887aa474ca5590.Survey%20Paper%20on%20Internet%20of%20Things%20IoT.pdf>
- [16] Dashrath Mane, Sangita Yadav, “A Survey on Technologies, Applications and Challenges of IoT”, *IJAR CET*, Vol 6, τεύχος 6, Ιούνιος, 2017, διαθέσιμο: <http://ijarcet.org/wp-content/uploads/IJAR CET-VOL-6-ISSUE-6-932-935.pdf>
- [17] Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, Moussa Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications”, *IEEE*, VOL. 17, 2015, διαθέσιμο: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7123563>
- [18] Cisco, “Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are”, διαθέσιμο: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/trends/iot/docs/computing-overview.pdf
- [19] Thorsten Kramp, Rob van Kranenburg, Sebastian Lange, “Introduction to the Internet of Things” σε “Enabling Things to Talk”, διαθέσιμο: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-40403-0_1
- [20] Suk Kyu Lee, Mungyu Bae, Hwangnam Kim, “Future of IoT Networks: A Survey”, *Appl. Sci.*, ,vol 7 τεύχος10, Οκτώβριος, 16, 2017, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/app7101072>
- [21] Qahhar Muhammad Qadir, Tarik A. Rashid, Nawzad K. Al-Salihi, Birzo Ismael, Alexander A. Kist, Zhongweu Zhang, “Low Power Wide Area Networks: A survey of Enabling Technologies, Applications and Interoperability Needs”, *IEEE access*, Νοέμβριος, 28, 2018, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883151>

- [22] Dali Ismail, Mahbubur Rahman, Abusayeed Saifullah, “Low - Power Wide - Area Networks: Opportunities, Challenges, and Directions”, Workshops ICDCN ‘18, Ιανουάριος, 2018, διαθέσιμο: <http://www.cs.wayne.edu/saifullah/scc18.pdf>
- [23] Abib Mehmood, Iynkaran Natgunanathan, Yong Xiang, Guang Hua, Song Guo, “Protection of Big Data Privacy”, IEEE Access, Μάιος, 9, 2016, διαθέσιμο : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2558446>
- [24] Frost & Sullivan White Paper, “Growing Industry Applications of LPWAN Technologies”, διαθέσιμο: https://rfdesignuk.com/uploads/9/4/6/0/94609530/murata_lpwan_study.pdf
- [25] Nikola Jovalekic, Vujo Drndarevic, Ermanno Pietrosemoli, Iain Darby, Marco Zennaro, “Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater”, Sensors, Αύγουστος, 2018, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/s18092853>
- [26] Shengyang Li, Usman Raza, Aftab Khan, “How Agile is the Adaptive Data Rate Mechanism of LoRaWAN?”, 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Δεκέμβριος, 2018, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2018.8647469>
- [27] LoRa Alliance Inc, “LoRaWAN™ 1.1 Specification”, 2017, διαθέσιμο: https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf
- [28] Gilles Callebaut, Geoffrey Ottoy, Liesbet Van der Perre, “Cross-layer framework and optimization for efficient use of the energy budget of IoT Nodes”, Ιούνιος, 22, 2018, διαθέσιμο: <https://arxiv.org/pdf/1806.08624.pdf>
- [29] Sebastián García, Diego F. Larios, Julio Barbancho, Enrique Personal, Javier M. Mora-Merchán, Carlos León, “Heterogeneous LoRa-Based Wireless Multimedia Sensor Network Multiprocessor Platform for Environmental Monitoring”, Αύγουστος, 2019, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/s19163446>
- [30] Semtech, “LoRa™ Modulation Basics”, διαθέσιμο: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [31] Giuseppe Bianchi, Francesca Cuomo, Domenico Garlisi, Ilenia Tinnirello, “Sequential Waterfilling for Adaptive Data Rate allocation in LoraWAN”, Ιούλιος, 2019, διαθέσιμο: <https://arxiv.org/pdf/1907.12360.pdf>
- [32] LoRa Alliance White Paper, “LoRaWAN™ SECURITY”, διαθέσιμο: https://loralliance.org/sites/default/files/2019-05/lorawan_security_whitepaper.pdf
- [33] Ismail Butun, Nuno Pereira, Mikael Gidlund, “Security Risk Analysis of LoRaWAN and Future Directions”, Future Internet, Δεκέμβριος, 2018, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/fi11010003>

- [34] M. Knight, B. Seeber, “Decoding LoRa: Realizing a modern LPWAN with SDR,” 6th GNU Radio Conference, διαθέσιμο: <https://pubs.gnuradio.org/index.php/grcon/article/view/8/7>
- [35] Link Labs, “What Is Weightless?”, Νοέμβριος, 2015, διαθέσιμο: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-weightless>
- [36] zTrack, <http://ztrackmap.com/2017/03/16/can-determine-battery-lifetime-lorawandevices/>
- [37] Ruben M. Sandoval, Antonio-Javier Garcia-Sanchez, Joan Garcia – Haro, “Performance optimization of LoRa nodes for the future smart city/industry”, EURASIP Journal, 2019, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1522-1>
- [38] S. Hoeller Jr., Onel Luis Alcaraz López, Hirley Alves, “Analysis and Performance Optimization of LoRa Networks with Time and Antenna Diversity”, IEEE Access, Ιούνιος, 2018, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2839064>
- [39] Dong-Hoon Kim, Eun-Kyu Lee, Jibum Kim, “Experiencing LoRa Network Establishment on a Smart Energy Campus Testbed”, Sustainable Communication Networks, Μάρτιος, 2019, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/su11071917>
- [40] WiMOD iC880A Datasheet, διαθέσιμο: https://wireless-solutions.de/downloads/Radio-Modules/iC880A/iC880A_Datasheet_V1_1.pdf
- [41] Ruki Harwahyu, Alfian Presekal, Riri Fitri Sari, “LoRaWAN Performance Evaluation with Optimized Configuration”, 2018, διαθέσιμο: <http://dx.doi.org/10.14257/ijfgcn.2018.11.4.05>
- [42] Xiaolin Jia, Quanyuan Feng, Taihua Fan, Quanshui Lei, “RFID Technology and Its Applications in Internet of Things (IOT)”, 2012
- [43] H. Arasteh, V. Hosseini-zhad, V. Loia, A. Tommasetti, O. Troisi, M. Shafie-khah, P. Siano, “IoT-based Smart Cities: a Survey”, IEEE-EEEIC'16, Ιούνιος, 2016, διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555867>
- [44] Fangchun Yang, Shangguang Wang, Jinglin Li, Zhihan Liu, Qibo Sun, “An overview of Internet of Vehicles”, IEEE, Οκτώβριος, 2014