



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου Υποσταθμού Με Χρήση Δικτύου LoRaWAN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΡΑΠΗ Σ. ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Άρης Ευάγγελος Δημέας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου Υποσταθμού Με Χρήση Δικτύου LoRaWAN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΡΑΠΗ Σ. ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Άρης Ευάγγελος Δημέας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22α Ιουνίου 2025.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γρηγόρης Καραγιώργος
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Γεώργιος Γεωργίου
Επιστ. Συνεργάτης

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Θεόδωρος Αράπης, 2025.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....
Θεόδωρος Αράπης

22 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η ανάγκη για αποδοτική παρακολούθηση και διαχείριση των ενεργειακών εγκαταστάσεων καθιστά επιτακτική την ανάπτυξη έξυπνων και αυτόνομων συστημάτων παρακολούθησης υποσταθμών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης και ελέγχου ενός ηλεκτρικού υποσταθμού, βασισμένο στην τεχνολογία LoRaWAN.

Το σύστημα περιλαμβάνει δύο τριφασικούς μετρητές, ο καθένας από τους οποίους κατασκευάστηκε με τη χρήση της πλακέτας ανάπτυξης The Things Uno και τρεις αισθητήρες PZEM-004T, ένας ανά φάση, για την καταγραφή μονοφασικών ηλεκτρικών μεγεθών. Η συλλογή των δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω ενός LoRaWAN gateway, το οποίο έχει συναρμολογηθεί βασιζόμενο σε ένα Raspberry Pi 4B, μία μονάδα συγκέντρωσης iC880A-SPI και μία κεραία σχετικά χαμηλού κέρδους των 2dBi. Το λογισμικό περιλαμβάνει την εγκατάσταση της στοίβας ανοιχτού κώδικα The Things Stack και του LoRa Basics Station, ενώ τα δεδομένα αποθηκεύονται και προβάλλονται μέσω διαδικτυακής εφαρμογής υλοποιημένης αξιοποιώντας το web framework Spring Boot της JAVA και την βιβλιοθήκη React της JavaScript.

Σκοπός της εργασίας είναι η πρακτική διερεύνηση της αξιοπιστίας, της επεκτασιμότητας και της χρηστικότητας των LoRaWAN-βασισμένων συστημάτων σε κρίσιμες εφαρμογές εποπτείας και αυτοματισμού υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά

LoRaWAN, υποσταθμός, απομακρυσμένη παρακολούθηση, Raspberry Pi, The Things Stack, LoRa Basics Station, end-device, IoT, Spring Boot, React

Abstract

The need for efficient monitoring and management of energy installations necessitates the development of intelligent and autonomous substation monitoring systems. In this diploma thesis, a complete system for the remote monitoring and control of an electrical substation was designed and implemented, based on LoRaWAN technology.

The system includes two three-phase meters, each built using the The Things Uno development board and three PZEM-004T sensors—one per phase—for capturing single-phase electrical measurements. Data collection is achieved through a LoRaWAN gateway based on a Raspberry Pi 4B, an iC880A-SPI concentrator module, and a high-gain antenna. The software stack includes the installation of the open-source The Things Stack and the LoRa Basics Station, while data is stored and visualized via a web application developed using Java Spring Boot and React.

The purpose of this work is to practically evaluate the reliability, scalability, and usability of LoRaWAN-based systems in critical applications related to the supervision and automation of electrical substations.

Keywords

LoRaWAN, substation, remote monitoring, Raspberry Pi, The Things Stack, LoRa Basics Station, end-device, IoT, Spring Boot, React

στοὺς γονεῖς μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Τσανάκα για την εμπιστευτικότητα αυτής της διπλωματικής εργασίας και ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Άρη Δημέα για την επίβλεψη, την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Ιούνιος 2025

Θεόδωρος Αράπης

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	7
1 Εισαγωγή	19
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	20
1.2 Οργάνωση του τόμου	21
I Θεωρητικό Μέρος	23
2 Τεχνολογίες LPWAN και το Πρωτόκολλο LoRaWAN	25
2.1 Εισαγωγή στα LPWAN	25
2.2 Σύγκριση Τεχνολογιών LPWAN	26
2.3 Τεχνολογία LoRa	28
2.3.1 Γενική Επισκόπηση της Τεχνολογίας LoRa	28
2.3.2 Ραδιοφωνική Διάδοση σε αστικό περιβάλλον	29
2.3.3 Chirp Spread Spectrum και η υλοποίησή του στη LoRa	36
2.3.4 Παράγοντας Εξάπλωσης και Ευαισθησία Δέκτη	38
2.3.5 Ρυθμός Συμβόλων, Chips, Bitrate και Εξισώσεις	41
2.3.6 Υπολογισμός Χρόνου Εκπομπής (Time-on-Air) και Παράγοντες που τον Επηρεάζουν	44
2.3.7 Αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση σήματος LoRa	46
2.4 Το Πρωτόκολλο LoRaWAN	47
2.4.1 Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN	48
2.4.2 Κλάσεις συσκευών και χρονισμοί επικοινωνίας	51
2.4.3 Τύποι μηνυμάτων και δομή πλαισίου LoRaWAN	54
2.4.4 Ενεργοποίηση συσκευών και Ασφάλεια (OTAA vs ABP)	58
2.4.5 Ρυθμός μετάδοσης, ADR, χρόνος στον αέρα (ToA) και περιορισμοί εκπομπής	64
3 Περιγραφή θέματος	67
3.1 Σχετικές εργασίες	67

II Πρακτικό Μέρος	69
4 Ανάλυση και σχεδίαση	71
4.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής	71
4.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων	71
4.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων	71
5 Υλοποίηση	73
5.1 Λεπτομέρειες υλοποίησης	73
5.1.1 Αλγόριθμοι	73
5.2 Περιγραφή κλάσεων	73
5.2.1 public class FirstUi	73
6 Έλεγχος	75
6.1 Μεθοδολογία Ελέγχου	75
6.2 Αναλυτική παρουσίαση ελέγχου	75
7 Παράδειγμα Πίνακα	77
7.1 Συμπεράσματα	77
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	77
8 Παράδειγμα Μαθηματικών Σχέσεων – Εκφράσεων και Αλγορίθμων	79
8.1 Συμπεράσματα	79
8.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	80
III Επίλογος	83
9 Επίλογος	85
9.1 Συμπεράσματα	85
9.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	86
Παραρτήματα	87
A' Παράδειγμα Παραρτήματος	89
A'.1 Πρώτη ενότητα	89
A'.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	89
B' Απόδειξη της σχέσης (8.1)	91
B'.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής	91
B'.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων	91
B'.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων	92
Γ' Παραδείγματα Βιβλιογραφικών Αναφορών	93
Δ' Δημιουργία Ευρετηρίου	95

Ε' Εισαγωγή Εικόνων	97
Βιβλιογραφία	102
Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	103
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	105

Κατάλογος Σχημάτων

Β'.1 Προσομοίωση Πύλης NOR 91

Κατάλογος Εικόνων

2.1	Σύγκριση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας (LPWAN) ως προς τον ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια και το κόστος.	26
2.2	Μοντέλο OSI σε αντιστοίχιση με τα LoRa και LoRaWAN επίπεδα.	29
2.3	Zώνη Fresnel με 40% της κάλυψη από εμπόδια.	31
2.4	Σύγκριση ευαισθησίας LoRa και FSK, υπογραμμίζοντας την υπεροχή της τεχνολογίας LoRa σε συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR).	34
2.5	Παράλληλη σύγκριση ενός down-chirp (αριστερά) και ενός up-chirp (δεξιά), που δείχνει τη γραμμική μείωση/αύξηση της στιγμιαίας συχνότητας (πάνω) συνοδευόμενη από το αντίστοιχο σήμα στο πεδίο του χρόνου, όπου η απόσταση των κυμάτων εκτείνεται/συμπλέζεται καθ' όλη τη διάρκεια του συμβόλου.	38
2.6	Φασματογράφημα σήματος LoRa που παρουσιάζει 8 αρχικά up-chirps προ-οιμίου, 2 down-chirps συγχρονισμού, και ακολουθία 5 chirp με κωδικοποιημένα δεδομένα (διαφορετική κυκλική μετατόπιση σε κάθε σύμβολο). Το σήμα σαρώνει πλήρως ένα εύρος ζώνης 125 kHz με γραμμικά αυξανόμενη ή μειούμενη συχνότητα σε κάθε chirp.	38
2.7	Σχηματική απεικόνιση της κυματομορφής Chirp Spread Spectrum στο LoRa για Spreading Factor (4 bits). Το διάγραμμα δείχνει πώς κάθε σύμβολο σαρώνει γραμμικά το εύρος ζώνης από f_{low} σε f_{high} , καθώς και την αντιστοίχιση των chips σε διακριτές τιμές (0-15) μέσα σε ένα σύμβολο.	39
2.8	Απεικόνιση κυματομορφών Chirp Spread Spectrum στο LoRa για Spreading Factor 4, με ένδειξη των διακριτών τιμών (0, 4, 8, 12) στην αντίστοιχη χρονική θέση μέσα στο σύμβολο T_s . Τα μπλε σημάδια δείχνουν το κλάσμα της περιόδου συμβόλου στο οποίο εκπέμπεται κάθε τιμή, ενώ η πράσινη σήμανση αντιστοιχεί στον αριθμό του chip.	42
2.9	Τεχνολογική στοίβα των LoRa και LoRaWAN.	48
2.10	Τυπική αρχιτεκτονική LoRaWAN δικτύου.	48
2.11	Αρχιτεκτονική LoRaWAN Network Server.	50
2.12	Ροή Uplink και Downlink μηνυμάτων στο Πρωτόκολλο LoRaWAN.	51
2.13	Ροή επικοινωνίας κλάσης A.	52
2.14	Ροή επικοινωνίας κλάσης B.	53
2.15	Ροή επικοινωνίας κλάσης C.	54
2.16	Δομή πακέτου LoRaWAN.	55
2.17	Ροή μηνυμάτων για ενεργοποίηση OTAA στο LoRaWAN 1.0.	60
2.18	Ροή μηνυμάτων για ενεργοποίηση OTAA στο LoRaWAN 1.1.	61

2.19	Προ-διαμοιρασμός του DevAddr και των session keys για ενεργοποίηση ABP στο LoRaWAN 1.0.	63
2.20	Προ-διαμοιρασμός του DevAddr και των session keys για ενεργοποίηση ABP στο LoRaWAN 1.1.	63
E.1	Βάτραχος	97

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών NB-IoT, LTE-M και LoRa	27
2.2	Πίνακας παραμέτρων Spreading Factor και αντίστοιχων ορίων SNR.	40
2.3	'Ορια SNR και ευαισθησία δέκτη για διαφορετικά Spreading Factors, με $BW = 125\text{kHz}$ και $NF = 6dB$	41
2.4	Διάρκεια συμβόλου LoRa σε $BW=125\text{ kHz}$ για διάφορα Spreading Factors, με ενεργοποιημένη Low Data Rate Optimization (DE) όπου απαιτείται.	46
2.5	Συνοπτικός πίνακας βασικών MAC εντολών LoRaWAN.	58
2.6	Πεδία Join-Request στο LoRaWAN 1.0.	59
2.7	Πεδία Join-Request στο LoRaWAN 1.1.	59
2.8	Πεδία Join-Accept στο LoRaWAN 1.0.	60
2.9	Πεδία Join-Accept στο LoRaWAN 1.1.	60
7.1	Πίνακας αλήθειας της λογικής συνάρτησης F	78
A'.1	Πίνακας αλήθειας της λογικής συνάρτησης F	90

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε μια εποχή σημαδεμένη από διαρκείς τεχνολογικές εξελίξεις, η ταχύτατη ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων Internet of Things - IoT ήταν αναμενόμενη, γεγονός που έχει φέρει στο προσκήνιο ένα πλήθος από νέες τεχνολογίες επικοινωνίας, ικανές να συνδέουν μία τεράστια ποικιλία απομακρυσμένων αισθητήρων και συσκευών, με μεγάλο εύρος λειτουργίας και χαμηλό ενεργειακό κόστος [1]. Μάλιστα, εκτιμάται ότι μέχρι το 2030 θα υπάρχουν περισσότερες από 30 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο παγκοσμίως [2]. Η εννόια Διαδίκτυο των Πραγμάτων περιγράφει ουσιαστικά το δίκτυο επικοινωνίας ενός πλήθους από συσκευές, εξοπλισμένα με αισθητήρες, οι οποίες μεταδίδουν, διαμοιράζουν και χρησιμοποιούν δεδομένα που λαμβάνουν από το φυσικό περιβάλλον, με σκόπο την παροχή υπηρεσιών.

Μία από τις πλέον πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες στον χώρο των ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (Low Power Wide Area Networks – LPWANs) είναι το LoRaWAN. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη δημιουργία ανθεκτικών και κλιμακούμενων υποδομών επικοινωνίας με ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπου η συνδεσιμότητα και η αυτονομία είναι υψηλή σημασίας.

Στον τομέα της ενέργειας και ειδικότερα στην παρακολούθηση και τον έλεγχο υποσταθμών μέσης και χαμηλής τάσης, η ανάγκη για απομακρυσμένη συλλογή μετρήσεων και δεδομένων, καθώς και του εξ αποσάσεως ελέγχου, είναι πιο επίκαιρη από ποτέ. Οι «έξυπνοι» μετρητές και τα συστήματα τηλεμετρίας επιτρέπουν την πρόβλεψη, την αποδοτικότερη κατανομή και απαραίτητη εποπτεία της κατανάλωσης, τη βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας και την έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων. Συνεπώς, η ενσωμάτωση αυτών των δυνατοτήτων με τεχνολογίες όπως το LoRaWAN αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την υλοποίηση και εφαρμογή των «έξυπνων» δικτύων ενέργειας (smart grids).

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου ηλεκτρικού υποσταθμού, με τη χρήση του LoRaWAN. Το σύστημα που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει:

- δύο τριφασικούς μετρητές, βασισμένους στην πλακέτα ανάπτυξης The Things Uno της The Things Industries και σε τρεις (ανά μετρητή) μονοφασικούς αισθητήρες PZEM-004T για την μέτρηση ακολούθηση ηλεκτρικών μεγεθών,
- έναν LoRaWAN gateway, κατασκευασμένο με ένα Raspberry Pi 4B και μία μονάδα συγκέντρωσης iC880A-SPI, στην οποία συνδέεται μία κεραία χαμηλού σχετικά κέρδους

των 2dBi,

- ανάπτυξη δυναμικής ιστοσελίδας με χρήση Java Spring Boot και React (TypeScript), με σκοπό την παρουσίαση των μετρήσεων που λαμβάνονται από τους μετρητές.

Η υλοποίηση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρητική διερεύνηση του προαναφερόμενου συστήματος, αλλά αποσκοπεί, επιπλέον, στην πρακτική αξιολόγηση της τεχνολογίας LoRaWAN στο πεδίο ενός IoT συστήματος παρακολούθησης υποσταθμού, επιδιώκοντας να αναδείξει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της όταν εφαρμόζεται σε ένα πραγματικό περιβάλλον ενεργειακής υποδομής.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου, χαμηλού κόστους και ενεργειακά αποδοτικού συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης και ελέγχου ενός ηλεκτρικού υποσταθμού, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του πρωτοκόλλου LoRaWAN. Το σύστημα αυτό εντάσσεται στο πλαίσιο των έξυπνων ενεργειακών υποδομών και της τεχνολογίας Internet of Things (IoT) και έχει στόχο τη δημιουργία μιας επεκτάσιμης και παράλληλα αξιόπιστης αρχιτεκτονικής, η οποία να μπορεί να υιοθετηθεί και σε άλλα βιομηχανικά ή ενεργειακά περιβάλλοντα.

Ο στόχος της εργασίας είναι διπτός:

1. **Πρακτική αξιοποίηση του LoRaWAN** ως βασικού μέσου επικοινωνίας για την αποστολή δεδομένων από απομακρυσμένες συσκευές μέτρησης προς ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υποστήριξη για μεγάλο αριθμό συσκευών, καθοτόντας την, επομένως, ιδανική για απαιτητικά περιβάλλοντα όπως οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί.
2. **Ανάπτυξη ολοκληρωμένης πλατφόρμας εποπτείας και διαχείρισης ενεργειακών μετρήσεων**, η οποία επιτρέπει τη οπτικοποίηση και αποθήκευση κρίσιμων ηλεκτρικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, όπως η τάση, το ρεύμα, η ισχύς και η κατανάλωση ενέργειας, ανά φάση. Η πλατφόρμα προσφέρει δυνατότητα επεκτασιμότητας και προσαρμοστικότητας, προκειμένου να μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά σημεία μέτρησης, καθώς και μελλοντική ενσωμάτωση επιπρόσθετων λειτουργιών, όπως ειδοποιήσεις ή αυτοματισμούς.

Η υλοποίηση βασίστηκε σε πλήρως παραμετροποιήσιμα εξαρτήματα ανοιχτού κώδικα και λογισμικού, όπως οι συσκευές The Things Uno, οι αισθητήρες PZEM-004T, ο συγκεντρωτής σήματος iC880A-SPI, το Raspberry Pi 4B, και η πλατφόρμα The Things Stack. Τα δεδομένα διαχειρίζονται και παρουσιάζονται μέσω διαδικτυακής εφαρμογής υλοποιημένης σε εργαλέια ανοιχτού κώδικα, όπως το JAVA Spring Boot framework και η front-end βιβλιοθήκη React της JavaScript.

Τέλος, η εργασία αυτή συμβάλλει στην αξιολόγηση των τεχνικών δυνατοτήτων του LoRaWAN, όταν αυτό χρησιμοποιείται σε κρίσιμες εφαρμογές παρακολούθησης, εντοπισμού

ανωμαλιών και ενεργειακής διαχείρισης, προσφέροντας έτσι ένα αξιόπιστο πρότυπο, το οποίο να μπορεί να αναπαραχθεί ή να εξελιχθεί περαιτέρω σε μεγαλύτερα δίκτυα ή άλλους τύπους βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών LPWAN, LoRa και LoRaWAN, καθώς και πληροφορίες για τα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου υποσταθμών.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η τεχνολογική στοίβα που χρησιμοποιήθηκε, όπως το The Things Stack, το LoRa Basics Station, καθώς και η υποστήριξη από λογισμικά όπως το Docker.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική παρουσίαση του εξοπλισμού: gateway, συσκευές μέτρησης και υπολογιστική υποδομή.
- Στο Κεφάλαιο 5 καταγράφεται η υλοποίηση του συστήματος, η παραμετροποίηση του εξοπλισμού, καθώς και η ανάπτυξη της ιστοσελίδας.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές και αξιολογείται η απόδοση του συστήματος.
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις βελτίωσης και επέκτασης της εργασίας.

Μέρος I

Θεωρητικό Μέρος

Τεχνολογίες LPWAN και το Πρωτόκολλο LoRaWAN

2.1 Εισαγωγή στα LPWAN

Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για απομακρυσμένη και ταυτόχρονα αποδοτική, ως προς την ενέργεια, επικοινωνία μεταξύ έξυπνων συσκευών και αισθητήρων έχει οδηγήσει στην εμφάνιση και εξέλιξη μιας νέας γενιάς ασύρματων τεχνολογιών, γνωστών ως Low Power Wide Area Networks (LPWAN). Οι τεχνολογίες LPWAN επιτρέπουν την αποστολή μικρών σε ποσότητα δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τις ιδιαίτερες για εφαρμογές Internet of Things (IoT), όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η αξιοπιστία είναι κρίσιμοι παράγοντες.

Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες Wi-Fi ή Bluetooth, οι οποίες είναι σχεδιασμένες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε μικρές αποστάσεις, τα LPWAN είναι προσανατολισμένα στην υποστήριξη ενός μεγάλου αριθμού συσκευών, με δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε αποστάσεις που υπερβαίνουν τα 10 χιλιόμετρα, σε ανοικτό πεδίο, και σε συχνότητες που βρίσκονται στο μη αδειοδοτημένο φάσμα (unlicensed spectrum). Το σημαντικότερο, μάλιστα, όφελος έναντι άλλων τεχνολογιών μετάδοσης πληροφορίας μεγάλου έυρους (όπως το φάσμα κινητής τηλεφωνίας 3G, 4G ή 5G), είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδοσία των αντίστοιχων συσκευών [3].

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες LPWAN είναι οι εξής:

- **NB-IoT (Narrowband Internet of Things)** - αποτελεί τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας και χαμηλής ισχύος, βασισμένη στο LTE (Long-Term Evolution), η οποία λειτουργεί στο αδειοδοτημένο φάσμα και προσφέρει αξιόπιστη κάλυψη εντός κτιρίων (deep indoor penetration). Αναπτύχθηκε από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) και υποστηρίζεται από το πρότυπο 3GPP Release 13. Έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές με ανάγκες μαζικής συνδεσιμότητας και μικρού όγκου δεδομένων, όπως μετρητές νερού ή αερίου. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία των συσκευών έχει ως αποτέλεσμα η διάρκεια λειτουργίας τους να φτάνει έως και 10 χρόνια, με την χρήση μίας μόνο μπαταρίας. [4]

- **LTE-M (LTE Cat-M1)** - επίσης βασίζεται στο LTE και προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από το NB-IoT (έως και 1Mbps), διατηρώντας ωστόσο εξίσου

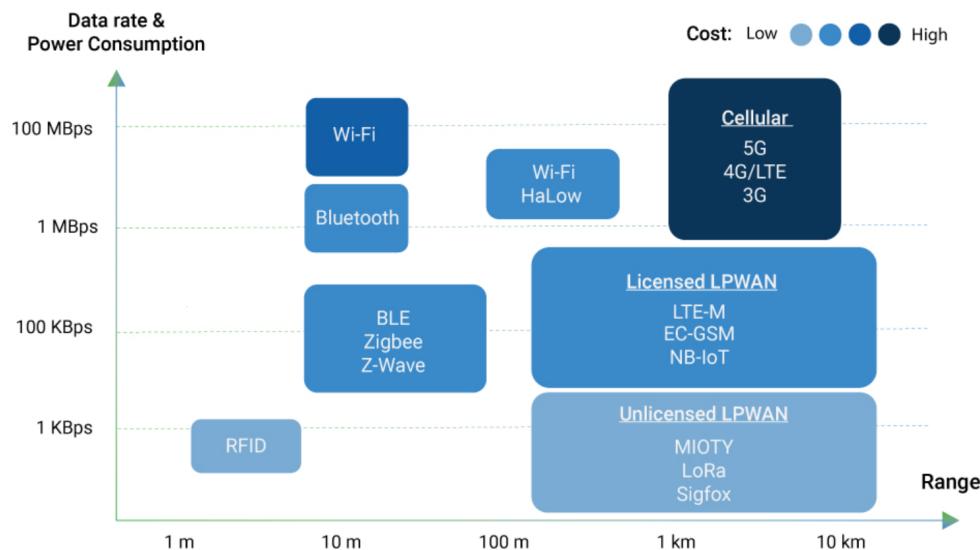
χαμηλή κατανάλωση [5]. Είναι κατάλληλο για φορητές εφαρμογές που απαιτούν αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, όπως η παρακολούθηση οχημάτων, οι φορητές ιατρικές συσκευές και οι φορητοί αισθητήρες. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η υποστήριξη κινητικότητας, επιτρέποντας την απρόσκοπη μετάβαση μεταξύ κυψελών, καθώς και η δυνατότητα φωνητικής επικοινωνίας μέσω VoLTE. [6]

- **LoRa και LoRaWAN** - πρόκειται για το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο σε μη-αδειοδοτημένο φάσμα (π.χ. 868MHz στην Ευρώπη), με κύρια πλεονεκτήματα την ευκολία υλοποίησης, τη μεγάλη αυτονομία (έως και 10 έτη), τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και την υψηλή ευελιξία ανάπτυξης μέσω ιδιωτικών ή δημόσιων δικτύων. Η τεχνολογία LoRa αναπτύχθηκε αρχικά από τη γαλλική Cycleo και κατοχυρώθηκε από τη Semtech, ενώ το LoRaWAN αναπτύσσεται και προτυποποιείται από τη LoRa Alliance. [7]

Τα δίκτυα LPWAN ενσωματώνονται όλο και περισσότερο σε κρίσιμες υποδομές, όπως είναι τα συστήματα παρακολούθησης ενέργειας, γεωργίας ακριβείας, έξυπνων πόλεων και βιομηχανικής αυτοματοποίησης, προσφέροντας λύσεις υψηλής κάλυψης, ανθεκτικότητας και χαμηλού κόστους εγκατάστασης.

2.2 Σύγκριση Τεχνολογιών LPWAN

Παρακάτω γίνεται η σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών LPWAN:



Εικόνα 2.1: Σύγκριση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας (LPWAN) ως προς τον ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια και το κόστος.

[8]

Οι τεχνολογίες LPWAN αποτελούν βασικό πυλώνα για την υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών και μεγάλης εμβέλειας εφαρμογών IoT, με διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς το φάσμα λειτουργίας, την κατανάλωση ισχύος, την κινητικότητα και τη δυνατότητα υποστήρι-

ζης ποικίλων τύπων δεδομένων. Ακολούθως παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά για τις τρεις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες LPWAN:

Παράμετρος	NB-IoT	LTE-M	LoRa
Τυποποίηση	3GPP	3GPP	LoRa Alliance
Διαμόρφωση	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM	CSS (Chirp Spread Spectrum)
Φάσμα Συχνοτήτων	Licensed 3GPP (180 kHz)	Licensed 3GPP (1.4 MHz)	Unlicensed ISM (EU 868 MHz)
Κάλυψη (Link Budget)	151 dB	146 dB	154 dB
Μέγιστο Φορτίο	1600 bytes	1000 bytes	242 bytes
Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας	έως 10 έτη	έως 2 έτη	έως 10 έτη
Ταχύτητα Μετάδοσης	200 kbps	1 Mbps	50 kbps
Αμφίδρομη Επικοινωνία	Ναι	Ναι	Ναι
Ασφάλεια	3GPP (128-256 bit)	3GPP (128-256 bit)	AES (128 bit)
Κινητικότητα	<100 km/h	<300 km/h	Ναι
QoS	Ναι	Ναι	Όχι

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών NB-IoT, LTE-M και LoRa
[3], [9], [5], [7]

Σημείωση για τους αριθμούς. Οι ρυθμοί και οι επιδόσεις είναι ενδεικτικοί: επηρεάζονται από εύρος ζώνης, coding rate, επαναλήψεις, περιβάλλον καναλιού και ρυθμίσεις συστημάτων. Για LoRa (ΕU, $BW = 125\text{kHz}$) το φυσικό bitrate είναι της τάξης $\sim 0.3 - 5.5\text{kbit/s}$ (ανά SF), ενώ με $BW = 500\text{kHz}$ μπορεί να φτάσει $\sim 22\text{kbit/s}$ [10, 11]. Για NB-IoT/LTE-M οι τιμές διαφέρουν ανά release/φορέα/ρύθμιση και δίνονται συνήθως ως εύρος.

Σημείωση για duty-cycle (Ευρώπη). Στο EU863-870 το επιτρεπόμενο duty-cycle δεν είναι παντού «1%»: εξαρτάται από υπο-ζώνη (π.χ. 0.1%, 1% ή 10%). Επομένως, ο επιτρεπότος ρυθμός αποστολών συνδέεται άμεσα με τον χρόνο στον αέρα (ToA) του κάθε πακέτου.

Η ανάλυση των επιμέρους χαρακτηριστικών των τριών τεχνολογιών δείχνει πως κάθε μία εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες, ανάλογα με το σενάριο χρήσης και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Ξεκινώντας από την κινητικότητα, το LTE-M υπερέχει με διαφορά, καθώς υποστηρίζει μετακινήσεις με ταχύτητες έως και 300km/h και δυνατότητα handover μεταξύ κυψελών, κάτι που καθιστά εφικτή την αξιόπιστη σύνδεση σε περιπτώσεις όπως είναι η παρακολούθηση οχημάτων ή drones εν κινήσει. Από την άλλη μεριά, το NB-IoT παρέχει περιορισμένη κινητικότητα και είναι περισσότερο κατάλληλο για στατικές συσκευές, ενώ το LoRa μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κινητές εφαρμογές μόνο αν βρίσκεται εντός εμβέλειας ενός διαθέσιμου gateway, γεγονός που περιορίζει τη χρήση του σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Στο πεδίο της μετάδοσης δεδομένων, το LTE-M προσφέρει τους υψηλότερους ρυθμούς ($1Mbps$), καθώς και υποστήριξη φωνητικής επικοινωνίας μέσω VoLTE, χαρακτηριστικά που απουσιάζουν από τις άλλες δύο τεχνολογίες. Αντίθετα, το LoRa περιορίζεται σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς (δεν υπερβαίνουν τα $50kbps$) και είναι σχεδιασμένο κυρίως για απλές, οποραδικές μεταδόσεις.

Όσον αφορά το φάσμα λειτουργίας, τόσο το NB-IoT όσο και το LTE-M αξιοποιούν το αδειοδοτημένο φάσμα, γεγονός που προσφέρει πιο σταθερή σύνδεση, μικρότερο λανθάνοντα χρόνο και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για εφαρμογές όπως POS terminals, όπου απαιτείται γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση συναλλαγών. Από την άλλη, το LoRa λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, που αν και μειώνει το κόστος, υπόκειται σε περιορισμούς όπως το duty-cycle και το fair access policy, μειώνοντας, έτσι, την αξιοπιστία σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει υψηλή κίνηση δεδομένων.

Σε όρους ενεργειακής απόδοσης, το LoRa και το NB-IoT είναι εμφανώς πιο αποτελεσματικά, υποστηρίζοντας διάρκεια μπαταρίας έως και 10 έτη. Το LTE-M, λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ισχύος, τείνει να έχει μικρότερη διάρκεια ζωής, συνήθως μεταξύ 1-2 ετών, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε εφαρμογές όπου η συντήρηση των κόμβων δεν είναι εύκολη.

Ως προς την εμπορική απήχηση, οι τεχνολογίες του 3GPP (NB-IoT και LTE-M) πρωθυνται κυρίως μέσω παρόχων κινητής τηλεφωνίας και ενσωματώνονται σε λύσεις ευρείας κλίμακας από τη βιομηχανία [12]. Αντίθετα, το LoRaWAN, μέσω της LoRa Alliance, διατίθεται ευρύτερα για αποκεντρωμένες και ιδιωτικές αναπτύξεις, γεγονός που το έχει καταστήσει ιδιαίτερα δημοφιλές σε αγροτικές εφαρμογές, αισθητήρες έξυπνων κτιρίων και περιβαλλοντική παρακολούθηση [13].

Συνοψίζοντας, δεν υπάρχει μία «καλύτερη» τεχνολογία για κάθε περίπτωση. Η επιλογή εξαρτάται από το εκάστοτε έργο και τους στόχους του: αν προέχει η κινητικότητα και η χαμηλή καθυστέρηση, το LTE-M είναι πιο κατάλληλο. Αν ζητούμενο είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος, το LoRa αποτελεί ιδανική επιλογή. Τέλος, το NB-IoT είναι ενδιάμεση λύση για στατικές εφαρμογές με αξιόπιστο σήμα και μεγάλη πυκνότητα κόμβων. Η τελική απόφαση λαμβάνει υπόψη τεχνικούς περιορισμούς, απαιτήσεις απόδοσης και το οικονομικό κόστος υλοποίησης.

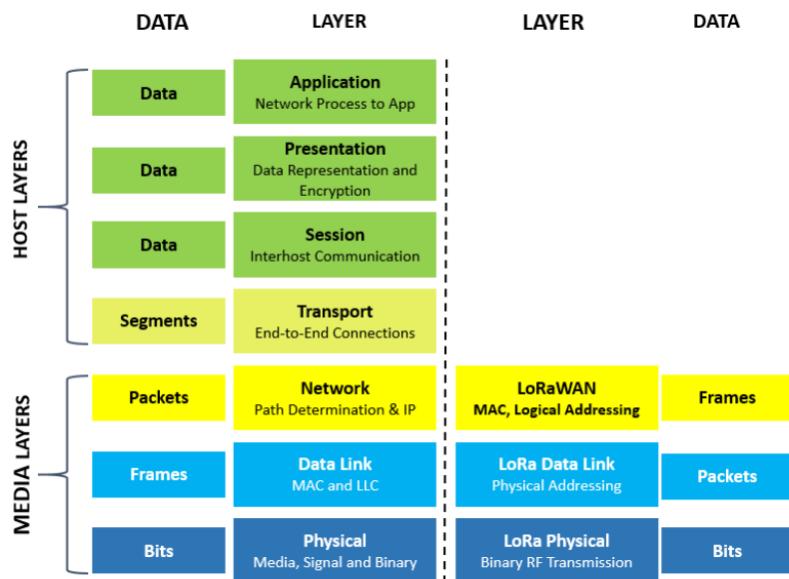
2.3 Τεχνολογία LoRa

2.3.1 Γενική Επισκόπηση της Τεχνολογίας LoRa

Ξεκινώντας με μία μικρή ιστορική αναδρομή, η τεχνολογία LoRa (Long Range) αναπτύχθηκε αρχικά το 2009 από δύο φίλους, τους Nicolas Sornin και Olivier Seller, όπου στην συνέχεια συμμετείχε στην ομάδα και ένας τρίτος συνεργάτης, o François Sforza και όλοι μαζί δημιούργησαν τη γαλλική εταιρεία Cycleo το 2010. Δύο χρόνια μετά (2012), η Cycleo εξαγοράστηκε από την αμερικανική εταιρεία Semtech [14]. Η τεχνολογία αυτή λειτουργεί αποκλειστικά στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer, PHY) του μοντέλου αναφοράς OSI (Open Systems Interconnection model), και βασίζεται στη διαμόρφωση εξάπλωσης

φάσματος τύπου Chirp Spread Spectrum (CSS), που επιτρέπει την αξιόπιστη και χαμηλής κατανάλωσης μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιεί το ελεύθερο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific and Medical), με κύρια μπάντα συχνοτήτων στην Ευρώπη τα $868MHz$ [7].

Η τεχνολογία LoRa παρέχει σημαντική αντοχή σε παρεμβολές, μιας και χρησιμοποιεί προσαρμοστικό ρυθμό μετάδοσης (Adaptive Data Rate - ADR), ενώ παράλληλα παρουσιάζει και υψηλή ευαισθησία δεκτών, γεγονότα που επιτρέπουν την επικοινωνία ακόμα και σε συνθήκες με μεγάλο θόρυβο από το περιβάλλον. Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται (Bandwidth, BW) είναι συνήθως $125kHz$, $250kHz$ ή $500kHz$, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Παράλληλα, η διαμόρφωση χρησιμοποιεί διαφορετικούς παράγοντες εξάπλωσης (Spreading Factors, SF) από 7 έως 12, που επηρεάζουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την εμβέλεια του σήματος [15].



Εικόνα 2.2: Μοντέλο OSI σε αντιστοίχιση με τα LoRa και LoRaWAN επίπεδα.

[7]

2.3.2 Ραδιοφωνική Διάδοση σε αστικό περιβάλλον

Στο αστικό περιβάλλον, η αξιοπιστία μιας ασύρματης ζεύξης LoRa επηρεάζεται καθοριστικά από φαινόμενα ραδιοδιάδοσης όπως η απώλεια διαδρομής (path loss), η ζώνη Fresnel, η πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation) και το φαινόμενο Doppler. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα φαινόμενα με έμφαση στη φυσική τους ερμηνεία και τη σημασία τους για το LoRa, καθώς και ένα αριθμητικό παράδειγμα υπολογισμού του τσοζυγίου ζεύξης (link budget) σε αστικές συνθήκες.

Απώλεια Διαδρομής (Path Loss)

Η απώλεια διαδρομής εκφράζει την εξασθένηση της ισχύος του σήματος καθώς αυτό διαδίδεται μέσω του χώρου. Σε ελεύθερο χώρο (χωρίς εμπόδια), η απώλεια διαδρομής αυξάνεται με την απόσταση και την συχνότητα σύμφωνα με το Θεμελιώδες μοντέλο Friis. Η εξίσωση της

ελεύθερης διαδρομής σε μορφή λογαριθμικής (dB) δίνεται από:

$$L_{FS}(dB) = 32.45 + 20 \log_{10}(d_{km}) + 20 \log_{10}(f_{MHz}) \quad (2.1)$$

όπου d_{km} η απόσταση σε χιλιόμετρα και f_{MHz} η συχνότητα σε MHz . Για παράδειγμα, σε συχνότητα $868MHz$ και απόσταση $2km$ (σενάριο ζεύξης LoRa στην Ευρώπη), η απώλεια ελεύθερου χώρου είναι:

$$L_{FS} = 32.45 + 20 \log_{10}(2) + 20 \log_{10}(868) \approx 97.24dB.$$

Αυτό σημαίνει ότι το σήμα εξασθενεί κατά περίπου $97 dB$ λόγω διάδοσης σε ελεύθερο χώρο. Σε πραγματικές αστικές συνθήκες όμως, η απώλεια διαδρομής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ιδανική περίπτωση ελεύθερου χώρου. Κτίρια, τοίχοι, και γενικά τα εμπόδια σκιάζουν και διαθλούν το σήμα, με αποτέλεσμα πρόσθετες να υπάρχουν απώλειες (shadowing, diffraction losses) [10].

Εμπειρικά μοντέλα διάδοσης για πόλεις (όπως το μοντέλο Okumura-Hata) τυπικά προβλέπουν εκθέτη απωλειών μεγαλύτερο από 2 (συχνά 2.7-4 ανάλογα με την πυκνότητα των κτιρίων), γεγονός που συνεπάγεται δεκάδες dB επιπλέον εξασθένησης συγκριτικά με το ελεύθερο πεδίο. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο Hata σε πυκνή αστική περιοχή μπορεί να δώσει απώλεια διαδρομής περίπου $130 - 140dB$ στα $2km$, τιμή αρκετά υψηλότερη από τα περίπου $97dB$ του ελεύθερου χώρου. Επομένως, το σφάλμα ζεύξης (link margin) σε αστικά περιβάλλοντα μειώνεται δραστικά αν δεν υπάρχει καθαρή οπτική επαφή. Είναι ζωτικής σημασίας να λαμβάνεται υπόψη αυτή η πρόσθετη εξασθένηση κατά τον σχεδιασμό δικτύων LoRa, ώστε η διαθέσιμη στάθμη σήματος να παραμένει πάνω από την ευαισθησία του δέκτη για αξιόπιστη επικοινωνία.

Ζώνη Fresnel και Διάθλαση

Η ζώνη Fresnel περιγράφει μια ελλειψοειδή περιοχή γύρω από την ευθεία της οπτικής επαφής μεταξύ πομπού-δέκτη, μέσα στην οποία η διάδοση συμβάλλει εποικοδομητικά στην λήψη. Για την πρώτη ζώνη Fresnel ($n = 1$), η ακτίνα F_1 στο ενδιάμεσο της διαδρομής (εκεί όπου η ζώνη είναι μεγαλύτερη) δίνεται από:

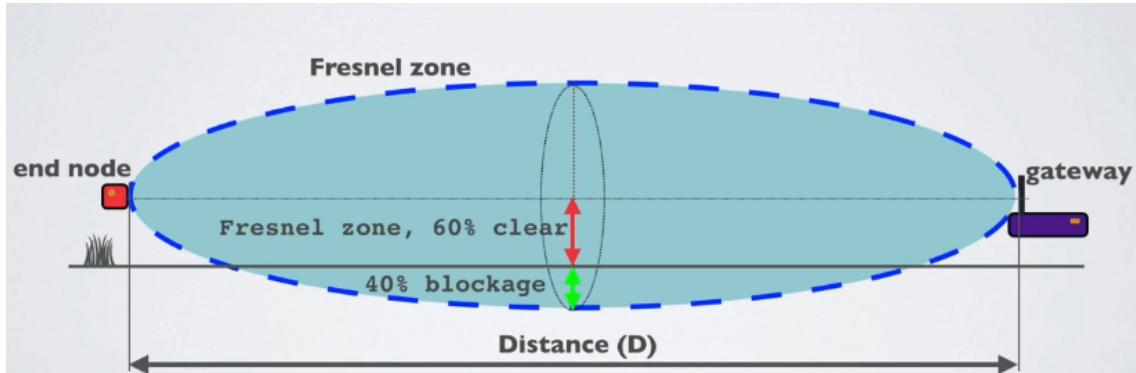
$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (2.2)$$

όπου λ το μήκος κύματος του σήματος, και d_1 , d_2 οι αποστάσεις του σημείου από τον πομπό και το δέκτη αντίστοιχα. Για τη συχνότητα $868MHz$ ($\lambda \approx 0.345m$) και συνολική απόσταση $2km$, η ακτίνα της 1ης ζώνης Fresnel στο μέσο της διαδρομής (δηλ. $d_1 = d_2 = 1km$) είναι:

$$F_1 \approx \sqrt{\frac{0.345 \times 1000 \times 1000}{2000}} \approx 13m.$$

Η φυσική σημασία αυτής της ζώνης είναι ότι τουλάχιστον το 60% της πρώτης ζώνης Fresnel πρέπει να είναι ελεύθερο από εμπόδια για να μην προκληθεί σημαντική πρόσθετη εξασθένηση [16]. Αν αντικείμενα (π.χ. κτίρια) παρεμβάλλονται και εισχωρούν βαθιά στη ζώνη Fresnel,

το σήμα θα υποστεί διάθλαση (diffraction) γύρω από τα εμπόδια, επιφέροντας μεγάλες απώλειες πέραν της ελεύθερης διάδοσης. Σε αστικό περιβάλλον, συνήθως η ζεύξη δεν έχει καθαρή οπτική επαφή, μιας και η πρώτη ζώνη Fresnel συχνά τέμνεται από κτίρια, δέντρα ή άλλες δομές. Αυτό οδηγεί σε μη γραμμική οπτική ζεύξη (NLoS), όπου η λήψη βασίζεται σε διερχόμενα και περιθλασμένα κύματα. Το αποτέλεσμα είναι το σήμα να μειωθεί σημαντικά. Για τον σχεδιασμό δικτύου LoRa στην πόλη, συστήνεται η ανύψωση των κεραιών (π.χ. εγκατάσταση gateway σε ψηλά κτίρια) ώστε να μεγιστοποιείται η εκκαθάριση της ζώνης Fresnel και να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες διάθλασης.



Εικόνα 2.3: Ζώνη Fresnel με 40% της κάλυψη από εμπόδια.

[17]

Πολυδιαδρομική Διάδοση (Multipath Propagation)

Λόγω των ανακλάσεων σε επιφάνειες όπως κτίρια, το έδαφος και άλλα εμπόδια, ένα ασύρματο σήμα μπορεί να φτάσει στον δέκτη μέσω πολλαπλών διαδρομών. Αυτή η πολυδιαδρομική διάδοση προκαλεί διαλείψεις (fading), μιας και τα σήματα από διαφορετικές διαδρομές μπορεί να φτάσουν με διαφορετική καθυστέρηση και φάση. Συνεπώς, εάν οι φάσεις τους είναι αντίθετες, ενδέχεται να επέλθει καταστροφική συμβολή, μειώνοντας σημαντικά την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (deep fade). Σε ένα δυναμικό περιβάλλον, ακόμη και μικρές μετακινήσεις ή αλλαγές μπορούν να μεταβάλουν το μοτίβο συμβολής, προκαλώντας ταχεία διακύμανση του σήματος (selective fading).

Για τα δίκτυα LoRa, η πολυδιαδρομή αποτελεί κρίσιμο φαινόμενο σε αστικές περιοχές, ωστόσο η ίδια η διαμόρφωση LoRa παρουσιάζει αξιοσημείωτη αντοχή σε multipath εξασθένιση. Η διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum (CSS) που χρησιμοποιεί το LoRa εκπέμπει το σύμβολο ως ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (chirp), γεγονός που το καθιστά λιγότερο επιρρεπές σε συχνόλεκτες διαλείψεις: το φάσμα του σήματος είναι σχετικά ευρύ και λειτουργεί αποτελεσματικά σαν ένα είδος διασποράς στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας [18]. Σύμφωνα με τεκμηρίωση της Semtech, το φαρδύ chirp προσδίδει στο LoRa «ανοσία στην πολυδιαδρομή και στο fading, καθιστώντας το ιδανικό για αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα όπου αυτά τα φαινόμενα κυριαρχούν» [10]. Πειραματικές μελέτες επιβεβαιώνουν αυτήν την ανθεκτικότητα: ο Staniec και ο Kowal (2018) ανέφεραν ότι το LoRa παρουσιάζει αξιοσημείωτη ανοχή σε έντονες συνθήκες multipath και παρεμβολών, ιδίως στα χαμηλότερα bit-rate (μεγαλύτερους spreading factors). Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις τους σε θάλαμο πολλαπλών

ανακλάσεων έδειξαν πως για ένα εύρος ρυθμίσεων LoRa υφίστανται περιοχές ευαισθησίας: μια «λευκή» περιοχή όπου το σήμα είναι πρακτικά ανεπιτρέαστο από multipath, μια «ανοιχτή γκρίζα» όπου το σύστημα εξακολουθεί να παρουσιάζει ανοχή στο multipath, αλλά αρχίζει να επηρεάζεται από ισχυρές παρεμβολές, και μια «σκούρα γκρίζα» περιοχή όπου υπό ακραίες συνθήκες το LoRa γίνεται ευάλωτο και στα δύο φαινόμενα [18].

Παρότι το LoRa είναι εγγενώς ανθεκτικό, η πολυδιαδρομική διάδοση σε αστικά περιβάλλοντα μπορεί ακόμη να δημιουργήσει προκλήσεις. Αν οι χρονικές καθυστερήσεις ορισμένων διαδρομών πλησιάσουν τη διάρκεια συμβόλου LoRa, μπορεί να προκληθεί παρεμβολή συμβόλων (inter-symbol interference). Ωστόσο, δεδομένου ότι οι ρυθμοί μετάδοσης LoRa είναι χαμηλοί (μεγάλες διάρκειες συμβόλων ειδικά σε υψηλό SF), οι περισσότερες ανακλώμενες συνιστώσες καταφθάνουν εντός του παραθύρου ενός συμβόλου και συγχωνεύονται χωρίς να καταστρέφουν την πληροφορία. Έτσι, στην πράξη το LoRa σπανίως υφίσταται ολική απώλεια λόγω multipath, σε αντίθεση με τεχνολογίες υψηλότερου ρυθμού όπου το multipath οδηγεί σε έντονο επιλεκτικό fading. Παρ' όλα αυτά, για μέγιστη αξιοπιστία σε πόλεις, συνιστάται η επιλογή παραμέτρων που μεγιστοποιούν το link margin (π.χ. υψηλός SF που προσφέρει μεγαλύτερη ευαισθησία δέκτη) ώστε ακόμη και τυχόν βαθιές διαλείψεις να μην ρίχνουν το σήμα κάτω από το όριο λήψης.

Ισοζύγιο Ζεύξης (Link Budget)

Το ισοζύγιο ζεύξης (link budget) αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες στον σχεδιασμό συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, καθώς εκφράζει το συνολικό εύρος απωλειών που μπορεί να αντέξει το σήμα κατά τη μετάδοση, χωρίς να χάσει τη δυνατότητα αξιόπιστης λήψης. Πρακτικά, το ισοζύγιο ζεύξης υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ισχύος εκπομπής και της ελάχιστης ισχύος που απαιτεί ο δέκτης για να λειτουργήσει αποτελεσματικά:

$$\text{Link Budget (dB)} = P_{TX}(dBm) + G_{TX}(dBi) + G_{RX}(dBi) - \text{Sensitivity}_{RX}(dBm) - \text{Losses}_{misc}(dB) \quad (2.3)$$

όπου:

- P_{TX} είναι η ισχύς εξόδου του πομπού (σε dBm),
- G_{TX}, G_{RX} είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπού και δέκτη αντίστοιχα (σε dBi),
- Sensitivity_{RX} είναι η ευαισθησία του δέκτη (σε dBm),
- Losses_{misc} είναι διάφορες επιπλέον απώλειες (π.χ. λόγω καλωδίων, συνδέσεων ή περιβαλλοντικών συνθηκών).

Η υψηλή τιμή του ισοζυγίου ζεύξης υποδηλώνει ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα ακόμα και με πολύ ασθενή σήματα ή σε δύσκολες συνθήκες μετάδοσης (π.χ. απομακρυσμένες συσκευές, αστικά περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια). Η τεχνολογία LoRa είναι γνωστή για το ιδιαίτερα υψηλό ισοζυγιού ζεύξης της, που τυπικά μπορεί να φτάσει έως και 154dB, ανάλογα με τις παραμέτρους της διαμόρφωσης (κυρίως τον παράγοντα εξάπλωσης SF και το εύρος ζώνης BW).

Η επίτευξη υψηλού ισοζυγίου ζεύξης στο LoRa προέρχεται από δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- **Υψηλή Ευαισθησία Δεκτών:** Οι δέκτες LoRa είναι σχεδιασμένοι ώστε να μπορούν να αποκωδικοποιούν σήματα πολύ χαμηλής έντασης, ακόμη και κάτω από το επίπεδο του θορύβου. Χαρακτηριστικά, η ευαισθησία των δεκτών LoRa κυμαίνεται από $-125dBm$ (για $SF7, BW = 125kHz$) έως $-137dBm$ (για $SF12, BW = 125kHz$), κάτι που επιτρέπει την λήψη εξαιρετικά ασθενών σημάτων από πολύ μεγάλες αποστάσεις [10].
- **Χαμηλός Ρυθμός Μετάδοσης και Διαμόρφωση Ευρέως Φάσματος (Spread Spectrum):** Η διαμόρφωση LoRa (Chirp Spread Spectrum, CSS) διαχέει το σήμα σε μεγάλο χρονικό διάστημα και εύρος ζώνης, αυξάνοντας την πιθανότητα αξιόπιστης λήψης του σήματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ένα κέρδος επεξεργασίας (processing gain) που δίνεται περίπου από τη σχέση :

$$G_{processing} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{BW}{R_{data}} \right) \quad (2.4)$$

όπου BW είναι το εύρος ζώνης μετάδοσης και R_{data} ο ρυθμός δεδομένων. Αυτό το κέρδος επεξεργασίας ενισχύει το σήμα σε σχέση με τον θόρυβο, επιτρέποντας την αποκωδικοποίηση ακόμη και υπό πολύ χαμηλές τιμές λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) [10].

Η τεχνολογία LoRa συγκρινόμενη με την παραδοσιακή διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Shift Keying - FSK), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε άλλες εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας, παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερη ευαισθησία. Αυτό οφείλεται στο ότι η FSK απαιτεί ένα ελάχιστο θετικό SNR για αξιόπιστη αποκωδικοποίηση, ενώ η LoRa μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με αρνητικό SNR, με το σήμα κυριολεκτικά «θαμμένο» μέσα στο θόρυβο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4.

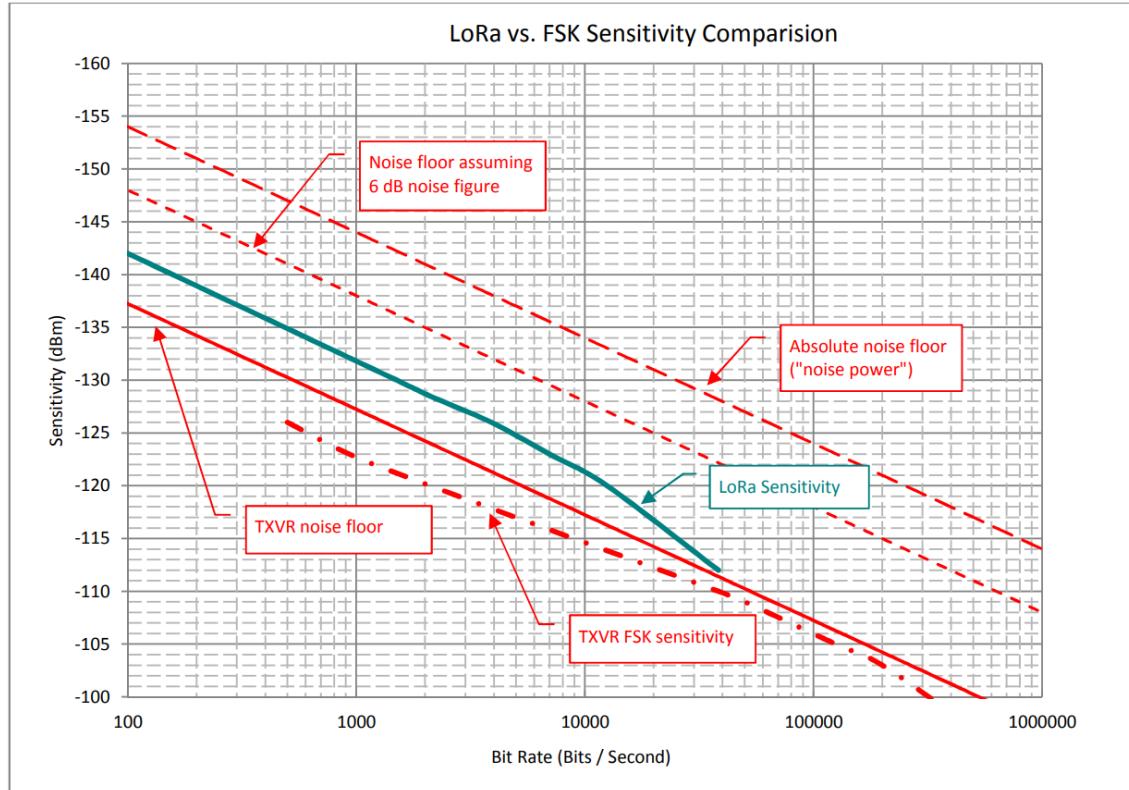
Συνοψίζοντας, το υψηλό ισοζύγιο ζεύξης είναι ο κύριος λόγος που η τεχνολογία LoRa μπορεί να επιτύχει επικοινωνία σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (έως και δεκάδες χιλιόμετρα σε ανοιχτό πεδίο), με πολύ χαμηλή ισχύ εκπομπής, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης σε περιβάλλοντα όπου η συντήρηση και η αντικατάσταση μπαταριών είναι δύσκολη ή και αδύνατη.

Φαινόμενο Doppler

Το φαινόμενο Doppler είναι η μεταβολή της συχνότητας ενός κύματος λόγω σχετικής κίνησης πομπού ή δέκτη. Στα ασύρματα δίκτυα, εάν ένας κόμβος LoRa κινείται (π.χ. αισθητήρας σε όχημα) ή αν το περιβάλλον μεταβάλει αποτελεσματικά τη συχνότητα (π.χ. ανακλώμενη διάδοση από κινούμενα αντικείμενα), η φέρουσα συχνότητα του σήματος όπως την αντιλαμβάνεται ο δέκτης μετατοπίζεται. Η μετατόπιση Doppler Δf προσεγγίζεται από τη σχέση :

$$\Delta f \approx \frac{v}{c} f_c, \quad (2.5)$$

όπου v η σχετική ταχύτητα πομπού-δέκτη, c η ταχύτητα του φωτός και f_c η φερουσα συχνότητα. Για παράδειγμα, στα $868MHz$, αν ένας αισθητήρας κινείται με $v = 100km/h$ (



Εικόνα 2.4: Σύγκριση ευαισθησίας LoRa και FSK, υπογραμμίζοντας την υπεροχή της τεχνολογίας LoRa σε συνδήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR).

[10]

$\approx 27.8 \text{ m/s}$, τότε η παρατηρούμενη συχνότητα μετατοπίζεται κατά:

$$\Delta f \approx \frac{27.8}{3 \times 10^8} \times 868 \times 10^6 \approx 80 \text{ Hz}.$$

Μια μετατόπιση περίπου 80 Hz είναι αμελητέα συγκριτικά με το εύρος ζώνης του LoRa (τυπικά 125 kHz), και συνεπώς δεν υποθαθμίζει την αξιοπιστία του σήματος. Γενικά, το LoRa είναι εξαιρετικά ανεκτικό στο φαινόμενο Doppler για τις συνήθεις ταχύτητες που συναντώνται σε αστικά σενάρια (π.χ. οχήματα). Η ίδια η διαμόρφωση με chirp καθιστά το σήμα ανθεκτικό σε μικρές συχνές αποκλίσεις: μια μόνιμη μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler απλώς μεταφράζεται σε μια μικρή χρονική ολίσθηση του τοπικού χρονοδιαγράμματος αποδιαμόρφωσης, κάτι που ο δέκτης LoRa μπορεί να αντιμετωπίσει χωρίς σημαντικές απώλειες απόδοσης. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτούνται κρύσταλλοι υψηλής ακρίβειας για τους ταλαντωτές και ότι το LoRa λειτουργεί αξιόπιστα ακόμη και σε κινητικές εφαρμογές, όπως σε αισθητήρες πίεσης ελαστικών, συστήματα διοδίων ή συσκευές σε μέσα μεταφοράς [10].

Φυσικά, σε ακραίες περιπτώσεις πολύ υψηλών ταχυτήτων (πέρα από τα αστικά δεδομένα, π.χ. σε δορυφορικές ζεύξεις LoRa) το φαινόμενο Doppler μπορεί να γίνει υπολογίσιμο, απαιτώντας τεχνικές διόρθωσης (frequency offset compensation). Όμως για επίγειες αστικές επικοινωνίες LoRa, ακόμη και ταχύτητες της τάξης των $100 - 200 \text{ km/h}$ μπορούν να εξυπηρετηθούν χωρίς αξιόλογη υποθάθμιση της ευαισθησίας [10]. Συνοψίζοντας, το φαινόμενο Doppler δεν αποτελεί κυρίαρχο περιορισμό στην αξιοπιστία ενός στατικού δικτύου LoRa ή

με αργά κινούμενους κόμβους στην πόλη.

Παράδειγμα Υπολογισμού Απώλειας Διαδρομής και Link Budget

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα που συνδυάζει τον υπολογισμό της απώλειας διαδρομής και του ισοζυγίου ζεύξης (link budget) για μια χαρακτηριστική σύνδεση LoRa σε αστικό περιβάλλον. Ας θεωρήσουμε ένα σενάριο όπου:

- Συχνότητα λειτουργίας: $f = 868MHz$ (ζώνη EU863-870).
- Απόσταση πομπού-δέκτη: $d = 2km$ (αστικό περιβάλλον, πιθανώς χωρίς καθαρή οπτική επαφή).
- Ισχύς εκπομπής πομπού: $P_{TX} = 14dBm$ (τυπικό μέγιστο LoRa επιτρεπόμενο στην ΕΕ).
- Κέρδος κεραίας πομπού/δέκτη: $G_{TX} = 0dBi$ (μικρή μονοπολική στοναισθητήρα), $G_{RX} = 2dBi$ (κεραία gateway).
- Απώλειες καλωδίων/συνδέσεων: $L_{misc} = 2dB$ (π.χ. απώλεια ομοαξονικού στον σταθμό βάσης).
- Ευαισθησία δέκτη: $S_{min} \approx -137dBm$ (υψηλή ευαισθησία, π.χ. LoRa δέκτης σε $SF = 12, BW = 125kHz$) [19].

1. Υπολογισμός απώλειας διαδρομής: Χρησιμοποιούμε πρώτα την εξίσωση ελεύθερου χώρου. Για $d = 2km$, $f = 868MHz$, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, $L_{FS} \approx 97.4dB$. Σε αστικό περιβάλλον χωρίς οπτική επαφή, θα προσθέσουμε μια επιπλέον απώλεια λόγω σκίασης/διάθλασης. Ας υποθέσουμε μια συντηρητική επιπλέον εξασθένηση $L_{urban} = 20 dB$ (λόγω κτιρίων που μερικώς φράσσουν τη ζώνη Fresnel και προκαλούν διάθλαση). Έτσι, η συνολική εκτιμώμενη απώλεια διαδρομής γίνεται:

$$L_{path} = L_{FS} + L_{urban} \approx 97.4 + 20 = 117.4dB.$$

2. Λίψη και Ισοζύγιο Ζεύξης: Το ισοζύγιο ζεύξης λαμβάνει υπόψη όλα τα κέρδη και τις απώλειες από τον πομπό έως τον δέκτη. Η ισχύς που φτάνει στον δέκτη (P_{RX} σε dBm) δίνεται από:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_{path} - L_{misc}.$$

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές:

$$P_{RX} = 14dBm + 0dB + 2dB - 117.4 dB - 2dB.$$

$$P_{RX} \approx -103.4dBm.$$

Η λαμβανόμενη ισχύς εκτιμάται περίπου $-103.4dBm$.

3. Σύγκριση με ευαισθησία δέκτη: Δεδομένου ότι ο δέκτης LoRa (με $SF = 12$) μπορεί να ανιχνεύσει σήματα έως και $S_{min} \approx -137dBm$, το συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζει ένα περιθώριο ζεύξης γύρω στα $33.6dB$ (διαφορά μεταξύ $-103.4dBm$ και $-137dBm$). Αυτό το

περιθώριο είναι πολύ άνετο - υπερκαλύπτει τυχόν επιπλέον απώλειες λόγω πιο έντονου fading ή παρεμβολών, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη επικοινωνία. Σημειώνεται ότι το υπολογισθέν L_{path} περιείχε ήδη ένα αποθεματικό $20dB$ για αστικό περιβάλλον. Στην πράξη, αν η ζεύξη είχε οπτική επαφή (LoS) το περιθώριο θα ήταν ακόμη μεγαλύτερο.

4. Επίδραση παραμέτρων LoRa: Αξίζει να τονιστεί ότι η ευαισθησία $-137dBm$ αντιστοιχεί σε διαμόρφωση LoRa με τον πιο παρατεταμένο χρόνο συμβόλου ($SF12, BW125kHz$) [19]. Εάν χρησιμοποιούνταν μια ταχύτερη διαμόρφωση (π.χ. $SF7$ με ευαισθησία περί τα $-123dBm$), το περιθώριο ζεύξης θα μειωνόταν (περίπου $20dB$ λιγότερο ευαίσθητος δέκτης) αλλά πιθανώς να παρέμενε επαρκές για $2km$. Στην περίπτωσή μας, με $SF12$, το πολύ μεγάλο link margin των $33+ dB$ υποδηλώνει ότι η ζεύξη θα εξακολουθούσε να λειτουργεί ακόμα κι αν η απώλεια διαδρομής ήταν σημαντικά μεγαλύτερη (π.χ. περίπου μέχρι $150dB$ συνολικά). Πράγματι, τα σύγχρονα LoRa transceivers υποστηρίζουν μέγιστο link budget της τάξης των $155 - 170dB$, ικανό να καλύψει αποστάσεις πολλών δεκάδων χιλιομέτρων σε ιδανικές συνθήκες. Στο δικό μας σενάριο, μια απώλεια περίπου $117dB$ είναι αρκετά χαμηλή συγκριτικά με το διαθέσιμο link budget (περίπου $154dB$ με $168dB$ ανάλογα τον δέκτη), εξηγώντας γιατί οι ζεύξεις LoRa μπορούν να επιτύχουν αξιόπιστη επικοινωνία ακόμα και σε αστικό περιβάλλον με διάφορες προκλήσεις διάδοσης [15].

Συμπέρασμα του παραδείγματος: Με τις παραπάνω παραμέτρους, η ζεύξη LoRa στα $2km$ όχι μόνο «κλείνει» (δηλαδή το σήμα υπερβαίνει το κατώφλι ευαισθησίας του δέκτη), αλλά διαθέτει και σημαντικό περιθώριο αξιοπιστίας. Αυτό το περιθώριο μπορεί να απορροφήσει επιπλέον απώλειες από φαινόμενα όπως εξασθένιση multipath, μελλοντική υποβάθμιση σήματος λόγω παρεμβολών, ή μείωση ισχύος μπαταρίας του πομπού. Δείχνει επίσης τη σπουδαιότητα του link budget: συνδυάζοντας υψηλή ευαισθησία δέκτη, επαρκή ισχύ εκπομπής και κεραίες με μικρά έστω κέρδη, το LoRa πετυχαίνει μεγάλες εμβέλειες. Σε ακραίες αστικές συνθήκες (π.χ. πολύ πυκνό αστικό τοπίο, εσωτερικό κτιρίων), το περιθώριο αυτό θα μειωθεί, ωστόσο η εγγενής ανθεκτικότητα του πρωτοκόλλου (λόγω του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης και του spread spectrum) επιτρέπει στο LoRa να διατηρεί επικοινωνία ακόμη και εκεί όπου άλλα συστήματα υψηλότερης συχνότητας ή ταχύτητας αποτυγχάνουν.

2.3.3 Chirp Spread Spectrum και η υλοποίησή του στη LoRa

Η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση φάσματος διασποράς με chirp (Chirp Spread Spectrum, CSS). Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε αρχικά τη δεκαετία του 1940 για εφαρμογές ραντάρ και έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί σε στρατιωτικά και ασφαλή συστήματα επικοινωνιών [20]. Τα τελευταία χρόνια γνωρίζει ευρεία εφαρμογή σε ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων, λόγω των σχετικά χαμηλών απαιτήσεων ισχύος και της έμφυτης ανθεκτικότητάς της έναντι παραγόντων υποβάθμισης του καναλιού, όπως η πολλαπλή διάδοση, το fading, το φαινόμενο Doppler κλπ. που αναφέρθηκαν προηγουμένως [10]. Μάλιστα, ένα φυσικό στρώμα βασισμένο σε CSS υιοθετήθηκε από το πρότυπο IEEE 802.15.4a για ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλού ρυθμού (LR-WPAN) που απαιτούν μεγαλύτερη εμβέλεια και κινητικότητα, ως εναλλακτική του DSSS με O-QPSK [20].

Σε αυτό το σχήμα διαμόρφωσης, κάθε σύμβολο μεταδίδεται ως ένα ημιτονοειδές σήμα (σήμα chirp). Συνεπώς, αντί για χρήση ψευδοτυχαίων κώδικων διάχυσης φάσματος όπως

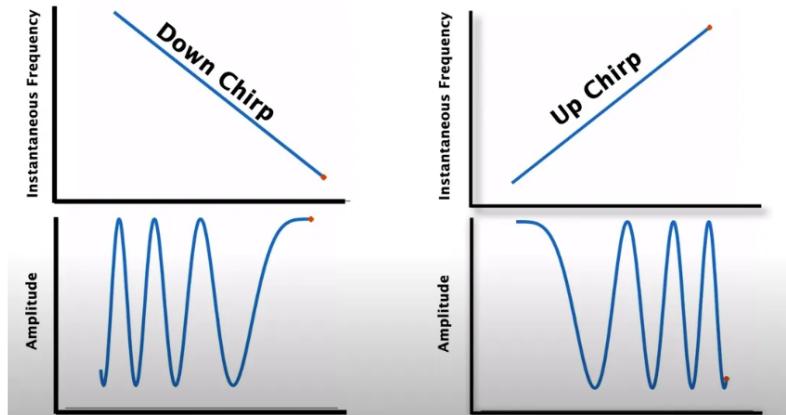
στο DSSS, στη LoRa το φάσμα διασπείρεται μέσω σημάτων chirp (παλμών των οποίων η συχνότητα μεταβάλλεται γραμμικά με τον χρόνο). Ένα τέτοιο chirp σαρώνει ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τυχόν διαφορές χρονισμού ή/και συχνότητας μεταξύ πομπού και δέκτη αντισταθμίζονται αυτόματα (καθώς και οι δύο υφίστανται την ίδια μετατόπιση), γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τον σχεδιασμό και τη διαδικασία συγχρονισμού του δέκτη [10]. Το φάσμα συχνότητας του chirp καθορίζεται από το εύρος ζώνης BW (Bandwidth) του σήματος (στην ουσία, το εύρος ζώνης του chirp είναι ίσο με το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος). Η επιθυμητή πληροφορία (τα δεδομένα) «τεμαχίζεται» σε πολύ υψηλότερο ρυθμό (chips) και κάθε σύμβολο μεταδίδεται ως ένα chirp μέσα στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης, ενσωματώνοντας τα δεδομένα στην αρχική φάση ή συχνότητα του chirp.

Στην πράξη, ένα up-chirp (που η συχνότητά του αυξάνεται γραμμικά) χρησιμοποιείται για την εκπομπή των συμβόλων, ενώ η LoRa ορίζει και ειδικά down-chirps (φθίνουσας συχνότητας) για σήματα συγχρονισμού και τερματισμού. Η κυματομορφή ενός ιδανικού up-chirp μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως σήμα συχνότητας που μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό. Για παράδειγμα, ένα απλοποιημένο μοντέλο up-chirp ξεκινώντας από συχνότητα f_0 μπορεί να γραφεί ως:

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \frac{BW}{T_s} t^2), \quad 0 \leq t < T_s, \quad (2.6)$$

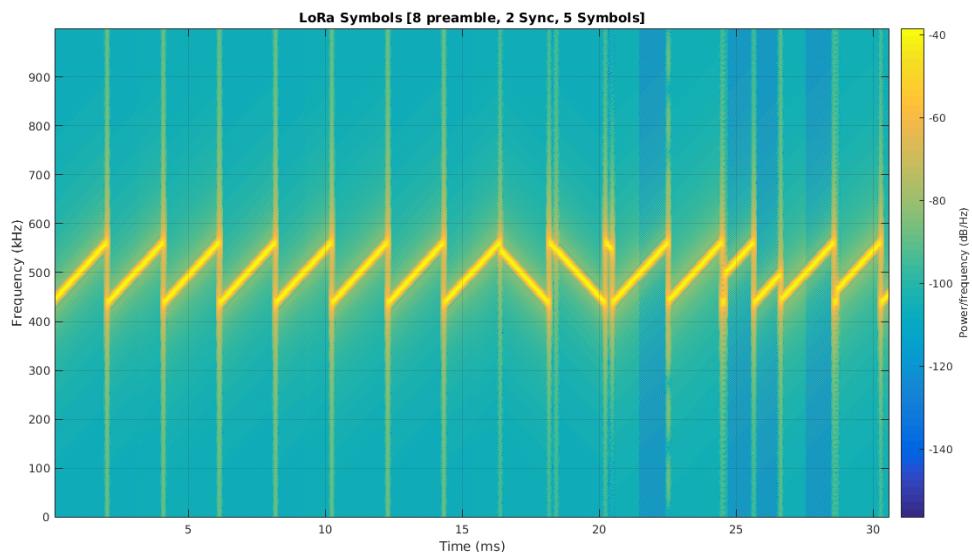
όπου T_s η διάρκεια του συμβόλου (chirp). Στο διάστημα αυτό, η στιγμιαία συχνότητα του $s(t)$ αυξάνεται γραμμικά από f_0 έως $f_0 + BW$. Χάρη στην τεχνική CSS, οι δέκτες LoRa μπορούν να ανιχνεύσουν σήματα έως και 19.5 dB κάτω από το επίπεδο θορύβου του καναλιού, αξιοποιώντας διαδικασίες συσχέτισης (correlation/demodulation) που συμπιέζουν το διεσπαρμένο σήμα πίσω στο αρχικό φάσμα του [20]. Συγκριτικά με τα συστήματα DSSS που χρησιμοποιούν ακολουθίες ψευδοθορύβου (όπως π.χ. το 802.11 ή το UMTS), η LoRa χρησιμοποιεί chirp pulses αντί για ψευδοτυχαίους κώδικες για τη διασπορά [20]. Το εκπεμπόμενο σήμα LoRa έχει συνεχή χαρακτηριστική με σταθερή περιβάλλουσα διαμόρφωση (constant envelope FM), η οποία αυξάνεται ή μειώνεται μονοτονικά εντός του διαθέσιμου φάσματος. Αυτή η προσέγγιση επιτυγχάνει την ίδια λειτουργία διάχυσης φάσματος, με χαμηλή πολυπλοκότητα και χωρίς να απαιτείται ακριβής γεννήτρια χρονισμού για μακρές ακολουθίες κώδικα, όπως συνέβαινε σε DSSS εφαρμογές (π.χ. GPS) [10]. Συνολικά, η CSS διαμόρφωση της LoRa παρέχει μια ανθεκτική λύση spread spectrum με χαμηλό κόστος και κατανάλωση, κατάλληλη για δίκτυα IoT μεγάλης εμβέλειας.

Η μετάδοση ενός πακέτου LoRa αρχίζει με έναν προκαθορισμένο πρόλογο (preamble) από διαδοχικά up-chirps που επιτρέπουν στον δέκτη να αντιληφθεί την παρουσία σήματος και να συγχρονίσει τη συχνότητα και το ρολόι του. Τυπικά χρησιμοποιούνται 8 σύμβολα προοιμίου (στην Ευρώπη), τα οποία ακολουθούνται από 2 ειδικά down-chirps που σηματοδοτούν το τέλος του προοιμίου και βοηθούν στον ακριβή συγχρονισμό φάσης του δεκτή [22]. Μετά το προοίμιο, έπονται τα chirps που μεταφέρουν τα ωφέλιμα δεδομένα, καθένα εκ των οποίων έχει τροποποιηθεί κυκλικά ως προς τη φάση ώστε να αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ακολουθία bits.



Εικόνα 2.5: Παράλληλη σύγκριση ενός down-chirp (αριστερά) και ενός up-chirp (δεξιά), που δείχνει τη γραμμική μείωση/αύξηση της σπιγμαίας συχνότητας (πάνω) συνοδευόμενη από το αντίστοιχο σήμα στο πεδίο του χρόνου, όπου η απόσταση των κυμάτων εκτείνεται/συμπιέζεται καθ' όλη τη διάρκεια του συμβόλου.

[21]



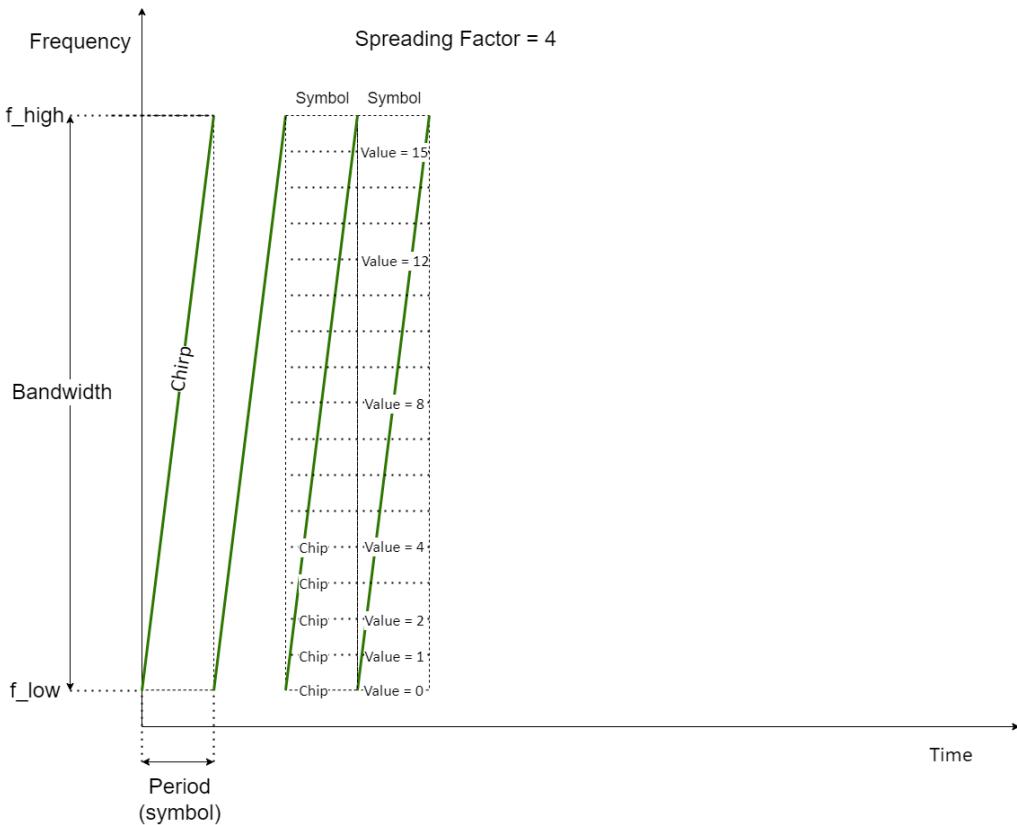
Εικόνα 2.6: Φασματογράφημα σήματος LoRa που παρουσιάζει 8 αρχικά up-chirps προοιμίου, 2 down-chirps συγχρονισμού, και ακολουθία 5 chirp με κωδικοποιημένα δεδομένα (διαφορετική κυκλική μετατόπιση σε κάθε σύμβολο). Το σήμα σαρώνει πλήρως ένα εύρος ζώνης 125 kHz με γραμμικά αυξανόμενη ή μειούμενη συχνότητα σε κάθε chirp.

[22]

2.3.4 Παράγοντας Εξάπλωσης και Ευαισθησία Δέκτη

Όπως έχει ήδη φανεί, βασική παράμετρος στην διαμόρφωση του σήματος LoRa είναι ο Παράγοντας Εξάπλωσης (Spreading Factor, SF). Ο SF ορίζει τον βαθμό διασποράς του σήματος. Ουσιαστικά ισούται με τον αριθμό των bits που κωδικοποιούνται σε κάθε σύμβολο. Μια μετάδοση με $SF = n$ σημαίνει ότι κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε n bits ωφέλιμης πληροφορίας, τα οποία διασπείρονται σε ένα chirp διάρκειας 2^n chips.

Συνολικά, υπάρχουν διαθέσιμες 6 διακριτές τιμές (τυπικά $SF = 7$ έως $SF = 12$) για το



Εικόνα 2.7: Σχηματική απεικόνιση της κυματομορφής Chirp Spread Spectrum στο LoRa για Spreading Factor (4 bits). Το διάγραμμα δείχνει πώς κάθε σύμβολο σαρώνει γραμμικά το εύρος ζώνης από f_{low} σε f_{high} , καθώς και την αντιστοίχιση των chips σε διακριτές τιμές (0-15) μέσα σε ένα σύμβολο.

[23]

LoRa PHY¹. Μεγαλύτερος SF συνεπάγεται περισσότερα chips ανά σύμβολο και άρα μεγαλύτερη διάρκεια συμβόλου, κάτι που μειώνει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αλλά αυξάνει το processing gain και την ευαισθησία του δέκτη. Αντίθετα, μικρότερος SF δίνει ταχύτερη μετάδοση (περισσότερα symbol/s) αλλά με χαμηλότερη επεξεργαστική ενίσχυση και συνεπώς μικρότερη ακτίνα αξιόπιστης επικοινωνίας. Στην πράξη, κάθε αύξηση του SF κατά 1 περίπου μονάδα διπλασιάζει τη διάρκεια του συμβόλου (για σταθερό εύρος ζώνης), με αποτέλεσμα να υποδιπλασιάζεται ο ρυθμός δεδομένων και να απαιτείται υψηλότερο E_b/N_0 (SNR per bit) για σωστή λήψη (αν δεν αλλάζει η ισχύς) [11]. Από την άλλη, ένα μεγαλύτερο SF επιτρέπει στο σήμα να ταξιδέψει μακρύτερα, αφού μπορεί να ανακτηθεί σωστά ακόμα και με πολύ χαμηλότερο SNR στο δέκτη λόγω του υψηλού κέρδους διασποράς (π.χ. ένα πακέτο με SF = 12 μπορεί να φτάσει αποδοτικά πιο μακριά από ένα με SF = 7, υπό τις ίδιες λοιπές συνθήκες [11]). Η επιλογή του SF σε δίκτυα LoRaWAN γίνεται συνήθως δυναμικά, μέσω του μηχανισμού Adaptive Data Rate, ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ ρυθμού μετάδοσης και αξιοπιστίας/απόστασης για κάθε συσκευή.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό της LoRa είναι ότι τα σήματα που χρησιμοποιούν διαφορετικούς SF (σε κοινό κανάλι συχνότητας και εύρους ζώνης) είναι σχεδόν ορθογώνια

¹Υπάρχει επίσης SF = 6 σε ορισμένες υλοποιήσεις, αλλά χρησιμοποιείται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις και με διαφοροποιημένο πρωτόκολλο διαμόρφωσης.

μεταξύ τους [15]. Αυτό σημαίνει ότι μια πύλη (gateway) LoRa μπορεί να λαμβάνει και να διαχωρίζει ταυτόχρονα πολλαπλές μεταδόσεις στην ίδια συχνότητα, εφόσον αυτές γίνονται με διαφορετικούς spreading factors, χωρίς ουσιαστική αλληλοπαρεμβολή. Η ορθογωνικότητα προκύπτει διότι τα διασπειρόμενα σήματα με διαφορετικό SF έχουν πολύ χαμηλή συσχέτιση: η εγκάρσια συσχέτιση των αντίστοιχων σειρών chips τείνει στο μηδέν, με αποτέλεσμα ένα πακέτο π.χ. $SF = 10$ να εμφανίζεται ως θόρυβος στον δέκτη που «ακούει» $SF = 7$ και αντιστρόφως [24]. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών κόμβων στον ίδιο δίαυλο, ουσιαστικά πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητα του καναλιού, αφού συσκευές με διαφορετικό SF δεν μετρούν ως collision μεταξύ τους στο επίπεδο PHY. Η ιδιότητα αυτή αξιοποιείται από το πρωτόκολλο LoRaWAN για τον έλεγχο της συμφόρησης: το δίκτυο μπορεί να αναθέτει υψηλότερους SF σε απομακρυσμένες ή δυσμενείς συσκευές και χαμηλότερους SF σε συσκευές με καλό σήμα, έτσι ώστε όλες να γίνονται αξιόπιστα αντιληπτές από τον δέκτη, μοιράζοντας το κανάλι χωρίς ανταγωνισμό [11].

Σημειώνεται ότι η ορθογωνικότητα μεταξύ διαφορετικών SF ισχύει αυστηρά μόνο όταν χρησιμοποιείται το ίδιο BW . Αν δύο μεταδόσεις χρησιμοποιούν διαφορετικό εύρος ζώνης και κατάλληλους SF τέτοιους ώστε να έχουν τον ίδιο ρυθμό chips, τότε οι γραμμικές σαρώσεις συχνότητας (chirps) θα έχουν ίδια «κλίση» και τα δύο σήματα δεν θα διαχωρίζονται καλά. Για παράδειγμα, ένας συνδυασμός $SF = 7$ με $BW = 125kHz$ και ένας άλλος με $SF = 9$ και $BW = 250kHz$ παράγουν το ίδιο chip rate (R_c) και ουσιαστικά το ίδιο chirp rate (ρυθμό μεταβολής συχνότητας), άρα τα σήματα δεν είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Στην πράξη αυτό αποφεύγεται διότι κάθε κανάλι LoRa ορίζεται από συγκεκριμένο εύρος ζώνης (π.χ. $125kHz$) και μόνο ο SF μεταβάλλεται. Όλοι οι κόμβοι σε ένα συγκεκριμένο κανάλι χρησιμοποιούν το ίδιο BW (συνήθως $125kHz$ στην Ευρώπη), διασφαλίζοντας την ορθογωνικότητα μεταξύ των διαθέσιμων SF7 – SF12.

Spreading Factor	Chips per symbol	$SNR_{limit}(dB)$
7	128	-7.5
8	256	-10
9	512	-12.5
10	1024	-15
11	2048	-17.5
12	4096	-20

Πίνακας 2.2: Πίνακας παραμέτρων Spreading Factor και αντίστοιχων ορίων SNR.

Ευαισθησία Δέκτη

Η ευαισθησία του δέκτη ενός συστήματος LoRa είναι το ελάχιστο επίπεδο ισχύος στο οποίο μπορεί να ανιχνευθεί σωστά το σήμα, δεδομένου ενός συγκεκριμένου SNR. Η ευαισθησία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S(dBm) = -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR_{limit}, \quad (2.7)$$

όπου:

- $-174dBm/Hz$: η θερμική πυκνότητα θορύβου στους $25^{\circ}C$,
- BW : το εύρος ζώνης σε Hz ,
- NF : ο συντελεστής θορύβου Noise Figure του δέκτη (συνήθως περίπου $6dB$, προκαθορισμένο αναλόγως με το hardware),
- SNR : το όριο SNR του συγκεκριμένου SF .

Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει τα όρια SNR και την αντίστοιχη ευαισθησία του δέκτη για διαφορετικούς παράγοντες εξάπλωσης, με τυπική τιμή $NF = 6dB$ και $BW = 125kHz$.

Spreading Factor	$SNR_{limit}(dB)$	$S_{(sensitivity)}(dBm)$
7	-7.5	-125
8	-10	-127
9	-12.5	-130
10	-15	-132
11	-17.5	-135
12	-20	-137

Πίνακας 2.3: 'Όρια SNR και ευαισθησία δέκτη για διαφορετικά Spreading Factors, με $BW = 125kHz$ και $NF = 6dB$.

Από τον παραπάνω πίνακα, φαίνεται ότι η αύξηση του SF βελτιώνει σημαντικά την ευαισθησία, επιτρέποντας την ανίχνευση σημάτων σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, κάτι που είναι καθοριστικό για τη μεγιστοποίηση της εμβέλειας σε δίκτυα LoRaWAN.

2.3.5 Ρυθμός Συμβόλων, Chips, Bitrate και Εξισώσεις

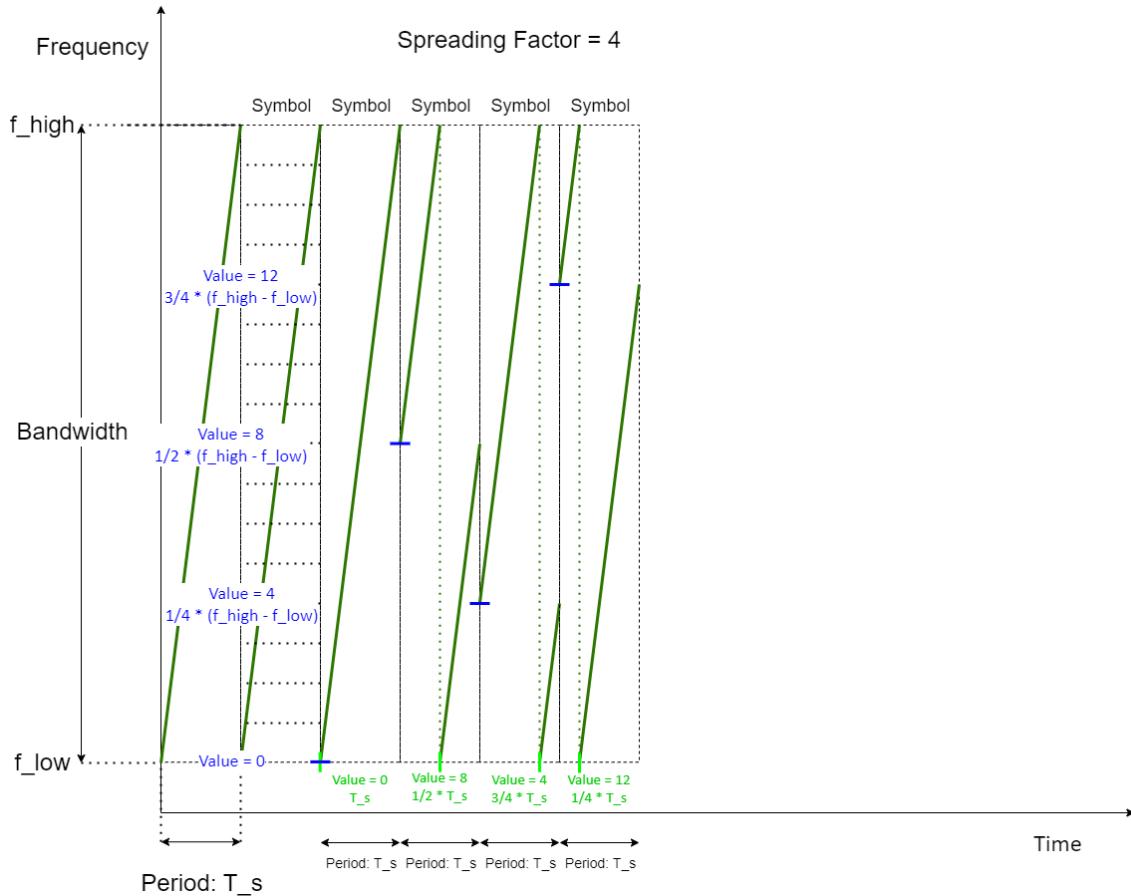
Το μήκος του συμβόλου στη LoRa (η διάρκεια ενός chip) εξαρτάται άμεσα από τον παράγοντα εξάπλωσης και το εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα, η χρονική διάρκεια T_s ενός συμβόλου ισούται με τον αριθμό των chips ανά σύμβολο διά το BW . Επειδή κάθε σύμβολο αποτελείται από 2^{SF} chips, προκύπτει:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (2.8)$$

όπου BW το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης (σε Hz) [10]. Για παράδειγμα, με $SF = 7$ και $BW = 125kHz$, έχουμε $T_s = 2^7/125000 \approx 1.024ms$, ενώ με $SF = 12$ (ίδιο BW) $T_s = 2^{12}/125000 \approx 32.768ms$ (δηλαδή 32 φορές μεγαλύτερο). Ο ρυθμός συμβόλων R_s (symbols per second) είναι απλά το αντίστροφο του T_s :

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}}, \quad (2.9)$$

'Όταν το SF αυξάνεται, ο ρυθμός συμβόλων μειώνεται εκθετικά (κάθε αύξηση SF κατά 1 $\Rightarrow R_s$ στο μισό). Η έννοια του chip αντιστοιχεί στο μικρότερο χρονικό βήμα εντός συμβόλου (με άλλα λόγια είναι πρακτικά το ελάχιστο διάστημα φάσης του chip στο οποίο κωδικοποιείται πληροφορία. Με 2^{SF} chips ανά σύμβολο και $R_s = BW/2^{SF}$, μπορούμε να



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση κυματομορφών Chirp Spread Spectrum στο LoRa για Spreading Factor 4, με ένδειξη των διακριτών τιμών (0, 4, 8, 12) στην αντίστοιχη χρονική θέση μέσα στο σύμβολο T_s . Τα μπλε σημάδια δείχνουν το κλάσμα της περιόδου συμβόλου στο οποίο εκπέμπεται κάθε τιμή, ενώ η πράσινη σήμανση αντιστοιχεί στον αριθμό του chip.

[23]

δούμε ότι ο ρυθμός chips R_c ισούται με:

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF} = BW, \quad (2.10)$$

Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από τον SF, το modem παράγει τον ίδιο αριθμό chips ανά δευτερόλεπτο, ίσο με το εύρος ζώνης. Για παράδειγμα, σε $BW = 125kHz$, εκπέμπονται $125000chips/s$ (δηλ. κάθε chip έχει διάρκεια $8 \mu s$), ενώ σε $BW = 500kHz$ εκπέμπονται $500000chips/s$, ανεξάρτητα από το SF. Αυτή η ιδιότητα συνάδει με τον ορισμό που δίνεται στα φυλλάδια της Semtech: «ένα chip εκπέμπεται ανά Hz ανά δευτερόλεπτο» [10].

Εφόσον κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε SF bits (πριν την προσθήκη κώδικα διόρθωσης), μπορούμε να εκφράσουμε τον ακαθάριστο ρυθμό bit της διαμόρφωσης LoRa. Χωρίς χρήση FEC, κάθε σύμβολο φέρει SF bits πληροφορίας και μεταδίδεται σε χρόνο T_s , άρα ο ρυθμός bit θα ήταν $R_b = SF \cdot R_s = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}}$. Στην LoRa όμως εφαρμόζεται επιπρόσθετα ένας κώδικας forward error correction (FEC) τύπου Hamming, που εισάγει πλεονάζοντα bits για διόρθωση λαθών. Ο βαθμός κωδικοποίησης εκφράζεται με λόγο $4/(4 + CR)$, όπου CR είναι

ένας ακέραιος 1-4 (π.χ. $CR = 1$ αντιστοιχεί σε code rate $4/5$, $CR = 4$ σε $4/8$ κ.ο.κ.). Ο καθαρός ρυθμός bit (ονομαστικός, net bit rate) λαμβάνοντας υπόψη την πλεονάζουσα κωδικοποίηση, δίνεται από την εξίσωση:

$$R_b = SF \cdot \frac{4}{4 + CR} \cdot \frac{BW}{2^{SF}}. \quad (2.11)$$

όπου τα SF και CR ορίζονται όπως παραπάνω [10]. Μπορούμε να ορίσουμε για ευκολία έναν παράγοντα $RateCode = \frac{4}{4+CR}$ (π.χ. $RateCode = 0.8$ για $CR = 1$, ή 0.5 για $CR = 4$). Τότε η σχέση γίνεται:

$$R_b = SF \cdot RateCode \cdot \frac{BW}{2^{SF}}. \quad (2.12)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι για δεδομένο BW και CR , η αύξηση του SF μειώνει τον R_b εκθετικά. Για παράδειγμα, με $SF = 7$, $BW = 125kHz$ και $CR = 1$ (κάθικας $4/5$), ο καθαρός ρυθμός είναι:

$$R_b = 7 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{125000}{128} \approx 5470bit/s. \quad (2.13)$$

δηλαδή περίπου $5.47kbps$. Με τις ίδιες παραμέτρους αλλά $SF = 12$, ο ρυθμός μειώνεται δραστικά:

$$R_b = 7 \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{125000}{4096} \approx 293bit/s. \quad (2.14)$$

δηλαδή μόλις $0.293kbps$. Αν χρησιμοποιηθεί ο μέγιστος πλεονασμός ($CR = 4$, δηλ. $4/8$), ο ρυθμός για $SF = 12$ πέφτει ακόμα χαμηλότερα, περίπου $183bit/s$. Αυτός είναι και ο ελάχιστος ρυθμός δεδομένων σε δίκτυο LoRa για ένα μόνο κανάλι $125kHz$. Αντιστρόφως, η χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης αυξάνει γραμμικά τον ρυθμό: για $BW = 250kHz$ ο ρυθμός bit διπλασιάζεται (με σταθερά SF, CR), ενώ για $BW = 500kHz$ τετραπλασιάζεται, κ.ο.κ. [11].

Σε υψηλές τιμές SF , η μεγάλη διάρκεια συμβόλου μπορεί να καταστήσει τις επικοινωνίες πιο ευάλωτες σε αστάθεια του ταλαντωτή ή σε θόρυβο φάσης. Γι' αυτό, στα πρότυπα LoRaWAN συνιστάται η ενεργοποίηση μιας ρύθμισης Low Data Rate Optimization (συντομογραφία DE) για $SF \geq 11$ όταν $BW = 125kHz$ [11]. Αυτή η ρύθμιση πρακτικά μειώνει το effective data rate εισάγοντας μικρή καθυστέρηση στη διαμόρφωση (μείωση του ρυθμού symbols/modulation), ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία στον δέκτη. Στις εξισώσεις, η ενεργοποίηση του *DE* λαμβάνεται υπόψη ως $(SF - 2)$ στον παρονομαστή ορισμένων όρων (βλ. επόμενη ενότητα), δηλαδή θεωρητικά σαν να μειώνεται ο διαθέσιμος αριθμός bit ανά σύμβολο κατά 2 όταν το *DE* = 1.

Βελτιστοποιήσεις CSS για LoRa

Παρά τους σχετικά χαμηλούς ρυθμούς της καθιερωμένης διαμόρφωσης LoRa, πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες στοχεύουν στη βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητάς της. Για παράδειγμα, έχει προταθεί ένα σχήμα διαμόρφωσης Slope-Shift Keying LoRa που προσθέτει, πέρα από το κανονικό up-chirp, τη χρήση ενός down-chirp και κυκλικών μετατοπίσεών του για τη μετάδοση επιπλέον πληροφορίας σε κάθε σύμβολο [25]. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το αλφάριθμο συμβόλων και μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερος ρυθμός bit στην ίδια

ζώνη συχνοτήτων, παραμένοντας συμβατό με τους δέκτες (απαιτεί όμως νέους αλγόριθμους ανίχνευσης συμβόλων). Μια συναφής προσέγγιση αξιοποιεί τεχνική Index Modulation στα chirp σήματα (ενσωματώνοντας πληροφορία στην επιλογή συγκεκριμένων θέσεων συχνότητας), ώστε να βελτιώσει περαιτέρω τον ρυθμό χωρίς επιπλέον ισχύ ή εύρος ζώνης [26]. Επίσης, έχει παρουσιαστεί μια επέκταση CSS όπου χρησιμοποιούνται ορθογώνια chirps ταυτόχρονα στους τετραγωνικούς άξονες I και Q (δηλ. μετάδοση στο σύμπλοκο επίπεδο με διαμόρφωση IQ) [27]. Αυτή η μέθοδος, γνωστή ως IQ-CSS, θεωρητικά διπλασιάζει τον ρυθμό bit για το ίδιο BW και SF (καθώς μεταφέρονται διαφορετικά bits στο I και στο Q κανάλι ανά σύμβολο) [27]. Όλες αυτές οι τεχνικές βρίσκονται υπό μελέτη και υπόσχονται σημαντική αύξηση της απόδοσης των LoRa συστημάτων, διατηρώντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα μεγάλης εμβέλειας της CSS διαμόρφωσης.

2.3.6 Υπολογισμός Χρόνου Εκπομπής (Time-on-Air) και Παράγοντες που τον Επηρεάζουν

Ο Χρόνος στον Αέρα ενός πακέτου LoRa (Time-on-Air, ToA) είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το πακέτο εκπέμπεται και καταλαμβάνει το κανάλι. Περιλαμβάνει τόσο τον χρόνο εκπομπής του προοιμίου (preamble) όσο και τον χρόνο εκπομπής του κύριου τμήματος (header + payload). Ο ΤoA εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων του φυσικού επιπέδου: τον spreading factor, το εύρος ζώνης, το μέγεθος του payload (bytes), τον κωδικό διόρθωσης λαθών CR, την παρουσία ή όχι ρητής επικεφαλίδας (explicit header vs implicit), την ενεργοποίηση του CRC, καθώς και τη ρύθμιση low data rate optimization (DE) που αναφέρθηκε προηγουμένως [11]. Η ακριβής διάρκεια του μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις παραμέτρους αυτές, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που ακολουθούν.

Καταρχάς, υπενθυμίζεται η διάρκεια συμβόλου $T_s = 2^{SF}/BW$. Ένα τυπικό πακέτο LoRaWAN χρησιμοποιεί προοίμιο μήκους $n_{preamble} = 8$ συμβόλων (που αποτελείται από $n_{preamble} - 1 = 7$ up-chirps συνένα ειδικό τελικό up-chirp και 2.25 down-chirps για συγχρονισμό στο δέκτη). Επιπλέον, το πρωτόκολλο ορίζει ότι ο δέκτης θα αναζητήσει τον προοίμιο με περιθώριο περίπου +4 σύμβολα και μια ίση προκαθορισμένη συσχέτιση = 0.25 συμβόλου για τον συγχρονισμό [11]. Συνολικά, αυτό προσθέτει 4.25 σύμβολα επιπλέον του $n_{preamble}$ στον υπολογισμό του χρόνου προοιμίου. Επομένως, ο χρόνος προοιμίου είναι:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \cdot T_s \quad (2.15)$$

Με $n_{preamble} = 8$, έχουμε $T_{preamble} = 12.25 T_s$. Για παράδειγμα, αν $T_s = 1.024ms$ (π.χ. SF7, 125kHz), το προοίμιο διαρκεί περίπου 12.544ms.

Στη συνέχεια, πρέπει να υπολογιστεί ο αριθμός συμβόλων του payload (μαζί με τυχόν header) που θα μεταδοθούν, δηλ. πόσα LoRa symbols απαιτούνται για να χωρέσουν τα δεδομένα και η επικεφαλίδα με το επιλεγμένο SF και CR. Η εξίσωση που δίνει τον αριθμό συμβόλων payload ($N_{payload}$) είναι αρκετά σύνθετη και περιλαμβάνει έναν τελεστή ceil (στρογγυλοποίηση προς τα πάνω), λόγω του ότι αν δεν ταιριάζει ακριβώς ένας ακέραιος αριθμός bits σε N σύμβολα, θα απαιτηθεί ένα επιπλέον σύμβολο. Συνοπτικά, η σχέση (όπως προκύπτει

από τη Semtech και τα πρότυπα LoRaWAN) είναι η ακόλουθη [10]:

$$N_{payload} = 8 + \max \left\{ \left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \times (CR + 4) \right\rceil, 0 \right\} \quad (2.16)$$

όπου:

- PL είναι το μέγεθος του payload σε bytes (ωφέλιμα δεδομένα),
- $CRC = 1$ αν συμπεριλαμβάνεται 2 byte CRC στο πακέτο (συνήθως ενεργοποιημένο, αλλιώς 0),
- H είναι bit ένδειξης header: $H = 0$ για explicit header (παρουσία τυπικής κεφαλίδας LoRaWAN, μήκους 20 bits) ή $H = 1$ για implicit mode (χωρίς καθόλου ηεαδερ, δηλαδή ο δέκτης γνωρίζει εκ των προτέρων το μέγεθος και το CR),
- $DE = 1$ αν έχει ενεργοποιηθεί Low Data Rate Optimization (σε $SF = 11, 12, 125kHz$, αλλιώς $DE = 0$)
- CR είναι ο ακέραιος (1..4) δείκτης του rate (όπου ο ρυθμός διόρθωσης είναι $4/(4+CR)$).

Η παραπάνω σχέση μπορεί να αναλυθεί ως εξής: ο αριθμός των bits του αδιαμόρφωτου payload είναι $8PL$. Σε αυτό προστίθενται 28 bits επικεφαλίδων πρωτοκόλλου (υπογραμμίζεται ότι όλα τα πακέτα LoRaWAN έχουν μια σταθερή προσθήκη 13 bytes = 26 bits υψηπέδων + 2 bits διαχωρισμού = 28 bits) και δυνητικά 16 bits CRC, ενώ αφαιρούνται 20 bits αν δεν υπάρχει ηεαδερ ($H = 1$ δηλ. implicit mode). Στον παρονομαστή, $4(SF - 2DE)$ προκύπτει από το ότι ο τρόπος διαμόρφωσης μοιράζει τα bits του κώδικα σε ομάδες των 4 συμβόλων (interleaving σε τετράδες) και ότι αν το $DE = 1$ μειώνει το αποτελεσματικό SF κατά 2 όπως προαναφέρθηκε. Τέλος, πολλαπλασιάζουμε με $(CR + 4)$ διότι για κάθε ομάδα 4 παψλοαδ bits προστίθενται CR bits FEC (σύμφωνα με τον λόγο $4/(4+CR)$). Ολόκληρο το κλάσμα μέσα στη Γ· μας δίνει τον αριθμό τετράδων συμβόλων που απαιτούνται για να χωρέσουν όλα τα bits, και η Γ· στρογγυλοποιεί προς τα πάνω στον επόμενο ακέραιο αν υπάρχει υπόλοιπο. Το $\max \cdot, 0$ εξασφαλίζει ότι λαμβάνουμε τουλάχιστον 0 (το αποτέλεσμα του κλάσματος μπορεί να βγει αρνητικό για πολύ μικρά πακέτα με συγκεκριμένες παραμέτρους, οπότε θεωρείται 0) [10]. Στο αποτέλεσμα προστίθεται σταθερά το 8, που αντιπροσωπεύει έναν ελάχιστο αριθμό 8 συμβόλων πάντα, ακόμη και για πολύ μικρό payload (πρακτικά το μικρότερο payload που μεταδίδεται καταλαμβάνει 8 σύμβολα, πέραν του preamble).

Αφότου υπολογιστεί το $N_{payload}$, μπορούμε να βρούμε τον χρόνο εκπομπής του payload:

$$T_{payload} = N_{payload} T_s \quad (2.17)$$

Τέλος, ο συνολικός χρόνος στον αέρα του πακέτου είναι απλώς το άθροισμα:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (2.18)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις, είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται ο SF ή/και ο CR , τόσο περισσότερα σύμβολα απαιτούνται (μεγαλύτερο $N_{payload}$) και τόσο μεγαλύτερο είναι το T_s ,

οδηγώντας σε μεγαλύτερο χρόνο εκπομπής. Αντίθετα, ένα μεγαλύτερο BW μειώνει ανάλογα το T_s (π.χ. διπλασιασμός του BW μισός χρόνος συμβόλου) και έτσι μειώνει τον ΤoA. Για να δώσουμε μια αίσθηση, στον πίνακα 2.4 φαίνεται ο ΤoA (ms) για ένα σύντομο πακέτο τυπικών διαστάσεων, υπό διάφορους SF , με σταθερά $BW = 125kHz$ και $CR = 1(4/5)$, σύμφωνα με τους υπολογισμούς των παραπάνω εξισώσεων.

Spreading Factor	Symbol Duration (ms)	Low Data Rate Opt.
7	41	
8	72	
9	144	
10	289	
11	578	(DE = 1)
12	991	(DE = 1)

Πίνακας 2.4: Διάρκεια συμβόλου LoRa σε $BW=125 kHz$ για διάφορα Spreading Factors, με ενεργοποιημένη Low Data Rate Optimization (DE) όπου απαιτείται.

Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν ότι περίπου κάθε μονάδα αύξησης του SF διπλασιάζει τον απαιτούμενο χρόνο εκπομπής (για σταθερό εύρος ζώνης) [28]. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ενεργειακή κατανάλωση των κόμβων: ένας κόμβος που εκπέμπει με υψηλό SF θα διατηρεί τον πομπό του ανοικτό πολύ περισσότερη ώρα σε σχέση με έναν που εκπέμπει το ίδιο δεδομένο με χαμηλότερο SF , ξοδεύοντας περισσότερη ενέργεια από την μπαταρία του. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή του χαμηλότερου δυνατού SF που ικανοποιεί τις απαιτήσεις επικοινωνίας είναι κρίσιμη για την παράταση της διάρκειας ζωής των συσκευών. Επιπλέον, σε κανονιστικά πλαίσια όπως η Ευρώπη, ισχύουν περιορισμοί duty-cycle στο EU863-870 που διαφέρουν ανά υπο-ζώνη (π.χ. 0.1%, 1% ή 10%). Όσο μεγαλώνει ο ΤoA, τόσο περιορίζεται ο πρακτικός ρυθμός αποστολών. Ενδεικτικά, αν ένα πακέτο διαρκεί 1 δευτερόλεπτο στον αέρα και το όριο της υπο-ζώνης είναι 1%, η συσκευή δεν μπορεί να το εκπέμπει πάνω από 36 φορές (περίπου) ανά ώρα. Συνεπώς, η μείωση ΤoA βοηθά ταυτόχρονα την ενεργειακή απόδοση και τη συμμόρφωση με τους περιορισμούς εκπομπής.

2.3.7 Αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση σήματος LoRa

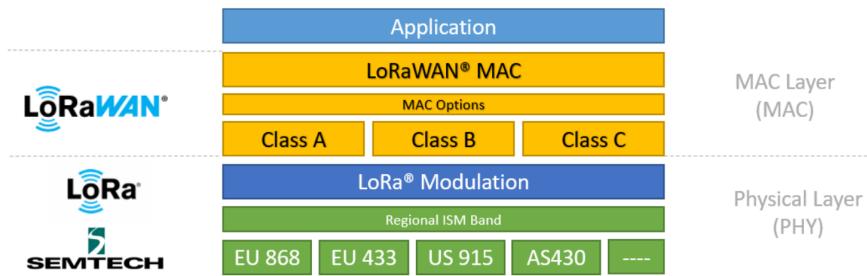
Η λήψη και αποδιαμόρφωση (demodulation) του σήματος LoRa πραγματοποιείται με τεχνικές που εκμεταλλεύονται τη δομή των chirp. Ο δέκτης, μόλις ανιχνεύσει το προοίμιο, παράγει ένα τοπικό σήμα αναφοράς (π.χ. έναν down-chirp που καλύπτει την ίδια ζώνη συχνοτήτων) και πολλαπλασιάζει το ληφθέν σήμα με το συζυγές του σήματος αναφοράς, μία διαδικασία γνωστή ως «απο-τοπικοποίηση» (de-chirping). Με αυτόν τον τρόπο, ένας λαμβανόμενος up-chirp μετατρέπεται σε ένα σχεδόν σταθερής συχνότητας ημιτονικό σήμα στο πεδίο του χρόνου, του οποίου η συχνότητα εξαρτάται από τη σχετική μετατόπιση (ολίσθηση) που είχε το chirp του συμβόλου. Εφαρμόζοντας έναν γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) στο απο-διαμορφωμένο σήμα, ο δέκτης μπορεί να αποτυπώσει ένα διάγραμμα ισχύος ως προς τη συχνότητα, στο οποίο εμφανίζεται μια χαρακτηριστική κορυφή. Η θέση της κορυφής αυτής στο φάσμα αντιστοιχεί στη δυαδική τιμή του συμβόλου που μεταδόθηκε. Με άλλα λόγια, η αποδιαμόρφωση στο LoRa υλοποιείται με έναν αποδιασπορέα συχνότητας και

έναν μετασχηματισμό FFT, που επιτρέπουν την ανίχνευση συσχέτισης του σήματος με κάθε πιθανή συμβολοσειρά [10, 27, 20]. Η μέθοδος αυτή είναι αποδοτική υπολογιστικά και μπορεί να υλοποιηθεί με χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικά στον δέκτη, σε αντίθεση με πιο περίπλοκα σχήματα διάχυσης (π.χ. DSSS).

Αφότου εξαχθούν οι διαδοχικές τιμές συμβόλων από το φυσικό επίπεδο, ακολουθεί η διαδικασία αποκωδικοποίησης των bits. Σε φυσικό επίπεδο, το LoRa εφαρμόζει διορθωτικό κώδικα προς διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένας κώδικας διεύρυνσης (coding rate) όπου για κάθε ομάδα 4 δεδομένων bits προστίθενται CR επιπλέον bits ανίχνευσης/διόρθωσης σφαλμάτων. Αυτό αντιστοιχεί σε λόγο κώδικα $4/(4+CR)$. Για παράδειγμα, $CR = 1$ δίνει $4/5$ (20% πλεονάζοντα bits), ενώ $CR = 4$ δίνει $4/8=1/2$ (50% πλεονάζοντα). Ο δέκτης, γνωρίζοντας το CR από την επικεφαλίδα (ή προκαθορισμένα), εφαρμόζει τον αντίστροφο αλγόριθμο του κώδικα για να ανιχνεύσει και διορθώσει τυχόν σφάλματα στα bits των συμβόλων. Έπειτα, ελέγχει την ακεραιότητα της συνολικής ωφέλιμης ακολουθίας μέσω του CRC (εάν υπάρχει). Εφόσον το CRC επαληθευτεί, τα αρχικά δεδομένα περνούν στο επάνω επίπεδο (π.χ. εφαρμογή). Σημειώνεται ότι η ανοχή του LoRa σε ταυτόχρονες μεταδόσεις περιορίζεται όταν αυτές χρησιμοποιούν τον ίδιο SF και κανάλι. Σε τέτοιες περιπτώσεις (collision), ο δέκτης συνήθως θα συγχρονιστεί και θα αποδιαμορφώσει μόνο το ισχυρότερο από τα πακέτα (φαινόμενο capture effect), εκτός αν τα σήματα είναι επαρκώς χρονικά και φασματικά διαχωρισμένα. Παρ' όλα αυτά, η χρήση διαφορετικών Spreading Factors ή καναλιών συχνοτήτων από τις συσκευές αποτρέπει τις περισσότερες συγκρούσεις, αξιοποιώντας πλήρως την ορθογωνιότητα και ευελιξία του πρωτοκόλλου.

2.4 Το Πρωτόκολλο LoRaWAN

Μετά την ανάλυση της φυσικής στρώσης LoRa και των δικτύων LPWAN στις προηγούμενες ενότητες, στρεφόμαστε τώρα στο πρωτόκολλο LoRaWAN. Το LoRaWAN είναι ένα ανοικτό πρωτόκολλο δικτύου που αναπτύσσεται από τη συμμαχία LoRa Alliance και λειτουργεί πάνω από τη διαμόρφωση LoRa, καθορίζοντας πώς οι συσκευές επικοινωνούν σε επίπεδο MAC και δικτύου. Ενώ το LoRa εξασφαλίζει τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή ισχύ, το LoRaWAN ορίζει την αρχιτεκτονική και τους κανόνες δικτύωσης ώστε εκατομμύρια τερματικές συσκευές να μπορούν να συνδεθούν αξιόπιστα μέσω μίας υποδομής μεγάλης κλίμακας. Το πρωτόκολλο αυτό έχει σχεδιαστεί ειδικά για τις απαιτήσεις του IoT: αμφίδρομη επικονινία με χαμηλό ρυθμό δεδομένων, ασφάλεια από άκρο σε άκρο, δυνατότητα κινητικότητας και στήριξη υπηρεσιών εντοπισμού θέσης [29]. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά η αρχιτεκτονική του LoRaWAN, οι κατηγορίες λειτουργίας των συσκευών, οι τύποι μηνυμάτων και η μορφή του πλαισίου, οι μηχανισμοί ενεργοποίησης και ασφάλειας, καθώς και σημαντικές παραμέτροι όπως το Adaptive Data Rate και οι περιορισμοί εκπομπής, κάνοντας αναφορές στα επίσημα πρότυπα (LoRa Alliance) και πρόσφατη βιβλιογραφία όπου ενδείκνυται. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία του οικοσυστήματος LoRaWAN στην πράξη (π.χ. The Things Network) και συνδέσεις με εφαρμογές όπως η τηλεμέτρηση ενέργειας με έξυπνους μετρητές σε υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας.

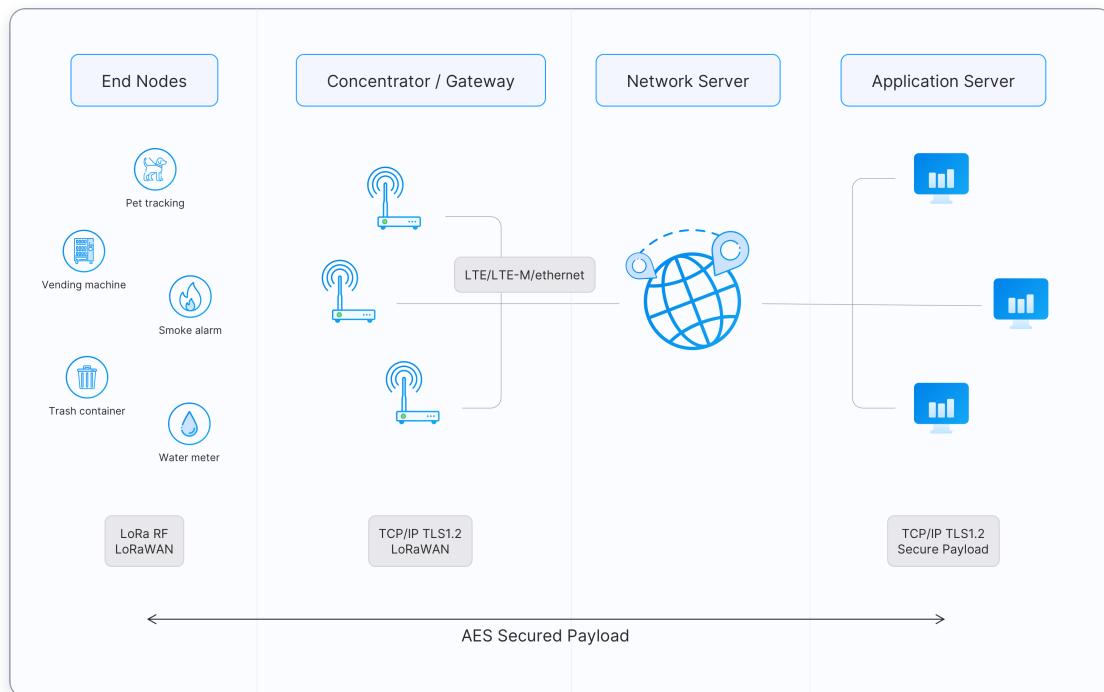


Εικόνα 2.9: Τεχνολογική στοιβα των LoRa και LoRaWAN.

[7]

2.4.1 Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN

Το δίκτυο LoRaWAN υλοποιείται σε τοπολογία τύπου «star-of-stars» (αστέρι των αστεριών), όπου οι πύλες (gateways) λειτουργούν ως διαμεσολαβητές μεταφέροντας ασύρματα μηνύματα μεταξύ των τερματικών συσκευών και ενός κεντρικού Network Server. Στην Εικόνα 2.10 παρακάτω απεικονίζεται μια τυπική αρχιτεκτονική LoRaWAN, με τις τερματικές συσκευές (end devices) να επικοινωνούν μέσω πολλαπλών πυλών με έναν κεντρικό Network Server, ενώ τα δεδομένα προωθούνται τελικά σε έναν Application Server, όπου βρίσκεται η τελική εφαρμογή του χρήστη. Το LoRaWAN Network Server (LNS) είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και συντονισμό του δικτύου, ενώ ένας ξεχωριστός Join Server μπορεί να συμμετέχει στη διαδικασία εισόδου νέων συσκευών στο δίκτυο, αποθηκεύοντας τα απαραίτητα κλειδιά και συνδράμοντας στον υπολογισμό των κλειδιών ασφαλείας κατά την ενεργοποίηση (περισσότερα για αυτό στο Υποτμήμα 2.4.4) [15].



Εικόνα 2.10: Τυπική αρχιτεκτονική LoRaWAN δικτύου.

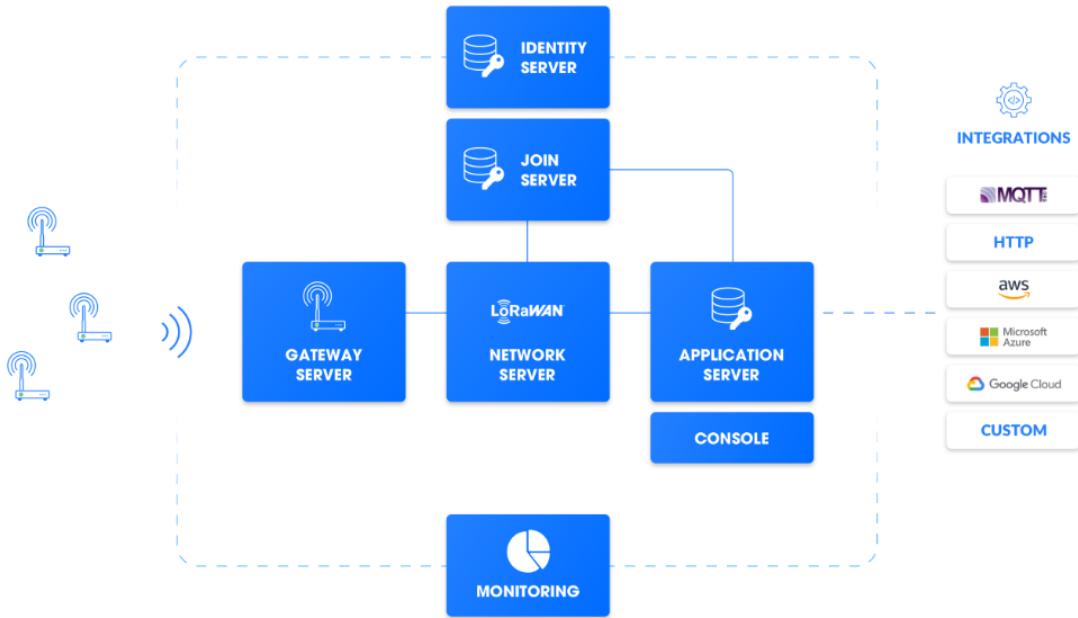
[15]

Τερματικές Συσκευές (End Devices): Πρόκειται για αισθητήρες, μετρητές ή ενεργοποιητές που διαθέτουν πομποδέκτη LoRa. Είναι συνήθως συσκευές χαμηλής ισχύος, συχνά με μπαταρία, που στέλνουν δεδομένα (uplinks) ή λαμβάνουν εντολές (downlinks) ασύρματα. Κάθε τερματική συσκευή επικοινωνεί απευθείας με όποιες πύλες βρίσκονται στην εμβέλειά της, χρησιμοποιώντας την ασύρματη ζεύξη LoRa χωρίς ανάγκη συσχέτισης με συγκεκριμένη πύλη. Η μετάδοση είναι τύπου ALOHA, δηλαδή χωρίς χειραψία, και μπορεί να ακουστεί από πολλές πύλες ταυτόχρονα [15]. Η κάθε συσκευή αναγνωρίζεται στο δίκτυο από μια διεύθυνση συσκευής (DevAddr) μήκους 32 bit, που εκχωρείται κατά την ενεργοποίηση.

Πύλες (Gateways): Οι πύλες λειτουργούν ως διαφανείς γέφυρες που μετατρέπουν τα ασύρματα πακέτα LoRa σε πακέτα IP και αντιστρέφονται [29]. Μια πύλη LoRaWAN περιλαμβάνει δέκτη/πομπό LoRa (συχνά με δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης σε πολλαπλά κανάλια συχνοτήτων) και συνδέεται μέσω δικτύου IP (Ethernet, Wi-Fi, ή κινητή σύνδεση LTE/5G) με τον Network Server. Δεν πραγματοποιεί τοπική αναμετάδοση ή δρομολόγηση, αντίθετα κάθε λαμβανόμενο πλαίσιο LoRa προωθείται αυτούσιο στον Network Server. Σε αντίθεση με τα δίκτυα κινητής, οι πύλες LoRaWAN δεν διαχειρίζονται συσχετίσεις σύνδεσης. Οποιαδήποτε πύλη που λαμβάνει ένα έγκυρο πακέτο από μια συσκευή θα το μεταδώσει προς το κεντρικό δίκτυο. Αυτό επιτρέπει πλεονασμό και ευρεία κάλυψη, καθώς ένα uplink μήνυμα μπορεί να ληφθεί από πολλές πύλες παράλληλα. Ο Network Server φροντίζει να απορρίψει τα διπλότυπα και να κρατήσει μόνο ένα αντίγραφο (συνήθως από την πύλη με το καλύτερο σήμα). Οι πύλες αποτελούν το μοναδικό σημείο εκπομπής downlink μηνυμάτων από το δίκτυο προς τις συσκευές [15]. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε εφαρμογές διαχείρισης δικτύων ενέργειας ή βιομηχανικών εγκαταστάσεων, οι πύλες LoRaWAN μπορούν να τοποθετηθούν π.χ. σε υποσταθμούς ή κέντρα ελέγχου ώστε να συλλέγουν δεδομένα από πολλούς κατανεμημένους αισθητήρες (ενδεικτικά, μετρητές κατανάλωσης) στην περιοχή.

Network Server (Διακομιστής Δικτύου): Ο Network Server (NS) είναι η «καρδιά» του δικτύου LoRaWAN. Πρόκειται για λογισμικό που τρέχει σε κεντρικό διακομιστή (cloud ή on-premise) και επιτελεί μια σειρά από κρίσιμες λειτουργίες δικτύου: i) Επικυρώνει την αυθεντικότητα των συσκευών και την ακεραιότητα των μηνυμάτων, ελέγχοντας τον Message Integrity Code (MIC) κάθε πλαισίου με τα κατάλληλα κλειδιά. ii) Κάνει απαλοιφή διπλοτύπων (deduplication) για uplink πακέτα που έλαβε ταυτόχρονα από πολλαπλές πύλες. iii) Καταχωρεί και διαχειρίζεται τις ενεργές συσκευές και τις διευθύνσεις τους (DevAddr), ελέγχοντας επίσης το εύρος των frame counters για αποτροπή επαναλήψεων (replay attacks). iv) Δρομολογεί τα εξερχόμενα application payloads προς τους αντίστοιχους Application Servers και αντίστροφα, λαμβάνοντας από αυτούς καθοδηγούμενα downlink μηνύματα για τις συσκευές. v) Επιλέγει την πλέον κατάλληλη πύλη για να μεταδώσει ένα downlink προς μια συσκευή (συνήθως την πύλη που είχε το καλύτερο σήμα στο τελευταίο uplink του εν λόγω κόμβου). vi) Αποστέλλει εντολές διαχείρισης σύνδεσης και πόρων, όπως τις εντολές ADR (Adaptive Data Rate) προς τις συσκευές, ρυθμίζοντας το ρυθμό δεδομένων ή την ισχύ εκπομπής τους για βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και της χωρητικότητας του δικτύου. vii) Συντονίζει τις διαδικασίες ενεργοποίησης συσκευών (OTAA), προωθώντας τα σχετικά μηνύματα Join προς τον κατάλληλο Join Server και διασφαλίζοντας την ορθή διανομή των κλειδιών ασφαλείας (βλ. 2.4.4). Συνολικά, ο Network Server υλοποιεί ολόκληρο το πρωτόκολλο LoRaWAN στη μεριά του δικτύου και ενεργεί ως το μόνο σημείο λήψης αποφάσεων για τη ροή

των δεδομένων και τον έλεγχο των συσκευών [15].



Εικόνα 2.11: Αρχιτεκτονική LoRaWAN Network Server.
[30]

Application Server (Διακομιστής Εφαρμογών): Ο Application Server (AS) είναι υπεύθυνος για την παραλαβή και επεξεργασία των δεδομένων εφαρμογής από τις συσκευές, καθώς και για τη δημιουργία τυχόν downlink μηνυμάτων σε επίπεδο εφαρμογής. Στο LoRaWAN η ασφάλεια είναι διαμοιρασμένη, έτσι ο Application Server διατηρεί το κλειδί εφαρμογής (AppSKey) για κάθε συσκευή, προκειμένου να αποκρυπτογραφεί τα δεδομένα που προωθεί ο Network Server. Οποιαδήποτε επιχειρησιακή λογική (π.χ. αποθήκευση μετρήσεων, ανάλυση δεδομένων, εμφάνιση σε πίνακες ελέγχου) υλοποιείται πάνω από τον Application Server. Σημειώνεται ότι μπορεί να υπάρχουν πολλαπλοί Application Servers σε ένα δίκτυο (π.χ. διαφορετικοί οργανισμοί να λαμβάνουν δεδομένα από τις δικές τους συσκευές) και ο Network Server φροντίζει να δρομολογεί σωστά τα πακέτα σε καθέναν από αυτούς (βάσει του DevAddr/εφαρμογής που αντιστοιχεί στη συσκευή) [15].

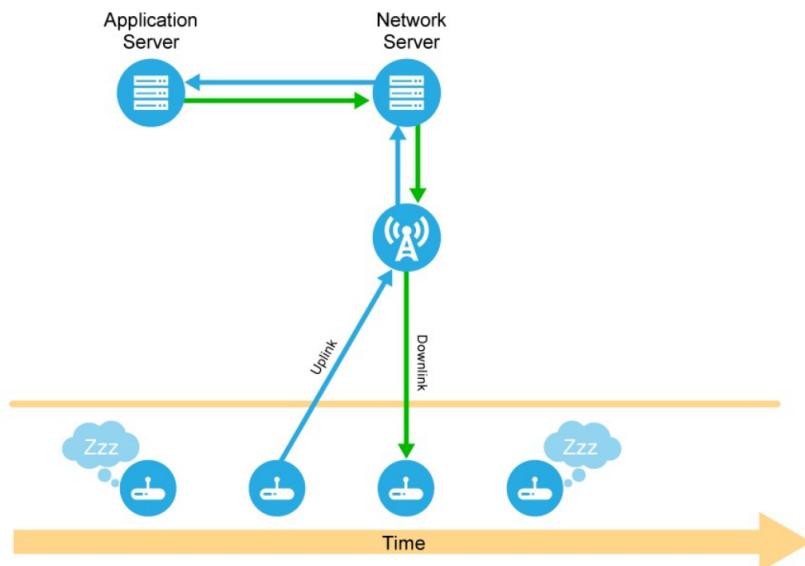
Join Server: Ο Join Server είναι μια επιπρόσθετη οντότητα (διακομιστής) που εμφανίστηκε κυρίως μετά την έκδοση LoRaWAN 1.1. Αναλαμβάνει να διαχειρίζεται την ασφαλή ενεργοποίηση των συσκευών. Συγκεκριμένα, ο Join Server αποθηκεύει τα Root Keys των συσκευών (βασικά κλειδιά εγγραφής, όπως το AppKey/NwkKey) και συμμετέχει στη διαδικασία Over-The-Air Activation (OTAA) υπολογίζοντας και παρέχοντας τα προσωρινά κλειδιά συνεδρίας τόσο στον Network Server όσο και στον Application Server [31]. Με αυτόν τον διαχωρισμό, επιτυγχάνεται απομόνωση των πεδίων ασφαλείας: ο Network Server δεν χρειάζεται να γνωρίζει το κλειδί εφαρμογής της συσκευής, ενώ ο Application Server δεν γνωρίζει τα κλειδιά δικτύου, ενώ αμφότεροι λαμβάνουν μόνο τα κλειδιά συνεδρίας που τους αναλογούν από τον Join Server. Στις πρώτες εκδόσεις (1.0.x) ο ρόλος του Join Server είτε δεν υπήρχε (το AppKey ήταν γνωστό απευθείας στο Network Server) είτε μπορούσε να συμπίπτει με τον Application Server. Στο LoRaWAN 1.1 όμως καθορίζεται ρητά ξεχωριστός Join Server,

βελτιώνοντας την ασφάλεια και υποστηρίζοντας επιπλέον λειτουργίες όπως η περιαγωγή μεταξύ δικτύων [15] [32]. Η διαδικασία OTAA με τη συμμετοχή Join Server περιγράφεται λεπτομερώς στην Ενότητα 2.4.4.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η αρχιτεκτονική end-to-end του LoRaWAN δεν οριθετεί αυστηρά το εμπορικό μοντέλο υλοποίησης, μιας και μπορούν να υπάρξουν δημόσια δίκτυα, ιδιωτικά δίκτυα ή κοινόχρηστες υποδομές. Το πρότυπο εγγυάται τη διαλειτουργικότητα, δηλαδή μια πιστοποιημένη συσκευή LoRaWAN μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε συμβατό δίκτυο. Για παράδειγμα, το The Things Network (TTN) αποτελεί ένα παγκόσμιο δημόσιο/community δίκτυο LoRaWAN, ενώ υπάρχουν πάροχοι που προσφέρουν εμπορικές υποδομές (Orange, LORIOT, κ.ά.), καθώς και δυνατότητα για εντελώς ιδιωτικά δίκτυα (π.χ. εγκατάσταση ενός Network Server και gateways αποκλειστικά για μια βιομηχανική εγκατάσταση ή ένα δίκτυο ενέργειας).

2.4.2 Κλάσεις συσκευών και χρονισμοί επικοινωνίας

To LoRaWAN υποστηρίζει τρεις κλάσεις λειτουργίας τερματικών συσκευών, τις Class A, Class B και Class C, ώστε να εξυπηρετεί διαφορετικές απαιτήσεις εφαρμογών σε όρους κατανάλωσης ισχύος, καθυστέρησης (latency) των downlink μηνυμάτων και λειτοργικότητας. Όλες οι συσκευές οφείλουν να υποστηρίζουν τουλάχιστον την Κλάση A (βασική λειτουργία), ενώ οι B και C είναι προαιρετικές επεκτάσεις. Η επικοινωνία σε όλες τις κλάσεις είναι αμφίδρομη (υπάρχει δυνατότητα για uplink και downlink), με διαφορετικά όμως χρονικά μοτίβα για τα παράθυρα μετάδοσης και λήψης ανά κλάση. Ακολουθεί περιγραφή κάθε κλάσης και των χρονισμών της, με αναφορά στους καθορισμένους χρόνους παραθύρων λήψης.

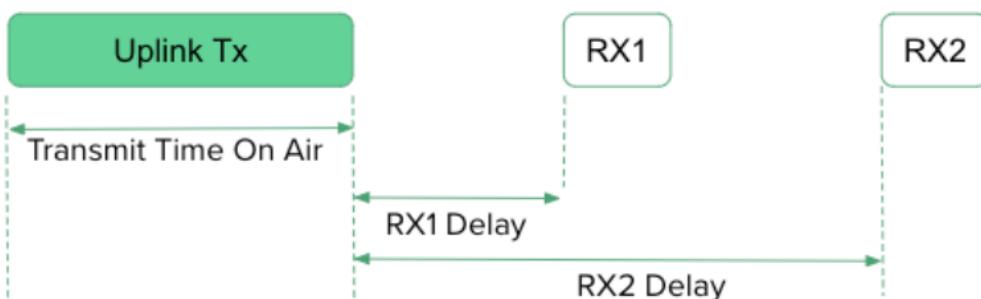


Εικόνα 2.12: Ποιή Uplink και Downlink μηνυμάτων στο Πρωτόκολλο LoRaWAN.
[33]

Αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης ενός uplink, δεν μπορούν οι συσκευές να λάβουν downlink. Η λήψη τους πραγματοποιείται μόνο στα καθορισμένα παράθυρα, εκτός αν η συσκευή ανήκει στην Class C και βρίσκεται σε συνεχή λήψη (listen mode).

Class A - Υποχρεωτική (βασική) κλάση, ελάχιστης ισχύος: Στην Κλάση A ανήκουν όλες οι συσκευές LoRaWAN εξ ορισμού. Πρόκειται για το πιο αποδοτικό ενεργειακά² «modus operandi», όπου η συσκευή μεταβαίνει στο δίκτυο μόνο όταν έχει δεδομένα να στείλει. Κάθε συσκευή Class A μπορεί να εκπέμψει ένα uplink ανά πάσα στιγμή, αναλόγως την εφαρμογή της (asynchronous uplink), ξεκινώντας έτσι την επικοινωνία. Αφότου στείλει ένα uplink, η συσκευή ανοίγει δύο σύντομα παράθυρα λήψης αναμένοντας κάποιο downlink από τον διακομιστή (Network Server). Το πρώτο παράθυρο (RX1) ξεκινά, τυπικά, περίπου 1 δευτερόλεπτο μετά το τέλος της μετάδοσης, ενώ το δεύτερο (RX2) ακολουθεί περίπου 1 δευτερόλεπτο αργότερα από το πρώτο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου (βλ. Εικόνα 2.13). Αν ο Network Server έχει έτοιμο ένα downlink για τη συσκευή, μπορεί να το στείλει στο RX1 ή (αν χαθεί το πρώτο) στο RX2. Εάν δεν σταλεί κανένα μήνυμα σε κανένα παράθυρο, η συσκευή επιστρέφει σε κατάσταση «ύπνου» μέχρι το επόμενο uplink. Να σημειωθεί ότι τα παράθυρα RX1/RX2 είναι πολύ σύντομα (της τάξης μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων ms) και προκαθορισμένα, ώστε να ελαχιστοποιείται η ενεργοβόρος κατάσταση λήψης του ραδιοφώνου. Η Class A ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας, μιας και η συσκευή κοιμάται το μέγιστο δυνατό διάστημα και «ξυπνά» μόνο για μετάδοση και λήψη. Η καθυστέρηση παράδοσης ενός downlink, όμως, μπορεί να είναι μεγάλη και μη προσδιορίσιμη, καθώς το δίκτυο οφείλει να περιμένει μέχρι το επόμενο uplink της συσκευής για να της στείλει ξανά δεδομένα (αφού μόνο τότε ανοίγουν τα RX παράθυρα).

Συνεπώς η Class A είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου τα downlinks είναι σπάνια ή όχι επείγοντα και όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι υψηλής σημασίας (επιτυγχάνεται διάρκεια πολλών ετών). Τυπικά παραδείγματα Class A συσκευών είναι οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες, οι ανιχνευτές καπνού, οι ιχνηλάτες ζώων ή αντικειμένων κ.ά.



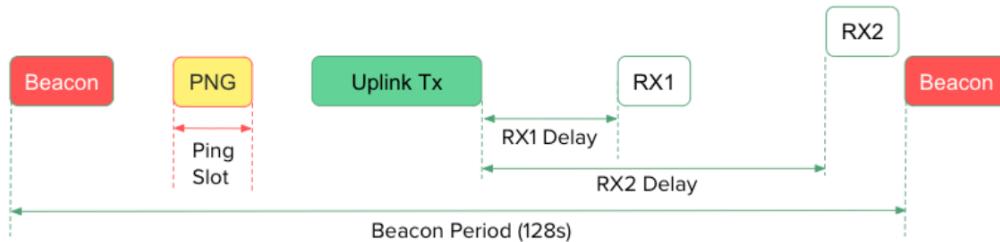
Εικόνα 2.13: Ροή επικοινωνίας κλάσης A.

Class B - Προγραμματισμένα παράθυρα λήψης με φάρο συγχρονισμού: Η Κλάση B επεκτείνει τη συμπεριφορά της κλάσης A, εισάγοντας επιπλέον περιοδικά καθορισμένα παράθυρα λήψης downlink, ανεξάρτητα αν έχει σταλθεί προηγουμένως κάποιο uplink. Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο μεταδίδει ειδικά σήματα συγχρονισμού, τα Beacons (φάροι), σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. κάθε 128 δευτερόλεπτα). Οι συσκευές Class B λαμβάνουν αυτούς τους φάρους και συγχρονίζουν ένα εσωτερικό ρολόι. Έτσι γνωρίζουν πότε ακριβώς πρέπει να «αφουγκραστούν» για τυχόν downlink, ανοίγοντας σύντομα παράθυρα λήψης, τα

²Το «modus operandi» είναι μια λατινική φράση που σημαίνει ουσιαστικά «τρόπος λειτουργίας».

ping slots, σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα (π.χ. μερικά δευτερόλεπτα ή λεπτά μεταξύ τους). Ο Network Server, γνωρίζοντας το πρόγραμμα των ping slots για κάθε Class B συσκευή (καθώς και ένα «bitmask» χρονικού διαμοιρασμού που δηλώνει πόσο συχνά ανοίγουν τα slot), μπορεί να στείλει downlink με καθορισμένη καθυστέρηση που συμπίπτει με κάποιο από αυτά τα slot. Έτσι εξασφαλίζεται πεπερασμένη και ντετερμινιστική καθυστέρηση παράδοσης downlink (π.χ. μια συσκευή μπορεί να λαμβάνει ως εγγύηση ότι θα ακούει κάθε 32 δευτερόλεπτα, οπότε ο χρόνος απόφασης για downlink είναι το πολύ 32 δευτερόλεπτα.) Φυσικά, αυτή η βελτίωση συνεπάγεται ελαφρώς υψηλότερη κατανάλωση, αφού η συσκευή πρέπει να διατηρεί ενεργό τον δέκτη της για τα ping slots και να λαμβάνει τους περιοδικούς φάρους. Παρ' όλα αυτά, το επιπλέον φορτίο είναι σχετικά μικρό (ο χρόνος λήψης είναι σύντομος και ο φάρος μεταδίδεται σε αραιή συχνότητα), επιτρέποντας στις Class B συσκευές μπορύν να τροφοδοτηθούν μόνο με μπαταρία.

Η Class B είναι κατάλληλη όταν απαιτείται εγγυημένος χρόνος απόκρισης σε κλίμακα δευτερολέπτων ή δεκάδων δευτερολέπτων για downlink μηνύματα. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν ασύρματοι μετρητές ωφέλιμων υπηρεσιών (ηλεκτρικού, ύδρευσης κ.λπ.), που ανήκουν στην κλάση B, όπου οι κόμβοι παραμένουν κυρίως σε ύπνο αλλά συγχρονίζονται με beacons και ανοίγουν προγραμματισμένα ping slots. Έτσι, εντολές όπως αλλαγές ρυθμίσεων ή firmware updates μπορούν να παραδοθούν μέσα σε προκαθορισμένο χρόνο (ο οποίος καθορίζεται από την περίοδο του beacon και τη συχνότητα των ping slots) και όχι απλώς όταν τύχει το επόμενο uplink όπως στην Class A. Σημειώνεται, επίσης, ότι οι συσκευές Class B διατηρούν πλήρως και τη συμπεριφορά της Class A, δηλαδή κάθε uplink τους ακολουθείται από τα παράθυρα RX1/RX2, ώστε το δίκτυο να μπορεί να απαντήσει άμεσα χωρίς να αναμένει το επόμενο προγραμματισμένο slot.



Εικόνα 2.14: Ροή επικοινωνίας κλάσης B.

Class C - Συνεχής λήψη (χαμηλή λανθάνουσα, υψηλότερη ισχύς): Η Κλάση C διευρύνει την Class A προς την αντίθετη κατεύθυνση. Πιο ειδικά, οι συσκευές βρίσκονται σχεδόν συνεχώς σε κατάσταση ακρόασης για downlink, εξασφαλίζοντας ελάχιστη καθυστέρηση στην παράδοση εντολών. Συγκεκριμένα, μια συσκευή Class C ανοίγει το δεύτερο παράθυρο λήψης (RX2) διαρκώς, αμέσως μετά το τέλος του σύντομου RX1 και μέχρι την επόμενη μετάδοσή της. Έτσι, πρακτικά, εκτός από τις στιγμές που εκπέμπει η ίδια (όπου προφανώς δεν μπορεί ταυτόχρονα να λάβει), ο δέκτης της παραμένει μονίμως ενεργός. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο Network Server μπορεί να στείλει ένα downlink ανά πάσα στιγμή σε μια Class C συσκευή (δεν χρειάζεται να περιμένει uplink ή προκαθορισμένο slot), οπότε η καθυστέρηση είναι μηδενική από την οπτική του προγραμματισμού (περιορίζεται μόνο από τον χρόνο διάδοσης και προετοιμασίας του πακέτου).

Αυτή η λειτουργία ενδέικνυται για εφαρμογές που απαιτούν άμεση αντίδραση ή συνεχή έλεγχο των συσκευών μέσω downlink, π.χ. απομακρυσμένος έλεγχος βιομηχανικού εξοπλισμού, έξυπνος φωτισμός δρόμων (που μπορεί να χρειάζεται εντολές on/off με μικρή καθυστέρηση), ή ακόμη και μετρητές ρεύματος που είναι δικτυωμένοι στο ρεύμα (οπότε δεν έχουν περιορισμό μπαταρίας και μπορούν να ακούν συνεχώς για να λαμβάνουν ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο). Το μειονέκτημα φυσικά είναι η αυξημένη κατανάλωση. Μία Class C συσκευή πρέπει να τροφοδοτεί τον δέκτη της συνεχώς, κάτι που τυπικά καταναλώνει τάξης δεκάδων mW συνεχώς, καθιστώντας την ακατάλληλη για μακροχρόνια λειτουργία με χρήση μπαταρίας. Ως εκ τούτου, σχεδόν όλες οι Class C συσκευές είναι συνδεδεμένες σε μόνιμη παροχή ρεύματος ή χρησιμοποιούνται μόνο περιστασιακά ως Class C (το πρότυπο επιτρέπει δυναμική εναλλαγή κλάσης, π.χ. μια συσκευή μπορεί προσωρινά να περάσει σε Class C όταν έχει πρόσβαση σε εξωτερική τροφοδοσία για μια ενημέρωση λογισμικού, και μετά να επιστρέψει σε Class A). Σχηματικά, όπως δείχνει η Εικόνα 2.15, το RX2 παράθυρο παραμένει ανοιχτό επ' αόριστον μέχρι να χρειαστεί η ίδια η συσκευή να στείλει νέο uplink, οπότε διακόπτει στιγμιαία τη λήψη για να εκπέμψει (half-duplex λειτουργία).



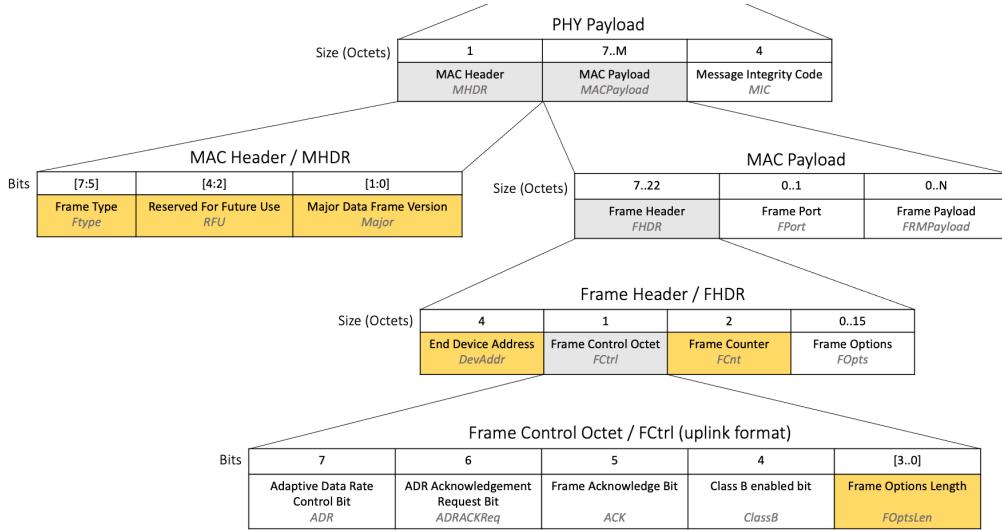
Εικόνα 2.15: Ροή επικοινωνίας κλάσης C.

Συνοψίζοντας, οι τρεις κλάσεις του LoRaWAN προσφέρουν ένα φάσμα επιλογών μεταξύ ελάχιστης ενεργειακής κατανάλωσης (Class A) και ελάχιστου χρόνου απόκρισης (Class C), με έναν ενδιαφέροντα ενδιάμεσο συμβιθασμό, την (Class B) για εφαρμογές όπου απαιτείται περιοδική επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης. Όλοι οι μηχανισμοί αυτοί υλοποιούνται σε επίπεδο MAC, διάφανη προς την εφαρμογή, επιτρέποντας στο ίδιο δίκτυο να εξυπηρετεί ποικίλες συσκευές. Σημειώνεται επίσης ότι το LoRaWAN υποστηρίζει και ομαδική επικοινωνία multicast για downlink σε πολλές συσκευές ταυτόχρονα (π.χ. για μαζική αναβάθμιση firmware). Οι συσκευές μπορούν να οριστούν σε γκρουπς και τα downlink πολυεκπομπής να παραδίδονται κατά προτίμηση σε Class B ή Class C συσκευές για να εξασφαλιστεί η λήψη τους.

2.4.3 Τύποι μηνυμάτων και δομή πλαισίου LoRaWAN

Η επικοινωνία στο LoRaWAN γίνεται μέσω δομών δεδομένων που ονομάζονται PHYPayloads, δηλαδή τα πλήρη πακέτα σε επίπεδο φυσικού μέσου που μεταδίδονται με διαμόρφωση LoRa. Κάθε PHYPayload περιλαμβάνει τρία βασικά μέρη: το **MHDR** (Message Header) στην αρχή, το **MACPayload** στη συνέχεια και έναν **MIC** (Message Integrity Code) στο τέλος για έλεγχο ακεραιότητας και αυθεντικότητας. Στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζεται σχηματικά η

γενική μορφή ενός LoRaWAN μηνύματος και τα πεδία του και στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυσή τους [15] [34].



Εικόνα 2.16: Δομή πακέτου LoRaWAN.

[35]

MHDR (MAC Header): Είναι η επικεφαλίδα του επιπέδου MAC, μεγέθους 1 byte, που τοποθετείται στην αρχή κάθε PHYPayload. Περιέχει, μεταξύ άλλων, τον τύπο του πλαισίου (**FType**), το οποίο έχει μήκος 3 bit και καθορίζει την κατηγορία/τύπο MAC του πλαισίου. Υπάρχουν 8 τύποι MAC:

- **Join-Request:** Uplink από τη συσκευή για ένταξη μέσω OTAA. Μεταφέρει JoinEUI/AppEUI, DevEUI, DevNonce ώστε ο (Join) Server να παραγάγει κλειδιά συνεδρίας.
- **Join-Accept:** Downlink απάντηση ένταξης. Περιέχει DevAddr, DLSettings, RxDelay και προαιρετικά CFList. Κρυπτογραφημένο και με MIC.
- **Unconfirmed Data Up:** Uplink δεδομένων χωρίς απαίτηση επιβεβαίωσης (ACK=0).
- **Unconfirmed Data Down:** Downlink δεδομένων χωρίς απαίτηση επιβεβαίωσης.
- **Confirmed Data Up:** Uplink που απαιτεί επιβεβαίωση (ACK από το δίκτυο). Αν δεν ληφθεί ACK στα RX1/RX2 παράθυρα, επιτρέπονται επαναμεταδόσεις.
- **Confirmed Data Down:** Downlink που απαιτεί επιβεβαίωση από τη συσκευή (το ACK επιστρέφεται στο επόμενο uplink μέσω FCtrl.ACK).
- **Rejoin-Request:** (LoRaWAN 1.1) μήνυμα επανένταξης για ανανέωση κλειδιών/επανασυγχρονισμό μετρητών. Υπάρχουν παραλλαγές τύπων (0, 1, 2) για διαφορετικά σενάρια.
- **Proprietary:** Ιδιοταγές πλαίσιο εκτός LoRaWAN MAC (πάνω από LoRa PHY). Χρησιμοποιείται για ειδικές/μη τυπικές εφαρμογές και αγνοείται από τον LoRaWAN Network Server.

Έτσι, από το MHDR μπορεί ο δέκτης να αντιληφθεί εάν, π.χ., το εισερχόμενο πλαίσιο είναι ένα αίτημα σύνδεσης (Join-Request) ή ένα απλό πακέτο δεδομένων. Επιπλέον, περιέχει 2 bit **RFU** (reserved for future use) και ένα πεδίο Major (2 bit) που εντοπίζει τη γενιά πρωτοκόλλου (π.χ. Ο για LoRaWAN v1).

MACPayload: Ακολουθεί το MHDR και περιέχει τα κύρια δεδομένα του MAC. Για τα data frames (πλαίσια δεδομένων uplink ή downlink), το MACPayload αποτελείται από τα εξής μέρη: την **FHDR** (Frame Header), ένα πιθανό πεδίο **FPort**, και το πραγματικό **FRMPayload** που μπορεί να είναι κρυπτογραφημένο.

FHDR (Frame Header): Είναι η κεφαλίδα κάθε πλαισίου δεδομένων, μεγέθους 7 έως 23 byte, και περιλαμβάνει τη διεύθυνση συσκευής και μετρητές. Συγκεκριμένα περιέχει τη **DevAddr** (32 bit διεύθυνση του node), το **FCtrl** (1 byte με διάφορα control bits), το **FCnt** (Frame Counter, 16 bit) και τυχόν **FOpts** (έως 15 byte). Τα bits του FCtrl έχουν διαφορετική σημασία ανάλογα αν το μήνυμα είναι uplink ή downlink: περιλαμβάνουν το ADR flag, ADR ACK request, bit επιβεβαίωσης ACK, κ.ά., καθώς και το μήκος του πεδίου FOpts. Ο μετρητής FCnt αυξάνεται σε κάθε πλαισίο (ζεχωριστά για uplink και downlink) και χρησιμοποιείται τόσο για anti-replay έλεγχο όσο και στον υπολογισμό του MIC. Το πεδίο FOpts είναι προαιρετικό και μεταφέρει MAC commands ενσωματωμένες στην επικεφαλίδα (π.χ. εντολές LinkADR, DutyCycle, κ.ά.) και περιέχει διαδοχικά ζεύγη εντολών μορφής CID, Args, όπου CID είναι 1 byte κωδικός εντολής και Args πιθανά ορίσματα.

FPort: Εάν μετά την FHDR υπάρχει επιπλέον φορτίο δεδομένων, παρεμβάλλεται ένα 1 byte πεδίο FPort που δηλώνει σε ποια θύρα εφαρμογής προορίζεται το FRMPayload. Τιμή $FPort = 0$ υποδηλώνει ότι το FRMPayload περιέχει μόνο MAC commands (άρα στην ουσία είναι πλαίσιο διαχείρισης και όχι δεδομένων εφαρμογής). Οι τιμές 1-223 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές από τον χρήστη, η τιμή 224 έχει δεσμευτεί για πειραματικά MAC test frames, ενώ η τιμή 255 είναι RFU (μη χρησιμοποιούμενη).

FRMPayload: Είναι το πραγματικό ωφέλιμο φορτίο δεδομένων του πλαισίου, μεταβλητού μήκους (έως 242 byte στο EU868). Μπορεί να είναι κενό ή να περιέχει είτε application payload είτε MAC commands. Εάν $FPort = 0$, τότε το FRMPayload περιέχει MAC commands (π.χ. πολλές εντολές μαζί) αντί για δεδομένα εφαρμογής. Διαφορετικά ($FPort \geq 1$), το FRMPayload αντιμετωπίζεται ως δεδομένα προς/από την εφαρμογή και κρυπτογραφείται με το κλειδί εφαρμογής (AppSKey). Στην περίπτωση που έχουμε MAC commands, αυτά κρυπτογραφούνται με το κλειδί δικτύου (NwkSKey ή στο v1.1 το NwkSEncKey). Όλα τα δεδομένα στο FRMPayload κρυπτογραφούνται για παροχή εμπιστευτικότητας. Η κρυπτογράφηση γίνεται με AES-128 σε λειτουργία CTR (counter mode) χρησιμοποιώντας κατάλληλο κλειδί ανάλογα με την περίπτωση, και τον μετρητή πλαισίου FCnt ως μέρος του vector. Η διαδικασία κρυπτογράφησης εγγυάται ότι μόνο ο εξουσιοδοτημένος διακομιστής (Network ή Application αντίστοιχα) μπορεί να αποκωδικοποιήσει το περιεχόμενο.

MIC (Message Integrity Code): Στο τέλος κάθε PHYPayload προσαρτάται ένας κώδικας ακεραιότητας MIC μήκους 4 byte (32 bit). Ο MIC υπολογίζεται ως συνάρτηση MAC (AES-CMAC) πάνω σε όλα τα προηγούμενα πεδία του μηνύματος (MHDR + MACPayload), καθώς και μερικά επιπλέον σταθερά βψτες που περιλαμβάνουν την κατεύθυνση (uplink/downlink) και τον αντίστοιχο frame counter. Το κλειδί που χρησιμοποιείται για τον MIC διαφέρει ανάλογα με τον τύπο μηνύματος:

Για μηνύματα Join-Request / Join-Accept, ο MIC υπολογίζεται με χρήση του AppKey (ή στο LoRaWAN 1.1 με το NwkKey για το Join-Request).

Για τα μηνύματα Data (uplink ή downlink), ο MIC υπολογίζεται με χρήση του NwkSKey (στο LoRaWAN 1.0) ή με συνδυασμό FNwkSIntKey και SNwkSIntKey (LoRaWAN 1.1) (λεπτομέρειες δίνονται στην επόμενη ενότητα ασφαλείας). Στην ουσία, στο LoRaWAN 1.0 ο ίδιος NwkSKey χρησιμοποιείται τόσο για την επικύρωση των uplink όσο και downlink δεδομένων, ενώ στην έκδοση 1.1 χωρίζεται σε δύο κλειδιά ώστε να μπορούν να συμμετέχουν πολλαπλοί διακομιστές (π.χ. roaming με serving vs home NS) χωρίς να εκτίθεται πλήρως το κλειδί ακεραιότητας. Ο σκοπός του MIC είναι να παρέχει έλεγχο αυθεντικότητας και ακεραιότητας, δηλαδή ο Network Server επαληθεύει ότι μόνο μια συσκευή με γνώση του κατάλληλου κλειδιού θα μπορούσε να έχει δημιουργήσει το εν λόγω πλαίσιο. Αν ο MIC δεν επαληθεύεται, το μήνυμα απορρίπτεται σιωπηλά. Είναι σημαντικό ότι η επαλήθευση MIC γίνεται πριν την αποκρυπτογράφηση των δεδομένων, οπότε το δίκτυο φιλτράρει αποτελεσματικά ψευδή ή αλλοιωμένα πακέτα.

MAC Commands: Όπως αναφέρθηκε, εντολές διαχείρισης MAC μπορούν να μεταφερθούν είτε στο πεδίο FOpts της επικεφαλίδας (μη κρυπτογραφημένες στο LoRaWAN 1.0.x, κρυπτογραφημένες με NwkSEncKey από LoRaWAN 1.1 και μετά) είτε εντός του κρυπτογραφημένου FRMPayload (με FPort = 0). Μερικές σημαντικές εντολές MAC φαίνονται στον Πίνακα 2.5.

Όλες οι MAC εντολές είναι ορισμένες στο πρότυπο με συγκεκριμένους κωδικούς (IDs) και μορφή. Παρέχουν το αναγκαίο εργαλείο στον Network Server για να διαχειρίζεται αποδοτικά το δίκτυο. Για παράδειγμα, μέσω των LinkADR μπορεί να ρυθμίσει μια απομακρυσμένη συσκευή ώστε να χρησιμοποιεί υψηλότερο data rate (μικρότερο SF) αν έχει καλή σύνδεση, μειώνοντας έτσι τον χρόνο στον αέρα και την κατανάλωση (βλέπε επόμενη ενότητα για ADR).

Συνολικά, η μορφή του πλαισίου LoRaWAN έχει προβλεφθεί ώστε να μεταφέρει με αποδοτικό τρόπο τόσο τα δεδομένα εφαρμογής όσο και τα απαραίτητα σήματα ελέγχου, μέσα σε ένα πολύ μικρό μήκος payload (συνήθως λίγα byte). Η δομή είναι ευέλικτη, δηλαδή αν δεν υπάρχουν MAC εντολές, το FOpts μπορεί να παραληφθεί ώστε να μεγιστοποιηθεί ο διαθέσιμος χώρος για data. Επίσης, το πρωτόκολλο ορίζει ότι τα πεδία διευθύνσεων και μετρητών είναι διαχειρίσιμα από τον NS, ενώ η εφαρμογή βλέπει μόνο το αποκρυπτογραφημένο περιεχόμενο (δεν ασχολείται με DevAddr ή MIC). Η ενσωματωμένη ασφάλεια στο επίπεδο αυτού του πλαισίου (κρυπτογράφηση FRMPayload, MIC επί όλων) είναι καθοριστική για να αναπτυχθούν ευρύτατα δίκτυα σε μη προστατευμένες μπάντες συχνοτήτων χωρίς να υπόκεινται σε επιθέσεις υποκλοπής ή τροποποίησης.

MAC Command	Σκοπός	Κατεύθυνση	Μεταφορά
LinkCheck Req/Ans	Έλεγχος συνδεσιμότητας (# πυλών, SNR margin)	Uplink: Req από συσκευή Downlink: Ans από NS	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
LinkADR Req/Ans	Ρύθμιση DR/TXPower/NbTrans, ενεργοποίηση ADR	Downlink: Req από NS Uplink: Ans από συσκευή	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
DutyCycleReq	Θέτει μέγιστο duty cycle για τη συσκευή	Downlink μόνο (από NS)	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
DevStatus Req/Ans	Κατάσταση συσκευής: μπαταρία και SNR margin	Downlink: Req από NS Uplink: Ans από συσκευή	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
NewChannel Req/Ans	Προσθήκη/τροποποίηση καναλιού (Freq, DRRange)	Downlink: Req από NS Uplink: Ans από συσκευή	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
DlChannel Req/Ans	Ορισμός downlink συχνότητας καναλιού	Downlink: Req από NS Uplink: Ans από συσκευή	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
RXParamSetup Req/Ans	Ρυθμίσεις RX1DRoffset, RX2DR, RX2Freq	Downlink: Req από NS Uplink: Ans από συσκευή	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
RXTimingSetupReq	Ρύθμιση καθυστέρησης RX1	Downlink μόνο (από NS)	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
Rekey Ind/Conf	Ανανέωση κλειδιών συνεδρίας (LoRaWAN 1.1)	Downlink: Ind από NS Uplink: Conf από συσκευή	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0
Reset Ind/Conf	Δήλωση reset συσκευής (LoRaWAN 1.1)	Uplink: Ind από συσκευή Downlink: Conf από NS	FOpts ή FRMPayload με FPort = 0

Πίνακας 2.5: Συνοπτικός πίνακας βασικών MAC εντολών LoRaWAN.

2.4.4 Ενεργοποίηση συσκευών και Ασφάλεια (OTAA vs ABP)

Ενεργοποίηση (Activation)

Η διαδικασία ένταξης μιας συσκευής σε δίκτυο LoRaWAN ονομάζεται Activation. Υπάρχουν δύο μέθοδοι ενεργοποίησης: **Over-The-Air Activation (OTAA)** και **Activation By Personalization (ABP)**. Στην OTAA η συσκευή πραγματοποιεί δυναμική σύνδεση στο δίκτυο μέσω ενός τελετουργικού ανταλλαγής μηνυμάτων (Join procedure) κατά την οποία λαμβάνει μια προσωρινή διεύθυνση και δημιουργεί κλειδιά συνεδρίας μαζί με το δίκτυο. Η ABP, αντιθέτως, βασίζεται σε στατικά προκαθορισμένες παραμέτρους, δηλαδή η συσκευή είναι προ-προγραμματισμένη με διεύθυνση και κλειδιά και μπορεί να επικοινωνεί αμέσως χωρίς να κάνει join-handshake. Η OTAA θεωρείται ασφαλέστερη και συνιστώμενη μέθοδος, καθώς παράγει ξεχωριστά κλειδιά για κάθε συνεδρία και επιτρέπει ευκολότερη μεταφορά της

συσκευής μεταξύ διαφορετικών δικτύων, ενώ η ABP ενέχει κινδύνους (στατικά κλειδιά που μπορεί να αποκαλυφθούν) και έλλειψη ευελιξίας (η συσκευή «κλειδώνεται» σε συγκεκριμένο δίκτυο και η αλλαγή παρόχου απαιτεί χειροκίνητη αναδιαμόρφωση) [15] [36].

Over-The-Air Activation (OTAA).

Πριν ξεκινήσει η OTAA, σε κάθε συσκευή είναι φορτωμένα ορισμένα αναγνωριστικά και κλειδιά: συγκεκριμένα ένα **DevEUI** (παγκόσμια μοναδικό 64-bit αναγνωριστικό συσκευής), ένα **AppEUI/JoinEUI** (64-bit αναγνωριστικό της εφαρμογής ή του Join Server που θα την χειριστεί) και ένα μυστικό κλειδί **AppKey** (128-bit AES κλειδί, γνωστό μόνο στη συσκευή και τον αντίστοιχο διακομιστή, είτε Network Server παλαιότερα, είτε Join Server στα νεότερα δίκτυα).

Η διαδικασία OTAA στα LoRaWAN 1.0.x και 1.1.x περιλαμβάνει δύο μήνυμα MAC:

- **Join-Request (uplink):** Η συσκευή στέλνει ένα αίτημα σύνδεσης. Το μήνυμα αυτό περιέχει τα πεδία **AppEUI**, **DevEUI** και ένα **DevNonce**. Το DevNonce είναι μια τυχαία δυαδική τιμή 2 byte που η συσκευή επιλέγει κάθε φορά που κάνει join. Ο Network/Join Server αποθηκεύει το τελευταίο DevNonce που έχει δει από τη συγκεκριμένη συσκευή ώστε να αποτρέψει επιθέσεις επανάληψης (αν λάβει ξανά Join-Request με ίδιο DevNonce, το απορρίπτει). Το Join-Request δεν είναι κρυπτογραφημένο (μεταδίδεται σε ένα από τα ειδικά κανάλια join της εκάστοτε περιοχής, π.χ. 868.10, 868.30, 868.50 MHz στην Ευρώπη), αλλά προστατεύεται με MIC που υπολογίζεται με το AppKey [15] [36].

8 bytes	8 bytes	2 bytes
AppEUI	DevEUI	DevNonce

Πίνακας 2.6: Πεδία Join-Request στο LoRaWAN 1.0.

8 bytes	8 bytes	2 bytes
JoinEUI	DevEUI	DevNonce

Πίνακας 2.7: Πεδία Join-Request στο LoRaWAN 1.1.

- **Join-Accept (downlink):** Αν το δίκτυο αποδεχτεί την αίτηση, αποστέλλει ένα μήνυμα Join-Accept. Στις εκδόσεις 1.0.x αυτό το μήνυμα παράγεται από τον Network Server (ή Application Server) ενώ στις 1.1+ παράγεται από τον Join Server. Το Join-Accept περιλαμβάνει κρίσιμες πληροφορίες: ένα **AppNonce** (24-bit τυχαίο που παράγει το δίκτυο για τη συσκευή), το **NetID** του δικτύου, τη νέα **DevAddr** που εκχωρείται στη συσκευή, το **DLSsettings** (ρυθμίσεις για τα παράθυρα λήψης, π.χ. αρχικό κανάλι RX2), το **RxDelay** (καθυστέρηση RX1) και πιθανώς ένα **CFLList** (λίστα επιπλέον καναλιών που θα χρησιμοποιεί η συσκευή).

3 bytes	3 bytes	4 bytes	1 byte	1 byte	16 bytes (optional)
AppNonce	NetID	DevAddr	DLSettings	RXDelay	CFList

Πίνακας 2.8: Πεδία Join-Accept στο LoRaWAN 1.0.

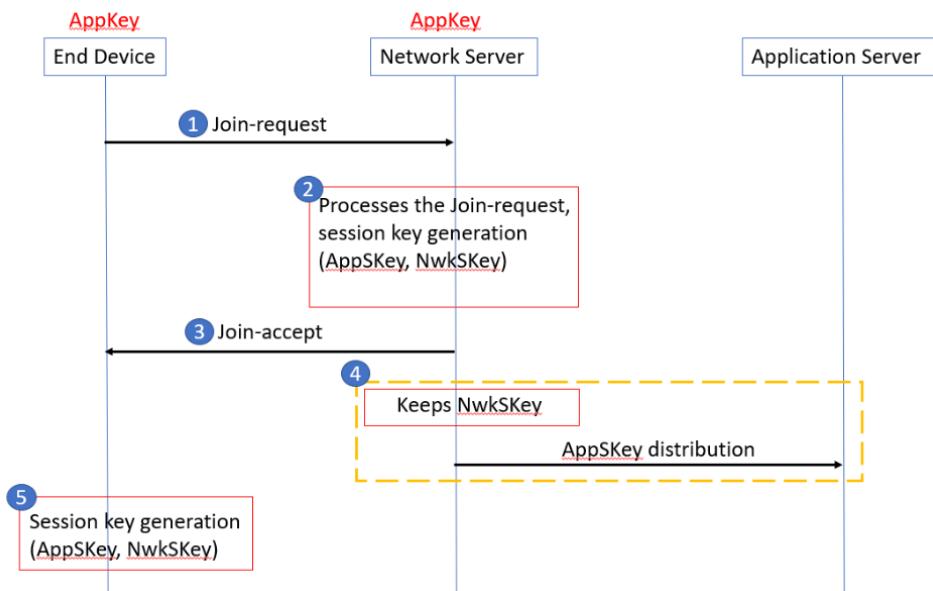
3 bytes	3 bytes	4 bytes	1 byte	1 byte	16 bytes (optional)
JoinNonce	NetID	DevAddr	DLSettings	RXDelay	CFList

Πίνακας 2.9: Πεδία Join-Accept στο LoRaWAN 1.1.

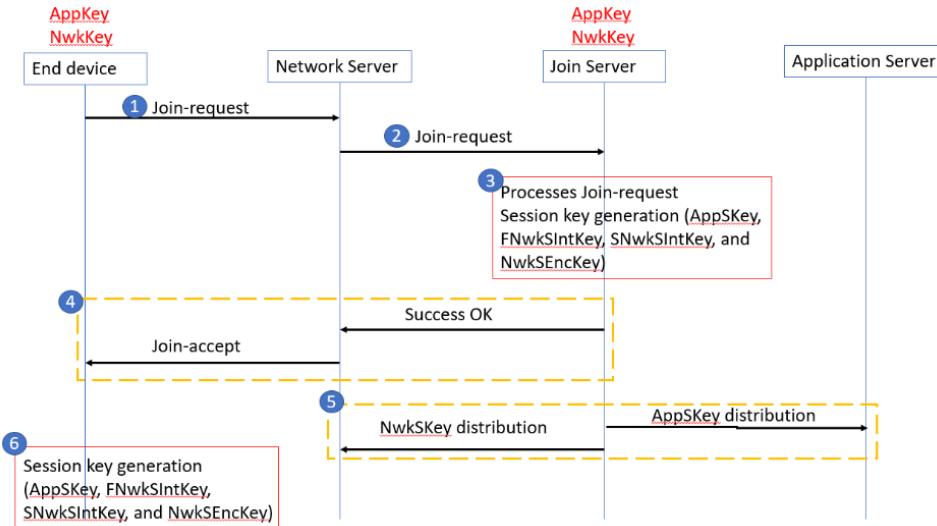
Το Join-Accept κρυπτογραφείται πριν σταλεί. Συγκεκριμένα, στην έκδοση 1.0 με το AppKey, ενώ στην 1.1 με ξεχωριστό κλειδί ανάλογα την περίπτωση (NwkKey αν προκλήθηκε από Join-Request, ή JSEncKey αν ήταν από Rejoin). Φέρει επίσης MIC (4-byte) που υπολογίζεται με χρήση του AppKey ή του JSIntKey αντίστοιχα. Όταν η συσκευή λάβει το Join-Accept, το αποκρυπτογραφεί (με χρήση του δικού της AppKey) και ελέγχει τον MIC και την τιμή του AppNonce (ότι είναι νέα, για αποτροπή παλιού accept). Εφόσον όλα είναι έγκυρα, προχωρά στον υπολογισμό των κλειδιών συνεδρίας. Στο LoRaWAN 1.0 χρησιμοποιείται το AppKey για να παραχθούν δύο 128-bit κλειδιά, το NwkSKey (Network Session Key) και το AppSKey (Application Session Key). Οι ακριβείς τύποι δίνονται στο πρότυπο:

$$NwkSKey = \text{AES}_{128}(\text{AppKey}, 0x01 \| \text{AppNonce} \| \text{NetID} \| \text{DevNonce}) ,$$

$$\text{AppSKey} = \text{AES}_{128}(\text{AppKey}, 0x02 \| \text{AppNonce} \| \text{NetID} \| \text{DevNonce}) .$$



Εικόνα 2.17: Ροή μηνυμάτων για ενεργοποίηση OTAA στο LoRaWAN 1.0.



Εικόνα 2.18: Ροή μηνυμάτων για ενεργοποίηση OTAA στο LoRaWAN 1.1.

[15]

Η συσκευή και ο Network Server έτοι μοιράζονται τώρα το ίδιο NwkSKey, και η συσκευή με τον Application Server το ίδιο AppSKey (στην πράξη ο NS κρατά το NwkSKey και μεταβιθάζει το AppSKey στον Application Server). Από τη στιγμή αυτή, όλες οι επικοινωνίες θα χρησιμοποιούν αυτά τα κλειδιά. Ο NS θα χρησιμοποιεί το NwkSKey για να ελέγχει/υπογράφει τα επόμενα μηνύματα και ο AS το AppSKey για να αποκρυπτογραφεί τα δεδομένα. Η συσκευή επίσης μηδενίζει τους frame counters $FCntUp = 0$, $FCntDown = 0$ και ξεκινά κανονική ανταλλαγή data frames. Στο LoRaWAN 1.1 η διαδικασία έχει ορισμένες τροποποιήσεις που ενισχύουν την ασφάλεια:

- Χρησιμοποιούνται δύο διακριτά Root Keys: το AppKey (για την εφαρμογή) και ένα NwkKey (για το δίκτυο). Ο Join Server (ή το δίκτυο) έχει και τα δύο, αλλά τα διαμοιράζει ξεχωριστά.
- To Join-Request προστατεύεται με MIC υπολογισμένο με το NwkKey αντί AppKey, ώστε μόνο ο Join Server (που έχει το NwkKey) να το επαληθεύσει.
- To Join-Accept κρυπτογραφείται με NwkKey (αν ανταποκρίνεται σε Join-Request) ή JSEncKey (αν ανταποκρίνεται σε Rejoin).
- Παράγονται τέσσερα κλειδιά συνεδρίας: το AppSKey (για εφαρμογή) που πλέον προκύπτει μόνο από το AppKey, και τρία κλειδιά δικτύου από το NwkKey: το FNwkSIntKey (Forwarding NS Integrity), SNwkSIntKey (Serving NS Integrity) και NwkSEncKey (Encryption for MAC). Σε ένα μη roaming σενάριο (συσκευή και NS στο ίδιο δίκτυο) τα FNwkSInt και SNwkSInt συμπίπτουν, αλλά η διάκριση επιτρέπει roaming μεταξύ ενός Home NS και Serving NS χωρίς ανταλλαγή κλειδιών ακεραιότητας.
- Ο μηχανισμός πλαισίων data στο 1.1 αλλάζει ως προς τον MIC. Αντί ενός MIC με ένα κλειδί, χρησιμοποιούνται δύο συνιστώσες (cmacF και cmacS) υπολογισμένες με FNwkSIntKey και SNwkSIntKey αντίστοιχα, και συνδυάζονται (2 byte από κάθε μία)

για να σχηματίσουν το 4-byte MIC. Αυτό εξασφαλίζει ότι ένας «πρωθητικός» NS σε roaming (fNS) που έχει το FNwkSIntKey μπορεί να ελέγξει τη μισή υπογραφή χωρίς να μπορεί να την παραγάγει πλήρως (δεν έχει το SNwkSIntKey που το έχει μόνο ο server του home δικτύου).

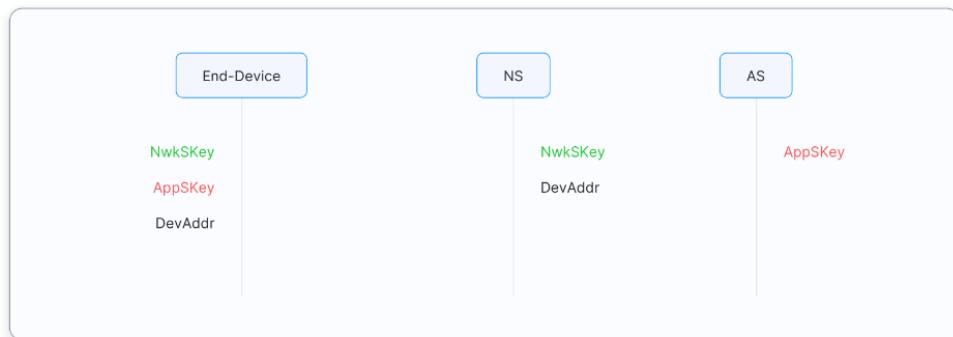
- Επίσης, στην έκδοση 1.1, αν μια συσκευή κάνει ABP έχει την απαίτηση να μην μηδενίζει τους frame counters μετά από reset (σε αντίθεση με 1.0 όπου το έκανε), ώστε να αποφεύγονται replay attacks λόγω επανεκκίνησης. Σε περίπτωση που γίνει reset, εισάγεται το MAC command ResetInd/ResetConf ώστε η συσκευή να ενημερώσει τον NS και να επανασυγχρονιστούν χωρίς κίνδυνο ασφάλειας.

Activation by Personalization (ABP).

Στην περίπτωση της ενεργοποίησης με προσωποποίηση, δεν υπάρχει ανταλλαγή μηνυμάτων join. Αντίθετα, η συσκευή έρχεται προρυθμισμένη με όλα τα απαραίτητα στοιχεία. Συγκεκριμένα, είναι αποθηκευμένα στη μνήμη της μια DevAddr καθώς και τα κλειδιά NwkSKey και AppSKey (στο LoRaWAN 1.0) ή τα 4 session keys (AppSKey, FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey στο LoRaWAN 1.1). Τα ίδια κλειδιά και η DevAddr είναι καταχωρημένα χειροκίνητα και στον Network Server (και Application Server) εκ των προτέρων. Έτσι, η συσκευή μόλις ανοίξει μπορεί άμεσα να σέλνει data frames χρησιμοποιώντας αυτά τα στοιχεία, χωρίς διαδικασία OTAA. Προφανώς, αυτό σημαίνει ότι όλα τα ABP nodes πρέπει να έχουν μοναδικά κλειδιά, μιας και το πρότυπο απαιτεί κάθε συσκευή να έχει δικό της ζεύγος NwkSKey/AppSKey για λόγους ασφάλειας (ώστε αν παραβιαστεί μία, να μην επιφρεαστούν οι άλλες). Η ABP είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις που το join μπορεί να είναι δύσκολο ή σε δοκιμές/εργαστήρια όπου θέλουμε να παρακάμψουμε το overhead [15] [36]. Ωστόσο, εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα:

- **Ασφάλεια:** Τα κλειδιά είναι στατικά και συνήθως ενσωματωμένα στο firmware. Συνεπώς, αν κάποιος αποκτήσει φυσική πρόσθαση στη συσκευή, μπορεί να τα εξαγάγει. Επίσης, δεν αλλάζουν ποτέ, άρα μια διαρροή κλειδιού εκθέτει όλη τη μετέπειτα επικοινωνία.
- **Διαχείριση:** Δεν υπάρχει εύκολος τρόπος ανανέωσης κλειδιών ή DevAddr. Αν χρειαστεί να αλλάξει δίκτυο η συσκευή (άλλον πάροχο ή δίκτυο), πρέπει να αναπρογραμματιστεί με νέα στοιχεία (ενώ με OTAA απλώς κάνει join στο νέο δίκτυο).
- **Frame Counters:** Στο LoRaWAN 1.0, μια ABP συσκευή αν κάνει επανεκκίνηση μηδενίζει το FCnt, αλλά ο NS κρατά την προηγούμενη τιμή, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει συγχύσεις (αν ο NS δει ξανά μικρότερο counter θα απορρίπτει τα μηνύματα ως replay). Συνήθως λύνεται με ρυθμίσεις στον NS (disable FCnt check), κάτι που όμως μειώνει την ασφάλεια. Στο LoRaWAN 1.1, όπως προαναφέρθηκε, απαιτείται να μη μηδενίζει η συσκευή τους counters ή να σέλνει ResetInd MAC command.
- **Roaming:** Μια ABP συσκευή είναι δεσμευμένη σε ένα NetID δικτύου. Το LoRaWAN 1.1 εισάγει μεν την έννοια του roaming και για ABP (Passive Roaming), αλλά χρειάζεται η συνεργασία δικτύων και δεν είναι τόσο απλό όσο μια OTAA rejoin.

Λόγω των παραπάνω, η OTAA προτιμάται σαφώς στην πράξη. Η ABP χρησιμοποιείται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις ή για απλούστευση κατά το στάδιο ανάπτυξης/πρωτοτυποποίησης.



Εικόνα 2.19: Προ-διαμοιρασμός του *DevAddr* και των *session keys* για ενεργοποίηση ABP στο LoRaWAN 1.0.

[15]



Εικόνα 2.20: Προ-διαμοιρασμός του *DevAddr* και των *session keys* για ενεργοποίηση ABP στο LoRaWAN 1.1.

[15]

Ασφάλεια E2E και κρυπτογραφία

Το LoRaWAN στηρίζεται σε συμμετρική κρυπτογραφία AES-128 για να πετύχει δύο βασικούς στόχους: (α) εμπιστευτικότητα δεδομένων και (β) ακεραιότητα/αυθεντικότητα μηνυμάτων. Όπως εξηγήθηκε, η εμπιστευτικότητα επιτυγχάνεται κρυπτογραφώντας το πεδίο FRMPayload κάθε data frame με το AppSKey (για εφαρμογές) ή το NwkSEncKey (για MAC commands) σε CTR mode. Αυτό εξασφαλίζει ότι ακόμα και αν κάποιος υποκλέψει το ασύρματο σήμα, δεν μπορεί να διαβάσει τα δεδομένα χωρίς το κλειδί. Η ακεραιότητα/αυ-

Θεντικότητα επιτυγχάνεται με τον έλεγχο MIC που υπογράφει κάθε μήνυμα με κλειδί που γνωρίζει μόνο το δίκτυο (NwkSKey/ FNwkSIntKey κλπ.), αποτρέποντας τόσο την τροποποίηση πακέτων όσο και την εισαγωγή ψεύτικων από τρίτους [32].

Σημαντικό είναι ότι τα κλειδιά αυτά είναι ξεχωριστά ανά συσκευή και ανά συνεδρία. Επίσης, δεν μεταδίδονται ποτέ "καθαρά" πάνω από τον αέρα, αλλά παράγονται τοπικά από τις δύο μεριές (συσκευή/JS και NS/AS) και αποθηκεύονται με ασφαλή τρόπο. Αυτή η φιλοσοφία end-to-end encryption φαίνεται και στην 2.10: το φορτίο παραμένει κρυπτογραφημένο από τη στιγμή που φεύγει από τη συσκευή μέχρι να φτάσει στον Application Server. Ο Network Server δεν γνωρίζει (ούτε χρειάζεται να γνωρίζει) το περιεχόμενο των εφαρμοστικών δεδομένων, καθώς λειτουργεί απλώς ως αγωγός. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε εφαρμογές όπως π.χ. έξυπνοι μετρητές ρεύματος, όπου τα δεδομένα κατανάλωσης πρέπει να προστατεύονται ιδιωτικά μέχρι τον πάροχο ενέργειας που τα διαχειρίζεται (το LoRaWAN το διασφαλίζει από σχεδιασμού).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι πέρα από τα εσωτερικά πρότυπα του LoRaWAN, υπάρχει και συνεισφορά από την IETF για διασύνδεση των δικτύων LoRaWAN με το διαδίκτυο σε επίπεδο IP. Συγκεκριμένα, έχει οριστεί ένα πρότυπο συμπίεσης επικεφαλίδων IPv6/UDP γνωστό ως **SCHC (Static Context Header Compression)** για χρήση πάνω από LoRaWAN, επιτρέποντας αποδοτική μεταφορά πακέτων IPv6 μέσω LoRaWAN με ελάχιστη επιβάρυνση. Το πρότυπο αυτό δημοσιεύτηκε ως RFC 9011 (2021) και ουσιαστικά ορίζει πώς μπορούν να διαμοιράζονται κανόνες συμπίεσης μεταξύ τερματικού και δικτύου ώστε ακόμη και τα μικρά payloads του LoRaWAN να μεταφέρουν δεδομένα IPv6 όταν απαιτείται (π.χ. σε βιομηχανικές εφαρμογές IPv6 sensor networking). Αυτό υπογραμμίζει τη modular αρχιτεκτονική, δηλαδή το LoRaWAN μπορεί να θεωρηθεί ως layer 2.5 που κουβαλά αν θέλουμε και υψηλότερα πρωτόκολλα με ειδική προσαρμογή [37].

2.4.5 Ρυθμός μετάδοσης, ADR, χρόνος στον αέρα (ToA) και περιορισμοί εκπομπής

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες ενότητες, το φυσικό layer LoRa (CSS) που χρησιμοποιεί το LoRaWAN επιτυγχάνει διάφορους ρυθμούς δεδομένων (bit rates) μεταβάλλοντας παραμέτρους όπως ο Spreading Factor (SF) και το εύρος ζώνης. Στο LoRaWAN αυτοί οι ρυθμοί έχουν κβαντιστεί σε διακριτά Data Rates (DR), τυπικά αριθμημένα (π.χ. DR0, DR1, ..., DR5 για την ΕΕ) και αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ρυθμίσεις (π.χ. DR0 = SF12/125kHz - 250 bps, ..., DR5 = SF7/125kHz - 5469 bps στο EU863-870). Ο χρόνος στον αέρα (Time-on-Air, ToA) ενός πλαισίου LoRa αυξάνεται δραματικά όσο μειώνεται ο ρυθμός (υψηλότερο SF): ένα μήνυμα 50 byte στο SF7 μπορεί να διαρκέσει 50 ms, ενώ στο SF12 μπορεί να διαρκέσει 1.6 δευτερόλεπτα. Η επιλογή του data rate συνεπώς επηρεάζει τόσο την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής (μεγάλος ToA = πολλή ενέργεια για εκπομπή) όσο και τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου (καθώς το κανάλι δεσμεύεται για περισσότερη ώρα, εμποδίζοντας άλλες μεταδόσεις). Το LoRaWAN αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα με δύο τρόπους: (α) μέσω του μηχανισμού Adaptive Data Rate (ADR) και (β) μέσω κανονιστικών περιορισμών εκπομπής (duty cycle, κ.λπ.) που επιβάλλονται στις μη αδειοδοτημένες συχνότητες [15].

Adaptive Data Rate (ADR)

Το ADR είναι ένας μηχανισμός του πρωτοκόλλου που επιτρέπει στο δίκτυο να βελτιστοποιεί δυναμικά τον ρυθμό δεδομένων και την ισχύ μετάδοσης μιας συσκευής, βασιζόμενο στις συνθήκες ζεύξης. Όταν μια συσκευή έχει το ADR ενεργοποιημένο (bit ADR=1 στα uplinks της), ουσιαστικά δηλώνει στον Network Server ότι είναι στατική ή έχει σταθερές συνθήκες και επιτρέπει στο δίκτυο να ρυθμίσει τις παραμέτρους της. Ο NS τότε συλλέγει μετρήσεις από τα πρόσφατα uplinks (μέχρι 20 τελευταία) όπως SNR σε πολλαπλές πύλες, αριθμό gateways που την άκουσαν, κ.λπ.. Με βάση αυτές, υπολογίζει ένα περιθώριο (margin) σήματος για τη συσκευή. Για παράδειγμα, αν λαμβάνεται με SNR πολύ πάνω από το ελάχιστο, αυτό σημαίνει ότι η συσκευή μπορεί να ανεβάσει το data rate (μικρότερο SF) ή/και να χαμηλώσει την ισχύ της χωρίς να χαθεί η επικοινωνία. Κατόπιν, ο NS στέλνει μία ή περισσότερες εντολές LinkADReq προς τη συσκευή, ορίζοντας νέο SF, bandwidth, ισχύ (και ενδεχομένως μάσκα καναλιών). Η συσκευή εκτελεί τις ρυθμίσεις και απαντά με LinkADRAAns (που επιβεβαιώνει ή απορρίπτει). Μέσω αυτού του feedback loop, το δίκτυο τείνει να ρυθμίσει όλες τις συσκευές στο ταχύτερο δυνατό data rate που επιτρέπει η απόστασή τους. Ειδικότερα, όσες συσκευές είναι κοντά σε πύλη θα μειώσουν σε SF7, εξοικονομώντας χρόνο αέρα και μπαταρία, ενώ όσες είναι μακριά θα παραμένουν σε υψηλότερο SF για μεγαλύτερη αξιοπιστία. Σε περίπτωση που μια συσκευή μετακινηθεί ή αλλάξουν οι συνθήκες (π.χ. εμποδισμός του σήματος), η ίδια μπορεί να αντιληφθεί υποβάθμιση (δεν λαμβάνει καθόλου downlinks για καιρό) και να απενεργοποιήσει προσωρινά το ADR (ADR flag=0) οπότε θα υποβιβαστεί αυτόματα στο πιο «ασφαλέσ» χαμηλό data rate έως ότου οι συνθήκες σταθεροποιηθούν ξανά.

Ο αλγόριθμος ADR δεν καθορίζεται πλήρως στο πρότυπο παρά μόνο ως σύσταση. Για παράδειγμα, η Semtech έχει δημοσιεύσει έναν απλό αλγόριθμο που λαμβάνει τον καλύτερο SNR από τα τελευταία 20 uplinks και αυξάνει βαθμιαία το data rate μέχρι το SNR margin να πέσει κάτω από κάποιο threshold. Συστήματα όπως το The Things Stack ακολουθούν τέτοιες μεθοδολογίες, εφαρμόζοντας μικρές υστερήσεις για να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις (π.χ. να μη στέλνουν συνεχώς ADReq αν η συσκευή αρνείται ή αν τα στοιχεία είναι αμφίβολα).

Εν γένει, το ADR είναι εξαιρετικά χρήσιμο για στατικές συσκευές (π.χ. αισθητήρες σε πάγια θέση), μιας και βελτιστοποιεί αυτόματα την κατανάλωσή τους και βελτιώνει την χωρητικότητα του δικτύου. Για κινητές συσκευές (π.χ. ιχνηλάτες σε οχήματα) το ADR μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Συνίσταται να απενεργοποιείται ή να χρησιμοποιείται μόνο όταν η συσκευή αντιληφθεί ότι παραμένει στάσιμη για αρκετό χρόνο. Σε κάθε περίπτωση, η τελική απόφαση για χρήση ADR ή όχι λαμβάνεται από τη συσκευή (το application μπορεί να το ενεργοποιήσει/απενεργοποιήσει αναθέτοντας την κατάλληλη τιμή στο ADR bit), ωστόσο στα περισσότερα δίκτυα IoT προτιμάται να είναι ενεργό για να επωφελούνται οι κόμβοι [15].

Περιορισμοί Duty Cycle και κανονισμοί περιοχής

Δεδομένου ότι το LoRaWAN λειτουργεί σε ελεύθερες (μη αδειοδοτημένες) ζώνες ISM, η εκπομπή των συσκευών διέπεται από κανονισμούς που αποσκοπούν στην αποφυγή κατάχρησης του φάσματος. Στην Ευρώπη, ισχύει το πρότυπο ETSI EN 300.220, το οποίο για την μπάντα 868 MHz επιβάλλει μέγιστο Duty Cycle 1% στις περισσότερες υποζώνες, με ορισμένες εξαιρέσεις (π.χ. 0.1% σε 869.40-869.65 MHz όπου επιτρέπεται 10%). Το Duty

Cycle ορίζεται ως ο λόγος χρόνου εκπομπής προς το συνολικό χρόνο σε ένα κανάλι. 1% duty cycle σημαίνει ότι μια συσκευή μπορεί να εκπέμπει το πολύ 36 δευτερόλεπτα ανά ώρα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Αν εκπέμψει συνεχόμενα π.χ. για 3 δευτερόλεπτα, θα πρέπει να περιμένει 297 δευτερόλεπτα πριν επανεκπέμψει στο ίδιο κανάλι (για να διατηρήσει τον λόγο 1/100). Ο περιορισμός αυτός, συνδυαζόμενος με τους μεγάλους χρόνους στον αέρα στα χαμηλά data rates, ουσιαστικά περιορίζει τον ρυθμό πακέτων που μπορεί να στέλνει ένας κόμβος. Στα δίκτυα LoRaWAN, είναι σύνηθες να στέλνουν οι αισθητήρες δεδομένα ανά λίγα λεπτά δεδομένα (π.χ. ανά 5 ή 15 λεπτά) ώστε να τηρούν άνετα το duty cycle. Ο Network Server μπορεί να βοηθάει στον έλεγχο αυτό, για παράδειγμα, μέσω ADR, κρατώντας τον ToA χαμηλό, ή μέσω του MAC command DutyCycleReq, επιβάλλοντας μικρότερο duty-cycle από το νομικό όριο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις [36] [15].

Στις ΗΠΑ και σε άλλες περιοχές (902–928 MHz band), αντί για duty cycle, ισχύουν κανονισμοί dwell time (μέγιστη διάρκεια συνεχούς εκπομπής περίπου 400ms) και Frequency Hopping (υποχρέωση αλλαγής συχνότητας σε κάθε πακέτο). Το LoRaWAN σε αυτές τις περιοχές χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό καναλιών (π.χ. 64 uplink channels στο US915) και μια τυχαία κατανομή των πακέτων σε αυτά. Έτσι διασφαλίζεται ότι πληροί τους κανόνες και κατανέμει τη χρήση του φάσματος. Σε κάποιες χώρες (π.χ. στην Ιαπωνία) επιβάλλεται μη-χανισμός LBT (Listen-Before-Talk) αντί του duty cycle, όπου η συσκευή οφείλει να ακούσει ότι το κανάλι είναι καθαρό πριν εκπέμψει. Το LoRaWAN Regional Parameters προσαρμόζει αυτές τις λεπτομέρειες ανά χώρα.

Το έγγραφο **LoRaWAN Regional Parameters** από τη LoRa Alliance ορίζει για κάθε περιοχή τα διαθέσιμα σχέδια συχνοτήτων (διαύλους) και τις ειδικές ρυθμίσεις. Για παράδειγμα, το EU868 σχέδιο ορίζει 3 βασικά κανάλια (867.1, 867.3, 867.5 MHz) που πάντα πρέπει να υποστηρίζει μια συσκευή και duty cycle 1% σε όλη τη μπάντα 863–870 εκτός ορισμένων μικρών υποζωνών. Το US915 σχέδιο ορίζει 64 κανάλια uplink με hop κάθε φορά και υποδιαίρεση σε 8 sub-band όπου κάθε sub-band έχει όριο 0.4s dwell per channel. Το AS923 (Ασία) ορίζει μια κοινή ομάδα 16 καναλιών για πολλές χώρες στην περιοχή, αλλά σε μερικές (π.χ. Νέα Ζηλανδία και Ιαπωνία) διαφοροποιείται ως προς τα LBT και duty cycle.

Εν τέλει, το LoRaWAN προσπαθεί να προσφέρει έναν ενοποιημένο τρόπο επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, η συσκευή σε κάθε περιοχή έχει μια λίστα προκαθορισμένων καναλιών και ξέρει τις ανώτατες επιτρεπόμενες ισχείς εκπομπής (π.χ. 14 dBm στην Ευρώπη, 30 dBm στις ΗΠΑ) και τη μέγιστη διάρκεια πακέτου. Η συμμόρφωση με αυτούς τους περιορισμούς είναι υποχρεωτική, οπότε κάθε node πρέπει να προγραμματίζεται έτσι ώστε να μην υπερβαίνει τα όρια (π.χ. να μην στέλνει πολύ συχνά ώστε να μην υπερβεί το duty cycle). Πολλές LoRaWAN συσκευές διαθέτουν εσωτερικό έλεγχο duty cycle, όπως για παράδειγμα το module RN2483 της Microchip δεν θα επιτρέψει νέα εκπομπή αν το κανάλι δεν είναι ελεύθερο ως προς το 1% (θα επιστρέψει σφάλμα no_free_ch). Αυτό προστατεύει το σύστημα από παραβίαση των κανονισμών ακόμα και αν η εφαρμογή προγραμματίστηκε λάθος.

Περιγραφή θέματος

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μια περιγραφή των συστημάτων ομότιμων κόμβων που είναι βασισμένα σε σχήματα (schema-based peer-to-peer systems). Στη συνέχεια περιγράφονται τρία βασικά συστήματα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, καθώς και ένα σύστημα για τη διαχείρηση RDF σχημάτων, και τέλος αναλύεται ο στόχος της παρούσας εργασίας.

3.1 Σχετικές εργασίες

Οι βάσεις δεδομένων εισήγαγαν ένα τρόπο αποθήκευσης και ανάκτησης των δεδομένων που βασιζόταν στο σχήμα [38]. Τα πρώτα συστήματα ομότιμων κόμβων που περιγράψαμε στην Υποενότητα 2.1.2 έδιναν μεγάλη σημασία στην αρχιτεκτονική του συστήματος και την δρομολόγηση των ερωτήσεων και λιγότερη στον τρόπο αναπαράστασης και τις δυνατότητες αναζήτησης. Η αναζήτηση σε αυτά τα συστήματα ομότιμων κόμβων γίνεται με βάση προκαθορισμένα χαρακτηριστικά - δείκτες, ή με προσπάθεια αντιστοίχισης μιας λέξης κλειδί.

Η ανάγκη λοιπόν για πιο εκφραστικές λειτουργίες οδήγησε στα συστήματα ομότιμων κόμβων τα οποία είναι βασισμένα σε σχήματα (schema based peer-to-peer systems). Πρόκειται για ομότιμες υποδομές διαχείρισης δεδομένων που όμως διατηρούν όλα τα χαρακτηριστικά των συστημάτων ομότιμων κόμβων.

Μέρος II

Πρακτικό Μέρος

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση και σχεδίαση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε για την υλοποίηση του συστήματος. Αρχικά περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος και γίνεται ο διαχωρισμός του στα επιμέρους υποσυστήματα, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι εφαρμογές του συστήματος.

4.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του συστήματος και ο χωρισμός του σε υποσυστήματα όσον αφορά την αρχιτεκτονική.

4.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων

Το σύστημα αποτελείται από τους απλούς κόμβους και ένα κόμβο διαχειριστή. Στο σημείο αυτό αναλύουμε το σύστημα ενός απλού κόμβου, το οποίο αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος.
- Υποσύστημα ενσωμάτωσης δεδομένων στο σχήμα.
- Υποσύστημα επικοινωνίας κόμβου.

4.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων

Παρακάτω δίνεται λεπτομερής περιγραφή για καθένα από τα συστήματα που αναφέραμε. Η περιγραφή αυτή γίνεται με βάση τα διαγράμματα ροής δεδομένων.

Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος

Το υποσύστημα αυτό

Κεφάλαιο 5

Υλοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος, με βάση τη μελέτη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζεται η πλατφόρμα και τα προγραμματιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια δίνονται οι λεπτομέρειες υλοποίησης για τους βασικούς αλγόριθμους του συστήματος καθώς και η δομή του κώδικα.

5.1 Λεπτομέρειες υλοποίησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικοί αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν καθώς και λεπτομέρειες σχετικά με την υλοποίηση της επικοινωνίας των κόμβων.

5.1.1 Αλγόριθμοι

Αλγόριθμος εισαγωγής δεδομένων

Όταν ένας κόμβος εισέρχεται για πρώτη φορά στο σύστημα, αρχικά δημιουργεί το σχήμα που θέλει χρησιμοποιώντας το RDFSculpt. Στη συνέχεια.....

Παράδειγμα

Έστω ότι ο κόμβος έχει επιλέξει να συμμετέχει στο σύστημα με το RDF σχήμα που φαίνεται στο Σχήμα. Έστω επίσης ότι από το SQL ερώτημα που έχει κάνει στη σχεσιακή βάση, έχει προκύψει η όψη που φαίνεται στον Πίνακα. Για τις ανάγκες του παραδείγματος θεωρούμε ότι η όψη αυτή περιέχει μόνο μία εγγραφή.

.....

5.2 Περιγραφή κλάσεων

Στην ενότητα αυτή δίνεται μια σύντομη περιγραφή των κλάσεων, των πεδίων και των μεθόδων που τις απαρτίζουν.

5.2.1 public class FirstUi

Η κλάση αυτή κατασκευάζει την οθόνη εισαγωγής του χρήστη στο σύστημα.

Πεδία

- `private GridBagConstraints con`
To layout για όλα τα Panel.
- `private GridBagConstraints con`
Ta constraints για το layout.
- `private Icon arrowR`
Εικονίδιο για το κουμπί Next.

Μέθοδοι

- `public FirstUi()`
Ο κατασκευαστής της κλάσης ο οποίος καλεί την `createEntryFrame()`.
- `private void createEntryFrame()`
Μέθοδος που κατασκευάζει το ενφραμε.

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος

Σ το κεφάλαιο αυτό γίνεται ο έλεγχος καλής λειτουργίας του συστήματος.

6.1 Μεθοδολογία Ελέγχου

Ο έλεγχος του συστήματος αυτού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός σεναρίου λειτουργίας. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό θεωρούμε ότι στο σύστημα υπάρχουν τρεις κόμβοι (peer1, peer2, peer3). Θεωρούμε επίσης ότι οι κόμβοι peer2 και peer3 έχουν ήδη σχήμα και δεδομένα. Το σχήμα του peer2 φαίνεται στο Σχήμα.

Επίσης η τοπολογία του συστήματος έχει ως εξής: ο peer2 είναι γείτονας του peer1 και ο peer3 γείτονας του peer2.

Αρχικά λοιπόν θα δημιουργήσουμε σχήμα για τον κόμβο peer1 και στη συνέχεια θα εισάγουμε σε αυτό δεδομένα εξετάζοντας έτσι την καλή λειτουργία του υποσυστήματος δημιουργίας σχήματος και του υποσυστήματος εισαγωγής δεδομένων. Στη συνέχεια από τον κόμβο αυτό στέλνουμε ερωτήσεις στους υπόλοιπους για τον έλεγχο του υποσυστήματος απάντησης ερωτήσεων και επικοινωνίας κόμβων.

6.2 Αναλυτική παρουσίαση ελέγχου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε αναλυτικά τον έλεγχο του συστήματος σύμφωνα με το σενάριο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Παράδειγμα Πίνακα

7.1 Συμπεράσματα

Τα συστήματα οιμότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα οιμότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα οιμότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυνατή την αναζήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Έτσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

Πίνακας 7.1: Πίνακας αλήθειας της λογικής συνάρτησης F

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Παράδειγμα Μαθηματικών Σχέσεων – Εκφράσεων και Αλγορίθμων

8.1 Συμπεράσματα

Τα συστήματα ομότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα ομότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Στα συστήματα αυτά κάθε $y = \int_0^1 f(x)dx$ $y = \int_0^1 f(x)dx$ κόμβος χρησιμοποιεί ένα σχήμα για την $\sum_{i=0}^{100} a_i$ αναπαράσταση των δεδομένων του. Όμως σε ένα σύστημα ομότιμων κόμβων, κάθε κόμβος έχει διαφορετικές απαιτήσεις αναπαράστασης δεδομένων. Επομένως πρέπει να υπάρχει ευελιξία στην επιλογή $\frac{1}{1+x^2}$ σχήματος. Τα συστήματα που έχουν προταθεί μέχρι τώρα και παρέχουν αυτή την ευελιξία, για να είναι δυνατή η αναζήτηση πληροφορίας, απαιτούν την ύπαρξη κανόνων αντιστοίχισης μεταξύ των σχημάτων με βάση τους οποίους να μετασχηματίζονται οι ερωτήσεις. Όμως δεν υποστηρίζεται ακόμα αυτόματη δημιουργία και δυναμική ανανέωση των κανόνων, που είναι απαραίτητα για τα συστήματα ομότιμων κόμβων.

$$y = \int_0^1 f(x)dx \quad (8.1)$$

Η συνεισφορά της (8.1) παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά τη δημιουργία ενός πλήρους συστήματος ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα RDF το οποίο παρέχει: (α) την υποδομή για την επικοινωνία των κόμβων, (β) μηχανισμό δημιουργίας σχήματος, (γ) μηχανισμό ενσωμάτωσης σχεσιακών δεδομένων στο σχήμα με τη χρήση αντιστοίχισεων που δημιουργεί ο χρήστης με τη βοήθεια ειδικής διαπροσωπείας, (δ) ευέλικτη διαπροσωπεία χρήστη για τη διατύπωση ερωτημάτων και (ε) μηχανισμό απάντησης και επεξεργασίας ερωτήσεων.

Το δεύτερο σκέλος αφορά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει μια σχετική ευελιξία ως προς την επιλογή του σχήματος από τον κάθε κόμβο, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα μετασχηματισμού ερωτήσεων χωρίς τη χρήση κανόνων αντιστοίχισης. Συγκεκριμένα, τα σχήματα των κόμβων αποτελούν υποσύνολα-όψεις (views) ενός βασικού σχήματος

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 8.1: Μετατροπή δεκαδικού αριθμού σε δυαδικό, με τη μέθοδο των διαδοχικών διαιρέσεων με το 2

Είσοδος: $X_{(10)}$ (ο δεκαδικός αριθμός προς μετατροπή)

Έξοδος: $X_{(2)}$ (η δυαδική αναπαράσταση του X)

Θέσε $\Delta = X_{(10)}$ ($\Delta = \text{διαιρετέος}$)

Θέσε $\Pi = 1$ ($\Pi = \text{πηλίκο}$)

Θέσε $X_{(2)} = \text{""}$ ("" ο κενός χαρακτήρας)

while $\Pi \neq 0$ **do**

Διαίρεσε το Δ με το 2 και βρες το πηλίκο Π , και το υπόλοιπο u .

$X_{(2)} = u + X_{(2)}$ (Τοποθέτησε το υπόλοιπο u στα αριστερά του $X_{(2)}$)

Θέσε $\Delta = \Pi$ (Το πηλίκο Π τίθεται ως διαιρετέος για την επόμενη διαίρεση)

end while

που ονομάζεται καθολικό σχήμα. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν το γεγονός ότι τα σχήματα αυτά είναι συμβατά μεταξύ τους, έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου της ικανοποιησιμότητας μιας ερώτησης και μετατροπής της όπου χρειάζεται, χρησιμοποιώντας τόσο το σχήμα του κόμβου όσο και το καθολικό σχήμα.

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυνατή την αναζήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

8.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα :

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Ετσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 8.2: *Κάποιος αλγόριθμος ...*

```
#include <stdio.h>
#define N 10
/* Block
 * comment */

int main()
{
    int i;

    // Line comment.
    puts("Hello world!");

    for (i = 0; i < N; i++)
    {
        puts("LaTeX is also great for programmers!");
    }

    return 0;
}
```

Μέρος

Επίλογος

Επίλογος

9.1 Συμπεράσματα

Τα συστήματα ομότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα ομότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Στα συστήματα αυτά κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα σχήμα για την αναπαράσταση των δεδομένων του. Όμως σε ένα σύστημα ομότιμων κόμβων, κάθε κόμβος έχει διαφορετικές απαιτήσεις αναπαράστασης δεδομένων. Επομένως πρέπει να υπάρχει ευελιξία στην επιλογή σχήματος. Τα συστήματα που έχουν προταθεί μέχρι τώρα και παρέχουν αυτή την ευελιξία, για να είναι δυνατή η αναζήτηση πληροφορίας, απαιτούν την ύπαρξη κανόνων αντιστοίχισης μεταξύ των σχημάτων με βάση τους οποίους να μετασχηματίζονται οι ερωτήσεις. Όμως δεν υποστηρίζεται ακόμα αυτόματη δημιουργία και δυναμική ανανέωση των κανόνων, που είναι απαραίτητα για τα συστήματα ομότιμων κόμβων.

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά τη δημιουργία ενός πλήρους συστήματος ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα RDF το οποίο παρέχει: (α) την υποδομή για την επικοινωνία των κόμβων, (β) μηχανισμό δημιουργίας σχήματος, (γ) μηχανισμό ενσωμάτωσης σχεσιακών δεδομένων στο σχήμα με τη χρήση αντιστοιχίσεων που δημιουργεί ο χρήστης με τη βοήθεια ειδικής διαπροσωπείας, (δ) ευέλικτη διαπροσωπεία χρήστη για τη διατύπωση ερωτημάτων και (ε) μηχανισμό απάντησης και επεξεργασίας ερωτήσεων.

Το δεύτερο σκέλος αφορά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει μια σχετική ευελιξία ως προς την επιλογή του σχήματος από τον κάθε κόμβο, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα μετασχηματισμού ερωτήσεων χωρίς τη χρήση κανόνων αντιστοίχισης. Συγκεκριμένα, τα σχήματα των κόμβων αποτελούν υποσύνολα-όψεις (views) ενός βασικού σχήματος που ονομάζεται καθολικό σχήμα. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν το γεγονός ότι τα σχήματα αυτά είναι συμβατά μεταξύ τους, έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου της ικανοποιησιμότητας μιας ερωτησης και μετατροπής της όπου χρειάζεται, χρησιμοποιώντας τόσο το σχήμα του κόμβου όσο και το καθολικό σχήμα.

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυ-

νατή την αναδρήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

9.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Έτσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

Παρατήματα

Παράδειγμα Παραρτήματος

A'.1 Πρώτη ενότητα

Τα συστήματα οιμότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα οιμότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα οιμότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυνατή την αναζήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

A'.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Έτσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

Πίνακας Α'.1: Πίνακας αληθειας της λογικής συνάρτησης F

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Παράρτημα **B'**

Απόδειξη της σχέσης (8.1)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε για την υλοποίηση του συστήματος. Αρχικά περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος και γίνεται ο διαχωρισμός του στα επιμέρους υποσυστήματα, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι εφαρμογές του συστήματος. Ελένη

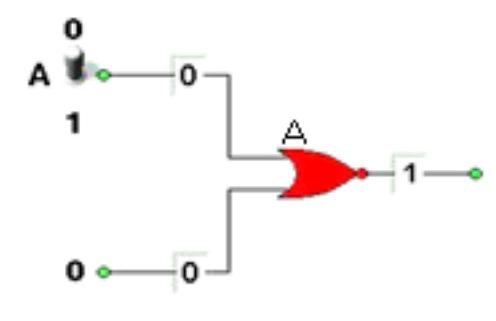
B'.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του συστήματος και ο χωρισμός του σε υποσυστήματα όσον αφορά την αρχιτεκτονική.

B'.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων

Το σύστημα αποτελείται από τους απλούς κόμβους και ένα κόμβο διαχειριστή. Στο σημείο αυτό αναλύουμε το σύστημα ενός απλού κόμβου, το οποίο αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος.
- Υποσύστημα ενσωμάτωσης δεδομένων στο σχήμα.
- Υποσύστημα επικοινωνίας κόμβου.



Σχήμα B'.1: Προσομοίωση Πύλης NOR

Το Σχήμα B'.1 απεικονίζει

B'.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων

Παρακάτω δίνεται λεπτομερής περιγραφή για καθένα από τα συστήματα που αναφέραμε. Η περιγραφή αυτή γίνεται με βάση τα διαγράμματα ροής δεδομένων.

Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος

Το υποσύστημα αυτό

Παράρτημα Γ'

Παραδείγματα Βιβλιογραφικών Αναφορών

Τύπος βιβλιογραφικής πηγής	Αριθμός αναφοράς
Βιβλίο ξενόγλωσσο	[39]
Βιβλίο ελληνικό	[40]
Παρουσίαση σε επιστημονικό συνέδριο	[41]
Διπλωματική εργασία	[42]
Πτυχιακή εργασία	[38]
Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία	[43]
Διδακτορική διατριβή	[44]
Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (πατέντα)	[45]

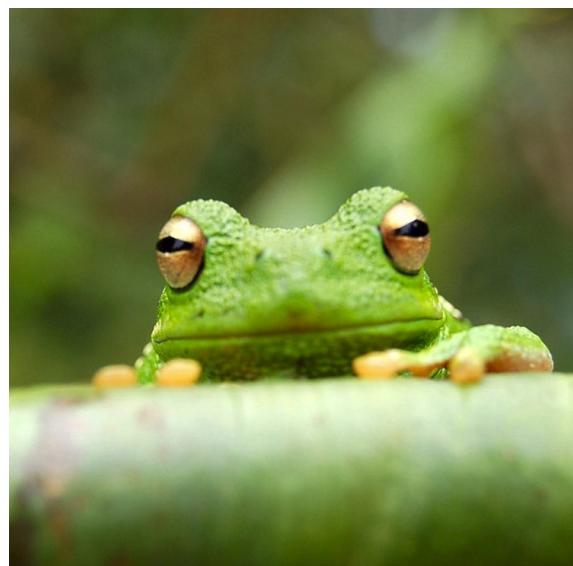
Παράρτημα **Δ'**

Δημιουργία Ευρετηρίου

Δείτε το περιεχόμενο του αρχείου appD.tex για τρόπους ορισμού ελληνικών και ξενόγλωσσων όρων ευρετηρίου.

Εισαγωγή Εικόνων

Δείτε το περιεχόμενο του αρχείου appE.tex για τον τρόπο εισαγωγής εικόνων.



Εικόνα E.1: Βάτραχος

Βιβλιογραφία

- [1] *A Rapid Increase in IoT Adoption - Manufacturing IoT in 2023.* <https://ubisense.com/a-rapid-increase-in-iot-adoption-manufacturing-iot-in-2023/>.
- [2] *Internet of Things (IoT) Statistics and Facts for 2024.* <https://www.demandsage.com/internet-of-things-statistics/>.
- [3] Frederic Chaxel Kais Mekki, Eddy Bajic και Fernand Meyer. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment.* *ICT Express*, 5(1):11–7, 2019.
- [4] Anna Ukovich. *NB-IoT Explained: What Is It, and How Does It Work?* <https://www.telit.com/blog/nb-iot-new-cellular-standard-means-business/>, 2019.
- [5] Zipit Wireless. *LTE Cat-M1 Explained: Pros and Cons of LTE-M for IoT Devices.* <https://www.zipitwireless.com/blog/lte-cat-m1-explained-pros-and-cons-of-lte-m-for-iot-devices>, 2023.
- [6] Gurudutt Hosangadi, Dandan Wang και Anil Rao. *System Design Considerations For Internet Of Things (IoT) With Category-M Devices In LTE Networks.* *arXiv preprint arXiv:1902.00408*, 2019.
- [7] Semtech Corporation. *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview.* <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>, 2021.
- [8] Saft Batteries. *The impact of communication technology protocol on your IoT application's power consumption.* <https://saft.com/en/energizing-iot/impact-communication-technology-protocol-your-iot-application%E2%80%99s-power-consumption>, 2023.
- [9] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martínez, Joan Melià-Seguí και Thomas Watteyne. *Understanding the Limits of LoRaWAN.* *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [10] Semtech Corporation. *AN1200.22 LoRa Modulation Basics.* Τεχνική Αναφορά με αριθμό, Semtech Corporation, 2015.
- [11] LoRa Alliance. *LoRaWAN Regional Parameters v1.0.3revA.* https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawanRegionalParameters_v1.0.3revA_0.pdf, 2020.
- [12] GSMA. *Mobile IoT Deployment Guide.* <https://www.gsma.com/smartmobility/wp-content/uploads/2022/10/Mobile-IOT-Deployment-Guide-October-2022-1-1.pdf>, 2022.

- [13] LoRa Alliance. *LoRa Alliance Issues 2023 Annual Report Highlighting LoRaWAN Maturity, Robust Adoption, and Diversity of End-to-End Solutions*. <https://lora-alliance.org/lora-alliance-press-release/lora-alliance-issues-2023-annual-report-highlighting-lorawan-maturity-robust-adoption-and-diversity-of-end-to-end-solutions/>, 2023.
- [14] Semtech Corporation. *A Brief History of LoRa®: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference*. <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>, 2020.
- [15] The Things Network. *LoRaWAN Documentation*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs lorawan/>.
- [16] T. Rademacher και others. *Analysis of Urban Path Loss Models for LoRaWAN Network Planning*. *International Journal of Advanced Scientific Research and Engineering (IJASRE)*, 4(7):12–21, 2018.
- [17] LoRa Documentation. *LoRa - The Things Network Documentation*. <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>, 2024.
- [18] Kamil Staniec και Michał Kowal. *LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions*. *Wireless Communications and Mobile Computing*, σελίδες 1–10, 2018.
- [19] Lansitec. *What are the factors affecting LoRaWAN range in IoT*. <https://www.lansitec.com/blogs/what-are-the-factors-affecting-lorawan-range-in-iot/>, 2024.
- [20] Rohde and Schwarz. *Characterization of LoRa Devices*. Τεχνική Αναφορά με αριθμό, Rohde and Schwarz, 2018.
- [21] Arghya Baral. *Understanding of LoRa*. <https://medium.com/@arghyababal/understanding-of-lora-066d89ed7bf4>, 2020. Μεδιουμ βλογ ποστ.
- [22] Sakshama Ghoslya. *LoRa: Symbol Generation*. <https://www.sghoslyा.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>, 2017.
- [23] Maciej Janc. *Communication over LoRa M2M case using RA-01*. <https://sii.pl/blog/en/communication-over-lora-m2m-case-using-ra-01/>, 2021.
- [24] Kristoffer Olsson και Sveinn Finnsson. *Exploring LoRa and LoRaWAN: A Suitable Protocol for IoT Weather Stations?* Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017.
- [25] Muhammad Hanif και Ha H. Nguyen. *Slope-Shift Keying LoRa-Based Modulation*. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(1):211–221, 2021.
- [26] Muhammad Hanif και Ha H. Nguyen. *Frequency-Shift Chirp Spread Spectrum Communications With Index Modulation*. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(24):17611–17621, 2021.

- [27] E. Bedeer A. Maleki, Ha H. Nguyen και R. Barton. *A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances*. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5:4578–4612, 2024.
- [28] RF Wireless World. *LoRaWAN Airtime Calculator*. <https://www.rfwireless-world.com/calculators/lorawan-airtime-calculator>.
- [29] LoRa Alliance. *What is LoRaWAN® Specification*. <https://lora-alliance.org/about-lorawan-old/>, 2025.
- [30] The Things Industries. *The Things Industries - Empowering Global IoT Connectivity*. <https://www.thethingsindustries.com/>, 2025.
- [31] Trend Micro Research. *The Current State of LoRaWAN Security*. Τεχνική Αναφορά με αριθμό, Trend Micro, 2021. Τεστηνισαλ Βριεφ.
- [32] Slim Loukil, Lamia Chaari Fourati, Anand Nayyar και K. W. A. Chee. *Analysis of LoRaWAN 1.0 and 1.1 Protocols Security Mechanisms*. *Sensors*, 22(10):3717, 2022.
- [33] Semtech Corporation. *LoRaWAN® Device Classes*. Τεχνική Αναφορά με αριθμό AN1200.87, Semtech Corporation, 2024.
- [34] Saishiva Reddy Gatla. *Understanding LoRaWAN: The MAC Layer Behind LoRa*. <https://medium.com/@shiva.cdachyd/understanding-lorawan-the-mac-layer-behind-lora-48c512e2180a>, 2025.
- [35] Semtech. *2 - Sending Messages: Metadata*. Δύρσες σημαπτέρ.
- [36] LoRa Alliance. *LoRaWAN 1.1 Specification*, 2017.
- [37] IETF LPWAN Working Group. *Static Context Header Compression (SCHC) over LoRaWAN (RFC 9011)*. RFC 9011, 2021.
- [38] Ε. Ανδρουλάκη. *Υλοποίηση Ενεργού Μηχανισμού σε Σύστημα Ομότυμων Βάσεων*. Πτυχιακή εργασία, KDBS Lab, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2005.
- [39] M. Goossens, F. Mittelbach και A. Samarin. *The LaTeX Companion*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 9η έκδοση, 1993.
- [40] I. Κάθουρας. *Συστήματα Υπολογιστών*. Κλειδάριθμος, Αθήνα, 3η έκδοση, 1991.
- [41] I. Liaperdos, L. Dermentzoglou, A. Arapoyanni και Y. Tsiatouhas. *Fault Detection in RF Mixers Combining Defect-Oriented and Alternate Test Strategies*. *26th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, San Sebastian, Spain, 2011.
- [42] Z. Καούδη. *Πρότυπο Σύστημα Αποδήκευσης και Διαχείρισης Σχημάτων RDFS*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.
- [43] Z. Λάσκαρη. *Κοινωνική Ανάλυση των Ταινιών της Finos Films*. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.

- [44] Z. Κουρούκλη. *Κατανεμημένα Συστήματα*. Διδακτορική Διατριβή, ΤΕΙ Πελοποννήσου, 2013.
- [45] P. Viswanathan, G. Winner και P. Vyas. *Convenient Provisioning of Embedded Devices with WiFi Capability*. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας US Patent 8,665,744, 2014.

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

βλπ	βλέπε
κ.λπ.	και λοιπά
κ.ο.κ	και ούτω καθεξής
ΤΕΙ	Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
BPF	Band Pass Filter

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

αδερφός
αμεταβλητότητα
ανάκτηση πληροφορίας
αντιμεταθετικότητα
απόγονος
απορρόφηση
βάση δεδομένων
γνώρισμα
διαπροσωπεία
διαφορά
δικτυακός κατάλογος
δικτυωτή δομή
δομικές επερωτήσεις
δομικές σχέσεις
δομικό σχήμα
εγκυρότητα
ένωση

Ξενόγλωσσος όρος

sibling
idempotency
information retrieval
commutativity
descendant
absorption
database
attribute
interface
difference
portal catalog
lattice
structural queries
structural relationships
schema
validity
union

