



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

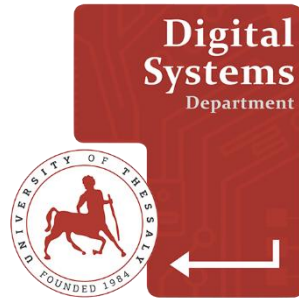
Σχεδιασμός για βέλτιστη κάλυψη σε δίκτυα χαμηλής ισχύος LoRa

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστοπούλου Ανδρεανή (ΑΜ: 3120061)

Επιβλέπων: Καρέτσος Γεώργιος, βαθμίδα

ΛΑΡΙΣΑ, Μάιος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

Network planning for coverage optimization for LoRa low power networks

BACHELOR THESIS

Christopoulou Andreani (RN: 3120061)

Supervisor: Karetsos Georgios, position

LARISSA, May 2024

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. 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.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Υπογραφή)

Χριστοπούλου Ανδρεανή

dd-05-2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Καρέτσος Γεώργιος Βαθμίδα/ιδιότητα επιβλέποντα, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 1 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 1, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 1
Μέλος	Ονοματεπώνυμο Μέλους 2 Βαθμίδα/ιδιότητα μέλους 2, Τμήμα/Ιδρυμα μέλους 2

Ημερομηνία έγκρισης: dd-05-2024

Περίληψη

Η παρακάτω πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην σχεδίαση για βέλτιστη κάλυψη δικτύων χαμηλής ισχύος LoRa(Long Range). Το LoRa αποτελεί τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, η οποία επιτρέπει την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές του IoT. Αρχικά γίνεται μια λεπτομερής εισαγωγή στην έννοια του LoRa, στην αρχιτεκτονική του καθώς και στα εργαλεία από τα οποία αποτελείται, αναλύοντας τις λειτουργίες τους και τις δυνατότητές τους. Περιγράφονται τα πλεονεκτήματα χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας, οι τομείς εφαρμογής της με βάση τις συσκευές που διαθέτουμε και πως αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν για βέλτιστη απόδοση.

Στην συνέχεια, μπαίνουμε πιο βαθιά στις έννοιες των MAC και PHY επιπέδων προκειμένου να έχουμε μια καλύτερη εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας του δικτύου, με σκοπό να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση και την κατανάλωση ενέργειας. Γίνεται αναφορά στην δομή των πακέτων και της αρχιτεκτονικής τους, ώστε να βασιστούμε σε αυτές σε μετέπειτα κεφάλαιο και να θέσουμε τις κατάλληλες παραμέτρους για το δίκτυό μας.

Έπειτα, γίνονται ορισμένοι υπολογισμοί με βάση τις παραμέτρους που τίθενται σε ισχύ στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αναλύοντας ταυτόχρονα την σημασία τους και την επίδραση που έχουν στον σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου. Βασιζόμενοι στους υπολογισμούς που έγιναν χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία, αναπαριστούμε τα αποτελέσματα σε γραφικές παραστάσεις για την καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία τους.

Τέλος, με χρήση λογισμικών και προγραμματισμού, είμαστε σε θέση να απεικονίσουμε διάφορες μορφές του δικτύου – από απλό έως ολοκληρωμένο -, να ερμηνεύσουμε και να αναλύσουμε τα αποτελέσματα που βγήκαν από τις μετρήσεις και να συζητήσουμε μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις στα δίκτυα LoRa.

Εν κατακλείδι, η πτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη μελέτη επάνω στα δίκτυα LoRa, παρουσιάζοντας και αναλύοντας την διαδικασία και τις παραμέτρους για την ανάπτυξη ενός δικτύου χαμηλής ισχύος με σκοπό την βέλτιστη απόδοσή του.

Λέξεις κλειδιά : LoRa, LoRaWAN, Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), Εύρος Ζώνης, Συχνότητες, Δίκτυα χαμηλής ισχύος, Κατανάλωση, Επικοινωνία, Πρωτόκολλο, Παρεμβολές, Απόδοση δικτύου.

Abstract

The following bachelor thesis focuses on the design for optimal coverage of Low Power Wide Area Networks (LPWANs) using LoRa (Long Range) technology. LoRa is a low-power consumption technology that enables communication over long distances, making it ideal for Internet of Things (IoT) applications. Initially, a detailed introduction to the concept of LoRa is provided, including its architecture and the tools it comprises, analyzing their functionalities and capabilities. The advantages of using this particular technology are described, along with the application areas based on the available devices and how they can be leveraged for optimal performance.

Subsequently, a deeper dive into the concepts of the MAC (Medium Access Control) and PHY (Physical) Layers is taken in order to gain a better understanding of the network's operation, aiming to optimize the performance and the energy consumption. The structure of packets and their architecture are discussed in order to base subsequent chapters on them, and set the appropriate parameters for our network.

Next, calculations are made based on the parameters set in the European Union, simultaneously analyzing their significance and the impact they have on the design of such a network. Using the calculations performed with the appropriate tools, the results are represented in graphical illustrations for better understanding and interpretation.

Finally, with the use of software and programming, various forms of the network – from simple to integrated- are depicted, interpreted and analyzed based on the results obtained from the measurements. In the end, future expansions and improvements to LoRa networks are discussed.

In conclusion, this bachelor thesis constitutes a comprehensive study on LoRa networks, presenting and analyzing the process and parameters for developing a low-power network with the aim of achieving optimal performance.

Keywords : LoRa, LoRaWAN, Internet of Things (IoT), Bandwidth , Frequencies, Low Power Networks, Consumption, Communication, Protocol, Interference, Network Performance.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και τους καθηγητές μου, που με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

Χριστοπούλου Ανδρεανή

01/01/2024

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	XI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LORA.....	3
2.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ-ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ	3
2.2 ΜΠΑΤΑΡΙΑ.....	4
2.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ LoRa.....	6
2.3.1 Κόμβοι LoRa(LoRa Nodes)	6
2.3.2 Πύλες(Gateways)	7
2.3.3 Διακομιστής Δικτύου(Network Server)	9
2.3.4 Διακομιστής Εφαρμογής(Application Server).....	10
2.3.5 Διακομιστής Συμμετοχής(Join Server)	10
2.4 ΑΣΦΑΛΕΙΑ	10
3 MAC & PHY LAYERS.....	15
3.1 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ MAC.....	15
3.1.1 Λειτουργίες και κλάσεις του MAC Layer.....	15
3.1.2 Εντολές MAC	17
3.2 ΕΠΙΠΕΔΟ PHY.....	19
3.2.1 Εισαγωγή στο PHY Layer	19
3.2.2 Μορφή πακέτου του Φυσικού Στρώματος LoRa	20
4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	23
4.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	23
4.2 ΤΟΠΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΧΡΗΣΗΣ ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ LoRAWAN RP-002	
1.0.325	

4.2.1	EU 863-870MHz (EU868)	25
4.2.2	EU 433MHz (EU433)	27
4.2.3	Data Rate	29
4.2.4	EIRP-ERP, RSSI και SNR	30
4.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ LoRA	31
5	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΟΣ LORAWAN ΔΙΚΤΥΟΥ	35
5.1	ΑΡΧΙΚΟ ΑΠΛΟ ΔΙΚΤΥΟ	35
5.1.1	Parallel Perception	38
5.2	ΣΥΝΘΕΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ 180 ΚΟΜΒΟΥΣ	40
5.3	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ 1500 ΚΟΜΒΟΥΣ	48
5.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ	53
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57
	ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ C++	61
	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	63
	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ NS-3	64

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1:	ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΝΟΣ LORAWAN ΔΙΚΤΥΟΥ	4
ΕΙΚΟΝΑ 2:	RS485-LB/LS-WATERPROOF RS485/UART TO LORAWAN CONVERTER	7
ΕΙΚΟΝΑ 3:	LT-22222-L LoRA I/O CONTROLLER	7
ΕΙΚΟΝΑ 4:	MS48-LR-LoRAWAN To MODBUS GATEWAY	9
ΕΙΚΟΝΑ 5:	OLG01-N SINGLE CHANNEL LoRA IoT GATEWAY	9
ΕΙΚΟΝΑ 6:	LoRA MESSAGE FORMAT	18
ΕΙΚΟΝΑ 7:	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SF-RANGE	32
ΕΙΚΟΝΑ 8:	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SF-ToA	33
ΕΙΚΟΝΑ 9:	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ BANDWIDTH-ToA	33
ΕΙΚΟΝΑ 10:	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ BANDWIDTH-RECEIVER SENSITIVITY	34
ΕΙΚΟΝΑ 11:	ΣΥΝΘΕΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ 180 ΚΟΜΒΟΥΣ ΚΑΙ 3 ΠΥΛΕΣ	44
ΕΙΚΟΝΑ 12:	ΠΟΡΕΙΑ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 180 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ 3 ΠΥΛΕΣ	45
ΕΙΚΟΝΑ 13:	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ 1500 ΚΟΜΒΟΥΣ ΚΑΙ 3 ΠΥΛΕΣ	48

ΕΙΚΟΝΑ 14: ΠΟΡΕΙΑ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ 1500 ΚΟΜΒΩΝ ΜΕ 3 ΠΥΛΕΣ.....	50
---	----

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΕΝΤΟΛΕΣ ΜΑC	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: UPLINK ΜΗΝΥΜΑ	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: DOWNLINK ΜΗΝΥΜΑ	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΠΡΟΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	25
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: EU863-870 ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ PAYLOAD (ΜΕ REPEATER)	26
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: EU863-870 ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ PAYLOAD (ΧΩΡΙΣ REPEATER)	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: EU863-870 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ BEACON	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: EU433 ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ PAYLOAD (ΜΕ REPEATER)	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: EU433 ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ PAYLOAD (ΧΩΡΙΣ REPEATER).....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: DATA RATES(DR0-DR7) ΓΙΑ EU868.....	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ	52

1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων έχει αναδειχθεί ως κρίσιμης σημασίας παράγοντας για την επικοινωνία, την παρακολούθηση και τη διαχείριση δεδομένων σε ποικίλους τομείς, όπως η βιομηχανία, η γεωργία, η υγεία και η έρευνα. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δίκτυα χαμηλής ισχύος με μεγάλη κάλυψη έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία, καθώς παρέχουν αποδοτικές λύσεις για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες που δραστηριοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσπρόσιτη υποδομή.

Μεταξύ των διάφορων πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται σε αυτό το πλαίσιο, το LoRa(Long Range) ξεχωρίζει για την ικανότητά του να προσφέρει εξαιρετική απόδοση επικοινωνίας μεταξύ συσκευών σε μεγάλες αποστάσεις, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η επίτευξη βέλτιστης κάλυψης σε ένα δίκτυο LoRa αποτελεί πρόκληση λόγω των ποικίλων παραμέτρων που επηρεάζουν την επίδοσή του, όπως η θέση των κόμβων, το ύψος και η τοποθέτηση των πυλών και του Network Server, οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του εδάφους, η παρουσία εμποδίων και άλλοι παράγοντες περιβάλλοντος.

Η παρούσα εργασία επιδιώκει να διερευνήσει τις μεθόδους και τεχνικές σχεδιασμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βέλτιστη κάλυψη σε δίκτυα χαμηλής ισχύος LoRa. Μέσω της ανάλυσης των παραμέτρων που επηρεάζουν την επίδοση του δικτύου και τη χρήση κατάλληλων λογισμικών και αριθμομηχανών για τον υπολογισμό και την απεικόνιση των δικτύων, η εργασία αυτή στοχεύει στην ανάπτυξη πρακτικών κατευθυντήριων αρχών για το σχεδιασμό και την υλοποίηση δικτύων LoRa που προσφέρουν βέλτιστη κάλυψη και απόδοση.

Επιπλέον, η εργασία αυτή αποσκοπεί στην ανάδειξη του δυναμικού των δικτύων LoRa ως εργαλείου για την υποστήριξη διάφορων εφαρμογών σε περιβάλλοντα με περιορισμένη ενέργεια και υποδομή, όπως οι αστικές περιοχές. Μέσω της βέλτιστης κάλυψης, της κατάλληλης χρήσης αριθμού κόμβων και πυλών, και της αποδοτικής χρήσης της ενέργειας, τα δίκτυα LoRa μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία έξυπνων και αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης, με εφαρμογές σε τομείς όπως η έξυπνη γεωργία, η έξυπνη πόλη και η βιομηχανική αυτοματοποίηση. Συνολικά, η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια να διαμορφωθεί μια κατανόηση του

σχεδιασμού δικτύων LoRa για την επίτευξη βέλτιστης κάλυψης και απόδοσης, καθώς και σωστής χρήσης του hardware για την υποστήριξη διάφορων εφαρμογών στο ευρύ φάσμα της τεχνολογίας των αισθητήρων και των ασύρματων δικτύων.

2 Εισαγωγή στο LoRa

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στο τι είναι το LoRa και την αρχιτεκτονική του, από τι αποτελείται, και πως προστατεύεται.

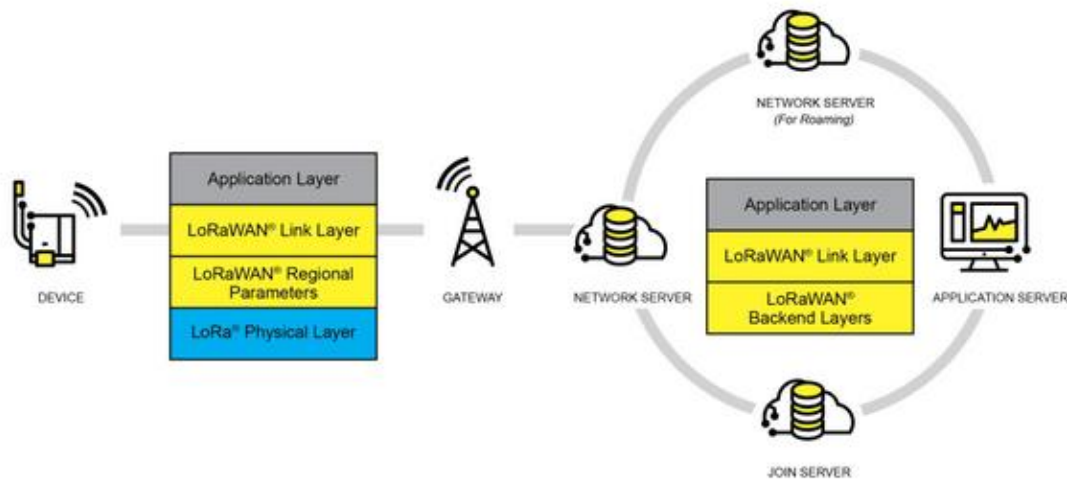
2.1 Αρχιτεκτονική-Τοπολογία

Το LoRa είναι μία τεχνική διαμόρφωσης που παρέχει μεγάλης εμβέλειας επικοινωνία, εκτεταμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, καθώς και αρκετά χαμηλή κατανάλωση. Το πρωτόκολλο που σχετίζεται με την διαμόρφωση LoRa είναι το LoRaWAN(Long Range Wide Area Network), το οποίο ορίζει την αρχιτεκτονική του δικτύου και το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιεί. Το LoRa προέρχεται από την τεχνική διαμόρφωσης του φάσματος διασποράς chirp(Chirp Spread Spectrum-CSS), που το κάνει ανθεκτικό στον θόρυβο του καναλιού, εφόσον χρησιμοποιούμε όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης (bandwidth), και ευρυζωνικούς γραμμικούς παλμούς που η συχνότητά τους αυξάνεται ή μειώνεται με βάση τις κωδικοποιημένες πληροφορίες, για την εκπομπή του σήματος. [1][2][3][7][9][14]

Η διαμόρφωση LoRa, λειτουργεί σε διάφορες συχνότητες(169 MHz,433 MHz, 868 MHz,915 MHz.) που διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή που χρησιμοποιούνται. Επομένως δεν απαιτούνται πρόσθετες άδειες, διασφαλίζοντας την διαλειτουργικότητα παγκοσμίως. Χρησιμοποιώντας την διαμόρφωση φάσματος, η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να επιτύχει ευαισθησία της τάξεως των -137dBm και ένα budget link έως και 157dB. Ο περιορισμός αυτός στον χαμηλό ρυθμό δεδομένων, καθιστά την LoRa κατάλληλη για εφαρμογές όπου ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων δεν είναι κρίσιμος. Γι' αυτό συνίσταται να χρησιμοποιείται σε επικοινωνίες M2M(Machine-to-Machine)[3][4][14]

Για την βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος και την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου, το LoRaWAN βασίζεται την τοπολογία των αστερών(star topology), διαθέτει λοιπόν έξι ορθογώνιους παράγοντες διασποράς(spreading factors-SF), με αποτέλεσμα να έχουμε διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια σε σχέση με την κλασσική τοπολογία ενός δικτύου πλέγμα-

τος(mesh network), τα οποία ενώνουν πολλαπλούς κόμβους και στέλνουν/λαμβάνουν δεδομένα από κόμβους που δεν σχετίζονται με τον πομπό/δέκτη. Η star-topology περιέχει τρία διαφορετικά είδη συσκευών, τους κόμβους, τις πύλες και τον network server, καθώς και τον Application Server.[1][8][11]



Εικόνα 1:Αρχιτεκτονική ενός LoRaWAN δικτύου [5].

Αυτή η αρχιτεκτονική ενός δικτύου LoRaWAN λειτουργεί με one-hop μηχανισμό στο επίπεδο δικτύου. Οι λεγόμενες end devices επικοινωνούν με μία ή περισσότερες πύλες μέσω του LoRaWAN. Οι πύλες στέλνουν τα δεδομένα από τις συσκευές αυτές στον network server μέσω μίας διεπαφής με υψηλότερο throughput, όπως το Ethernet, ή το 4G. Ο Network Server, με την σειρά του αφού αποκωδικοποιήσει τα πακέτα που λαμβάνει από τις πύλες, φιλτράρει τα δεδομένα προκειμένου να σταλούν στον Application Server, ή αντίστοιχα πίσω στις συσκευές που αρχικά έστειλαν αυτά τα πακέτα.[1][2][6][8][11][14]

2.2 Μπαταρία

Το πιο σημαντικό κριτήριο για ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του. Η χαμηλή κατανάλωση που προσφέρει ένα LoRa δίκτυο, οφείλεται στην ασύγχρονη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Λειτουργούν με βάση την μέθοδο ALOHA, στην οποία το πλαίσιο στέλνεται μόνο όταν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή, διαφορετικά δε γίνεται η μετάδοση. Η μέθοδος αυτή μειώνει δραστικά την κατανάλωση της μπαταρίας, καθώς το δίκτυο επικοινωνεί μόνο όταν υπάρχουν δεδομένα[1]. Καθώς εργαζόμαστε με τους LoRaWAN αισθητήρες, πρέπει να λάβουμε

υπόψη την χωρητικότητα, την αυτοεκφόρτιση, τη διάρκεια ζωής του προϊόντος, το κόστος κτλ., παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της μπαταρίας που θα χρησιμοποιήσουμε.

Τα περισσότερα cells της μπαταρίας αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια(electrodes) και έναν ηλεκτρολύτη(electrolyte). Ο συνδυασμός των υλικών που χρησιμοποιούνται καθορίζει την χημεία της μπαταρίας. Αυτή με την σειρά της, καθορίζει την τάση, το φορτίο, την χωρητικότητα, την θερμοκρασία λειτουργίας, την αυτοεκφόρτιση και το φυσικό μέγεθος της μπαταρίας. Υπάρχουν 3 είδη μπαταρίας:

- **Primary**

Δεν είναι επαναφορτιζόμενες και φτιάχνονται από ηλεκτροχημικά cells που παράγουν μία μη αναστρέψιμη χημική αντίδραση. Γι' αυτόν τον λόγο δε μπορείς να τις φορτίσεις ξανά, και πρέπει να αντικατασταθούν όταν εξαντληθούν. Αυτού του είδους μπαταρίας έχουν συγκεκριμένη ισχύ και ενέργεια, και οι συσκευές που τις χρησιμοποιούν είναι σχεδιασμένες να καταναλώνουν λίγη ενέργεια, επιτρέποντας στην ζωή της μπαταρίας να διαρκέσει όσο περισσότερο γίνεται. Τα πιο κοινά είδη τέτοιων μπαταριών είναι λιθίου, αλκαλική και ψευδαργύρου-άνθρακα. [19]

- **Επαναφορτιζόμενη(Rechargeable)**

Αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας πολλών συσκευών και περισσότερο των φορητών όπως οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, τα laptops, τα κινητά τηλέφωνα κτλ. Για να επαναφορτιστούν αυτές οι μπαταρίες, αντιστρέφουμε τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις εφαρμόζοντας τάση στην μπαταρία προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το κόστος των επαναφορτιζόμενων μπαταριών είναι αρχικά μεγαλύτερο από τις απλές μπαταρίες, αλλά λόγω της επαναλαμβανόμενης χρήσης τους ίσως αποδειχθούν οικονομικότερες στο τέλος. Και σε αυτή την περίπτωση όπως και στις απλές μπαταρίες, είναι δυνατόν να χωρίσουμε τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες σε κατηγορίες με βάση την χημική τους σύσταση. Τα πιο γνωστά είδη είναι τα Li-ion, Ni-Cd, Ni-MH, και Lead Acid.[19]

- **Super-capacitors**

Διαφέρει από την τυπική μπαταρία, φορτίζεται σε δευτερόλεπτα με μικρή υποβάθμιση χωρητικότητας. Ουσιαστικά μπορούν να αντέξουν άπειρους κύκλους φόρτισης, και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που παρουσιάζουν ξαφνικές αιχμές ενέργειας. Ο συνδυασμός ενός super-capacitor και μίας μπαταρίας ικανοποιεί τόσο τις βραχυπρόθεσμες όσο και τις μακροπρόθεσμες ανάγκες για ισχύ, μειώνει την κατα-

πόνηση της μπαταρίας και έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.[19]

Η χωρητικότητα της μπαταρίας μετριέται σε Αμπέρ-ώρες(Ah), και όλες οι μπαταρίες επηρεάζονται από την διαδικασία της αυτοεκφόρτισης. Ο βαθμός ενέργειας της αυτοεκφόρτισης εξαρτάται από την τεχνολογία και τις χημικές ουσίες της μπαταρίας.[19]

2.3 Στοιχεία LoRa

2.3.1 Κόμβοι LoRa(LoRa Nodes)

Οι LoRa κόμβοι(nodes), αποτελούνται από αισθητήρες ή εφαρμογές που με την σειρά τους αποτελούνται από αισθητήρες, συσκευές εντοπισμού κτλ., οι οποίες μπορεί να περιέχουν διάφορους μετρητές, συναγερμούς. Είναι υπεύθυνοι για την συλλογή των δεδομένων και την αποστολή τους στις πύλες με τις οποίες συνδέονται μέσω single-hop LoRa επικοινωνία. Σε ένα δίκτυο LoRa, κανένας κόμβος δεν είναι συνδεδεμένος με κάποια συγκεκριμένη πύλη, τα δεδομένα που στέλνονται από τις συσκευές συνήθως λαμβάνονται από πολλαπλές πύλες. Οι κόμβοι που βρίσκονται κοντά σε έναν σταθμό βάσης θα έχουν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων(data rate), σε σύγκριση με πιο απομακρυσμένους κόμβους, οι οποίοι μειώνουν το data rate αυξάνοντας τον Spreading Factor(SF)[1][2][6][14].

Οι κόμβοι προσφέρουν την ικανότητα του απομακρυσμένου ελέγχου, δίνοντας την δυνατότητα να επικοινωνήσουν με μία ή πολλαπλές πύλες. Ο κόμβος αποτελείται από έναν πομποδέκτη LoRa που διαχειρίζεται ένας μικροελεγκτής. Ο μικροελεγκτής στέλνει τις εντολές διαμόρφωσης στον πομποδέκτη, ο οποίος διαμορφώνει και μεταδίδει τα δεδομένα στην πύλη[14].

Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά είδη τελικών συσκευών LoRa, τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με την χρήση που θέλουμε να κάνουμε(περιβάλλον, απόσταση, συχνότητα), την κλάση που είναι, την κατανάλωση κτλ. Πιο συγκεκριμένα, κάθε συσκευή έχει ορισμένες δυνατότητες με βάση τους παραπάνω παράγοντες. Για παράδειγμα, η συσκευή RS485-LB/LS είναι κατάλληλη για ανάγνωση δεδομένων από αισθητήρες RS485/UART καθώς μετατρέπει τα δεδομένα αυτά και τα ανεβάζει στον IoT server μέσω του LoRaWAN δικτύου. Επιπλέον, μπορεί να επιτύχει μετάδοση μεγάλου εύρους, και μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα με τις πύλες LoRaWAN και τον IoT server. Παρέχει μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας με χαμηλή κατανάλωση, διότι «φοράει» μπα-

ταρία Li-SOC12 85000mAh, ή συνδυασμό ηλιακής ενέργειας με μπαταρία λιθίου, κάνοντας την κατάλληλη για εξωτερική χρήση όπως σε έξυπνα κτίρια, έξυπνες μετρήσεις/γεωργία/βιομηχανία καθώς και στα logistics, αφού είναι επίσης και αδιάβροχη.[24]



Εικόνα 1:RS485-LB/LS-WaterProof RS485/UART to LoRaWAN Converter[24]

Ένα διαφορετικό είδος συσκευής είναι η LT-22222-L LoRa I/O Controller, η οποία υποστηρίζει τόσο το πρωτόκολλο της Κλάσης A όσο και της Κλάσης C τις οποίες θα μελετήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να στείλει δεδομένα σε πολύ μακρινές αποστάσεις, διότι παρέχει επικοινωνία μεγάλου spread spectrum με επίσης μεγάλη ανοχή σε παρεμβάσεις ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας. Περιέχει διαφορετικές διεπαφές I/O όπως είσοδο αναλογικού ρεύματος/τάσης, έξοδο ρελέ, ψηφιακή είσοδο και έξοδο. Όπως και η προηγούμενη συσκευή, κι αυτή είναι κατάλληλη για τις ίδιες εξωτερικές κυρίως χρήσεις όπως τα έξυπνα κτίρια και οι έξυπνες πόλεις.[24]



Εικόνα 2:LT-22222-L LoRa I/O Controller[24]

2.3.2 Πύλες(Gateways)

Οι πύλες(gateways) του δικτύου αποτελούν τον ενδιάμεσο διακομιστή και είναι υπεύθυνες για την αναμετάδοση των δεδομένων-πακέτων μεταξύ των LoRa nodes και του κεντρικού Network Server. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης των πυλών μέσω IP με τον server που λειτουργούν ως ‘γέφυρες’, μετατρέποντας τα RF(radio frequency) σε

IP πακέτα και το αντίστροφο. Οι πύλες αυτές στέλνουν αυτά τα πακέτα στον Network Server, με τον οποίο συνδέονται μέσω standard IP συνδέσεων.[8][18]

Οι πύλες δεν εκτελούν κάποια λειτουργία ασφάλειας, αλλά λειτουργούν ως ρελέ που μπορεί να αναμεταδώσει πληροφορίες μεταξύ των συσκευών και του Network Server. Στην βάση της πύλης υπάρχει ένας LoRa συγκεντρωτής, που είναι ένας multi-channel αποδιαμορφωτής ικανός να αποκωδικοποιήσει όλες τις εκδόσεις της LoRa διαμόρφωσης σε πολλαπλές συχνότητες παράλληλα. Σε έναν τυπικό κόμβο, είναι δυνατόν να αποκωδικοποιηθεί μόνο μία SF διαμόρφωση σε μία συχνότητα. Η επικοινωνία μεταξύ κόμβων και πυλών πραγματοποιείται σε διαφορετικά κανάλια με διαφορετικό ρυθμό δεδομένων. Η επιλογή του data rate γίνεται σε συνδυασμό της απόστασης της επικοινωνίας και της ωφέλιμης πληροφορίας του πακέτου, και κυμαίνεται από 0.3kbps έως τα 50kbps. Η αρχιτεκτονική LoRa έχει έτσι θετικά αποτελέσματα ως προς την ενεργειακή απόδοση και την διαχείριση της ισχύος μετάδοσης RF, χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό ADR(Adaptive Data Rate) που εφαρμόζεται στο επίπεδο των κόμβων. Χωρίζονται σε εσωτερικές(picocell) και εξωτερικές(macroc cell). Οι πρώτες είναι οικονομικές και κατάλληλες για μέρη βαθύ εσωτερικού χώρου όπως υπόγεια και κτήρια πολλαπλών ορόφων. Οι εξωτερικές από την άλλη πλευρά, παρέχουν μεγαλύτερη εμβέλεια και είναι κατάλληλες και για αστικές και για αγροτικές περιοχές. [8][14][18][23]

Αντίστοιχα με τις τελικές συσκευές, οι πύλες επιλέγονται με βάση κριτήρια όπως η εσωτερική ή εξωτερική χρήση, εάν πρόκειται για ιδιωτικό πρωτόκολλο LoRa, το επίπεδο/εμπειρία του χρήστη(ορισμένες συσκευές δεν προτείνονται για νέους χρήστες), η συνδεσιμότητα κτλ. Οι πύλες έχουν την δυνατότητα να συνδέσουν ένα ασύρματο δίκτυο LoRa σε ένα IP δίκτυο μέσω Wi-Fi, Ethernet ή κυψελικού δικτύου προκειμένου ο χρήστης να στείλει δεδομένα και να επιτύχει επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτή τη δυνατότητα παρέχει για παράδειγμα η πύλη MS48-LR- LoRaWAN to Modbus, η οποία είναι πλήρως συμβατή με το πρωτόκολλο LoRaWAN και περιέχει έναν ενσωματωμένο LoRaWAN και IoT server. Οι διαφορετικές ζώνες που χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο δεν αποτελούν πρόβλημα για την συγκεκριμένη πύλη, εφόσον είναι ήδη προδιαμορφωμένες. Είναι κατάλληλη για έξυπνα κτίρια, σπίτια, μετρήσεις, πόλεις και βιομηχανία.[26]



Εικόνα 3:MS48-LR-LoRaWAN To Modbus Gateway[26]

Μία διαφορετική περίπτωση μίας πύλης LoRa είναι η OLG01-N Single Channel LoRa IoT πύλη, η οποία παρόλο που έχει ακριβώς τις ίδιες δυνατότητες με την προηγούμενη πύλη που αναφέραμε, δεν είναι συμβατή με το πρωτόκολλο LoRaWAN καθώς είναι συσκευή μόνο για ιδιωτικό πρωτόκολλο LoRa. Υποστηρίζει 10 έως 100 sensor nodes, και παρέχει πολλές μεθόδους σύνδεσης στο διαδίκτυο όπως διεπαφή Wi-Fi, θύρα Ethernet και θύρα υποδοχής USB προκειμένου ο χρήστης να συνδέσει το δίκτυο αισθητήρων στο διαδίκτυο. Μερικές από τις εφαρμογές της είναι τα συστήματα ασφαλείας, η αυτοματοποίηση σπιτιού, η βιομηχανική παρακολούθηση και έλεγχος αλλά και GPS tracker.[26]



Εικόνα 4:OLG01-N Single Channel LoRa IoT Gateway[26]

2.3.3 Διακομιστής Δικτύου(Network Server)

Ο LoRa Network Server(LNS) διαχειρίζεται ολόκληρο το δίκτυο, καθιερώνει το LoRaWAN πρωτόκολλο, ελέγχει δυναμικά όλες τις παραμέτρους του δικτύου προκειμένου να προσαρμόζονται σε ενδεχόμενες αλλαγές κατάστασης, καθιερώνει ασφαλείς συνδέσεις για την μεταφορά δεδομένων τόσο σε επίπεδο συσκευών(από μία συσκευή στο Application του χρήστη), αλλά και σε επίπεδο ελέγχου της κίνησης από την συσκευή στον LNS(και το αντίστροφο). Καταργεί τα αντίγραφα των μηνυμάτων uplink

ζεύξης, επιλέγει την καλύτερη πύλη για την δρομολόγηση downlink μηνυμάτων, στέλνει ADR εντολές για να βελτιστοποιήσει τον ρυθμό δεδομένων των συσκευών και παρέχει αναγνώριση για τα επιβεβαιωμένα uplink μηνύματα. Επιπρόσθετα, προωθεί και δρομολογεί τα uplink φορτία εφαρμογής στους σωστούς διακομιστές εφαρμογής, προωθεί αιτήματα και αποδοχές σύνδεσης μεταξύ των συσκευών και του Join Server, και τέλος απαντά σε όλες τις εντολές επιπέδου MAC. Ο LNS διασφαλίζει την αυθεντικότητα του κάθε αισθητήρα στο δίκτυο, και την ακεραιότητα κάθε μηνύματος. Δεν έχει όμως πρόσβαση, ούτε μπορεί να δει τα application δεδομένα.[18][22][23]

2.3.4 Διακομιστής Εφαρμογής(Application Server)

Ο Application Server είναι υπεύθυνος για τον ασφαλή χειρισμό, την διαχείριση και ερμηνεία των sensor application δεδομένων. Επίσης είναι υπεύθυνος για την αποκρυπτογράφηση των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και την κρυπτογράφηση δεδομένων που στέλνονται στις τελικές συσκευές. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να ενσωματωθούν σε υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης δεδομένων ή IoT πλατφόρμες όπως το Azure και το Google Cloud. Παράγει επιπρόσθετα όλα τα payloads της downlink ζεύξης του επιπέδου εφαρμογής, και τα στέλνει στις συνδεδεμένες τελικές συσκευές μέσω του Network Server. Να σημειωθεί εδώ, πως ένα δίκτυο LoRaWAN είναι δυνατόν να έχει και περισσότερους από έναν Application Servers.[18][22][23].

2.3.5 Διακομιστής Συμμετοχής(Join Server)

Ο Join Server συνδράμει στην ασφαλή ενεργοποίηση της συσκευής, στην αποθήκευση του κλειδιού-ρίζας και στη δημιουργία ενός session κλειδιού. Η διαδικασία συμμετοχής ξεκινά από την τελική συσκευή στέλνοντας ένα αίτημα συμμετοχής στον Join Server μέσω του Network Server. Ο Join Server επεξεργάζεται το μήνυμα αιτήματος, παράγει session κλειδιά και μεταφέρει τα NwkSKey και AppSKey στον διακομιστή διαδικτύου και εφαρμογής αντίστοιχα.[23]

2.4 Ασφάλεια

Η ασφάλεια ενός τέτοιου δικτύου αποτελεί ένα από τα βασικότερα θέματα προς συζήτηση, καθώς αναφερόμαστε σε μεγάλο εύρος δικτύων, μεγάλο όγκο δεδομένων, αλλά και πολλαπλές συσκευές που είναι υπεύθυνες για την συλλογή αυτών των δεδομένων. Σε αντίθεση με ενσύρματα δίκτυα, στην προκειμένη περίπτωση το ασύρματο δίκτυο δεν

προστατεύεται φυσικά, και ένας εισβολέας χρειάζεται μόνο να βρίσκεται στην εμβέλεια του ασύρματου δικτύου για να προσπαθήσει να “επιτεθεί”. Το LoRaWAN, αποτελείται από δύο επίπεδα κρυπτογραφίας,

- I. Ένα μοναδικό Network Session κλειδί(NwkSKey) των 128 bit, που μοιράζονται οι συσκευές και ο Network Server[5]
- II. Ένα μοναδικό Application Session κλειδί(AppKey) των 128 bit, στον Application Server.[5]

Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζει και προστατεύει την κίνηση μέσα στο δίκτυο χρησιμοποιώντας διαπιστευτήρια ασφαλείας, κατοχυρώνοντας την αυθεντικότητα, την ακεραιότητα και την εμπιστευτικότητα μεταξύ των end-devices και άλλων στοιχείων του LoRaWAN. Η ασφάλεια του LoRaWAN βασίζεται στο Advanced Encryption Standard(AES), που καθορίζεται στο NIST FIPS 197, και ακολουθεί αρχές όπως χρήση καλά ελεγμένων, τυπικών αλγορίθμων, και end-to-end ασφάλεια. [12][13]

Οι μηχανισμοί ασφαλείας βασίζονται σε δοκιμασμένους και τυποποιημένους AES(Advanced Encryption Standard) αλγόριθμους κρυπτογράφησης. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι έχουν αναλυθεί και εγκριθεί από το NIST, και έχουν ευρέως υιοθετηθεί ως η βέλτιστη πρακτική ασφάλειας για περιορισμένους κόμβους και δίκτυα. Η ασφάλεια LoRaWAN χρησιμοποιεί το CMAC(Cipher-based Message Authentication Code)για προστασία της ακεραιότητας, και το CTR(Counter Mode Encryption) για κρυπτογράφηση.[12][13]

Εμβαθύνοντας στην αρχιτεκτονική της ασφάλειας, βλέπουμε πως οι end-devices διαθέτουν διαπιστευτήρια, που περιέχουν ένα 128-bit AES AppKey και έναν EUI-64-based DevEUI(Extended Unique Identifier-Εκτεταμένο Μοναδικό Αναγνωριστικό), βασισμένο σε έναν OUI(Organizationally Unique Identifier) που αναθέτει η IEEE. Αυτά χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή δύο μοναδικών 128-bit AES κλειδιών που αναφέρθηκαν πιο πάνω, το Network Session και το Application Session κλειδί. Αυτό συμβαίνει όταν μια συσκευή συνδέεται στο LoRaWAN και υπάρχει αλληλεπίδραση με τον Join Server. Για να συμβεί η αλληλεπίδραση με τον Join Server, η συσκευή στέλνει μία αίτηση σύνδεσης(Join Request). Ο Join Server περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για την συσκευή που προστατεύονται από το AppKey, και επαληθεύει την σύνδεση χρησιμοποιώντας το δικό του αντίγραφο του AppKey, διασφαλίζοντας ότι συνδέονται μόνο οι εξουσιοδοτημένες συσκευές. [12][13]

Στην LoRaWAN ασφάλεια, υποστηρίζονται ιδιότητες όπως ο αμοιβαίος έλεγχος ταυτότητας, η προστασία της ακεραιότητας και η εμπιστευτικότητα. Είναι από τα λίγα δίκτυα IoT που εφαρμόζουν end-to-end κρυπτογράφηση.[12][13]

Προκειμένου να συμμετάσχει σε ένα δίκτυο μία end-device, πρέπει να ενεργοποιηθεί και να πιστοποιηθεί. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την πιστοποίηση και την ενεργοποίηση των συσκευών.

1) Ενεργοποίηση Over the Air(OTAA)

Το OTAA εκτελεί μία διαδικασία σύνδεσης δικτύου, με δυναμική διεύθυνση και κλειδιά ασφαλείας που διαπραγματεύονται με την συσκευή. Σε αυτή τη μέθοδο ενεργοποίησης η συσκευή δεν είναι φορτωμένη με καμία πληροφορία. Γίνεται μία διαδικασία σύνδεσης για να συνδεθεί η συσκευή στο δίκτυο. Όμως, πριν συνδεθεί στο δίκτυο η συσκευή είναι φορτωμένη με πληροφορίες. Στη συνέχεια, η διαδικασία αυτή πρέπει να επαναληφθεί για κάθε μετάδοση μέσω του δικτύου όταν χαθούν οι πληροφορίες περιεχομένου του session. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει ότι οι συσκευές δεν περιορίζονται σε κάποιον συγκεκριμένο πάροχο υπηρεσιών, και έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν σε οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσιών δικτύου ενώ βρίσκονται σε περιαγωγή. Η υψηλή κίνηση δικτύου ωστόσο αποτελεί ένα μεγάλο πρόβλημα στην ενεργοποίηση over the air, διότι παρουσιάζονται μεγάλες καθυστερήσεις ενεργοποίησης αλλά και υψηλός αριθμός αναμεταδόσεων πακέτων. Την απόδοση του OAA επηρεάζουν τρεις παράγοντες: i)οι συγκρούσεις, ii)οι αναμεταδόσεις, και iii)communication request work cycle.[1][21]

2) Ενεργοποίηση με εξατομίκευση(Activation by personalization-ABP)

Το ABP απαιτεί κωδικοποίηση της πηγής όπως και των κλειδιών ασφαλείας στην συσκευή. Στη μέθοδο αυτή η συσκευή έχει ήδη αποθηκευμένες τις πληροφορίες που χρειάζεται για την ενεργοποίηση. Η συσκευή συνδέεται απευθείας με το συγκεκριμένο δίκτυο που ορίζεται από τις πληροφορίες κατά την εκκίνηση της συσκευής. Αυτός ο τρόπος όμως δε χρησιμοποιείται συχνά, πάρα μόνο σε ορισμένες συγκεκριμένες περιπτώσεις. Στη μέθοδο ABP, αποστέλλεται απλώς ένα αίτημα συμμετοχής και ένα μήνυμα αποδοχής συμμετοχής μεταξύ της συσκευής και του δικτύου, για να ενεργοποιηθεί η πρώτη[1][21].

Airtime

Το airtime που αναφέρθηκε νωρίτερα, είναι ο χρόνος μεταξύ της αποστολής και της λήψης ενός σήματος μεταξύ των συσκευών σε ένα δίκτυο LoRa. Εξαρτάται πέρα από το μέγεθος του payload, και από τον συνδυασμό των SF, BW και CR. Αξίζει να ση-

μειωθεί πως αναλόγως με τις επιλεγμένες ρυθμίσεις επικοινωνίας, ένα πακέτο δεδομένων μπορεί να έχει σημαντικές διακυμάνσεις στο airtime. Σε ένα εξωτερικό περιβάλλον, λόγω της απόστασης των συσκευών και των πυλών, το airtime είναι υψηλότερο. Αξιόλογο είναι επίσης το γεγονός ότι στο ίδιο περιβάλλον, διαφορετική μέθοδος ενεργοποίησης έχει διαφορετικό airtime. Έχει παρατηρηθεί πως η μέθοδος OTAA έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με την μέθοδο ABP, μέθοδοι που μελετήσαμε στο παραπάνω υποκεφάλαιο. Η διάρκεια μίας μετάδοσης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την Semtech LoRa modem αριθμομηχανή[1][15][21]

3 MAC & PHY LAYERS

3.1 Πρωτόκολλο MAC

3.1.1 Λειτουργίες και κλάσεις του MAC Layer

Το LoRaWAN ορίζει ένα MAC Layer πρωτόκολλο για να ενεργοποιήσει δίκτυα LPWAN. Είναι ένα software layer, το οποίο καθορίζει τον τρόπο που οι συσκευές χρησιμοποιούν το LoRa για να μεταδώσουν δεδομένα, αλλά και την μορφή των μηνυμάτων. Για να ικανοποιηθούν τα χαρακτηριστικά του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της κατανάλωσης ενέργειας το MAC ελέγχει τις παραμέτρους μετάδοσης. Αυτές οι παράμετροι είναι το bandwidth που χρησιμοποιείται, το Spreading Factor και η ισχύς μετάδοσης του κάθε κόμβου.[34]

Το LoRaWAN MAC Layer είναι υπεύθυνο για ποικίλες λειτουργίες όπως θα δούμε παρακάτω.

-Μορφοποίηση και ανάλυση πλαισίου: Δομεί τα δεδομένα σε πλαίσια για να μεταδοθούν, και ερμηνεύει τα ληφθέντα πακέτα.[35]

-Διαχείριση καναλιού: Επιλέγει τα κατάλληλα κανάλια συχνοτήτων για την επικοινωνία, και διαχειρίζεται το duty cycle προκειμένου να υπακούει στους τοπικούς περιορισμούς. [35]

-Adaptive Data Rate(ADR): Προσαρμόζει δυναμικά το data rate με βάση τις συνθήκες δικτύου, για βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και του εύρους επικοινωνίας. [35]

-Κρυπτογράφηση/Ασφάλεια: Διαχειρίζεται την κρυπτογράφηση/αποκρυπτογράφηση, και διασφαλίζει την ασφαλή επικοινωνία τελικών συσκευών-NS. [35]

-Προγραμματισμός/Συντονισμός: Προγραμματίζει τις μεταδόσεις και την επικοινωνία των τελικών συσκευών με τις πύλες για να αποφευχθούν οι συγκρούσεις. [35]

Στα συστήματα LoRaWAN, οι διάφορες εφαρμογές του IoT έχουν διαφορετικές ανάγκες ως προς την κατανάλωση ενέργειας, την ανταλλαγή μηνυμάτων και την ζωή της μπαταρίας. Γι' αυτόν τον λόγο το LoRaWAN διακρίνει τις end-point συσκευές σε τρεις διαφορετικές κλάσεις, ανάλογα με τις ανάγκες που καλούνται να καλύψουν σε ένα

ευρύ φάσμα εφαρμογών του IoT. Δεν υπάρχουν διαφορές στον τρόπο μετάδοσης των μηνυμάτων στον Network Server ανεξαρτήτως της κλάσης που ανήκουν. Ωστόσο, η διαφορά βρίσκεται στο πως και πότε λαμβάνουν τα downlink μηνύματα οι τελικές συσκευές. Παρακάτω μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε κλάσης.[32]

- **Κλάση A – Χαμηλότερης Ισχύος, αμφίδρομες τελικές συσκευές**

Αποτελεί την προκαθορισμένη κλάση που πρέπει να υποστηρίζουν όλες οι LoRaWAN συσκευές. Είναι μία κλάση με μειωμένη κατανάλωση και ικανότητες εξοικονόμησης ενέργειας, και αυτό την ξεχωρίζει από τις άλλες δύο κλάσεις που ακολουθούν. Οι συσκευές αυτής της κατηγορίας έχουν ένα πολύ μικρό παράθυρο λήψης, αφού μεταδίδουν ένα πακέτο. Η επικοινωνία ξεκινά πάντα από την συσκευή, είναι ασύγχρονη και οποιαδήποτε uplink μετάδοση έχει τη δυνατότητα να σταλεί ανά πάσα ώρα και στιγμή, ακολουθούμενη από τα δύο σύντομα παράθυρα downlink ζεύξης, όπου το πρώτο παράθυρο ανοίγει έπειτα από ± 20 microsecond[1]. Τα δεδομένα έχουν την δυνατότητα να ληφθούν από οποιοδήποτε από τα δύο ανοιχτά παράθυρα. Αν τα πακέτα ληφθούν από το πρώτο παράθυρο, η συσκευή τα επεξεργάζεται, τα αποδιαμορφώνει, και αν στάλθηκαν στην σωστή συσκευή δεν «ανοίγει» το δεύτερο παράθυρο. Ακολουθεί το πρωτόκολλο ALOHA, και αφότου σταλούν τα δεδομένα, η συσκευή αυτής της κλάσης μπαίνει σε sleep mode προκειμένου να εξοικονομήσει ενέργεια, επιτρέποντας όμως την uplink επικοινωνία διαρκώς. Καθώς όμως η downlink επικοινωνία πρέπει πάντοτε να ακολουθεί μία uplink, αποθηκεύεται στην προσωρινή μνήμη του Network Server, έως ότου συμβεί ξανά uplink επικοινωνία.[5][6][9][10][11]

- **Κλάση B – Αμφίδρομες τελικές συσκευές με ντετερμινιστική καθυστέρηση downlink ζεύξης και προγραμματιζόμενες υποδοχές λήψης**

Στις συσκευές κλάσης B, οι συσκευές συγχρονίζονται με το δίκτυο χρησιμοποιώντας περιοδικούς «φάρους»(periodic beacons), ανοίγοντας ένα επιπρόσθετο παράθυρο(ring slot), σε συγκεκριμένες προγραμματισμένες στιγμές. Τα παράθυρα αυτά συγχρονίζονται από τα beacons, τα οποία στέλνονται από την πύλη προκειμένου να γνωρίζει ο Network Server πότε η συσκευή είναι διαθέσιμη. Αυτή η κλάση δίνει την δυνατότητα στο δίκτυο να επιτύχει downlink επικοινωνία με συγκεκριμένη καθυστέρηση, καταναλώνοντας όμως περισσότερη ενέργεια. Η καθυστέρηση αυτή φτάνει μέχρι και τα 128 δευτερόλεπτα, και η έξτρα κατανάλωση ενέργειας παραμένει αρκετά χαμηλή. Παρόλα αυτά, είναι σίγουρα υψηλότερη της προηγούμενης κλάσης A.[5][6][9][10][11]

- **Κλάση C– Χαμηλότερη καθυστέρηση, αμφίδρομες τελικές συσκευές με μέγιστες υποδοχές λήψης**

Στην συγκεκριμένη κλάση παρατηρούμε την μέγιστη κατανάλωση ενέργειας ανάμεσα στις τρεις κλάσεις, καθώς οι συσκευές έχουν σχεδόν συνέχεια ανοιχτά τα παράθυρα λήψης τους, ακόμα κι αν δεν λαμβάνονται δεδομένα. Ο διακομιστής λοιπόν είναι σε θέση να ξεκινήσει μία downlink μετάδοση ανά πάσα στιγμή, έχοντας ως αποτέλεσμα την χαμηλότερη δυνατή καθυστέρηση για την επικοινωνία μεταξύ διακομιστή και συσκευής, εφόσον δε χρειάζεται περαιτέρω αναμονή για να ανοίξει κάποιο παράθυρο. Τα παράθυρα αυτά κλείνουν μόνο όταν η συσκευή στέλνει δεδομένα προς την πύλη. Λόγω της αυξημένης κατανάλωσης, συνήθως οι συσκευές αυτής της κλάσης δε χρησιμοποιούν την μπαταρία ως πηγή ενέργειας, και είναι κατάλληλες σε εφαρμογές όπου υπάρχει δυνατότητα συνεχόμενης παροχής ενέργειας και ισχύος. Όμως, σε συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία είναι δυνατή η εναλλαγή μεταξύ των κλάσεων A και C και είναι αρκετά χρήσιμη για διακοπτόμενες εργασίες.[5][6][9][10]

3.1.2 Εντολές MAC

Οι εντολές MAC χρησιμοποιούνται για την διευκόλυνση της επικοινωνίας, την καλύτερη χρήση της ενέργειας αλλά και για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση του LoRaWAN MAC με τους τοπικούς περιορισμούς. Υπάρχουν διάφορες εντολές οι οποίες χρησιμοποιούνται για διάφορες λειτουργίες, και η καθεμία απ' αυτές έχει διαφορετικά αποτελέσματα ως προς την βελτίωση ενός δικτύου. Χρησιμοποιώντας την κατάλληλη εντολή, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε το data rate μίας συσκευής, αλλά και να εξισορροπήσουμε την αναλογία απόστασης-ζωής της μπαταρίας. Ορισμένες συσκευές χρησιμοποιούνται και για την αξιολόγηση της ποιότητας της σύνδεσης, την αναγνώριση προβλημάτων, αλλά και για περιοδικό έλεγχο του επιπέδου της μπαταρίας, για προληπτική επίλυση προβλημάτων που ίσως προκύψουν, συμβάλλοντας έτσι ριζικά στην ομαλή λειτουργία των συστημάτων.[35]

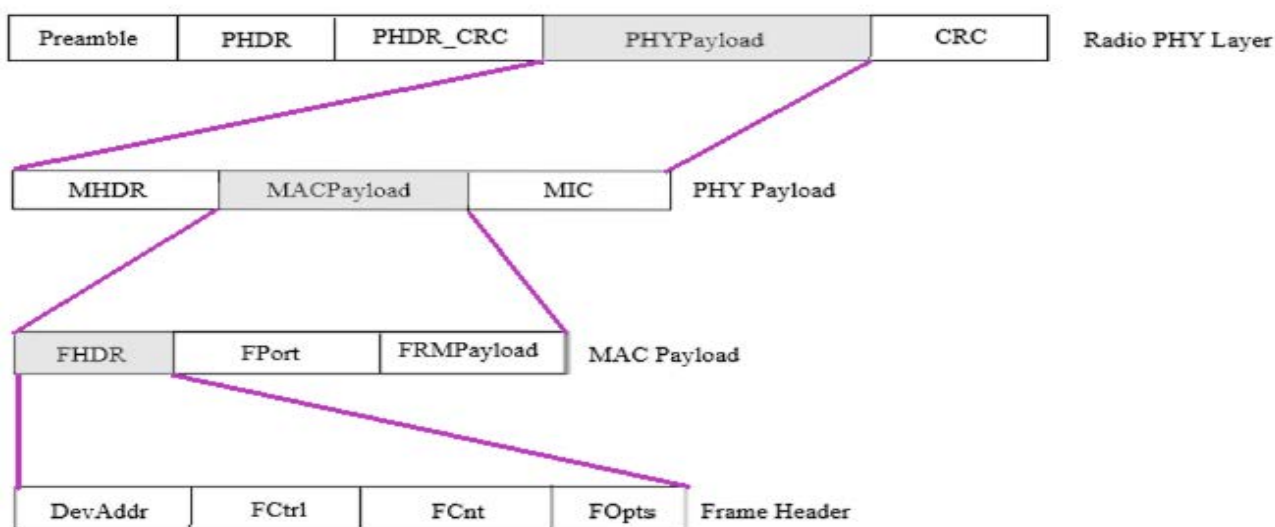
Υπάρχουν 2 τρόποι για να σταλούν εντολές MAC. Είτε μέσα στο πεδίο FOpts την ίδια στιγμή που άλλα δεδομένα στέλνονται στο Frame Payload(FRMPayload), είτε σαν ξεχωριστά πακέτα χρησιμοποιώντας όλο το Frame Payload. Επίσης, μπορούν να σταλούν μεμονωμένα ή σε ομάδα MAC εντολών. [36] Όλες οι εντολές ξεκινούν με μία οκτάδα που περιέχει το αναγνωριστικό της εντολής(CID) το οποίο υποδηλώνει ποιος τύπος εντολής ακολουθεί στις επόμενες οκτάδες, το μήκος των οποίων βασίζεται στον

τύπο της εντολής. Ο δέκτης των εντολών, απαντάει με την αντίστοιχη εντολή MAC, η οποία έχει αντίστοιχη μορφή με την εντολή που έλαβε από τον πομπό, με μία οκτάδα που περιέχει το CID και όσες οκτάδες ορίζονται στο LoRaWAN Link Layer Specification για την σχετική εντολής απάντησης[36]. Όπως φαίνεται στον πίνακα 10 παρακάτω, κάθε εντολή έχει και την αντίστοιχη εντολή απάντησης που στέλνει ο πομπός για επιβεβαίωση.

Η σωστή χρήση των κατάλληλων εντολών μπορεί να ενισχύσει την απόδοση της συσκευής αλλά και την συνολική λειτουργικότητα του δικτύου σε διάφορες εφαρμογές του IoT. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε μερικές από τις εντολές που προσφέρει το MAC, ποια συσκευή τις μεταδίδει αλλά και τι κάνουν.

Εντολή	Πηγή Μετάδοσης	Περιγραφή της εντολής
LinkCheckReq	Τελική Συσκευή	Ζητά από τον διακομιστή να αξιολογήσει την ποιότητα σύνδεσης μεταξύ συσκευής και της κοντινότερης πύλης.
LinkCheckAns	Πύλη	Παρέχει στην συσκευή την αξιολόγηση που ζήτησε.
RXTimingSetupReq	Πύλη	Δίνει εντολή στην συσκευή να τροποποιήσει την καθυστέρηση μεταξύ του τέλους της uplink μετάδοσης και της έναρξης του παραθύρου της downlink λήψης.
RXTimingSetupAns	Τελική Συσκευή	Επιβεβαιώνει την συμμόρφωση της συσκευής στην εντολή που έλαβε προηγουμένως.

Πίνακας 1: Εντολές MAC[35]

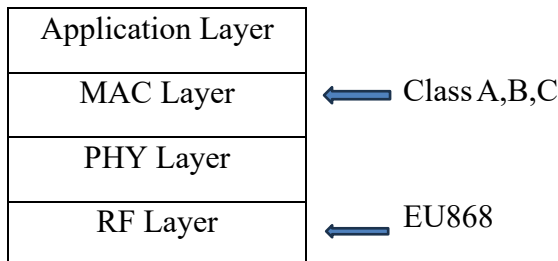


Εικόνα 6: LoRa Message Format

3.2 Επίπεδο PHY

3.2.1 Εισαγωγή στο PHY Layer

Το φυσικό στρώμα του LoRa βρίσκεται ανάμεσα στο RF και MAC Layer όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω:



Το φυσικό επίπεδο προσφέρει μια ποικιλία λειτουργιών. Για παράδειγμα προσφέρει υπηρεσίες σε ανώτερα στρώματα όπως το MAC και το Application, περνάει το πλαίσιο φυσικού στρώματος στο επίπεδο RF προκειμένου να μετατραπεί σε ραδιοσυχνότητα που διαφέρει ανάλογα με την περιοχή. Επίσης χρησιμοποιεί Forward Error Correction για να βοηθήσει στην διόρθωση σφαλμάτων, προσθέτει preamble στο PHY Layer πλαίσιο το οποίο χρησιμοποιείται για συγχρονισμό συχνότητας και χρόνου στον δέκτη. Χρησιμοποιεί επιπλέον CRC για εντοπισμό λαθών στο PHY πλαίσιο που φέρει το MAC payload και χρησιμοποιεί διαμόρφωση GFSK για να είναι το αναλογικό σήμα κατάλληλο προκειμένου να μεταδοθεί μέσω αέρα.[33]

Το LoRa χρησιμοποιεί ευρείας ζώνης διαμορφωμένους παλμούς chirp γραμμικής συχνότητας για να κωδικοποιήσει τα bits πληροφορίας. Τα chirp μετατοπίζονται κυκλικά, και τα frequency jumps είναι εκείνα που καθορίζουν την κωδικοποίηση των δεδομένων στα chirp. Το PHY layer περνά το διαμορφωμένο σήμα στον πομποδέκτη RF για να το μετατρέψει σε υψηλότερες συχνότητες σύμφωνα με τις ζώνες LoRaWAN. Αντίστοιχα, ακολουθείται η ίδια διαδικασία για την αποδιαμόρφωση του σήματος σε bits πληροφορίας. Εφαρμόζοντας το Forward Error Correction, προσθέτουμε error correction bit στα μεταδιδόμενα δεδομένα, για να επαναφέρουμε τα δεδομένα που αλλοιώνονται από διάφορες παρεμβολές. Όσα περισσότερα τα επιπλέον bit, τόσο ευκολότερη γίνεται η επαναφορά των αλλοιωμένων δεδομένων, με κόστος όμως την μείωση της ζωής της μπαταρίας.[33]

Το φυσικό επίπεδο κατασκευάζει ένα πλαίσιο, το οποίο θα μελετήσουμε στην επόμενη ενότητα, για να μεταδίδει το payload από το στρώμα MAC μέσω ζεύξης RF.

3.2.2 Μορφή πακέτου του Φυσικού Στρώματος LoRa

Το LoRa χρησιμοποιεί δύο τύπους μορφών πακέτων για την μετάδοση των δεδομένων: explicit και implicit. Στην explicit λειτουργία, ένα πακέτο LoRa περιέχει τα εξής στοιχεία:

- **Preamble:** Χρησιμοποιείται για να συγχρονιστεί ο δέκτης με τον πομπό. Πρέπει να αποτελείται από 8 σύμβολα για όλες τις περιοχές όπως γράφονται στο έγγραφο με τις παραμέτρους περιοχών. Ωστόσο ο πομπός προσθέτει ακόμα 4,25 σύμβολα, έχοντας έτσι ένα αποτέλεσμα $8+4,25=12,25$ συμβόλων.[31]
- **PHDR (Physical Header):** Είναι ένα προαιρετικό στοιχείο που υπάρχει μόνο στην λειτουργία explicit, και περιέχει πληροφορίες για το μέγεθος του payload και το CRC (Cyclic Redundancy Check).[31]
- **PHDR_CRC (Header CRC):** Είναι ένα προαιρετικό πεδίο που περιέχει έναν error detecting κώδικα για να διορθώνει λάθη στην κεφαλίδα.[31]

Τα PHDR και PHDR_CRC κωδικοποιούνται με Coding Rate 4/8.

- **PHYPayload:** Περιέχει το ολοκληρωμένο πλαίσιο που παράγει το επίπεδο MAC. Το μέγιστο μέγεθος payload ποικίλει ανάλογα με το DR(Data Rate) και είναι συγκεκριμένο με βάση την περιοχή. [31]
- **CRC:** Είναι ένα προαιρετικό πεδίο το οποίο περιέχει έναν κώδικα για να ανιχνεύει και να διορθώνει λάθη στο payload των uplink μηνυμάτων.[31]

Τα PHYPayload και CRC κωδικοποιούνται με ένα από τα Coding Rates(4/5, 4/6, 4/7, or 4/8). Το πλήρες πλαίσιο στέλνεται έπειτα με κάποιο από τα Spreading Factors(SF = 7 έως 12).

Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να δούμε την φυσική δομή των uplink και downlink μηνυμάτων στην explicit λειτουργία.

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
----------	------	----------	------------	-----

Πίνακας 2:Uplink Μήνυμα[31]

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
----------	------	----------	------------

Πίνακας 3:Downlink μήνυμα[31]

Στην λειτουργία implicit, η κεφαλίδα αφαιρείται από το πακέτο, στο οποίο το μέγεθος του payload και του CR είναι ήδη καθορισμένα ή τα γνωρίζουμε εκ των προτέρων. Τα beacons χρησιμοποιούν το LoRa radio packet για να στείλουν πληροφορίες συγχρονισμού από τις πύλες στις τελικές συσκευές.[31]

4 Περιορισμοί και Υπολογισμοί

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε τις παραμέτρους μετάδοσης, τους τοπικούς περιορισμούς RF στην Ευρώπη, και θα κάνουμε υπολογισμούς χρησιμοποιώντας LoRa airtime αριθμομηχανές συγκρίνοντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα.

4.1 Παράμετροι Μετάδοσης

Ένα τυπικό LoRa radio παρέχει πέντε παραμέτρους διαμόρφωσης τους οποίους και θα αναλύσουμε.

- **Ισχύς Μετάδοσης-Transmission Power(TP)**

Η ισχύς μετάδοσης μπορεί να προσαρμοστεί από -4dBm έως και 20dBm, αλλά λόγω ορίων στην υλοποίηση του hardware, το εύρος αυτό περιορίζεται από 2dBm έως 20dBm, και επίπεδα ισχύος πάνω από 17dBm μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο στο 1% του κύκλου λειτουργίας. Στην Ευρώπη, η TP είναι περιορισμένη στα 14dBm. [15][16][17]

- **Συχνότητα Φέροντος-Carrier Frequency(CF)**

Είναι η κεντρική συχνότητα και προγραμματίζεται σε βήματα των 61Hz, μεταξύ 137MHz και 1020MHz. Ανάλογα το LoRa chip, το εύρος αυτό είναι δυνατόν να περιοριστεί στα 860MHz έως και 1020MHz.[15]

- **Συντελεστής διάδοσης-Spreading Factor(SF)**

Αποτελεί την αναλογία μεταξύ του ρυθμού συμβόλων και του ρυθμού chip. Η αύξηση του SF, αυξάνει και το SNR, και συνεπώς την ευαισθησία και το εύρος. Αυξάνει όμως και το airtime του πακέτου. Ο αριθμός των chip ανά σύμβολο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο 2^{SF} . Κάθε αύξηση του SF μειώνει στο μισό τον ρυθμό μετάδοσης, με αποτέλεσμα να διπλασιάζει την διάρκεια μετάδοσης και την κατανάλωση ενέργειας. Οι ραδιοεπικοινωνίες με διαφορετικούς SF είναι ορθογώνιες μεταξύ τους, επομένως ο διαχωρισμός του δικτύου με χρήση διαφορετικών SF είναι εφικτός. Το LoRaWAN ορίζει 6 spreading factors-από SF7 έως SF12, και επιλέγεται από την τελική συσκευή επηρεάζοντας τον χρόνο μετάδοσης ενός πακέ-

του. Σε κάθε συσκευή εκχωρείται ένας SF για την μετάδοση δεδομένων μέσω του Network Server.[15][16][17][20][23]

- **Εύρος Ζώνης-Bandwidth(BW)**

Το εύρος ζώνης είναι ουσιαστικά το εύρος των συχνοτήτων στην ζώνη μετάδοσης. Παρέχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και συνεπώς λιγότερο airtime, αλλά χαμηλότερη ευαισθησία λόγω πρόσθετου θορύβου. Όσο χαμηλότερο το εύρος ζώνης και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, τόσο υψηλότερη η ευαισθησία. Τα δεδομένα στέλνονται με ρυθμό chip ίδιο με το εύρος ζώνης, οπότε ένα BW των 500kHz αντιστοιχεί σε ρυθμό chip 500kcps. Το εύρος ζώνης κυμαίνεται από τα 7.8kHz έως τα 500kHz, όμως ένα κλασσικό δίκτυο LoRa λειτουργεί είτε στα 125kHz, ή στα 250kHz ή στα 500kHz. Εύρη ζώνης μικρότερα από 62.5kHz απαιτούν έναν crystal oscillator για αντιστάθμιση της θερμοκρασίας(Temperature Compensated Crystal Oscillator-TCXO)[15][16][17]

- **Ρυθμός Κωδικοποίησης-Coding Rate(CR)**

Το LoRa χρησιμοποιεί το Forward Error Correction(FEC) το οποίο είναι ένας τρόπος να ελέγξουμε τα σφάλματα σε θορυβώδεις μεταδόσεις δεδομένων προσθέτοντας περιττά δεδομένα, προκειμένου να ξεπεραστούν πιθανές παρεμβολές. Ο ρυθμός κωδικοποίησης αποτελεί τον ρυθμό FEC του LoRa modem και μπορεί να οριστεί σε 4/5, 4/6, 4/7, 4/8. Ο ρυθμός κωδικοποίησης καθορίζει την αναλογία των bit που μεταφέρουν πραγματικά πληροφορίες-για παράδειγμα το CR 4/5 σημαίνει πως για κάθε 4 bit που φέρουν πληροφορία, 1 bit χρησιμοποιείται για διόρθωση σφαλμάτων. Υψηλότερο CR σημαίνει περισσότερη προστασία, αυξάνοντας όμως το airtime. Radios με διαφορετικό CR μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αν χρησιμοποιήσουν μία ρητή κεφαλίδα(explicit header), καθώς το CR του payload αποθηκεύεται στην κεφαλίδα του πακέτου[15][16][17][20].

Το σύμβολο έχει 2^{SF} τιμές.

Για $SF=7$, έχουμε εύρος από 0 έως 127.

$CR=4/(4+CR)$, όπου $CR=1,2,3,4$

$BW=R_c=Chiprate(Chips/sec)$

$R_c(symbols/sec)=BW/2^{SF}=R_c/2^{SF}$

Για παράδειγμα εάν έχουμε $BW=125\text{KHz}$ και $SF=7$ θα έχουμε ως αποτέλεσμα:
 $R_s=125000/2^7=977\text{Symbols/sec}$.

$$R_b (\text{bits/sec}) = SF * (BW/2^{SF}) * (4/(4+CR))[33]$$

4.2 Τοπικοί Περιορισμοί χρήσης Ραδιοσυχνοτήτων στο LoRaWAN RP-002 1.0.3

Η sub-gigahertz ISM(Industrial, Scientific and Medical) ζώνη, είναι ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ των 868MHz και 870MHz στην Ευρώπη που είναι διαθέσιμες για χρήση χωρίς άδεια. Αυτές οι συχνότητες χρησιμοποιούνται για την βιομηχανική και επιστημονική επικοινωνία, για ιατρικές εφαρμογές και στα LoRaWAN δίκτυα.

4.2.1 EU 863-870MHz (EU868)

Στην Ευρώπη το LoRaWAN χρησιμοποιεί ένα εύρος 24-80 καναλιών με είτε 125kHz ή 250kHz, όπου το εύρος ζώνης 250kHz μπορεί να επιτευχθεί μόνο χρησιμοποιώντας DR6(Data Rate).[23]

Όλες οι LoRaWAN συσκευές είναι υποχρεωτικό να λειτουργούν τουλάχιστον στα κανάλια 868.10 MHz, 868.30 MHz, και 868.50 MHz. Αυτά τα κανάλια πρέπει να έχουν εύρος ζώνης 125kHz στο DR0 έως DR5, και έχουν περιορισμό στον κύκλο λειτουργίας τους έως 1%. Αυτά τα τρία κανάλια χρησιμοποιούνται για να στείλουμε join-requests, συνεπώς όλες οι πύλες πρέπει να «ακούνε» τα κανάλια. Η LoRa Alliance προτείνει κύκλο λειτουργίας 1% για την Ευρώπη. Το οποίο σημαίνει ότι η συσκευή δεν πρέπει να μεταδίδει για περισσότερο από 1% της λειτουργίας της, ενώ πρέπει να εξασφαλίσει το μέγιστο EIRP(Effective Isotropic Radiated Power) των +16dBm. Σκοπός του περιορισμού στον κύκλο λειτουργίας είναι η εξασφάλιση πως οι συσκευές που λειτουργούν στην ζώνη ISM δεν προκαλούν παρεμβολές στις υπόλοιπες συσκευές που λειτουργούν στην ίδια ζώνη.[23]

Συχνότητα Καναλιού(MHz)	Bandwidth(kHz)	LoRa Data Rate(DR)	Bit Rate(kbps)
868.10	125	DR0-DR5	0.3-5
868.30	125	DR0-DR5	0.3-5
868.50	125	DR0-DR5	0.3-5

Πίνακας 4:Προκαθορισμένα Κανάλια[27]

Η ETSI(European Telecommunications Standards Institute) χώρισε την Ευρωπαϊκή ISM συχνότητα σε 6 υπό-ζώνες(K-Q) και επιβάλλει επιπλέον περιορισμούς στον κύκλο λειτουργίας και το μέγιστο ERP για μερικές από αυτές τις υπό-ζώνες.[23]

- K (863 MHz - 865 MHz): 0.1%, 25 mW ERP
- L (865 MHz - 868 MHz): 1%, 25 mW ERP
- M (868 MHz - 868.6 MHz): 1%, 25 mW ERP
- N (868.7 MHz - 869.2 MHz): 0.1%, 25 mW ERP
- P (869.4 MHz - 869.65 MHz): 10%, 500 mW ERP
- Q (869.7 MHz - 870 MHz): 1%, 25 mW ERP

Για παράδειγμα οι συσκευές που λειτουργούν στο εύρος 869.4-869.65 MHz το οποίο είναι η υπό-ζώνη P, έχουνε έναν περιορισμό στον κύκλο λειτουργίας τους της τάξεως του 10%. Αυτό σημαίνει ότι η συσκευή μπορεί να μεταδώσει έως και 10% του χρόνου.

Στην Ευρώπη η 869.525MHz χρησιμοποιείται για Κλάσης B beacon μεταδόσεις και ping slots, και έχει προκαθορισμένο data rate DR0(SF12/125kHz).[25][27]

Data Rate	M	N
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	230	222
5	230	222
6	230	222
7	230	222
8	58	50
9	123	115
10	58	50
11	123	115

Πίνακας 5:EU863-870 μέγιστο μέγεθος payload (με repeater)[25]

Data Rate	M	N
0	59	51

1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	230	242
5	230	242
6	230	242
7	230	242
8	58	50
9	123	115
10	58	50
11	123	115

Πίνακας 6:EU863-870 μέγιστο μέγεθος payload (χωρίς repeater)[25]

EU863-870 Κλάση B-beacon και προκαθορισμένο downlink κανάλι

Οι φάροι πρέπει να μεταδίδονται με βάση τις παρακάτω ρυθμίσεις:

DR	3	Αντιστοιχεί σε spreading factor SF9 με bandwidth 125kHz
CR	1	Coding Rate = 4/5
Πολικότητα Σήματος	Non-inverted	Σε αντίθεση με την κανονική downlink κίνηση, η οποία χρησιμοποιεί ανεστραμμένη πολικότητα σήματος

Πίνακας 7:EU863-870 ρυθμίσεις beacon[25]

EU863-870 Προκαθορισμένες Ρυθμίσεις

Δεν υπάρχουν συγκριμένες προκαθορισμένες ρυθμίσεις για την ζώνη ISM EU 863-870MHz

4.2.2 EU 433MHz (EU433)

Το LoRaWAN μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην ζώνη ISM 433.05 έως 434.79 MHz στην ITU Region 1, εφόσον η ραδιοσυσκευή EIRP είναι μικρότερη από 12dBm.Ο κύκλος λειτουργίας της τελικής συσκευής πρέπει να είναι χαμηλότερος από 10%[25]. Η συχνότητα των LoRaWAN καναλιών κυμαίνεται στο παρακάτω εύρος:

- Ελάχιστη Συχνότητα: 433.175 MHz

- Μέγιστη Συχνότητα: 434.665 MHz

EU433 Μέγιστο μέγεθος payload

Το μέγιστο μέγεθος MACPayload(M) προκύπτει από τους περιορισμούς στο επίπεδο PHY που εξαρτάται από τον αποτελεσματικό ρυθμό διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται λαμβάνοντας υπόψη ένα πιθανό στρώμα ενθυλάκωσης repeater και φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Δίνεται επίσης και το μέγιστο μήκος payload χωρίς την παρουσία του προαιρετικού πεδίου ελέγχου FOpts(N). Η τιμή του N ίσως να είναι μικρότερη εάν το πεδίο FOpts δεν είναι άδειο.[25]

Data Rate	M	N
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	230	222
5	230	222
6	230	222
7	230	222

Πίνακας 8:EU433 μέγιστο μέγεθος payload (με repeater)[25]

Εάν η τελική συσκευή δε χρησιμοποιήσει repeater τότε το μέγιστο μήκος payload με την απουσία των πεδίων ελέγχου optional FOpts πρέπει να είναι όπως φαίνεται στον πίνακα:

Data Rate	M	N
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	250	242
5	250	242
6	250	242
7	250	242

Πίνακας 9:EU433 μέγιστο μέγεθος payload (χωρίς repeater)[25]

EU433 Προκαθορισμένες ρυθμίσεις

Δεν υπάρχουν συγκριμένες προκαθορισμένες ρυθμίσεις για την ζώνη ISM EU 433MHz.

4.2.3 Data Rate

Είναι ο αριθμός των bit που μεταδίδονται στην μονάδα του χρόνου, και εξαρτάται από ορισμένες από τις παραμέτρους μετάδοσης που μελετήσαμε νωρίτερα, και πιο συγκεκριμένα, το SF, το BW και το CR.

Ο συντελεστής μετάδοσης-SF καθορίζει ουσιαστικά και το bit rate, καθώς παρατηρούμε πως υψηλότερο SF έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερα bit rates και το αντίστροφο. Εάν όμως χρησιμοποιήσουμε τον ίδιο SF αλλά διπλασιάσουμε το bandwidth, το data rate επίσης διπλασιάζεται.[27]

Οι συσκευές οι οποίες λειτουργούν στην ISM EU868 οφείλουν να υποστηρίζουν μία από τις παρακάτω επιλογές:

1. DR0-DR5(το ελάχιστο data rate που πρέπει να υποστηρίζουν οι συσκευές για να αποκτήσουν LoRaWAN πιστοποίηση)
2. DR0-DR7
3. DR0-DR11(περιέχει όλα τα data rates)

Data Rate	Spreading Factor	Bandwidth(kHz)	Bit Rate(bit/s)
0	SF12	125	250
1	SF11	125	440
2	SF10	125	980
3	SF9	125	1760
4	SF8	125	3125
5	SF7	125	5470
6	SF7	250	11000
7	FSK	50kbps	50000

Πίνακας 10:Data Rates(DR0-DR7) για EU868[27]

Εάν χαμηλώσουμε την ισχύ μετάδοσης θα έχουμε μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην ζωή της μπαταρίας, όμως το εύρος του σήματος θα είναι μικρότερο. Ο συνδυασμός bandwidth και spreading factor διαμορφώνουν το data rate. Αυξάνοντας το data rate(χαμηλό SF και πιο ευρύ BW), μπορούμε να μεταδώσουμε αυτά τα byte σε λιγότερο χρόνο, μειώνοντας όμως την απόσταση. Διπλασιάζοντας το BW(στην Ευρώπη από BW125 σε BW250 για SF7) έχουμε την δυνατότητα να διπλασιάσουμε τον αριθμό των byte στον ίδιο χρόνο. Μειώνοντας τον SF κατά ένα, επίσης μας δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με τον διπλασιασμό του BW. Η μείωση του SF όμως έχει ως αποτέλεσμα την πιο δύσκολη η λήψη των μεταδόσεων από την πύλη, εφόσον θα είναι πιο ευαίσθητες στον θόρυβο. Μεγαλύτερο SF(πχ SF11) συνεπάγεται χαμηλότερη ταχύτητα.[28]

4.2.4 EIRP-ERP, RSSI και SNR

Το EIRP(Effective Isotropic Radiated Power) είναι η συνολική ισχύς που εκπέμπεται από μία ισοτροπική κεραία προς μόνο μία κατεύθυνση, και εκφράζεται σε dBi.[29] Μία μονάδα EIRP περιέχει έναν πομπό(dBm), μία κεραία(dBi) και ένα καλώδιο(dB), και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{EIRP(dBi)} = \text{Transmitter output power (dBm)} + \text{Antenna Gain(dBi)} - \text{Cable Loss(dB)}$$

Το ERP(Effective Radiated Power) είναι η συνολική ισχύς που εκπέμπεται από μία κεραία σε σχέση με μία διπολική κεραία μισού κύματος. [29] Η δομή του ERP είναι η ίδια με του EIRP, όπως και ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του, με διαφορά την μονάδα μέτρησης των κερδών της κεραίας.

$$\text{ERP(dBm)} = \text{Transmitter output power(dBm)} + \text{Antenna Gain(dBd)} - \text{Cable Loss(dB)}$$

Τα RSSI και SNR αφορούν την ισχύ του σήματος, καθώς στις ασύρματες επικοινωνίες ο δέκτης χρειάζεται ισχυρό σήμα για να διαχωρίσει το αρχικό σήμα από το διαμορφωμένο φέρον.

Το RSSI(Received Signal Strength Indicator) μας υποδεικνύει εάν το λαμβανόμενο σήμα είναι αρκετά ισχυρό για να έχουμε καλή ασύρματη επικοινωνία με τον πομπό. Αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για το LoRaWAN και τις μετρήσεις τόσο για τις πύ-

λες όσο και για τις τελικές συσκευές, καθώς έχουμε διπλής κατευθύνσεως επικοινωνία. Μετρείται σε dBm και η τιμή του είναι αρνητική-όσο πιο κοντά στο 0 είναι, τόσο πιο ισχυρό σήμα έχουμε.[30] Επηρεάζεται επίσης από παράγοντες που αναφέραμε νωρίτερα στους τύπους EIRP/ERP.

Το SNR(Signal-to-Noise Ratio), είναι η αναλογία του λαμβανόμενου σήματος προς τον θόρυβο, υποδεικνύοντάς μας την ποιότητα του σήματος που λαμβάνουμε. Εκφράζεται σε dB και υπολογίζεται από τον τύπο

$$\text{SNR(dB)} = \text{P}_{\text{RECEIVED}}(\text{dBm}) - \text{P}_{\text{NOISE}}(\text{dBm})$$

Οι τιμές του μπορούν να είναι τόσο θετικές όσο και αρνητικές, και αναλόγως συμπεραίνουμε την ποιότητα του σήματος και αν ο δέκτης θα είναι σε θέση να αποδιαμορφώσει το σήμα που έλαβε. Θετικό SNR σημαίνει πως η ισχύς του σήματος είναι μεγαλύτερη από τον θόρυβο, και ο δέκτης θα μπορέσει να αποδιαμορφώσει το σήμα. Αντίστοιχα, εάν το SNR είναι αρνητικό, η ισχύς του σήματος είναι μικρότερη του θορύβου και ο δέκτης δε θα αποδιαμορφώσει το σήμα. Παρόλα αυτά, το LoRa μπορεί να αποδιαμορφώσει σήματα που είναι μικρότερα του θορύβου, θέτοντας ελάχιστες τιμές για το SNR σε σχέση με τον SF.[30]

4.3 Υπολογισμοί LoRa

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα κάνουμε ορισμένους υπολογισμούς με το Airtime Calculator της Semtech, για να αποδείξουμε όσα αναφέραμε προηγουμένως. Θα συγκρίνουμε τα SF/BW, και θα παρατηρήσουμε τις διαφορές στην κατανάλωση αλλά και στο εύρος επικοινωνίας, που διαφέρει ανάλογα με τα δεδομένα που ορίζουμε στην κάθε τελική συσκευή. Για τους συγκεκριμένους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε την συσκευή SX1276, με τα δεδομένα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

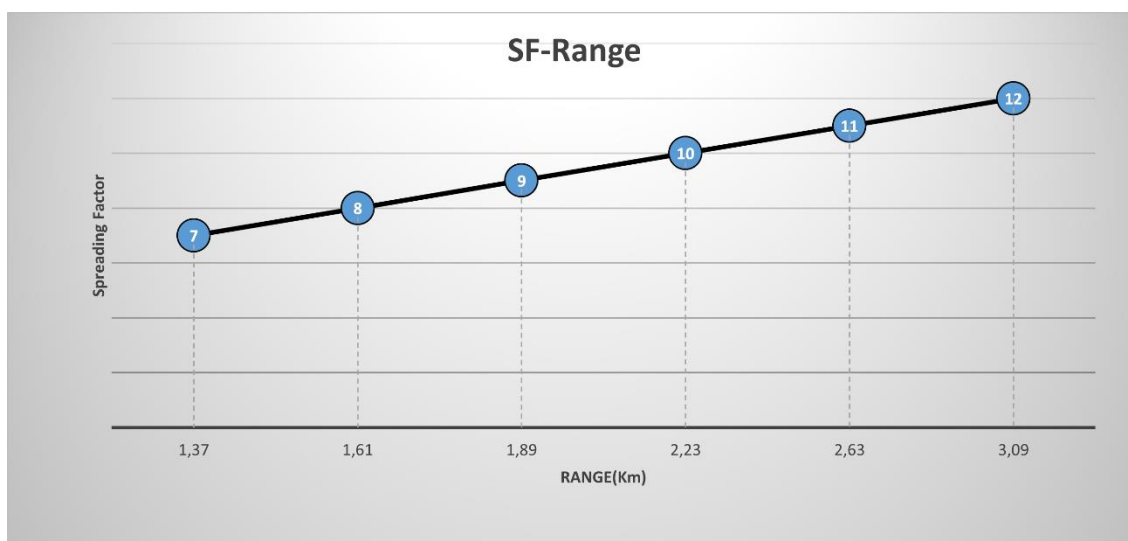
Tx Power	13dBm
Frequency	868.5MHz
SF	7-12
Bandwidth	125 & 250kHz

Coding Rate	4/8
Preamble Length	8 symbols
Payload Length	25 bytes

Πίνακας 11: Δεδομένα για τους υπολογισμούς

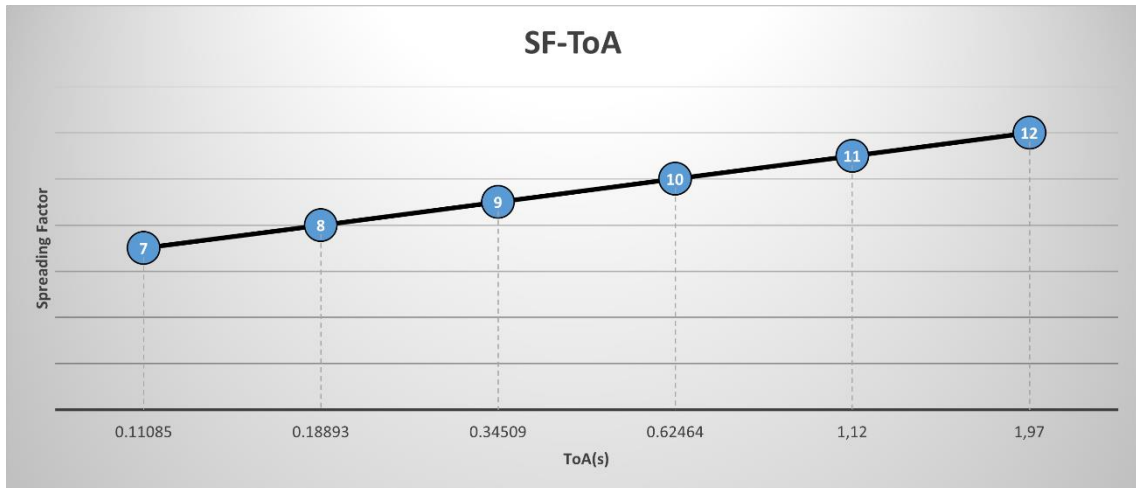
Η αύξηση των SF οδηγεί σε αύξηση της απόστασης επικοινωνίας, καταναλώνει όμως περισσότερη ενέργεια μειώνοντας σε βάθος χρόνου τη ζωή της μπαταρίας, καθώς αυξάνει τον χρόνο που τα πακέτα βρίσκονται στον αέρα. Επίσης, οδηγεί σε χαμηλότερη αξιοποίηση των πυλών.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ανάλογη αύξηση SF και απόστασης επικοινωνίας στα 125kHz.



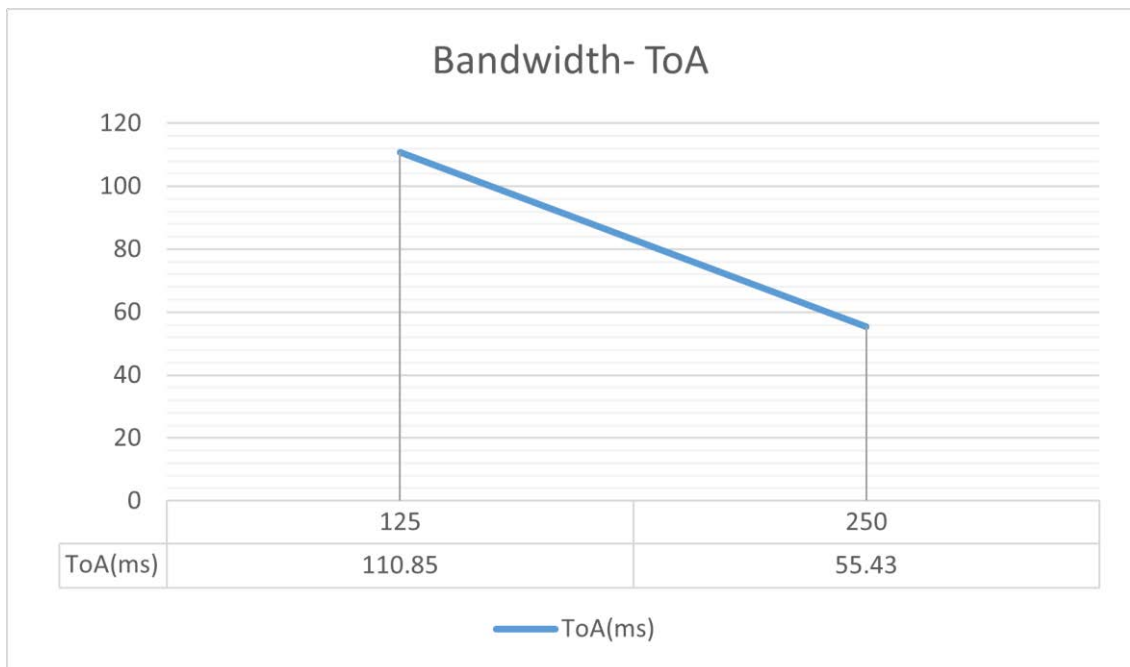
Εικόνα 7: Διάγραμμα SF-Range

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, η αύξηση του spreading factor δεν αυξάνει μόνο την απόσταση επικοινωνίας, αλλά και τον χρόνο που τα πακέτα βρίσκονται στον αέρα. Η αύξηση του ToA έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη κατανάλωση της ζωής της μπαταρίας.



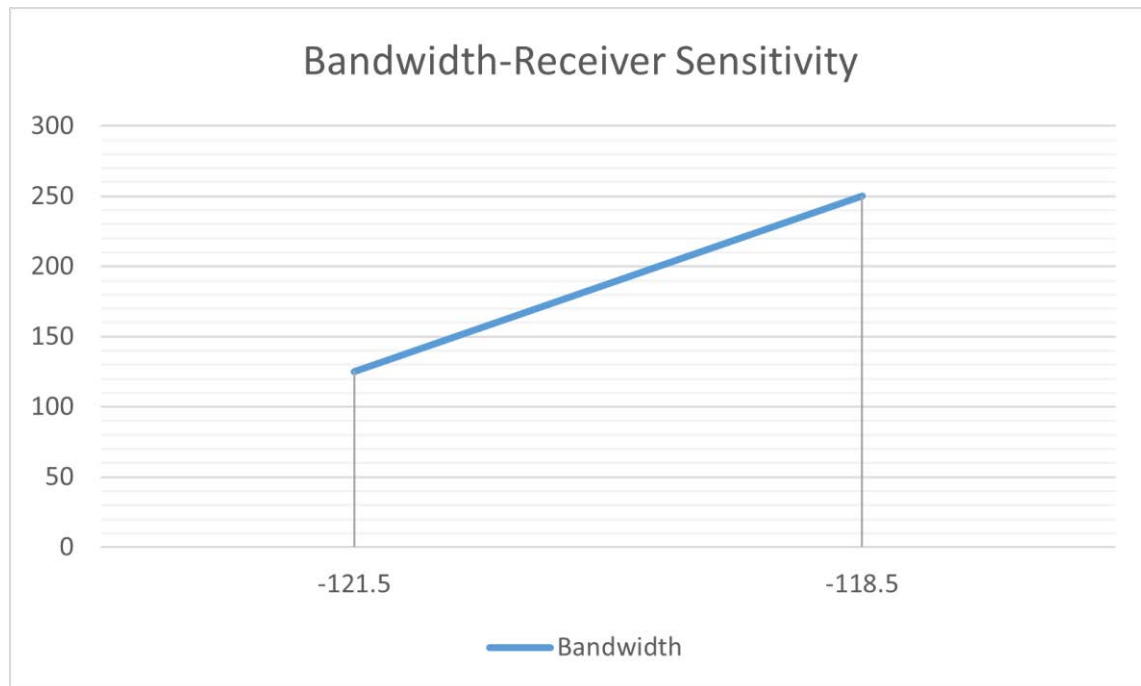
Εικόνα 8:Διάγραμμα SF-ToA

Στην περίπτωση όμως του spreading factor 7(SF7), το εύρος ζώνης μπορεί να είναι είτε 125kHz είτε 250kHz. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα για τους υπολογισμούς μας, παρατηρούμε πως η αύξηση του Bandwidth, και συγκεκριμένα ο διπλασιασμός του, οδηγεί σε μείωση του ToA σχεδόν στο μισό.



Εικόνα 9:Διάγραμμα Bandwidth-ToA

Αντίστοιχα, αυξάνεται και η ευαισθησία του δέκτη όπως βλέπουμε στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Εικόνα 10:Διάγραμμα Bandwidth-Receiver Sensitivity

5 Σχεδιασμός ενός LoRaWAN δικτύου

Σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιώντας το εργαλείο NS-3, φτιάχνουμε ένα simulation ενός δικτύου LoRaWAN και αναλύουμε τις παραμέτρους, προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα συμπέρασμα που θα βελτιώσει τον σχεδιασμό των δικτύων. Μέσω της απεικόνισης των παρακάτω δικτύων, θα είμαστε σε θέση να επιβεβαιώσουμε τα θεωρητικά αποτελέσματα που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.1 Αρχικό απλό δίκτυο

Ξεκινώντας αυτό το κεφάλαιο, δουλεύουμε το open-source NS-3 σε περιβάλλον Linux το οποίο είναι ένας network simulator που προορίζεται κυρίως για ερευνητική και εκπαιδευτική χρήση. Για την απεικόνιση του δικτύου σε animator χρησιμοποιήθηκε το netanim-3.109. Βασιζόμενοι στον κώδικα του Πανεπιστημίου της Πάντοβα, ο οποίος είναι διαθέσιμος στο GitHub μπορούμε να τρέξουμε τα παραδείγματα που υπάρχουν σε C++ και να καταλήξουμε σε ορισμένα συμπεράσματα.

Στο πρόγραμμα simple-network-example υπάρχουν ορισμένες εντολές που χρησιμοποιούμε για να παραχθούν τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία μας δίνουν μία εικόνα για το δίκτυό μας. Αρχικά, παρατηρούμε πως προστίθενται οι συχνότητες και τα sub-bands στο κανάλι.

```
+0.000000000s -1 LogicalLoraChannelHelper:AddSubBand(0x7ffe1174f730, 868, 868.6)
+0.000000000s -1 LogicalLoraChannelHelper:AddSubBand(0x7ffe1174f730, 868.7, 869.2)
+0.000000000s -1 LogicalLoraChannelHelper:AddSubBand(0x7ffe1174f730, 869.4, 869.65)
```

```
+0.000000000s -1 GatewayLoraPhy:AddFrequency(0x5613df001280, 868.1)
+0.000000000s -1 GatewayLoraPhy:AddFrequency(0x5613df001280, 868.3)
+0.000000000s -1 GatewayLoraPhy:AddFrequency(0x5613df001280, 868.5)
```

Έπειτα δημιουργείται το PHY Layer. Βλέπουμε πως τα πακέτα χρησιμοποιούν τις συχνότητες των πυλών για να σταλούν, και η εκάστοτε τελική συσκευή χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα κανάλια για να στείλει ταυτόχρονα τα πακέτα χωρίς καθυστερήσεις.

```
+2.000000000s 0 EndDeviceLorawanMac:GetNextTransmissionDelay(): Waiting time
before the next transmission in channel with frequency 868.1 is = 0.
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:GetWaitingTime(0x5613df000548,
0x5613defffd40)
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:GetWaitingTime(): Waiting time: 0
+2.000000000s 0 EndDeviceLorawanMac:GetNextTransmissionDelay(): Waiting time
before the next transmission in channel with frequency 868.3 is = 0.
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:GetWaitingTime(0x5613df000548,
0x5613defffd80)
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:GetWaitingTime(): Waiting time: 0
+2.000000000s 0 EndDeviceLorawanMac:GetNextTransmissionDelay(): Waiting time
before the next transmission in channel with frequency 868.5 is = 0.
```

Όταν το πακέτο λαμβάνεται από την εφαρμογή, η τελική συσκευή κάνει reset τις παραμέτρους μετάδοσης και προσθέτει το νέο πακέτο. Αναλύει τα χαρακτηριστικά του Rx όπως το μέγεθος του LoRaFrameHeader, την διεύθυνση, fCnt κτλ., όπως φαίνονται παρακάτω:

```
-SF
-ToA
-CR
-BW
-preamble
-header on/off
-crc on/off
-data rate optimization
-packet size
-payload symbols
-tPreamble
-tPaylad
-Total time
```

```
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(0x5613defc0040, SF: 7, headerDisabled:
false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowData-
RateOptimizationEnabled: false))
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): Packet of size 19 bytes
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): Time computation: num = 168, den = 28,
payloadSymbNb = 38, tSym = 0.001024
```

-36-

```
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): tPreamble = 0.012544
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): tPayload = 0.038912
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): Total time = 0.051456
```

Αντίστοιχα μετά αναλύονται τα χαρακτηριστικά του PHY Layer του Tx όπως νωρίτερα του Rx, βλέποντας τους χρόνους και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούμε. Αφού του υπολογιστεί ο ολικός χρόνος που χρειάζεται για την μετάδοση των πακέτων παρατηρούμε πως αναφέρεται το Duty Cycle, αλλά και τότε η συγκεκριμένη sub-band επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί.

```
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(0x5613defc0040, SF: 7, headerDisabled:
false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowData-
RateOptimizationEnabled: false))
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): Packet of size 19 bytes
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): Time computation: num = 168, den = 28,
payloadSymbNb = 38, tSym = 0.001024
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): tPreamble = 0.012544
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): tPayload = 0.038912
+2.000000000s 0 LoraPhy:GetOnAirTime(): Total time = 0.051456
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:AddEvent(0x5613df000548,
+5.1456e+07ns, 0x5613defff40)
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:AddEvent(): Time on air: 0.051456
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:AddEvent(): m_aggregatedDutyCycle: 1
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:AddEvent(): Current time: 2
+2.000000000s 0 LogicalLoraChannelHelper:AddEvent(): Next transmission on this
sub-band allowed at time: 7.09414
```

Το PHY Layer της τελικής συσκευής αλλάζει σε κατάσταση stand-by μέχρι το MAC Class A End Device να ανακοινώσει πως η μετάδοση τελείωσε, όπου το αλλάζει ξανά σε κατάσταση sleep.

```
+2.051456000s 0 EndDeviceLoraPhy:SwitchToStandby()
+2.051456010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:TxFinished()
+2.051456010s 0 EndDeviceLoraPhy:SwitchToSleep()
```

Τα παρακάτω αποτελέσματα μας δείχνουν την διαδικασία αποστολής του πακέτου από την τελική συσκευή στην πύλη. Η τελική συσκευή που χρησιμοποιείται είναι κλάσης A, συνεπώς λειτουργεί όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, με παράθυρα τα οποία ανοίγουν και κλείνουν όποτε δίνει εντολή το MAC Layer για να σταλούν και να ληφθούν πακέτα. Μπροστά από τα αποτελέσματα μπορούμε να παρατηρήσουμε με ακρίβειας 9 δεκαδικών ψηφίων τους χρόνους που γίνονται αυτές οι διαδικασίες μεταξύ MAC&PHY Layers.

```
+2.051459336s 1 LoraInterferenceHelper:IsDestroyedByInterference(): Packet survived
all interference
```

```

+2.051459336s 1 GatewayLorawanMac:Receive(0x5613df001810, 0x5613defc0040)
+2.051459336s 1 LorawanMacHeader:Deserialize()
+2.051459336s 1 LorawanMacHeader:IsUplink()
+2.051459336s 1 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x5613defc0040
+3.051456010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:OpenFirstReceiveWindow()
+3.051456010s 0 EndDeviceLoraPhy:SwitchToStandby()
+3.051456010s 0 LorawanMac:GetSfFromDataRate(0x5613df0004d0, 5)
+3.051456010s 0 LorawanMac:GetBandwidthFromDataRate(0x5613df0004d0, 5)
+3.059648010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:CloseFirstReceiveWindow()
+3.059648010s 0 EndDeviceLoraPhy:GetState()
+3.059648010s 0 EndDeviceLoraPhy:SwitchToSleep()
+4.051456010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:OpenSecondReceiveWindow()
+4.051456010s 0 EndDeviceLoraPhy:GetState()
+4.051456010s 0 EndDeviceLoraPhy:SwitchToStandby()
+4.051456010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:OpenSecondReceiveWindow(): Us-
ing parameters: 869.525Hz, DR0
+4.051456010s 0 LorawanMac:GetSfFromDataRate(0x5613df0004d0, 0)
+4.051456010s 0 LorawanMac:GetSfFromDataRate(0x5613df0004d0, 0)
+4.051456010s 0 LorawanMac:GetBandwidthFromDataRate(0x5613df0004d0, 0)
+4.313600010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:CloseSecondReceiveWindow()
+4.313600010s 0 EndDeviceLoraPhy:GetState()
+4.313600010s 0 EndDeviceLoraPhy:SwitchToSleep()
+4.313600010s 0 ClassAEndDeviceLorawanMac:CloseSecondReceiveWindow(): We
have 8 transmissions left. We were not transmitting confirmed messages.

```

5.1.1 Parallel Perception

Μέσω του συγκεκριμένου παραδείγματος για ένα απλό δίκτυο, μπορούμε να δούμε την ταυτόχρονη λήψη πακέτων με διαφορετικά SF στην ίδια συχνότητα και πύλη.

```

+0.000000000s -1 GatewayLoraPhy:AddFrequency(0x56364dac5f80, 868.1)
+0.000000000s -1 GatewayLoraPhy:AddFrequency(0x56364dac5f80, 868.3)
+0.000000000s -1 GatewayLoraPhy:AddFrequency(0x56364dac5f80, 868.5)

+1.051456000s      6      SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(0x56364dac5f80,
0x56364da7f040, (1 s - 1.05146 s), SF7, 6.3 dBm, 868.1 MHz)
+1.051456000s 6 SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(): Packet with SF 7 received
correctly
+1.051456000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(0x56364dac65b0, 0x56364da7f040)
+1.051456000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x56364da7f040
+1.102912000s      6      SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(0x56364dac5f80,
0x56364da8c990, (1 s - 1.10291 s), SF8, 6.3 dBm, 868.1 MHz)

```

```

+1.102912000s 6 SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(): Packet with SF 8 received
correctly
+1.102912000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(0x56364dac65b0, 0x56364da8c990)
+1.102912000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x56364da8c990
+1.185344000s      6      SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(0x56364dac5f80,
0x56364da73370, (1 s - 1.18534 s), SF9, 6.3 dBm, 868.1 MHz)
+1.185344000s 6 SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(): Packet with SF 9 received
correctly
+1.185344000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(0x56364dac65b0, 0x56364da73370)
+1.185344000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x56364da73370
+1.329728000s      6      SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(0x56364dac5f80,
0x56364dac88e0, (1 s - 1.32973 s), SF10, 6.3 dBm, 868.1 MHz)
+1.329728000s 6 SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(): Packet with SF 10 received
correctly
+1.329728000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(0x56364dac65b0, 0x56364dac88e0)
+1.329728000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x56364dac88e0
+1.741376000s      6      SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(0x56364dac5f80,
0x56364dac8e40, (1 s - 1.74138 s), SF11, 6.3 dBm, 868.1 MHz)
+1.741376000s 6 SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(): Packet with SF 11 received
correctly
+1.741376000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(0x56364dac65b0, 0x56364dac8e40)
+1.741376000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x56364dac8e40
+2.318912000s      6      SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(0x56364dac5f80,
0x56364dac93a0, (1 s - 2.31891 s), SF12, 6.3 dBm, 868.1 MHz)
+2.318912000s 6 SimpleGatewayLoraPhy:EndReceive(): Packet with SF 12 received
correctly
+2.318912000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(0x56364dac65b0, 0x56364dac93a0)
+2.318912000s 6 GatewayLorawanMac:Receive(): Received packet: 0x56364dac93a0

```

Παρατηρούμε πως υπάρχει αρκετή διαφορά ανάμεσα στους χρόνους μεταξύ των SF. Για παράδειγμα, ο SF7 χρειάζεται 0.05146 δευτερόλεπτα προκειμένου να στείλει το πακέτο στην πύλη, ενώ ο SF11 χρειάζεται 0.74138sec. Επιβεβαιώνουμε λοιπόν, πως με την αύξηση του SF, αυξάνεται η απόσταση αλλά και το ToA.

5.2 Σύνθετο δίκτυο με 180 κόμβους

Περνώντας από το απλό δίκτυο στο πιο σύνθετο, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως πλέον υπάρχουν 180 κόμβοι που συνοδεύονται από 1 πύλη στο πρώτο παράδειγμα, και 3 πύλες στο δεύτερο. Η σωστή τοποθέτηση των πυλών αλλά και η χρήση κατάλληλου αριθμού πυλών, οδηγεί στην καλύτερη και πιο αξιόπιστη απόδοση του δικτύου, με τα λιγότερα δυνατά σφάλματα και απώλειες.

Τρέχοντας το πρόγραμμα `complete-network-example` χωρίς αλλαγές στις παραμέτρους, παρατηρούμε πως με ακτίνα 6400m και χρήση μίας πύλης, γίνεται χρήση όλων των διαθέσιμων SF. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο των υπολογισμών, τα μικρότερα SF χρησιμοποιούνται για μικρότερες αποστάσεις και γρηγορότερη αποστολή των πακέτων σε σχέση με τα μεγαλύτερα SF. Με χρήση της εντολής `Logcomponentenable("Loraphy", Log_Level_All)`; του προγράμματος παίρνουμε ως αποτέλεσμα το μέγεθος των πακέτων, των SF που χρησιμοποιήθηκαν και τους χρόνους που χρειάστηκαν για την ολοκλήρωση της αποστολής.

```
LoraPhy:GetOnAirTime(0x558a519aabd0, SF: 7, headerDisabled: false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowDataRateOptimizationEnabled: false))
```

Packet of size 34 bytes

Time computation: num = 288, den = 28, payloadSymbNb = 63, tSym = 0.001024

tPreamble = 0.012544

tPayload = 0.064512

Total time = 0.077056

```
LoraPhy:GetOnAirTime(0x558a519a9ed0, SF: 8, headerDisabled: false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowDataRateOptimizationEnabled: false))
```

Packet of size 34 bytes

Time computation: num = 284, den = 32, payloadSymbNb = 53, tSym = 0.002048

tPreamble = 0.025088

tPayload = 0.108544

Total time = 0.133632

```
LoraPhy:GetOnAirTime(0x558a519aa210, SF: 9, headerDisabled: false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowDataRateOptimizationEnabled: false))
```

Packet of size 34 bytes

Time computation: num = 280, den = 36, payloadSymbNb = 48, tSym = 0.004096

tPreamble = 0.050176
tPayload = 0.196608
Total time = 0.246784

LoraPhy:GetOnAirTime(0x558a519ab190, SF: 10, headerDisabled: false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowDataRateOptimizationEnabled: false))

Packet of size 34 bytes

Time computation: num = 276, den = 40, payloadSymbNb = 43, tSym = 0.008192

tPreamble = 0.100352

tPayload = 0.352256

Total time = 0.452608

LoraPhy:GetOnAirTime(0x558a519ac330, SF: 11, headerDisabled: false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowDataRateOptimizationEnabled: true))

Packet of size 34 bytes

Time computation: num = 272, den = 36, payloadSymbNb = 48, tSym = 0.016384

tPreamble = 0.200704

tPayload = 0.786432

Total time = 0.987136

LoraPhy:GetOnAirTime(0x558a519a7d00, SF: 12, headerDisabled: false, codingRate: 1, bandwidthHz: 125000, nPreamble: 8, crcEnabled: true, lowDataRateOptimizationEnabled: true))

Packet of size 34 bytes

Time computation: num = 268, den = 40, payloadSymbNb = 43, tSym = 0.032768

tPreamble = 0.401408

tPayload = 1.40902

Total time = 1.81043

Όπως αναφέραμε νωρίτερα, το MAC Layer είναι υπεύθυνο για πολλές από τις λειτουργίες των τελικών συσκευών, όπως για την διευθυνσιοδότηση και τα Data Rates. Έτσι με την εντολή LogComponentEnable("EndDeviceLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL); είμαστε σε θέση να δούμε ποια πακέτα στέλνει η κάθε συσκευή αλλά και το waiting time μέχρι την επόμενη μετάδοση σε κάθε συχνότητα.

EndDeviceLorawanMac:EndDeviceLorawanMac(0x55ce710cc5f0)

EndDeviceLorawanMac:SetDeviceAddress(0x55ce710cc5f0,
01101110|00000000000000011101001000)

EndDeviceLorawanMac:EndDeviceLorawanMac(0x55ce711ff5e0)

EndDeviceLorawanMac:SetDeviceAddress(0x55ce711ff5e0,
01101110|00000000000000011101001001)

EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce712f4640, 0)
EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce712f5c30, 3)
EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce712f7220, 4)
EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce7130bb30, 3)
EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce7130d120, 5)
EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce7130e710, 1)
EndDeviceLorawanMac:SetDataRate(0x55ce7130fd00, 2)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce710cc5f0)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce711ff5e0)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce71200a80)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce71208e90)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce7120a4c0)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce7120bab0)
EndDeviceLorawanMac:GetDeviceAddress(0x55ce7120d0a0)

EndDeviceLorawanMac:Send(0x55ce712c7250, 0x55ce711fe650)
EndDeviceLorawanMac:GetNextTransmissionDelay()
Waiting time before the next transmission in channel with frequency 868.1 is = 0.
Waiting time before the next transmission in channel with frequency 868.3 is = 0.
Waiting time before the next transmission in channel with frequency 868.5 is = 0.
EndDeviceLorawanMac:GetChannelForTx()
EndDeviceLorawanMac:Shuffle()
Frequency of the current channel: 868.5
Waiting time for current channel = 0

EndDeviceLorawanMac:DoSend(0x55ce712c7250)
Received a new packet from application. Resetting retransmission parameters.
APP packet: 0x55ce711fe650.
EndDeviceLorawanMac:ApplyNecessaryOptions()
Added frame header of size 8 bytes.
EndDeviceLorawanMac:ApplyNecessaryOptions()
EndDeviceLorawanMac:GetChannelForTx()
EndDeviceLorawanMac:Shuffle()
Frequency of the current channel: 868.1
Waiting time for current channel = 0

Όμως, με χρήση πολλών κόμβων με μικρό αριθμό πυλών, έχουμε πολλές παρεμβολές ακόμα και στα χαμηλότερα SF. Οι παρεμβολές μπορούν να οδηγήσουν σε αλλοίωση των δεδομένων ή και σε packet loss. Στα παρακάτω αποτελέσματα για το ίδιο δίκτυο

βλέπουμε αναλυτικά την ισχύ την μετάδοσης αλλά και των παρεμβολών ενδεικτικά για SF 7-9.

Cumulative Interference Energy: 0

Signal power in W: 2.83823e-15

Signal energy: 2.18703e-16

The needed isolation to survive is -20 dB

The current SNIR is inf dB

Packet survived interference with SF

Packet survived all interference

Found an interferer: sf = 7, power = -103.649, start time = +3.69622e+11ns, end time = +3.69699e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

Interferer power in W: 4.31603e-14

Interference energy: 0

Interferer on same channel

Found an interferer: sf = 8, power = -124.678, start time = +3.74071e+11ns, end time = +3.74205e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

Interferer power in W: 3.4054e-16

Interference energy: 0

Different channel or same event

Interferer on same channel

Found an interferer: sf = 8, power = -124.441, start time = +3.83487e+11ns, end time = +3.83621e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

Interferer power in W: 3.59665e-16

Interference energy: 0

Interferer on same channel

Found an interferer: sf = 7, power = -120.867, start time = +3.85661e+11ns, end time = +3.85738e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

Interferer power in W: 8.19004e-16

Interference energy: 0
Interferer on same channel

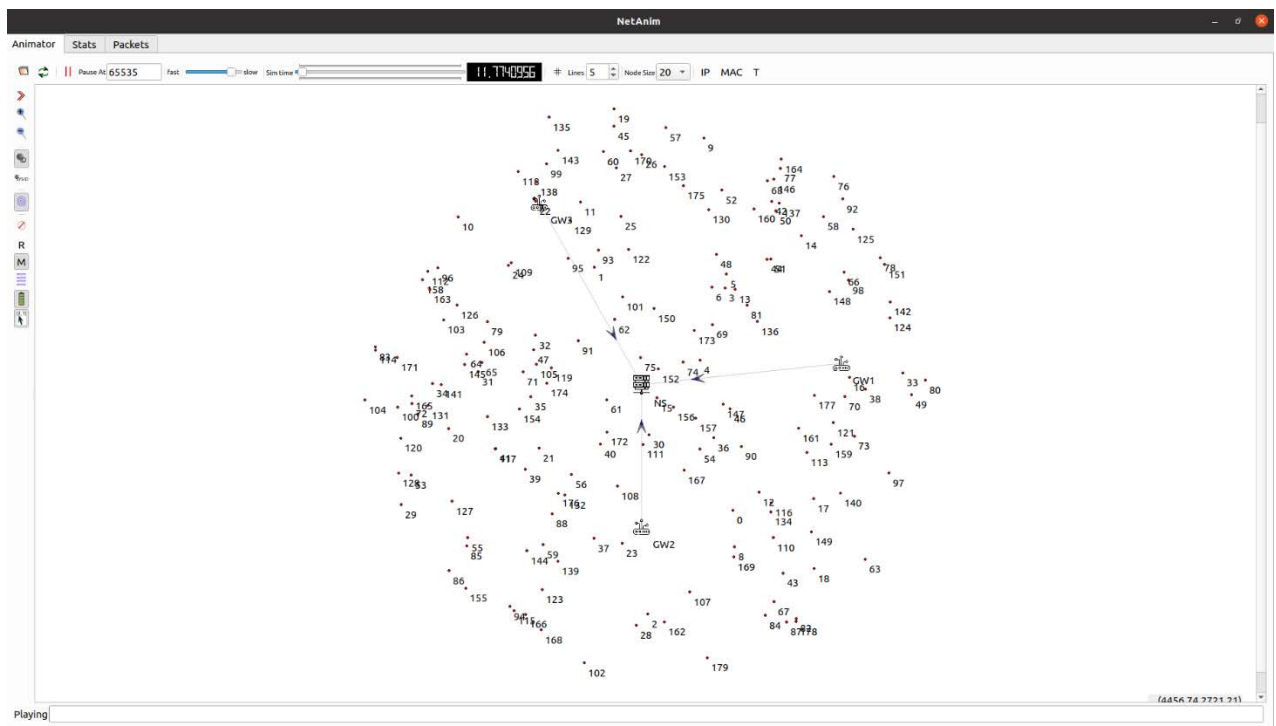
Found an interferer: sf = 9, power = -127.562, start time = +3.85952e+11ns, end time = +3.86198e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

Interferer power in W: 1.75315e-16

Τροποποιώντας τον κώδικα ώστε να έχουμε 3 πύλες σε διαφορετικές συντεταγμένες και με μικρότερη ακτίνα των 2000m βλέπουμε αρκετές αλλαγές στα αποτελέσματα όσον αφορά τις παρεμβολές, τα SF και την ισχύ των σημάτων. Εφόσον η ακτίνα που έχουμε μειώθηκε, ο αριθμός των κόμβων παρέμεινε ο ίδιος και οι πύλες αυξήθηκαν, βλέπουμε πως οι κόμβοι χρησιμοποιούν μόνο SF7, καθώς όπως υπολογίσαμε και στο 4^ο κεφάλαιο, με SF7 έχουμε την δυνατότητα να καλύψουμε σχεδόν 1,4km.



Εικόνα 11: Σύνθετο δίκτυο με 180 κόμβους και 3 πύλες

Found an interferer: sf = 7, power = -122.706, start time = +3.58609e+11ns, end time = +3.58686e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

Interferer power in W: 5.3628e-16

Interference energy: 0

Interferer on same channel

Found an interferer: sf = 7, power = -107.617, start time = +3.65422e+11ns, end time = +3.65499e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

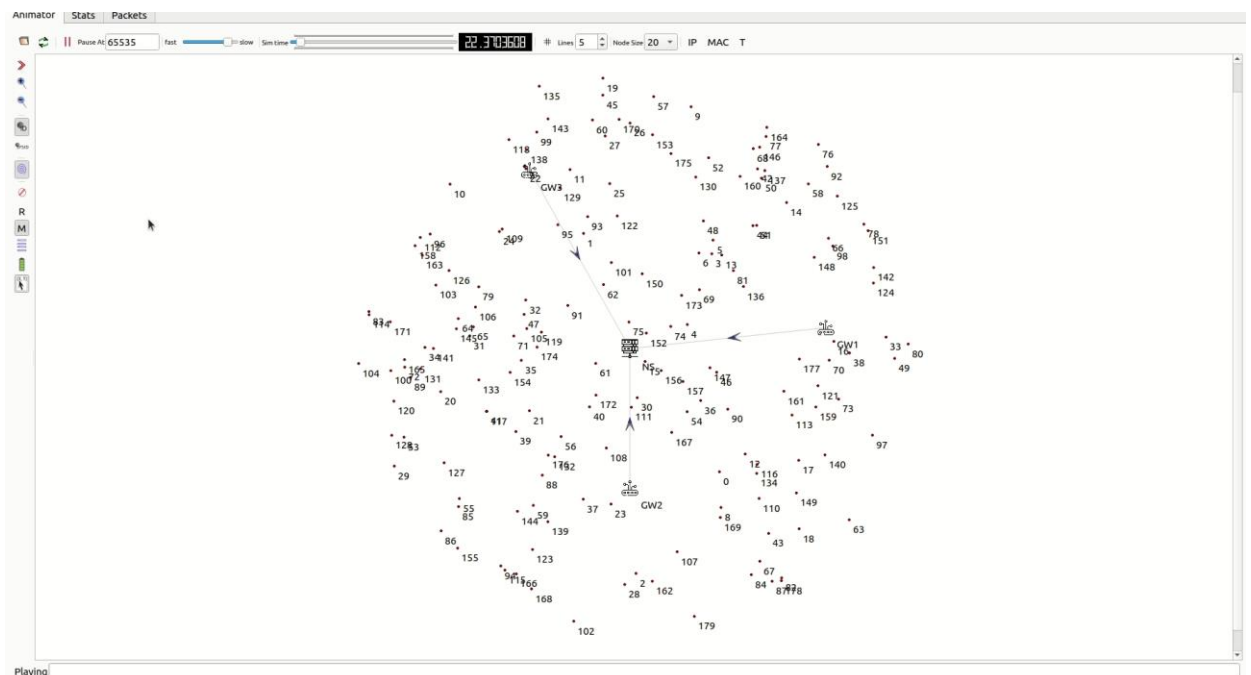
Interferer power in W: 1.73121e-14

Interference energy: 0

Different channel or same event

Interferer on same channel

Τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν την αρχική υπόθεση πως ο αριθμός των πυλών αλλά και η ακτίνα που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον αριθμό των κόμβων και την σωστή τοποθέτηση των κόμβων έχουν μεγάλο αντίκτυπο στον σχεδιασμό και την απόδοση του δικτύου.



Εικόνα 12: Πορεία πακέτων σε δίκτυο 180 κόμβων με 3 πύλες

FromId	To Id	Tx(sec)
182	183	7.87878
181	183	7.87878
180	183	7.87879
181	183	11.7726
182	183	11.7726
180	183	11.7726
181	183	12.5467
180	183	12.5467
181	183	13.9017
182	183	13.9017
180	183	13.9017
182	183	14.5146
181	183	14.5146
180	183	14.5146
182	183	20.7059
181	183	20.7059
180	183	20.7059
181	183	21.092
180	183	21.092
182	183	21.092
181	183	22.3694
182	183	22.3694
180	183	22.3694
181	183	23.8982
182	183	23.8982
180	183	23.8982
181	183	33.4284

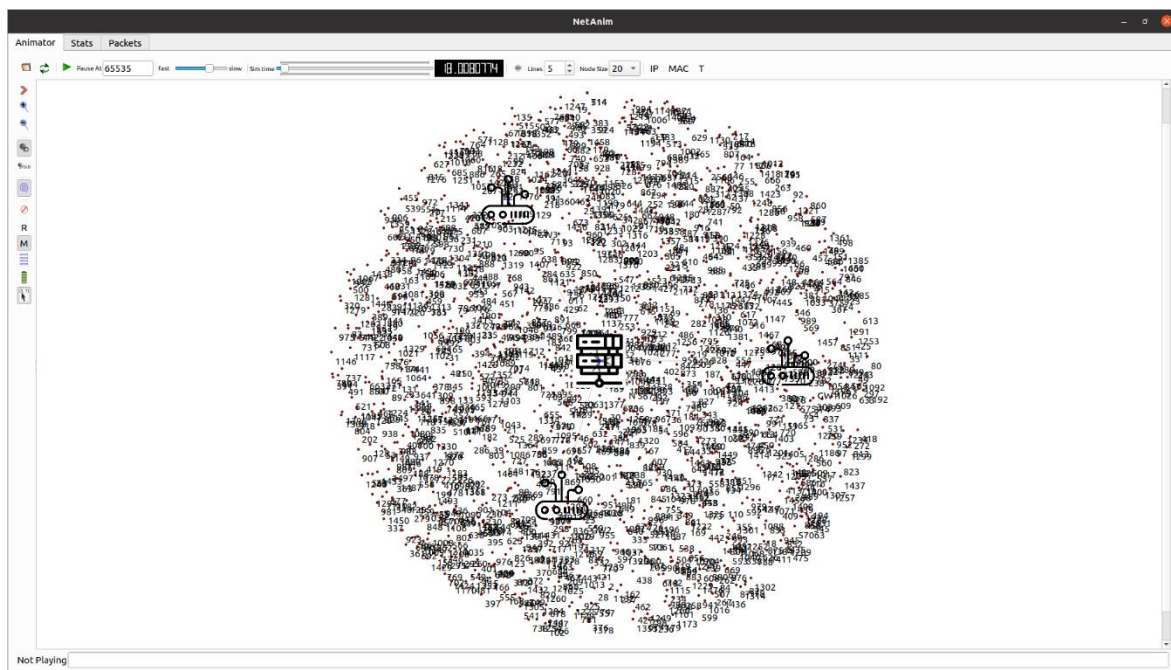
182	183	33.4285
180	183	33.4285
180	183	35.7524
182	183	35.7524
181	183	35.7524
180	183	40.3234
182	183	40.3234
181	183	40.3234
182	183	46.4401
180	183	46.4401
181	183	46.4401
180	183	50.8104
181	183	50.8104
182	183	50.8104
181	183	53.5966
180	183	53.5966
182	183	53.5966
182	183	54.238
180	183	54.238
181	183	54.238
180	183	59.9774
182	183	59.9774
181	183	59.9774

Πίνακας 12: Χρονικές στιγμές μετάδοσης για σύνθετο δίκτυο

Ο παραπάνω πίνακας απεικονίζει τις χρονικές στιγμές από 0.00sec – 60.00sec που οι 3 πύλες 180-182, μεταδίδουν πακέτα προς τον Network Server 183.

5.3 Ολοκληρωμένο δίκτυο με 1500 κόμβους

Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, έτσι κι εδώ αλλάζουμε τις παραμέτρους που αφορούν τον αριθμό των κόμβων και της ακτίνας, αυξάνοντας και τα δύο στα 1500 και 2500m αντίστοιχα. Κρατάμε όμως σταθερό τον αριθμό των πυλών και τις συντεταγμένες τους. Οι κόμβοι και πάλι βρίσκονται αρκετά «κοντά» σε κάποια πύλη, με αποτέλεσμα και πάλι να χρησιμοποιείται SF7 για την μετάδοση των πακέτων από τις τελικές συσκευές στις πύλες. Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε πως τόσο οι πύλες, όσο και ο Network Server πρέπει να βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο ύψος προκειμένου να πραγματοποιηθεί βέλτιστη λήψη των δεδομένων με τις λιγότερες δυνατές απώλειες, στον μικρότερο δυνατό χρόνο.



Εικόνα 13: Ολοκληρωμένο δίκτυο με 1500 κόμβους και 3 πύλες

Current number of events in LoraInterferenceHelper: 11

Found an interferer: sf = 7, power = -122.949, start time = +5.93744e+11ns, end time = +5.93821e+11ns

LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()

The two events overlap for 0 s.

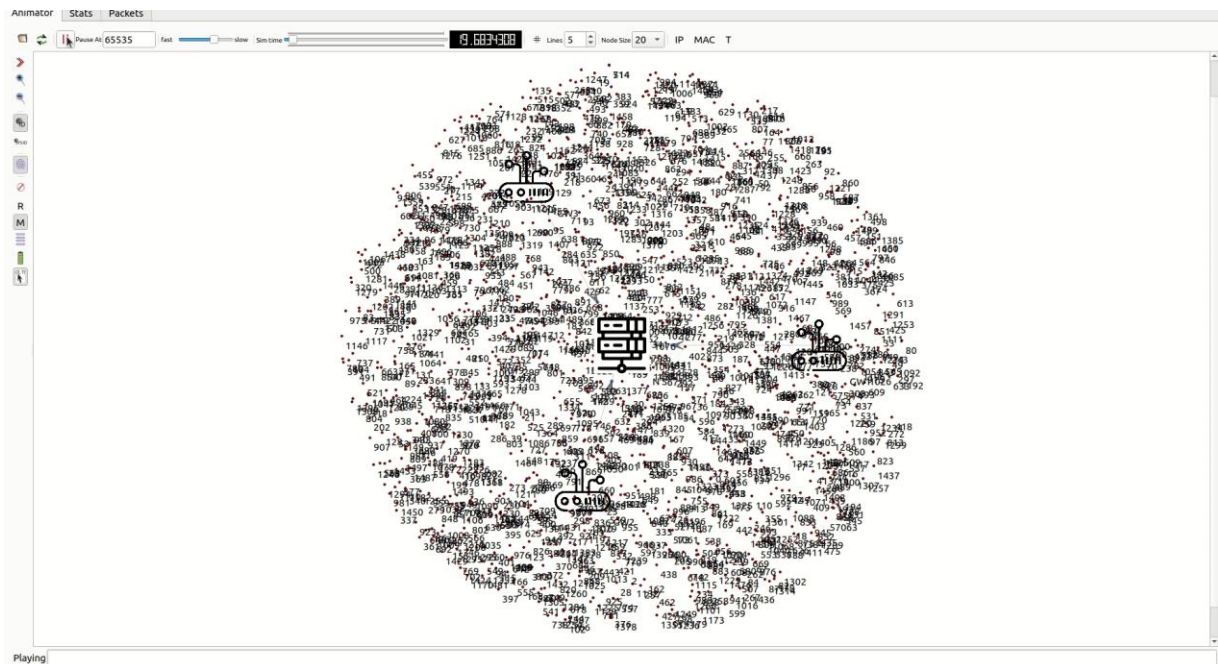
Interferer power in W: 1.27812e-15

Interference energy: 0

Different channel or same event
Interferer on same channel
Found an interferer: sf = 7, power = -115.069, start time = +5.9517e+11ns, end time = +5.95247e+11ns
LoraInterferenceHelper:GetOverlapTime()
The two events overlap for 0 s.
Interferer power in W: 3.11278e-15
Interference energy: 0
Different channel or same event
Different channel or same event
Cumulative Interference Energy: 0
Signal power in W: 1.75243e-14
Signal energy: 1.35036e-15
The needed isolation to survive is 6 dB
The current SNIR is inf dB
Packet survived interference with SF
Cumulative Interference Energy: 0
Signal power in W: 1.75243e-14
Signal energy: 1.35036e-15
The needed isolation to survive is -16 dB
The current SNIR is inf dB
Packet survived interference with SF
Cumulative Interference Energy: 0
Signal power in W: 1.75243e-14
Signal energy: 1.35036e-15

Packet survived all interference

Από τα παραπάνω αποτελέσματα βλέπουμε ότι η ισχύς του σήματος είναι αυξημένη σε σχέση με το προηγούμενο δίκτυο, ενώ οι παρεμβολές κινούνται στα ίδια επίπεδα.



Εικόνα 14: Πορεία πακέτων σε δίκτυο 1500 κόμβων με 3 πύλες

From Id	To Id	Tx(sec)
1501	1503	0.110476
1502	1503	0.110478
1501	1503	0.203025
1502	1503	0.20303
1500	1503	0.203033
1502	1503	0.756714
1501	1503	0.756716
1500	1503	0.756721
1500	1503	1.10484
1501	1503	1.10485
1502	1503	1.10485
1500	1503	1.41599
1501	1503	1.416

1502	1503	1.416
1500	1503	1.5655
1501	1503	1.5655
1502	1503	1.56551
1501	1503	2.07549
1500	1503	2.07549
1502	1503	2.0755
1500	1503	2.23808
1501	1503	2.23808
1502	1503	2.23809
1502	1503	2.50819
1501	1503	2.50819
1500	1503	2.5082
1502	1503	2.76888
1501	1503	2.76889
1500	1503	2.76889
1500	1503	3.75424
1502	1503	3.75425
1501	1503	3.75425
1500	1503	4.46128
1502	1503	4.46128
1501	1503	4.46128
1502	1503	4.70954
1501	1503	4.70955
1500	1503	4.70955
1500	1503	4.74867
1501	1503	4.74868
1502	1503	4.74868

1500	1503	4.86349
1502	1503	4.86349
1501	1503	4.8635
1500	1503	4.95947
1502	1503	4.95947
1501	1503	4.95948
1500	1503	5.34391
1501	1503	5.34391
1502	1503	5.34391
1501	1503	5.3518
1502	1503	5.35181
1500	1503	5.35181
1501	1503	6.81716
1500	1503	6.81717
1502	1503	6.81717
1500	1503	7.03292
1501	1503	7.03293
1502	1503	7.03293

Πίνακας 13: Χρονικές στιγμές μετάδοσης για ολοκληρωμένο δίκτυο

Ο παραπάνω πίνακας απεικονίζει ενδεικτικά τις χρονικές στιγμές από 0.00sec – 7.04sec που οι 3 πύλες 1500-1502, μεταδίδουν πακέτα προς τον Network Server 1503. Συγκρίνοντάς τον με τον πίνακα του σύνθετου δικτύου των 180 πυλών, συμπεραίνουμε πως λόγω του μεγάλου αριθμού κόμβων και δεδομένων, οι πύλες λαμβάνουν και μεταδίδουν συχνότερα πακέτα, ξεκινώντας και πιο γρήγορα τα transmissions προς τον Network Server.

Σημαντική είναι η επίσης η αναφορά των κτιρίων που εμπλέκονται στο δίκτυο, καθώς τα συγκεκριμένα παραδείγματα των σύνθετων δικτύων, μας δίνουν την δυνατότητα να τα ενσωματώσουμε στους υπολογισμούς μας. Συνεπώς, τα παραπάνω αποτελέσματα

για τις παρεμβολές, προκύπτουν και από την παρουσία κτιρίων όπως στον πραγματικό κόσμο.

5.4 Σχεδιασμός βέλτιστης κάλυψης

Ένα ασφαλές συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε από την ανάλυση των LoRaWAN δικτύων είναι η διαφορετικότητα και μοναδικότητα των δικτύων με βάση την περιοχή που θέλουμε να τα αναπτύξουμε, αλλά και την φύση των δεδομένων που θέλουμε να συλλέξουμε. Αυτό οδηγεί σε διαφορετικές συμπεριφορές του δικτύου, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τον σχεδιασμό του.

Αρχικά, αφού μελετήσουμε το περιβάλλον και το hardware(κόμβους, πύλες) που έχουμε στη διάθεσή μας, μπορούμε να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα ως προς την τοποθέτησή τους. Συγκεντρώνουμε παραμέτρους και μετρήσεις που ίσως προκαλέσουν ή προκαλούν παρεμβολές και λάθη στο δίκτυο μας και τις μελετάμε ενδελεχώς.

Όπως έχουμε δει, τον πιο σημαντικό ρόλο στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου μας έχει η σωστή τοποθέτηση των πυλών. Για την τοποθέτησή τους εκτός από τους γενικούς περιορισμούς της κάλυψης, λαμβάνουμε υπόψιν τα επίπεδα των συγκρούσεων και τις πιθανές τοποθεσίες τοποθέτησης των πυλών. Η βιβλιογραφία μας αποδεικνύει ότι ένας καλός αρχικός σχεδιασμός είναι προτιμότερος από τον συνεχή ανασχεδιασμό και ανατοποθέτηση πυλών σε διαφορετικές θέσεις.[38]

Για την τοποθέτηση των πυλών σε εξωτερικούς χώρους ενδείκνυται να αναλογιστούμε την σκίαση των κτηρίων, καθώς η τοποθέτησή τους πρέπει να γίνει πάνω σε κάποιο κτήριο προκειμένου να είναι σε ένα συγκεκριμένο ύψος. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο ψηλά βάζουμε την πύλη LoRa, τόσο πιο μεγάλη απόσταση επικοινωνίας καλύπτει. Το ύψος αποτελεί ένα από τα κυριότερα κριτήρια για την εξασφάλιση ποιοτικής επικοινωνίας και αποδοτικότητας του δικτύου. Ωστόσο, το ύψος επιβάλλεται να επιλεγεί σε σχέση με την απόσταση με τις τελικές συσκευές εφόσον την καλύτερη δυνατή σύνδεση την έχουμε όταν η πύλη είναι σε LOS με τις τελικές συσκευές, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν έχουμε εξίσου αποτελεσματική επικοινωνία μέσω διάσπαρτων διαδρομών.

Αφότου ολοκληρωθούν τα παραπάνω και μελετήσουμε τις λειτουργίες των κόμβων, είμαστε σε θέση να ελέγξουμε το δίκτυο μας με σχετικούς προσομοιωτές για να βγά-

λούμε τα πρώτα αποτελέσματα και συμπεράσματα για την λειτουργία του, την κατανάλωση ενέργειας, τις απώλειες και τις παρεμβολές. Έχοντας το δίκτυο σε συνεχή λειτουργία μπορούμε να παρατηρήσουμε την αντίδραση και συμπεριφορά του για παράδειγμα στην προσθήκη νέων συσκευών. Αυτό είναι μία καλή τακτική για να μειώσουμε τον φόρτο των συσκευών, χωρίς να χρειαστεί να προσθέσουμε περισσότερες πύλες, το οποίο οδηγεί αυτόματα σε αύξηση του κόστους και στην υπερτροφοδότηση.[39]

Με βάση τα αποτελέσματα και τις μετρήσεις που συλλέγουμε από τον προσομοιωτή του δικτύου μας μπορούμε να επανατοποθετήσουμε τις πύλες, με αυτό βέβαια να μην αποτελεί καλή τακτική, καθώς είναι αρκετά δαπανηρό αφοτό το δίκτυο έχει ήδη αναπτυχθεί. Είναι σημαντικό κατά την σχεδίαση του δικτύου να δίνουμε την δυνατότητα επεκτασιμότητας χωρίς την περαιτέρω αύξηση του αριθμού των πυλών. Ένα καλά σχεδιασμένο και επεκτάσιμο δίκτυο λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά με πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων και αύξηση των πυλών. [39]

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, τα αποτελέσματα στα παραπάνω κεφάλαια μας επιβεβαιώνουν πως μεγαλύτερη απόσταση και χρήση μεγαλύτερου SF οδηγούν αυτόματα στην μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Γι' αυτό προτείνεται από την βιβλιογραφία ο σχεδιασμός ενός δικτύου που χρησιμοποιεί SF7-9, με χρήση όμως περισσότερων πυλών.

6 Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσίασε μία ολοκληρωτική επισκόπηση για τα δίκτυα χαμηλής ισχύος LoRa, εστιάζοντας στις λειτουργίες και τις παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τον σχεδιασμό του δικτύου, με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα και η αποδοτικότητα του δικτύου. Διερευνήθηκαν επίσης, τα πλεονεκτήματα και τα χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων, καθώς και οι δυνατότητές τους.

Από τα ευρήματα αυτής της έρευνας, συμπεραίνουμε πως τα δίκτυα LoRa μπορούν να αποτελέσουν μια ικανοποιητική και αποδοτική λύση όταν χρειαζόμαστε επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, όσον αφορά μικρά πακέτα δεδομένων. Σημαντικό ρόλο στο στήσιμο ενός τέτοιου δικτύου είχαν οι τοποθεσίες και τα ύψη που τοποθετήσαμε τους κόμβους, τις πύλες και τον Server, καθώς αυτοί οι παράμετροι επηρέασαν άμεσα την κατανάλωση ενέργειας, τις παρεμβολές και άλλες παραμέτρους.

Συμπεραίνουμε επίσης, πως το κάθε δίκτυο πρέπει να είναι «personalized» με βάση την τοποθεσία που βρίσκεται, την χρήση που θέλουμε να κάνουμε, τα δεδομένα που θέλουμε να συλλέξουμε, καθώς και το μέγεθος των δεδομένων αυτών.

Βασίζόμενοι στην ανάλυση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων της παραπάνω πτυχιακής, φαίνεται ότι η βελτιστοποίηση της κάλυψης είναι εφικτή με την κατάλληλη χρήση και σύγκριση των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Η έρευνα αυτή αναδεικνύει την σημασία της προσεκτικής προεπισκόπησης των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος του δικτύου που θέλουμε να αναπτύξουμε, καθώς και τις απαιτήσεις που έχουμε από αυτό. Η προσαρμογή των παραμέτρων του δικτύου σύμφωνα με το περιβάλλον και τις ανάγκες, με την χρήση των κατάλληλων λογισμικών και εργαλείων για την ανάλυση και τον υπολογισμό των παρεμβολών και των χρόνων που χρειάζονται, κατέστησαν δυνατή την βελτιστοποίηση και την καλύτερη απόδοση του δικτύου.

Συνεπώς, από τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορούμε να εξάγουμε ασφαλώς τα εξής συμπεράσματα: Η κατανόηση της τεχνολογίας που μελετάμε, η ορθή και ενδεδειγμένη μελέτη του σχεδιασμού και η αντίληψη των αναγκών του δικτύου σε συνδυασμό με την καλή χρήση των λογισμικών, είναι το κλειδί για την βελτιστοποίηση οποιοδήποτε δι-

κτύου μελετάμε. Η συγκεκριμένη πτυχιακή, τονίζει την σημασία της καλής σχεδίασης στην εγκατάσταση δικτύων LoRa για την επίτευξη βέλτιστης κάλυψης και απόδοσης.

Συλλέγοντας όλες αυτές τις πληροφορίες και υπό το φως της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας και των δικτύων IoT, γίνεται σαφές πως αυτές οι τεχνολογίες αποτελούν το μέλλον. Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει την βάση για βαθύτερη μελέτη των δικτύων LoRa σε συνδυασμό με AI και ML για πιθανή εξέλιξη των αλγορίθμων δρομολόγησης και αυτοματοποίηση των παραμέτρων ανάλογα με την τοποθεσία και τους τοπικούς περιορισμούς που θα πρέπει να υπάγεται το εκάστοτε δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Devalal and A. Karthikeyan, "LoRa Technology - An Overview," 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 2018, pp. 284-290, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474715.
- [2] Augustin, Aloÿs, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Mark Townsley. 2016. "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things" *Sensors* 16, no. 9: 1466. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- [3] A. Zourmand, A. L. Kun Hing, C. Wai Hung and M. AbdulRehman, "Internet of Things (IoT) using LoRa technology," 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Selangor, Malaysia, 2019, pp. 324-330, doi: 10.1109/I2CACIS.2019.8825008.
- [4] K. Mikhaylov, -. Juha Petaejaejaervi and T. Hanine, "Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology," European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference, Oulu, Finland, 2016, pp. 1-6.
- [5] "LoRa Alliance," <https://lora-alliance.org/>.
- [6] A. Pötsch and F. Haslhofer, "Practical limitations for deployment of LoRa gateways," 2017 IEEE International Workshop on Measurement and Networking (M&N), Naples, Italy, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWMN.2017.8078360.
- [7] "Semtech LoRa Technology Overview | Semtech." 10 Νοεμ. 2023, <https://www.semtech.com/lora/>.
- [8] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT" *ICT Express*, Volume 3, Issue 1, 2017
- [9] Bouguera, Taoufik, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Randa Jaouadi, and Guillaume Andrieux. 2018. "Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN" *Sensors* 18, no. 7: 2104. <https://doi.org/10.3390/s18072104>
- [10] P. S. Cheong, J. Bergs, C. Hawinkel and J. Famaey, "Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption," 2017 IEEE Symposium on Communica-

- tions and Vehicular Technology (SCVT), Leuven, Belgium, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCVT.2017.8240313.
- [11] Ertürk, Mehmet Ali, Muhammed Ali Aydın, Muhammet Talha Büyükakkaşlar, and Hayrettin Evirgen. 2019. "A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies" *Future Internet* 11, no. 10: 216. <https://doi.org/10.3390/fi11100216>
 - [12] "LoRaWAN Security- Full end-to-end Encryption for IoT Application Providers", LoRa Alliance
 - [13] "Security FAQ on the LoRaWAN L2 1.0.4 specification", LoRa Alliance
 - [14] A. Lavric and V. Popa, "LoRa™ wide-area networks from an Internet of Things perspective," 2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Targovishte, Romania, 2017, pp. 1-4, Doi: 10.1109/ECAI.2017.8166397.
 - [15] Martin C. Bor, Utz Roedig, Thimo Voigt, and Juan M. Alonso. 2016. "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?" In Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 59–67. <https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>
 - [16] D. Zorbas, G. Z. Papadopoulos, P. Maille, N. Montavont and C. Douligeris, "Improving LoRa Network Capacity Using Multiple Spreading Factor Configurations," 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT), Saint-Malo, France, 2018, pp. 516-520, doi: 10.1109/ICT.2018.8464901.
 - [17] M. Bor and U. Roedig, "LoRa Transmission Parameter Selection," 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Ottawa, ON, Canada, 2017, pp. 27-34, doi: 10.1109/DCOSS.2017.10.
 - [18] LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL. (n.d.). <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
 - [19] LoRa best practices selecting a battery, key battery parameters | DEVELOPER PORTAL. (n.d.). <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/the-book/key-battery-parameters>
 - [20] A. M. Yousuf, E. M. Rochester, B. Ousat and M. Ghaderi, "Throughput, Coverage and Scalability of LoRa LPWAN for Internet of Things," 2018 IEEE/ACM 26th

- International Symposium on Quality of Service (IWQoS), Banff, AB, Canada, 2018, pp. 1-10, doi: 10.1109/IWQoS.2018.8624157.
- [21] A. M. D. Rocha, M. A. D. Oliveira, P. José F. M. and G. G. H. Cavaleiro, "ABP vs. OTAA activation of LoRa devices: an Experimental Study in a Rural Context," 2023 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Honolulu, HI, USA, 2023, pp. 630-634, doi: 10.1109/ICNC57223.2023.10074553.
 - [22] "The Things Industries",
<https://www.thethingsindustries.com/news/whatlorawan-network-server/>
 - [23] LoRaWAN Architecture. (n.d.). The Things Network.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>
 - [24] LORA / LORAWAN End Node. (n.d.).
<https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-end-node.html>
 - [25] LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup. (2021). RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters. In LoRa Alliance. LoRa Alliance.
 - [26] LORA / LORAWAN Gateway. (n.d.).
<https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway.html>
 - [27] EU863-870 MHz Band. (n.d.). The Things Network.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/eu868/>
 - [28] Modulation & Data Rate. (n.d.). The Things Network.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/modulation-data-rate/>
 - [29] EIRP and ERP. (n.d.). The Things Network.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/eirp-and-erp/>
 - [30] RSSI and SNR. (n.d.). The Things Network.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>
 - [31] LoRa Physical Layer Packet Format. (n.d.). The Things Network.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/lora-phy-format/>
 - [32] Fehri, C. el, Kassab, M., Abdellatif, S., Berthou, P., & Belghith, A. (2018). LoRa technology MAC layer operations and Research issues. *Procedia Computer Science*, 130, 1096–1101.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.162>

- [33] LORAWAN Physical Layer | LORA Physical Layer. (n.d.).
<https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LoRaWAN-Physical-Layer.html>
- [34] Oliveira, L., Rodrigues, J. J. P. C., Kozlov, S. A., Rabêlo, R. A. L., & de Albuquerque, V. H. C. (2019). MAC layer protocols for internet of things: A survey. In *Future Internet* (Vol. 11, Issue 1). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/fi11010016>
- [35] Haidarzhy, V. (2023, November 21). *LoRAWAN MAC Layer: Definition, architecture, classes, and more* | Sirin Software. Sirin Software.
<https://sirinsoftware.com/blog/lorawan-mac-layer-definition-architecture-classes-and-more>
- [36] MAC Commands | DEVELOPER PORTAL. (n.d.).
<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lorawan-mac-commands/mac-commands/>
- [37] Signetlabdei. (n.d.). *GitHub - signetlabdei/lorawan: An ns-3 module for simulation of LoRaWAN networks*. GitHub.
<https://github.com/signetlabdei/lorawan>
- [38] F. Loh, D. Bau, J. Zink, A. Wolff, and T. Hoßfeld, “Robust gateway placement for scalable lorawan,” in 2021 13th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC). IEEE, 2021, pp. 71–78.
- [39] Loh, F., Geißler, S., & Hoßfeld, T. (2022). LoRaWAN Network Planning in Smart Environments: Towards Reliability, Scalability, and Cost Reduction. In *Würzburg Workshop on Next-Generation Communication Networks (WueWoWas '22)* (p. 4). <https://doi.org/10.25972/OPUS-28082>

Κώδικας σε C++

Κώδικας σε C++ που τροποποιήθηκε για την απεικόνιση του complete-network-example:

```
// Network settings
int nDevices = 1500;    //!< Number of end device nodes to create
//*****MODIFICATION*****//
int nGateways = 3;      //!< Number of gateway nodes to create
//*****MODIFICATION*****//
double radiusMeters = 2500;    //!< Radius (m) of the deployment
//*****MODIFICATION*****//
double simulationTimeSeconds = 600;    //!< Scenario duration (s) in simulated time

// Make it so that nodes are at a certain height > 0 //standard position for the GWs
allocator->Add(Vector(1758.0, -188.0, 15.0)); //GW1 coordinates MODIFIED
allocator->Add(Vector(-350.0, 1250.0, 15.0)); //GW2 coordinates MODIFIED
allocator->Add(Vector(-850.0, -1500.0, 15.0)); //GW3 coordinates MODIFIED
mobility.SetPositionAllocator(allocator);
mobility.SetPositionAllocator(allocator); //*****MODIFICATION*****//
mobility.SetPositionAllocator(allocator); //*****MODIFICATION*****//
mobility.Install(gateways);

//*****MODIFICATION setting a standard position for the NS*****//
Ptr<ListPositionAllocator> locat = CreateObject<ListPositionAllocator>();
locat->Add(Vector(0.0, 0.0, 20.0));
mobility.SetPositionAllocator(locat);
mobility.Install(networkServer)
//*****END OF MODIFICATION*****//

/*****MODIFICATION for the animator*****/

AnimationInterface anim ("complete-net.xml"); /*COMPLETE NETWORK
EXAMPLE MODIFIED*/

/*****END OF MODIFICATION*****/
```

Εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για απεικόνιση των αποτελεσμάτων για το σύνθετο και ολοκληρωμένο δίκτυο:

```
Logcomponentenable("Loraphy", Log_Level_All);  
//shows the SFs
```

```
LogComponentEnable("EndDeviceLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);  
//address, data rate, waiting time
```

```
LogComponentEnable("ClassAEndDeviceLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);  
//packets sent, confirmed messages
```

```
LogComponentEnable("GatewayLorawanMac", LOG_LEVEL_ALL);  
//packets received, confirmed messages
```

```
LogComponentEnable("NetworkScheduler", LOG_LEVEL_ALL);  
//open windows and gateway availability
```

```
LogComponentEnable("NetworkServer", LOG_LEVEL_ALL);  
//adds nodes, gateways to the server and sets their addresses
```

```
LogComponentEnable("LoraInterferenceHelper", LOG_LEVEL_ALL);  
//shows the interference
```

Συντομογραφίες

Συντομογραφίες που χρησιμοποιούνται στην πτυχιακή:

IoT = Internet of Things

LoRa = Long Range

SF = Spreading Factor

DR = Data Rate

NS = Network Server

CSS = Chirp Spread Spectrum

M2M = Machine-To-Machine

ADR = Adaptive Data Rate

NwkSKey = Network Session Key

AppKey = Application Session Key

AES = Advanced Encryption Standard

RF = Radio Frequency

BW = Bandwidth

CR = Coding Rate

EIRP = Effective Isotropic Radiated Power

SNR = Signal to Noise Ratio

RSSI = Received Signal Strength Indicator

ToA = Time On Air

CRC = Cyclic Redundancy Check

MAC = Media Access Control

TP = Transmission Power

CF = Carrier Frequency

ABP = Activation by personalization

OTAA = Over The Air Activation

CMAC = Cipher-based Message Authentication Code

LNS = LoRa Network Server

AI = Artificial Intelligence

ML = Machine Learning

LOS = Line Of Sight

Εγκατάσταση NS-3

Πως να χρησιμοποιήσουμε το υλικό από το github σε περιβάλλον Linux από το terminal.

```
sudo apt install g++ python3 cmake ninja-build git ccache
```

```
git clone https://gitlab.com/nsnam/ns-3-dev.git && cd ns-3-dev &&
```

```
git clone https://github.com/signetlabdei/lorawan src/lorawan &&
```

```
tag=$(< src/lorawan/NS3-VERSION) && tag=${tag#release } && git checkout $tag -b $tag
```

```
./ns3 configure --enable-tests --enable-examples &&
```

```
./ns3 build
```

```
./test.py
```

```
./ns3 run simple-network-example
```

Για να έχουμε το animation σε εικόνα, ανοίγουμε το αρχείο complete-network-example σε c++ και αντιγράφουμε τα κομμάτια του κώδικα του παραρτήματος Α και ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία αφού το κάνουμε save(πρέπει να έχουμε κατεβάσει τον φάκελο netanim-3.109 και να τον έχουμε τοποθετήσει στον φάκελο ns-3-dev προκειμένου να μπορέσουμε να απεικονίσουμε τα δίκτυά μας στον animator).

```
cd
```

```
cd ns-3-dev
```

```
./ns3 run complete-network-example
```

```
cd netanim-3.109
```

```
./NetAnim
```

Αφού μας ανοίξει τον animator ανοίγουμε το xml αρχείο που έχει δημιουργηθεί στον φάκελο ns-3-dev.

```
sudo apt install qt4-default qt4-qmake
```

```
qmake NetAnim.pro
```

```
make
```

Οι παραπάνω εντολές χρησιμοποιούνται στο terminal για να κατεβάσουμε ό,τι χρειάζεται για τον animator, αφού βεβαιωθούμε πως βρισκόμαστε στον φάκελο του netanim-3.109.