



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Πτυχιακή Εργασία

Πρωτόκολλα Τηλεματικής LoRa

Συγγραφέας

Δημήτρης Καλκάνης

ΑΜ: 45798

Επιβλέπων

Ανδρέας Σορτ , Θεοχάρης Ευστάθιος

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL ENGINEERS
DEPARTMENT INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION

Diploma Thesis

Telematics Protocols LoRa

Dimitris Kalkanis

45798

Supervisor name and surname:

Andreas Sort , Theocharis

Efstathios

Athens, February, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Πρωτόκολλα Τηλεματικής LoRa

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

| A/a | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ | ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ | |
| 2 | ΣΟΡΤ ΑΝΔΡΕΑΣ | ΕΔΙΠ'Α | |
| 3 | ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ | ΕΔΙΠ'Α | |

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Δημήτρης Καλκάνης του Μιχαήλ , με αριθμό μητρώου 45798 φοιτητής/ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικού Σχεδιασμού και Παραγωγής , δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

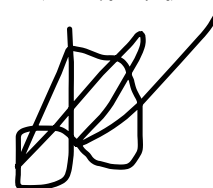
**Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή*

Ο/Η Δηλών Δημήτρης Καλκάνης

*** Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**

(Υπογραφή)

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα



** Σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από αιτιολόγηση και έγκριση του επιβλέποντα, προβλέπεται χρονικός περιορισμός πρόσβασης (embargo) 6-12 μήνες. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6):*

https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Περίληψη | 7 |
| Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγικές έννοιες | 8 |
| 1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)..... | 8 |
| 1.2 LoRa..... | 9 |
| 1.3 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) | 11 |
| 1.4 Χρήσεις τροποποιημένου LoRaWAN | 12 |
| 1.4.1 Σύστημα παρακολούθησης κατάψυξης σωλήνων πυρκαγιάς..... | 13 |
| 1.4.2 Έξυπνο σύστημα ελέγχου φωτισμού δρόμου | 14 |
| 1.4.3 Παρακολούθηση τοξικών αερίων κατά την κατασκευή μεγάλων πλοίων | 15 |
| Κεφάλαιο 2^ο - Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και ευρείας κάλυψης (LPWA) | 17 |
| 2.1 LoRa | 20 |
| 2.2 NB-IoT | 22 |
| 2.3 Sigfox | 23 |
| Κεφάλαιο 3^ο – Τεχνολογίες LoRa | 25 |
| 3.1 Αρχιτεκτονική LoRa | 25 |
| 3.2 Raspberry PI..... | 26 |
| 3.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών για Multi-Hop πρωτόκολλα LoRa..... | 26 |
| 3.4 Τεχνολογία LoRa | 30 |
| 3.4.1 Προσομοίωση δικτύου | 30 |
| 3.4.2 Περιβάλλοντα προσομοίωσης δικτύου..... | 32 |
| 3.4.3 mLoRa..... | 33 |
| 3.5 Περιβάλλοντα προσομοίωσης δικτύου | 36 |
| Κεφάλαιο 4^ο - PLC (Power Line Communications) με την τεχνολογία LoRa | 43 |
| 4.1 Πομπός..... | 43 |
| 4.2 Δέκτης..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3 Συγχρονισμός..... | 44 |
| 4.4 Upconversion | 44 |
| 4.5 LoRa σε PLC | 45 |
| 4.5.1 Εισαγωγή στα PLC | 45 |
| 4.5.2 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική συστήματος | 47 |
| 4.5.3. Διαμόρφωση μονάδας έξυπνου μετρητή | 48 |
| 4.5.4 Δίκτυο LoRa – GPRS | 50 |
| 4.5.5 Διαμόρφωση διακομιστή cloud | 52 |
| Κεφάλαιο 5^ο – Case Study | 54 |
| Κεφάλαιο 6^ο – Συμπεράσματα | 58 |
| Κεφάλαιο 7^ο – Βιβλιογραφία | 61 |

Περίληψη

Η χρηστικότητα του Διαδικτύου των Πραγμάτων ή Ίντερνετ των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) κερδίζει αυξανόμενο έδαφος στην καθημερινότητα, καθώς η σύνδεση διαφορετικών ασύρματων συσκευών κυμαινόμενης εμβέλειας μερικών εκατοστών έως μερικών χιλιομέτρων είναι αυξημένης ζήτησης. Οι νέες τεχνολογίες του IoT όπως για παράδειγμα αναφέρεται εν προκειμένω το LoRa (Long-Range), εξελίσσονται ώστε να επιτραπεί η απροσπέλαστη ασύρματη επικοινωνία σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις. Η προσομοίωση του δικτύου LoRa θεωρείται μεγίστης σημασίας αφού δύναται να χρησιμοποιηθεί με απώτερο στόχο τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των εφαρμογών, που βασίζονται στο LoRa χωρίς εντούτοις να επιβαρύνεται με επιπλέον δαπάνες η υλοποίηση του υφιστάμενου συστήματος. Σκοπός της παρόντος πονήματος είναι να καταδείξει την σπουδαιότητα του LoRa ως νέο πρότυπο ασύρματων επικοινωνιών μεγάλης εμβέλειας αφενός, χαμηλής κατανάλωσης αφετέρου. Επιπρόσθετα, στην παρούσα εργασία διερευνάται το ερώτημα εάν το φυσικό επίπεδο LoRa δύναται να εντοπίσει ενσύρματες εφαρμογές μέσω καναλιών γραμμής ισχύος. Το μοντέλο φυσικού επιπέδου LoRa αναπτύχθηκε σε μια σειρά προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας το μοντέλο ATP-EMTPH, το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα, προκειμένου να επιλέξει τις σωστές παραμέτρους του συστήματος για να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων συσκευών. Τέλος, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα περιβάλλοντα προσομοίωσης LoRa που είναι διαθέσιμα βιβλιογραφικά, αναλύονται οι εφαρμογές LoRa, παρατίθενται μελέτες περιπτώσεων συστημάτων LoRa, οι οποίες εφαρμόζονται σε αντλιοστάσια και εξάγονται ενισχυτικά συμπεράσματα ως προς την βέλτιστη κατανόηση του συστήματος.

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things) αποτελεί μία από τις τρεις σπουδαιότερες τεχνολογικές εξελίξεις της επικείμενης δεκαετίας (συμπεριλαμβανομένου του mobile Internet και την αυτοματοποίηση του knowledgework), ενώ δεν είναι λίγοι εκείνοι που υποστηρίζουν σθεναρά ότι πρόκειται για το επόμενο μεγάλο βήμα στον χώρο της τεχνολογίας, δευτερολογώντας έννοιες όπως π.χ τεχνητή νοημοσύνη και ρομποτική (Insights Team, 2017e). Ως όρος Internet of Things απαντάται στο τέλος της δεκαετίας του 1990 από τον επιχειρηματία Kevin Ashton. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συγκεκριμένος καινοτόμος είναι ένας από τους ιδρυτές του Auto-ID center στο MIT, ενώ ήταν μέρος μιας ομάδας που ανακάλυψε τον τρόπο να συνδέσει τα αντικείμενα με το Διαδίκτυο μέσω μιας ετικέτας RFID.

Ο Burrus (2014, παρ. 13) προσυπογράφει, επισημαίνοντας το γεγονός ότι από όλες τις τάσεις της τεχνολογίας που πραγματοποιούνται τη διανύουσα χρονική περίοδο, η μεγαλύτερη καθίσταται το IoT, καθώς προκαλεί τη μεγαλύτερη επανάσταση αφού προσφέρει τις περισσότερες δυνατότητες εφαρμογής για τα επόμενα χρόνια. Το Ίντερνετ των Πραγμάτων αυξάνει βαθμιαία τη χρηστικότητα του σε παγκόσμια κλίμακα, γεγονός, που επαληθεύεται από πληθώρα μελετών, συμπεριλαμβανομένης μελέτης που δημοσιεύτηκε στο Forbes Insights, που αφορούσε σε 500 στελέχη στην Ευρώπη, στην Αμερική και στην Ασία, που εκπροσωπούσαν μια σειρά βιομηχανίες και εταιρείες τουλάχιστον 500 εργαζομένων.

Μολονότι ο όρος IoT χρησιμοποιείται πλέον σε ευρεία κλίμακα, οι Wortmann και Flüchter (2015) διατυπώνουν την άποψη ότι δεν υφίσταται κοινός ορισμός ή ακριβής έννοια του τι περιλαμβάνει ο συγκεκριμένος όρος. Παρόλο που δεν έχει διατυπωθεί έως τώρα τυπικός ορισμός για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, αρκετοί θεωρητικοί έχουν προσπαθήσει να αποδώσουν την έννοια ανά διάφορα χρονικά διαστήματα. Ενδεικτικά αναφέρονται βιβλιογραφικά οι Huang, Craig, Lin, & Yan, 2016; Lund et al., 2014; Insights Team, 2017c; Ben-Daya et al., 2017; Gigli & Koo, 2011; Lee & Lee, 2015; Madakam et al., 2015; Ornes, 2016.

Επιχειρώντας να αποδώσουμε έναν γενικότερο ορισμό και συμπεριλαμβάνοντας διάφορες παραλλαγές, θα αναφέραμε ότι αποτελεί δίκτυο επικοινωνίας πολλαπλών συσκευών, αυτοκινήτων καθώς και κάθε αντικειμένου που εμπρικλείει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο, με απώτερο στόχο τη σύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων. Σε απλουστευμένη μορφή, η φιλοσοφία, που διέπει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι η σύνδεση του συνόλου των ηλεκτρονικών συσκευών

μεταξύ τους τοπικά ή με δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο παγκόσμια, αφού κάθε αντικείμενο διαθέτει ένα μοναδικό αναγνωριστικό και μπορεί να διευθυνσιοδοτηθεί και να συνδεθεί στο Διαδίκτυο. Σε γενικότερο επίπεδο, το IoT αναφέρεται σε ένα δίκτυο δικτύων με μοναδικά χαρακτηριστικά σημεία λήψης και κοινής χρήσης δεδομένων μέσω διασύνδεσης μηχανών ή/και συσκευών διαδικτυακά, δημιουργώντας δεδομένα, τα οποία δύνανται να αποδώσουν αναλυτικές γνώσεις και να υποστηρίξουν νέες λειτουργίες (Team Insights, 2017c, pp. 4). Το IoT συνίσταται από πολυεπίπεδη στοίβα τεχνολογιών, οι οποίες αποτελούν την αρχιτεκτονική του. Προκειμένου να καταστεί κατανοητή η εφαρμογή του IoT, κρίνεται ως απαραίτητη η αναθεώρηση της αρχιτεκτονικής του.

1.2 LoRa

Είναι διάχυτη πεποίθηση ότι ο κυριότερος στόχος της διαδικτυακής αλληλόδρασης είναι η ανάπτυξη του διαδικτύου σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να διευκολύνεται η απόλυτη επικοινωνία είτε μεταξύ των ανθρώπων είτε μεταξύ των ανθρώπων και των συσκευών είτε επίσης και συσκευών μεταξύ τους, καθιστώντας μια machine-to-machine επικοινωνία (M2M) εφικτή. Το αξιοσημείωτο δε είναι ότι σε ανάλογες περιπτώσεις, η ανθρώπινη παρέμβαση δεν είναι διόλου απαραίτητη. Εισερχόμεστε κλιμακωτά με αυτόν τον τρόπο σε μια νέα εποχή παρουσίας της πολυεπίπεδης επικοινωνίας, αυτοχαρακτηριζόμενη εποχή εν ολίγοις του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Ως εκ τούτου, προκύπτουν πάμπολλες ανάλογες εφαρμογές, οι οποίες απαντώνται σε διάφορους τομείς όπως για παράδειγμα ενδεικτικά αναφέρονται η τεχνολογία στον τομέα της επικοινωνίας, της βιομηχανίας, της γεωργίας, του αθλητισμού, της διασκέδασης, της κτηνοτροφίας, της ασφάλειας, της μεταφοράς καθώς και των καθημερινών εργασιών διαχείρισης, επιστασίας και εποπτείας ενός σπιτικού (Raza U.P., Sooriyabandara M., 2017). Είναι οπότε λογικό, η ταχεία εξέλιξη του IoT να συνεπάγεται επίσης ταχύτατη ανάπτυξη των μεθόδων μετάδοσης του, όπως εν προκειμένω του LoRa. Το LoRa, που σημαίνει "Μεγάλη εμβέλεια" (Long Range) έχει φέρει επανάσταση στο IoT, επιτρέποντας την επικοινωνία δεδομένων σε μεγάλη απόσταση, χρησιμοποιώντας εν αντιθέσει πολύ μικρή ισχύ. Αναλυτικότερα, πρόκειται για ένα από τα LPWAN (δίκτυο ευρείας περιοχής χαμηλής κατανάλωσης) συστήματα που έχουν δυνατότητα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων, ενώ υποστηρίζεται από την ανάπτυξη των IBM, Semtech, Actility, κ.λπ., που είναι μέλη της LoRa Alliance (Augustin A. et al., 2016). Ο στόχος της ανάπτυξης του LoRa είναι η

χαμηλής ισχύος (με μπαταρίες) μετάδοση τελικού κόμβου, η οποία θα μεταδώσει ένα συγκεκριμένο αριθμό πακέτων από δεδομένα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, προκειμένου να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας, η βελτίωση της ποιότητας ζωής καθώς και η καλύτερη δυνατή διαχείριση των υφισταμένων πόρων του πλανήτη.

Σχετικά με την εφαρμογή του LoRa, η LoRa Alliance έχει προτείνει μια αρχιτεκτονική δικτύου στην επικοινωνία LoRa που ονομάζεται LoRaWAN (Bardyn O.S. and N.S.J., Melly T., 2016). Πρόκειται για συντομογραφία του Δικτύου Ευρείας Περιοχής Μεγάλης Εμβέλειας (Long Range Wide Area Network) και αφορά σε τεχνολογία ανοιχτού κώδικα εκπέμποντας σε ζώνες συχνοτήτων χωρίς σχετική άδεια. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρέχει συγκριτικά με το WiFi και το Bluetooth πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια, αποδίδοντας ικανοποιητικά σε εσωτερικούς χώρους, ενώ παράλληλα φαίνεται ότι η εφαρμογή της είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν παρέχουν ικανοποιητική κάλυψη.

Ωστόσο, η ίδια η εφαρμογή του LoRaWAN φαίνεται ότι δεν πληροί τους κύριους σχεδιαστικούς στόχους του LoRa ως ένα από τα πρωτόκολλα LPWAN, κυρίως επειδή ακόμα ένα δίκτυο είναι απαραίτητο για την επεξεργασία και την εμφάνιση δεδομένων (Augustin A. et al., 2016). Αφού λοιπόν ο στόχος είναι η σχεδίαση LPWAN να βασίζεται στην απλή υλοποίηση με χαμηλό κόστος και απλή αρχιτεκτονική, φαίνεται ότι δεν είναι το πλέον κατάλληλο. Η σχεδίαση βασίζεται στο ότι περιλαμβάνει ένα νέο εναλλακτικό πρωτόκολλο που ονομάζεται SLP (Simple LoRa Protocol). Ο σκοπός του σχεδιασμού του SLP είναι η βελτιστοποίηση του σκοπού του σχεδιασμού LPWAN στο LoRa ώστε να πληρούν την ανάπτυξη του συστήματος παρακολούθησης.

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν μελέτες σχετικές με τη χρησιμότητα και την εφαρμογή της προαναφερθείσας τεχνολογίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι Widiando et al. πραγματοποίησαν μια έρευνα για την αποδοτικότητα του LoRa QoS στην Ινδονησία (Widiando AAF and RSED, Pakpahan MSM, 2018), ενώ οι Rosmiati et al (Rosmiati M. Fachru RM Wanti I, 2018) διερεύνησαν τη χρησιμότητα του LoRa με χρήση της συσκευής Raspberry Pi 3. Από την άλλη πλευρά, οι Hsieh, et al μελέτησαν τη χρήση του LoRa ως μέθοδο επικοινωνίας συστήματος παρακολούθησης (Hsieh CL et al., 2017). Επιπρόσθετα, ο Prihatmoko (Prihatmoko D., 2017) διερεύνησε το σύστημα παρακολούθησης με χρήση διακομιστή web που χρησιμοποιεί τη Raspberry Pi συσκευή. Με βάση προηγούμενες μελέτες από τους Rosmiati et al και Hsieh, et al κρίνεται ως επιτακτική ανάγκη οι περαιτέρω διαδικτυακές εγκαταστάσεις για την επεξεργασία και παρουσίαση δεδομένων από τα αποτελέσματα της επικοινωνίας LoRa. Τέλος, ο Prihatmoko έχει παρουσιάσει δεδομένα με τη μορφή

διακομιστή web χωρίς εγκαταστάσεις internet, ενώ η μέθοδος επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν το LoRa.

1.3 LoRaWan

Το LoRaWAN είναι μια ανοιχτή στοίβα πρωτοκόλλου που προτείνεται από τη LoRa Alliance και χρησιμοποιείται για δημόσια δίκτυα LoRa που αναπτύσσονται από φορείς εκμετάλλευσης δικτύου (LoRa Alliance, 2018). Καθορίζει την τοπολογία δικτύου και το μέσο ελέγχου πρόσβασης (MAC) πάνω από το φυσικό στρώμα LoRa. Τα κυριότερα στοιχεία του δικτύου LoRaWAN συνοψίζονται στους τερματικούς κόμβους LoRa, στις πύλες (gateways) και στον διακομιστή δικτύου. (LoRa Alliance, 2015), (LoRa Alliance, 2018). Οι τερματικοί κόμβοι LoRa επικοινωνούν με τις πύλες χρησιμοποιώντας το φυσικό στρώμα (physical layer) LoRa. Οι πύλες συνδέονται με το διακομιστή δικτύου μέσω IP-backhaul με υψηλή απόδοση, όπως το Ethernet ή δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, ενώ τα πακέτα αναμετάδοσης πύλης με διαφάνεια μεταξύ των τελικών κόμβων LoRa και του δικτύου υπηρέτη (network server).

Το LoRaWAN εν προκειμένω χρησιμοποιεί αστεροειδή τύπο δικτύου, καθώς όλοι οι τερματικοί κόμβοι συνδέονται με τις αντίστοιχες πύλες, οι οποίες συνδέονται με τον αντίστοιχο κεντρικό διακομιστή δικτύου (central network server). Με αυτό τον τρόπο οι διαχειριστές έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν τη δική τους υποδομή ή εναλλακτικά να αναζητήσουν κατάλληλο πάροχο. Συμπερασματικά, η παραπάνω ιδιότητα το καθιστά δικαίως έναν από τους πλέον δημοφιλείς τύπους LPWAN.

Σε αντίθεση με ένα συμβατικό κυψελοειδές σύστημα, δεν προκύπτει αρχική διαδικασία αναζήτησης πύλης στους τερματικούς κόμβους, ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε κόμβος δεν σχετίζεται με μια συγκεκριμένη πύλη (LoRa Alliance, 2015), καθώς ένα πακέτο από έναν συγκεκριμένο κόμβο μεταδίδεται στο δίκτυο διακομιστή μέσω πολλαπλών πυλών. Ο διακομιστής δικτύου αποκωδικοποιεί διπλότυπα πακέτα που αναμεταδίδονται από τις πολλαπλές πύλες και επιλέγει το περισσότερο αξιόπιστο πακέτο. Εάν είναι απαραίτητο, ο διακομιστής του δικτύου στέλνει μια επιβεβαίωση στον τελικό κόμβο μέσω της αντίστοιχης πύλης. Με αυτόν τον τρόπο, η σύνδεση LoRaWAN διασφαλίζει ποικιλομορφία, κέρδος και απόδοση στους κινητούς τερματικούς κόμβους (LoRa Alliance, 2018).

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η εφαρμογή του LoRaWAN προϋποθέτει ικανοποιητική σχεδίαση των πυλών έτσι ώστε κάθε κόμβος να μπορεί να φτάσει σε μία ή πολλές πύλες μέσα σε ένα μόνο άλμα επικοινωνίας LoRa. Συνάμα, ο βέλτιστος σχεδιασμός των κυψελών φαίνεται να μην επηρεάζει τα δημόσια δίκτυα που εκτελούνται από τους χειριστές δικτύου. Εντούτοις, για ένα προσωρινά εκτελούμενο ιδιωτικό ad-hoc δίκτυο (π.χ. σε κατασκευαστικά πεδία), η ανάπτυξη του δικτύου χρειάζεται να είναι απλή και αξιόπιστη με δυνατότητα επέκτασης. Επίσης, έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις ότι προτιμώνται τα ιδιωτικά δίκτυα έναντι των δημοσίων δικτύων που απαιτούν συνδρομή και μηνιαία χρέωση για κάθε κόμβο. Επίσης χρειάζεται να αναφερθεί ότι στην εφαρμογή του

LoRaWAN, η άμεση επικοινωνία δεν υποστηρίζεται μεταξύ των κόμβων LoRa. Οποιαδήποτε επικοινωνία κόμβου σε κόμβο ενδείκνυται να πραγματοποιείται διά του διακομιστή δικτύου μέσω two-gateway μετάδοσης.

Στο LoRaWAN, δεν υπάρχει πολλαπλάσιο σύστημα πρόσβασης για την πρόληψη της σύγκρουσης μεταξύ των πακέτων που προέρχονται από τους τερματικούς κόμβους, ενώ η πρόσβαση πολλαπλής αίσθησης φορέα (CSMA) χρησιμοποιείται σε συμβατικά ασύρματα δίκτυα, όπως το 802.11, για να μετριάσει το ποσοστό σύγκρουσης. Η χωρητικότητα του συνδέσμου του LoRaWAN μειώνεται σε αυτή του καθαρού Aloha όταν ένας σημαντικός αριθμός εκπομπών κόμβων συμβαίνει ταυτόχρονα (Augustin A. et al, 2016). Συνοπτικά, υπάρχουν δύο προβλήματα όταν χρησιμοποιείται το LoRaWAN για την εξυπηρέτηση εφαρμογών σε ένα ιδιωτικό δίκτυο κυψέλης με κακό προγραμματισμό: 1) Παρουσία τερματικών κόμβων που είναι αποσυνδεδεμένοι από το δίκτυο. 2) Ένα υψηλό ποσοστό σύγκρουσης λόγω των παρεμβολών μεταξύ των ακραίων κόμβων.

1.4 Χρήσεις τροποποιημένου LoRaWan

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που σχετίζονται με το τυπικό Lo-RaWAN στις περιπτώσεις, που εφαρμόζεται σε ad-hoc ιδιωτικά δίκτυα, αναπτύχθηκε μια τροποποιημένη στοίβα πρωτοκόλλου του LoRa που εξυπηρετεί πλέγματα δικτύωσης και επιτρέπει την πολλαπλή πρόσβαση με την απαραίτητη διαίρεση του χρόνου. Επειδή οι συμβατικοί τύποι δικτύου, όπως για παράδειγμα οι δενδροειδείς και οι αστεροειδείς, έχουν πλέον καθιερωθεί ενώ ταυτόχρονα διατίθενται τυποποιημένοι και ουδέτεροι, είναι αυτονόητο ότι χρησιμοποιούνται συχνά για τα δημόσια δίκτυα. Αξίζει, εντούτοις να επισημανθεί ότι το κοινό πρότυπο και η συμβατότητα δεν είναι επαρκώς καθορισμένα για τα δίκτυα πλέγματος, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά για ιδιωτικά δίκτυα με εφαρμογή συγκεκριμένων πρωτοκόλλων (Wikipedia, Mesh Networking, 2022).

LoRa Mesh Network στη ζώνη ISM

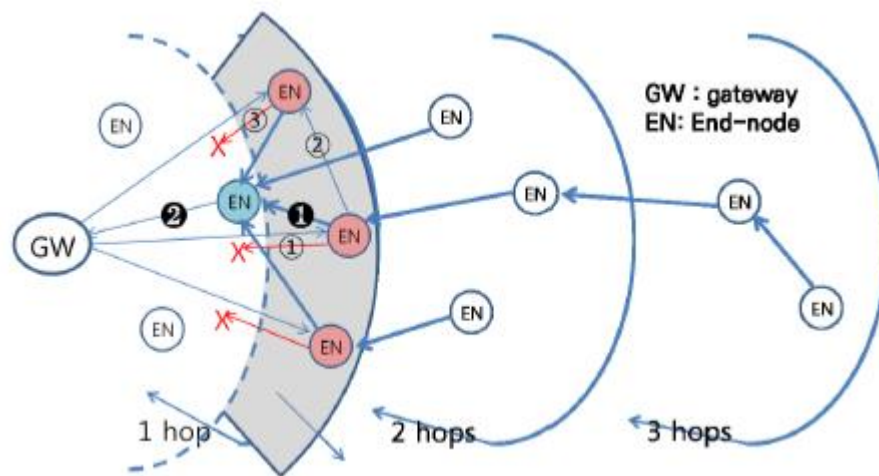
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν προκύπτει ιεραρχία σε ένα δίκτυο πλέγματος, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να αναμεταδίδει, να πακετάρει και να συνεργάζεται με άλλους κόμβους για την αποτελεσματική δρομολόγηση του πακέτου προς τις πύλες. Τα δίκτυα πλέγματος συνδέονται δυναμικά και καταλήγουν στους κόμβους μαζί ενώ διαμορφώνουν μόνοι τους τις διακλαδώσεις (Alotaibi E., 2012). Στα συστήματα IoT που βασίζονται σε πρωτόκολλο LPWAN, οι τερματικοί κόμβοι αποτελούνται από χαμηλής ισχύος συσκευές, που μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα ετών με μπαταρία σε σχήμα νομίσματος. Κατά συνέπεια, η ισχύς μετάδοσης των ακραίων κόμβων συνήθως διατηρείται χαμηλότερη από αυτή των πυλών.

Σε ορισμένες χώρες, προκαθορίζονται διαφορετικές μέγιστες δυνάμεις μετάδοσης για την ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη βάσει πρωτοκόλλου. Άμεση συνέπεια είναι η ανισορροπία, που προκαλείται σε ένα πραγματικό δίκτυο πλέγματος. Σε γενικότερο πλαίσιο, ένα οποιοδήποτε δίκτυο πλέγματος έχει τη

δυνατότητα να αυτορρυθμιστεί χρησιμοποιώντας αλγόριθμους υπερχειλίσης.

Η δικτύωση που βασίζεται σε υπερχειλίση μπορεί να συνοψιστεί σε τρία μέρη (Alotaibi E., 2012). Πρώτον, μια πύλη εκπέμπει ένα μήνυμα. Οι τερματικοί κόμβοι λαμβάνουν το μήνυμα και το αναμεταδίδουν με ένα ιστορικό υποδοχής. Όταν τελειώσει η διαδικασία υπερχειλίσης, οι περισσότεροι από τους τερματικούς κόμβους θα είχαν λάβει το μήνυμα αρκετές φορές είτε απευθείας από την πύλη είτε μέσω άλλων τελικών κόμβων.

Στη συνέχεια, προετοιμάζεται ένας πίνακας πλέγματος για κάθε ακραίο κόμβο με βάση το ιστορικό λήψης και την ένδειξη της ισχύος του σήματος λήψης (RSSI) του μηνύματος. Το σχήμα 1 δείχνει το δίκτυο LoRa με ανισορροπία ισχύος (Ghosh D., Lott C., 2007).



Σχήμα 1 : Δικτύωση ζεύξεων με την ανισορροπία σε ανερχόμενες και κατερχόμενες δυνάμεις μετάδοσης.

Το δίκτυο πλέγματος προϋποθέτει το πολύ τρία άλματα, και η κάλυψη ενός άλματος της πύλης είναι μέχρι την περιοχή ανισορροπίας που υποδηλώνεται με την γκριζα περιοχή. Για να ξεκινήσει η δικτύωση mesh, μια πύλη εκπέμπει ένα σήμα. Εάν ένας κόμβος βρίσκεται έξω από την κάλυψη της πύλης, προσπαθεί να συνδεθεί με έναν γειτονικό κόμβο για τη μετάδοση της ανερχόμενης ζεύξης. Ο τελικός κόμβος, υποδεικνύεται με τον κύκλο σε κόκκινο χρώμα, βρίσκεται εντός της κάλυψης της πύλης και μπορεί να λάβει το σήμα κατερχόμενης ζεύξης απευθείας από την πύλη. Αναλόγως, η πύλη και οι γειτονικοί τερματικοί κόμβοι που υποδεικνύονται χρησιμοποιώντας τους άλλους κόκκινους κύκλους είναι πάνω από το πλέγμα του. Ωστόσο, ένα πακέτο ανοδικής ζεύξης που μεταδίδεται από τον τελικό κόμβο στην περιοχή ανισορροπίας, δεν μπορεί να παραδοθεί στην πύλη ούτε απευθείας, ούτε μέσω των γειτονικών κόμβων που υποδεικνύονται χρησιμοποιώντας τους κόκκινους κύκλους.

Αυτή η ανισορροπία ενδέχεται να οδηγήσει σε διακοπή ή σε επαναφορά της διαδικασίας δρομολόγησης κατά τη χρήση του συμβατικού αλγορίθμου υπερχειλίσης πλέγματος. Προκειμένου να διευθετηθούν τα προαναφερθέντα ζητήματα, αφαιρείται η πύλη και οι γειτονικοί ακραίοι κόμβοι από τον πίνακα πλέγματος και τοποθετείται ο τελικός κόμβος, που υποδεικνύεται χρησιμοποιώντας έναν μπλε κύκλο,

στο πάνω μέρος του πίνακα πλέγματος στο τροποποιημένο πρωτόκολλο LoRa, εάν το ρεύμα του τελικού κόμβου βρίσκεται στην περιοχή ανισορροπίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

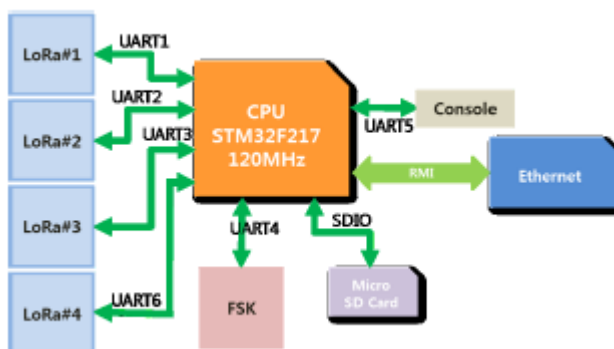
Σχετικά με τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου δικτύου πλέγματος κρίνουμε απαραίτητο να αναφέρουμε αρχικά ότι δεν προκύπτει ανάγκη για προγραμματισμό κυψελών με τις πύλες και τους τερματικούς κόμβους να μπορούν να αναπτυχθούν με σχετικά απλό και ευέλικτο τρόπο. Οι διαδρομές δρομολόγησης (διακλαδώσεις) καθορίζονται αυτόματα μεταξύ των τερματικών κόμβων. Εάν υπάρχει αστοχία στην υπάρχουσα δρομολόγηση διαδρομής, γίνεται στο δίκτυο εκ νέου δρομολόγηση και επαναδιαμορφώνονται νέες διαδρομές. Το δίκτυο είναι βελτιστοποιημένο για επικοινωνία χαμηλού ποσοστού στις ζώνες ISM υπο-GHz. Είναι δυνατές οι αμφίδρομες επικοινωνίες N:1 και 1:N. Επιπρόσθετα, το δίκτυο είναι κατάλληλο για έξυπνη μέτρηση, συστήματα διαχείρισης ενεργειακών κτιρίων (EMS) και παρακολούθηση της ασφάλειας σε κατασκευαστικούς τομείς.

Σύστημα με γνώμονα τα συμβάντα με χρονική αυλάκωση (TEDS)

Σχετικά με τα συστήματα που διαθέτουν πολλούς τερματικούς κόμβους σε λιγότερο από ένα hop (περιοχή άμεσης κάλυψης) και ανάγκη συλλογής δεδομένων, αναπτύχθηκε μια στοίβα TEDS για να μειωθεί ο ρυθμός σύγκρουσης δεδομένων. Αυτό αποτρέπει την ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου λόγω σημάτων επεξεργασίας συμβάντων και καταστροφής δεδομένων. Ειδικότερα, έχει αποδειχθεί ότι είναι καταλληλότερα για τηλεμέτρηση συστημάτων νερού/αερίου που λειτουργούν με μπαταρία, συστήματα προσομοίωσης μάχης που απαιτούν δυνατότητες σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και έλεγχο φωτισμού του δρόμου που απαιτεί γρήγορη απάντηση πολλών κόμβων.

Ανάπτυξη πύλης

Το Σχήμα 2 δείχνει την αρχιτεκτονική συστήματος της πύλης σύμφωνα με το προτεινόμενο πρωτόκολλο LoRa. Τα πλεονεκτήματα, που παρουσιάζει η πύλη είναι αρκετά. Καταρχήν ισχύει για τις περισσότερες εφαρμογές λειτουργίας του IoT,. Επιπλέον, υποστηρίζει το μέγιστο τέσσερα κανάλια LoRa (τελικός κόμβος δικτύου πλέγματος), ενώ παράλληλα είναι συμβατό με πρόσθετο ασύρματο backhaul με μετατόπιση συχνότητας 38,4 kbps, πληκτρολόγηση (FSK), Ethernet (σύνδεση WAN) και εσωτερική και εξωτερική χρήση (αδιάβροχο σχέδιο)



Σχήμα 2 : Η ανεπτυγμένη πύλη που υποστηρίζει ένα δίκτυο πλέγματος LoRa

Περιπτώσεις χρήσης του τροποποιημένου LoRaWAN

Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις εφαρμογής του προτεινόμενου πρωτοκόλλου LoRa, το οποίο δύναται να υλοποιηθεί σε ιδιωτικό δίκτυο.

Σύστημα παρακολούθησης παγώματος σωλήνων πυρκαγιάς

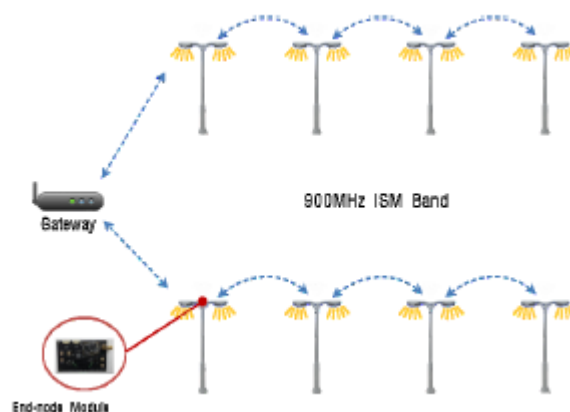
Το Σχήμα 3 δείχνει την τοποθεσία εφαρμογής. Υπάρχουν περισσότεροι από 600 αισθητήρες θερμοκρασίας πυροσωλήνων σε περιοχή 2,3 χλμ και αντίστοιχα 4,8 χλμ. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο συγκεκριμένο περιβάλλον, ήταν δύσκολο να βρεθούν επαρκείς θέσεις για την εγκατάσταση πύλης. Εξαιτίας των σοβαρών ραδιοφωνικών παρεμβολών και της παραλλαγής καναλιών, ρυθμίστηκε εκ νέου η διαδρομή δρομολόγησης. Εν τέλει, το προτεινόμενο δίκτυο πλέγματος LoRa λειτούργησε με επιτυχία.



Σχήμα 3: Δικτυωτό δίκτυο LoRa για αντιπαγωγική προστασία σωλήνων νερού πυρός σε μεγάλα φυτά.

Εξυπνο σύστημα ελέγχου φωτός δρόμου

Χιλιάδες φώτα δρόμου εγκαταστάθηκαν σε ιδιωτικό δίκτυο με μια ενιαία πύλη (υβριδική τεχνολογία TEDS και Mesh) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Με τη συγκεκριμένη δομή δικτύου φαίνεται ότι μόνο ένα backhaul ήταν απαραίτητο, οπότε δεν χρειαζόταν κυψελοειδή τέλη συνδρομής και τηλεπικοινωνιών.

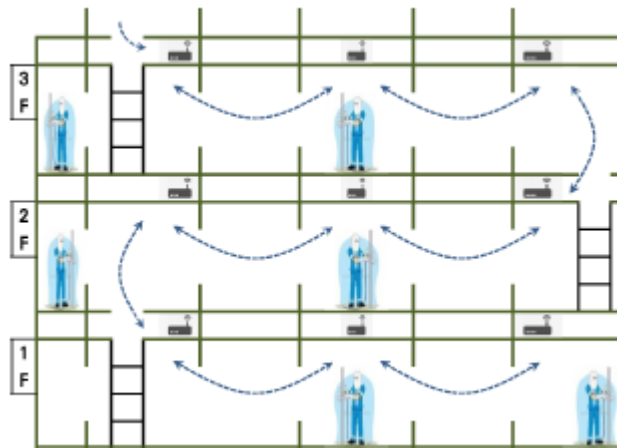


Σχήμα 4 : Δίκτυο πλέγματος LoRa για έλεγχο φωτισμού δρόμου.

Η σύνδεση στο διαδίκτυο δεν είναι απαραίτητη για πύλες, επενδύσεις στο δίκτυο και δεν απαιτούνται εγκαταστάσεις και συντήρηση. Η λύση αυτού του αυτοδικτύου επιτρέπει πρόσθετες υπηρεσίες όπως τη μέτρηση νερού και την επεξεργασία κλήσεων έκτακτης ανάγκης σε ιδιωτικά δίκτυα.

Παρακολούθηση τοξικών αερίων κατά τη ναυπήγηση μεγάλων πλοίων

Η ναυπήγηση οποιουδήποτε πλοίου αποτελεί ένα ακόμη παράδειγμα εφαρμογής, καθώς απαιτεί την λειτουργία ενός συστήματος διαχείρισης ασφάλειας . Σε αυτό το πλαίσιο, τοποθετήθηκαν ετικέτες LoRa στους μάντες εργαζομένων σε εργοτάξιο ναυπήγησης πλοίου, έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής παρακολούθηση της εργασίας, των υφιστάμενων θέσεων εργασίας, του περιβάλλοντος και του κλιματισμού. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, οι εργαζόμενοι είχαν τη δυνατότητα να πιάσουν ένα κουμπί κλήσης έκτακτης ανάγκης που ήταν συνδεδεμένο στο Tag LoRa και ειδοποιούσε αμέσως τον υπεύθυνο διαχείρισης. Το δίκτυο είχε σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί σε χρονικό ορίζοντα εξαμήνου χωρίς να κρίνεται απαραίτητη η αντικατάσταση της μπαταρίας. Σε αυτή την περίπτωση, που η εγκατάσταση Διαδικτύου για μια backhaul πύλη κρίνεται υψηλού κόστους, προτείνεται η δικτύωση με πλέγμα LoRa ως η καλύτερη δυνατή εναλλακτική. Το Σχήμα 5 καταδεικνύει την ανάπτυξη του συστήματος (ετικέτα LoRa, τερματικοί κόμβοι LoRa και πύλες).



Σχήμα 5 :Δίκτυο πλέγματος LoRa για παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα στις τοποθεσίες της ναυπηγικής βιομηχανίας

Κεφάλαιο 2^ο

Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και ευρείας κάλυψης (LPWA)

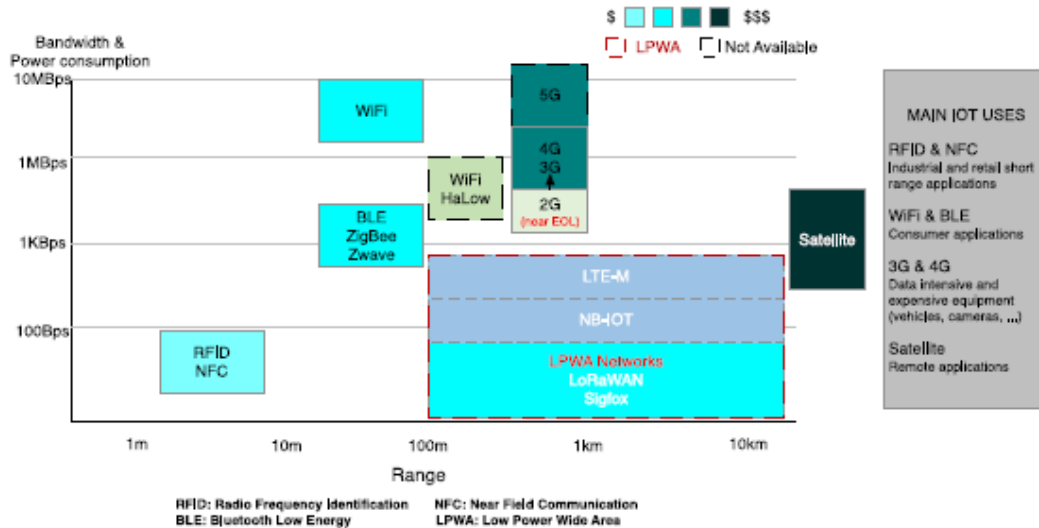
Όπως έχει ήδη επισημανθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ταχεία ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) επιτρέπει την διάχυτη συνδεσιμότητα μεταξύ μηχανών μέσω ασύρματης επικοινωνίας, διευκολύνοντας την καθημερινότητα πολλών ανθρώπων, ενδεικτικά αναφέρουμε τα έξυπνα σπίτια (Sivaraman et al., 2015), η έξυπνη μεταφορά (Zhou et al., 2012) και οι μηχανισμοί παρακολούθησης πληρότητας κάδων ανακύκλωσης (Navghane et al., 2016). Οι συσκευές IoT αντιλαμβάνονται τις συγκεκριμένες πληροφορίες και τις μοιράζονται μεταξύ τους όπως άλλωστε και με τους ανθρώπους εξυπηρετώντας τον απώτερο στόχο των αποτελεσματικών υπηρεσιών (Dartmann et al., 2019; Rawat et al., 2017). Ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών IoT εκτιμήθηκε ότι θα ξεπερνούσε τα 25 δισεκατομμύρια μέχρι το 2020 (Ericsson, 2016) και θα απέφερε έσοδα της τάξεως των 7 τρισεκατομμυρίων δολαρίων (Berthelsen και Morrish, 2015).

Εντούτοις, εξαιτίας των διαφορετικών απαιτήσεων, που επιβάλλει η επικοινωνία, αυτές οι συγκεκριμένες συσκευές IoT εμπίπτουν σε ολοένα αυξανόμενους περιορισμούς (όπως για παράδειγμα ασύμφορη απώλεια ενέργειας, αυξημένο κόστος εγκατάστασης και κάλυψης), γεγονός που δρα αποτρεπτικά στο ενδεχόμενο περαιτέρω βελτίωσης απόδοσης (Song et al., 2016). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι δεν υφίσταται τεχνολογία ικανή να παρέχει αποτελεσματική συνδεσιμότητα υπό διαφορετικές καταστάσεις (συμπεριλαμβανομένης της μικρής και μεγάλης εμβέλειας), προκειμένου να ξεπεραστούν οι προαναφερόμενοι περιορισμοί. Συμπερασματικά, χρειάζεται να αναπτυχθούν οι κατάλληλες τεχνολογίες αντιμετώπισης διαφορετικών απαιτήσεων για διαφορετικές εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων.

Σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας, παρατηρείται ότι υπάρχει πληθώρα αποτελεσματικών εφαρμογών έτσι ώστε να πραγματοποιείται η επικοινωνία, όπως για παράδειγμα τα Bluetooth, ZigBee, WiFi, LongTerm Evolution (LTE). Οι συγκεκριμένες εφαρμογές έχουν την δυνατότητα να παρέχουν δεδομένα, μεταδόσεις υψηλής ταχύτητας και αξιόπιστες επικοινωνίες μεταξύ συσκευών IoT. Παρόλαυτα, το μειονέκτημα, που παρουσιάζουν είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης σε συνδυασμό με την υψηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τα ακατάλληλα για επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας, η οποία απαιτεί από τις συσκευές να λειτουργούν σε χαμηλή ισχύ. Καταλήγουμε εν προκειμένω αβίαστα στο συμπέρασμα της αναγκαιότητας μιας σειράς νέων ασύρματων πρωτοκόλλων, τα επονομαζόμενα «δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος» (LPWA). Τα συγκεκριμένα δίκτυα αποτελούν μεγάλο κίνητρο για την υλοποίηση της επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας σε χαμηλή ισχύ, αφού έχουν την δυνατότητα να παρέχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε συνδυασμό με υψηλή ενεργειακή απόδοση

καθώς και υψηλές δυνατότητες κάλυψης.

Στο Σχήμα 6 είναι ευδιάκριτη η σύγκριση μεταξύ LPWA δικτύων και άλλων τεχνολογιών συνδεσιμότητας σχετικά με το εύρος ζώνης, την κατανάλωση ενέργειας, το εύρος και το κόστος (Iotconnectivity, 2019).



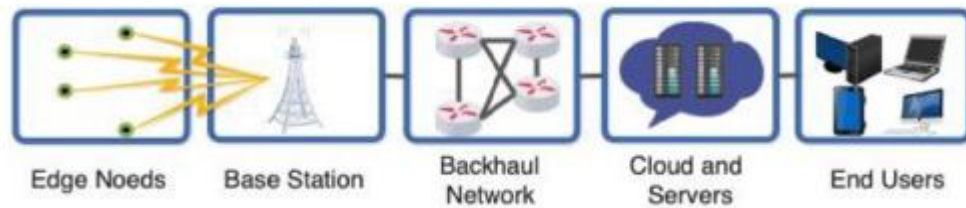
Σχήμα 6 : Σύγκριση μεταξύ δικτύων LPWA και άλλων τεχνολογιών συνδεσιμότητας (Iotconnectivity, 2019).

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν ενδεικτικές έρευνες, που επικεντρώνονται στις τεχνολογίες δικτύου LPWA. Οι Mekki et al. παρείχαν μια ολοκληρωμένη μελέτη του Sigfox, LoRa και NB-IoT σχετικά με τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τη χωρητικότητα και το κόστος (Mekki et al., 2019). Συνδυαστικά, εξέτασαν σενάρια εφαρμογής επεξηγώντας την καταλληλότητα κάθε τεχνολογίας για κάθε σενάριο. Παρόλαυτα, ο περιορισμός της συγκεκριμένης μελέτης ήταν η αδυναμία να διερευνηθούν οι βασικές τεχνολογίες δικτύου LPWA ώστε να προβούν σε μια σύγκριση, προκειμένου να καταδειχθεί η διαφορά μεταξύ αυτών των LPWA τεχνολογιών δικτύου. Από την άλλη πλευρά, οι Raza et al. διερεύνησαν διάφορες τεχνολογίες LPWA και τις δραστηριότητες τυποποίησης διαφορετικών οργανισμών (Raza et al., 2017). Επίσης, ανέλυσαν τις ερευνητικές προκλήσεις προτείνοντας ταυτόχρονα πιθανές λύσεις σε αυτές.

Ανάλογες ερευνητικές αναζητήσεις αναφέρονται και από τους Ali et al. καθώς παρείχαν μια λεπτομερή έρευνα τεχνολογιών επικοινωνίας, αρχιτεκτονικές και πλατφόρμες ανάπτυξης που είχαν την δυνατότητα να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των εφαρμογών M2M (Ali et al., 2017). Εντούτοις, ο περιορισμός, που αντιμετώπισαν παρατηρήθηκε στο γεγονός ότι δεν είχαν την δυνατότητα να αναλύσουν τις αναπτυξιακές προκλήσεις των τεχνολογιών LPWA και να εισάγουν τους διαφορετικούς τομείς εφαρμογών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το LPWA είναι ένα νέο σχήμα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί ενέργεια χαμηλής ισχύος για να επιτευχθεί η επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας Machine to Machine (M2M) με

χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται ένα τυπικό δίκτυο LPWA αρχιτεκτονικής (Sanchez-Iborra and Cano, 2016), η οποία είναι παρόμοια με την τυπική αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου.



Σχήμα 7 : Αρχιτεκτονική δικτύου LPWA (Sanchez-Iborra and Cano, 2016).

Οι τεχνικές LPWA παρουσιάζουν συνήθως αστεροειδή τοπολογία δικτύου, ενώ τα περιβάλλοντα δεδομένα συλλέγονται σε κόμβους και μεταδίδονται σε σταθμούς βάσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των κανονισμών κύκλου λειτουργίας των σταθμών βάσης, οι τεχνολογίες LPWA δεν χρειάζονται αναμετάδοση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων από την πύλη προς τους κόμβους, γεγονός που μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνει την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Τα δίκτυα LPWA είχε ήδη διαφανεί από το 2017 ότι θα ελέγχουν μια πολλά υποσχόμενη αγορά της τάξεως του 25% των IoT συσκευών, χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία επικοινωνίας (Raza et al., 2017). Επιπρόσθετα, η εμφάνιση των τεχνολογιών LPWA αντισταθμίζει την ανεπάρκεια των παραδοσιακών τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας και μικρής εμβέλειας IoT σχετικά με την μετάδοση σε μεγάλη απόσταση όπως άλλωστε και το υψηλό κόστος εγκατάστασης.

Το εύρος των ασυρμάτων δικτύων μικρής εμβέλειας, όπως έχει ήδη αναφερθεί (π.χ. Bluetooth, ZigBee και WiFi) περιορίζεται σε μερικές δεκάδες μέτρα αναλογιζόμενοι την καλύτερη δυνατή περίπτωση (Sinha et al., 2017). Παρόλο που τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπως LTE, Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM), κ.λπ. έχουν την δυνατότητα να επιτύχουν μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις μέσω multi-hop mesh network, δεν αποτελούν την ιδανική λύση, καθώς το κόστος ανάπτυξης και επικοινωνίας δικτύου παραμένει πάρα πολύ υψηλό (Finnegan και Brown, 2018). Προκειμένου να μειωθεί το κόστος της επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας, οι τεχνολογίες LPWA, οι οποίες επιτυγχάνουν εύρος λίγων έως δεκάδων χιλιομέτρων και διάρκεια μπαταρίας δέκα ετών και άνω σε βάρος χαμηλού ρυθμού δεδομένων (περίπου 10 kb/s), αποτελούν την ιδανική λύση για τη σύνδεση όλων των συσκευών IoT (Petajajarvi et al., 2015).

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι οι τεχνολογίες LPWA πραγματοποιούν μεταδόσεις μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργεια στο κόστος αφενός χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (συνήθως δεκάδες kb/s) αφετέρου υψηλής καθυστέρησης (κατά μέσο όρο μερικά δευτερόλεπτα ή λεπτά). Συνοψίζοντας, οι τεχνολογίες LPWA αξιολογούνται ως κατάλληλες για εκείνες τις περιπτώσεις χρήσης που παρουσιάζουν ανοχή στην καθυστέρηση δικτύου, απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ρεύματος και χαμηλό κόστος και δεν χρειάζονται ρυθμό μετάδοσης.

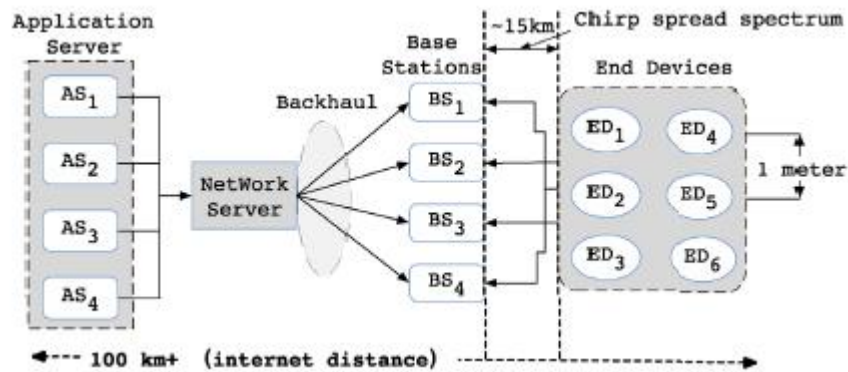
2.1 LoRa

Το LoRa (Long Range) αναπτύχθηκε και διατέθηκε στο εμπόριο από την Semtech Corporation. Πρόκειται για μια αναδυόμενη τεχνολογία φυσικού επιπέδου, η οποία λειτουργεί σε μια ζώνη χωρίς άδεια κάτω του 1 GHz για την παροχή δυνατότητας δικτύου ευρείας περιοχής (Semtech, 2019). Υπάρχουν 433 MHz και 868 MHz διαθέσιμα στην Ευρώπη, ενώ τα 868 MHz χρησιμοποιούνται περισσότερο εξαιτίας της ευρύτερης συχνότητάς τους και των λιγότερο αυστηρών απαιτήσεων κύκλου εργασίας. Επίσης, υιοθετείται η διαμόρφωση φάσματος εξάπλωσης που προέρχεται από τη διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum (CSS) σε εφαρμογές αμφίδρομης επικοινωνίας (Reynders and Pollin, 2016).

Το CSS αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1940 και χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη στρατιωτική ανίχνευση για τις επικοινωνίες μεγάλης απόστασης με τις ελάχιστες παρεμβολές. Το LoRa αποτελεί την πρώτη εμπορική χρήση με εφαρμογή χαμηλού κόστους σε μεγάλες αποστάσεις, το οποίο χρησιμοποιεί ενσωματωμένη Διόρθωση Προώθησης Σφάλματος (FEC) προκειμένου να εξασφαλίσει την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας (Bor et al., 2016). Το LoRaWAN αποτελεί το καλύτερα υποστηριζόμενο πρωτόκολλο ανώτερου επιπέδου για το LoRa. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα που διαχειρίζεται η LoRa Alliance, η οποία υποστηρίζει την ασφαλή επικοινωνία για ωφέλιμα φορτία που κυμαίνονται από 19 έως 250 byte.

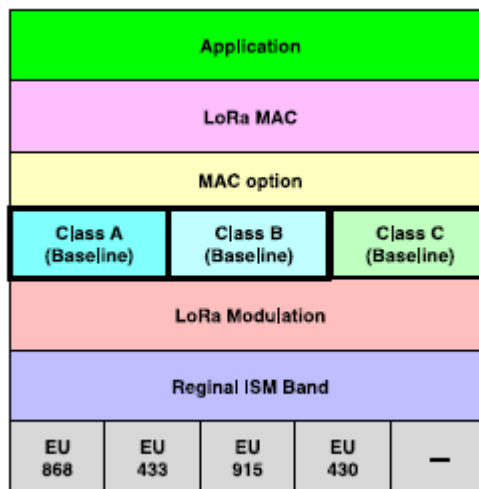
Σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί η πολύ μικρή χωρητικότητα μηνυμάτων 12 byte του LoRaWAN. Η ανάπτυξη ενός παρόμοιου δικτύου απαιτεί NetID από την LoRa Alliance ή αγορά του δικαιώματος από έναν πάροχο δικτύου που μπορεί να δημιουργήσει ένα ιδιωτικό δίκτυο LoRaWAN. Το εύρος επικοινωνίας του LoRaWAN εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα την ισχύ μετάδοσης, το εύρος ζώνης, τη συχνότητα φορέα, το σχήμα κωδικοποίησης και τους παράγοντες εξάπλωσης (Augustin et al., 2016). Ο παράγοντας spread σηματοδοτεί την αναλογία μεταξύ του ρυθμού συμβόλων και του ρυθμού τσιπ, ο οποίος διαθέτει έξι τιμές (7–12). Η αύξηση του συντελεστή διασποράς συνεπάγεται την αύξηση αφενός της ανθεκτικότητας στο θόρυβο και τη μείωση αφετέρου του ρυθμού δεδομένων. Το συγκεκριμένο γεγονός έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων παραγόντων διασποράς σε μεγαλύτερης εμβέλειας επικοινωνίας με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Μια τυπική αρχιτεκτονική LoRaWAN διαφαίνεται στο Σχήμα 8, στην οποία υφίστανται πύλες οι οποίες είναι προσαρμοσμένες με τέτοιον τρόπο, ώστε να αναμεταδίδουν τα μηνύματα μεταξύ ενός κεντρικού δικτύου και τελικών συσκευών.



Σχήμα 8 : Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN (Alliance, 2015b)

Σε ένα δίκτυο LoRaWAN, οι τερματικοί κόμβοι δεν συσχετίζονται με μια συγκεκριμένη πύλη, αλλά συνδέονται με πολλαπλές πύλες μέσω singlehop επικοινωνίας για τη μετάδοση αισθητών δεδομένων. Οι πύλες λαμβάνουν τα δεδομένα και προωθούνται στον διακομιστή δικτύου μέσω δικτύων backhaul (π.χ. κινητό, ethernet, WiFi και δορυφορική). Ο διακομιστής δικτύου έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει τα διπλότυπα δεδομένα από πολλές πύλες και να επιστρέψει την απάντηση, προκειμένου να διασφαλιστεί η επιτυχής επικοινωνία. Στο Σχήμα 9 φαίνεται ότι υπάρχουν συνήθως τρεις τύποι κατηγορίας συσκευών στα δίκτυα LoRaWAN, συγκεκριμένα Κλάση A, Κλάση B και Κλάση Γ.



Σχήμα 9 : Τυπική αρχιτεκτονική συστήματος μιας τελικής συσκευής LoRaWAN (Alliance, 2015a).

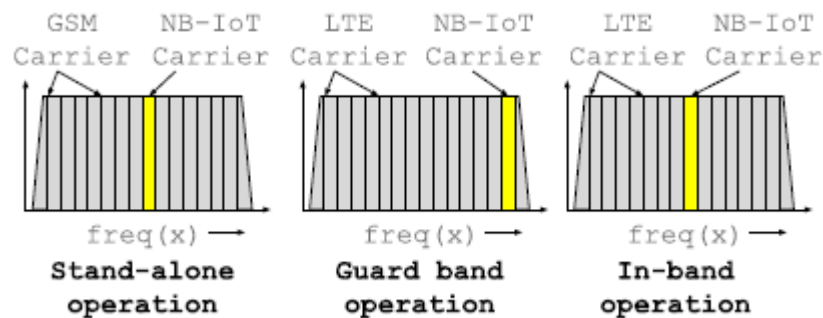
Η κατηγορία A είναι η συσκευή χαμηλότερης ισχύος, παραμένοντας τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας και ενεργοποιείται μόνο σε προγραμματισμένη ώρα ή όποτε χρειάζεται να μεταδώσει δεδομένα. Η Κλάση B επεκτάθηκε από την κλάση A ανοίγοντας επιπλέον παράθυρα λήψης σε προγραμματισμένη ώρα για να προσδιορίσει το χρόνο λήψης δεδομένων. Η κλάση Γ έχει την ελάχιστη καθυστέρηση όπως στην ακρόαση για τη λήψη των δεδομένων ανά πάσα στιγμή εκτός από τη μετάδοση δεδομένων.

2.2 NB-IoT

Οι NB-IoT (NarrowBand IoT), επικοινωνίες τύπου Machine (MTC) και GSM εκτεταμένης κάλυψης (EC-GSM) είναι οι τρεις νέες τεχνολογίες που εισήχθησαν και ορίστηκαν στη 3rd Generation Partnership Project (3GPP) έκδοση 13 για την παροχή ευρέος φάσματος επικοινωνίας και χαμηλού κόστους για συγκεκριμένες εφαρμογές IoT με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Διαφορετικό από τις άλλες δύο νέες τεχνολογίες και ενισχυμένο από προηγούμενες εργασίες, το NB-IoT θεωρείται ως μια νέα τεχνολογία, η οποία μπορεί να συνυπάρχει αλλά όχι σε πλήρως συμβατικό επίπεδο με τις υπάρχουσες τεχνολογίες 3GPP (Wang et al., 2017).

Παρά το ότι το NB-IoT είναι ενσωματωμένο στο πρότυπο LTE, απλοποιεί πολλές δυνατότητες του LTE με στόχο τη μείωση του κόστους και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, όπως η χρήση μιας διαφορετικής διαδικασίας αναζήτησης κυψελών, η αξιοποίηση διαφορετικού εύρους ζώνης, η προσαρμογή μιας τροποποιημένης τεχνικής τυχαίας πρόσβασης, κ.λπ. Ο συμβιβασμός σχετικά με το ρυθμό δεδομένων, την καθυστέρηση και την απόδοση του φάσματος έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη κάλυψη και τη μειωμένη ισχύ κατανάλωσης. Επιπλέον, με την εκμετάλλευση μιας στενότερης ζώνης, η τιμή του τσιπ NB-IoT παρουσιάζεται επίσης μειωμένη ώστε να αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Το NB-IoT χρησιμοποιεί τις αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων ως LTE και χρησιμοποιεί διαμόρφωση τετραγωνικής μετατόπισης πλήκτρων (QPSK).

Γενικά μιλώντας, υπάρχουν τρία διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης, stand-alone, guard-band και in-band, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10 (Chen et al., 2017).

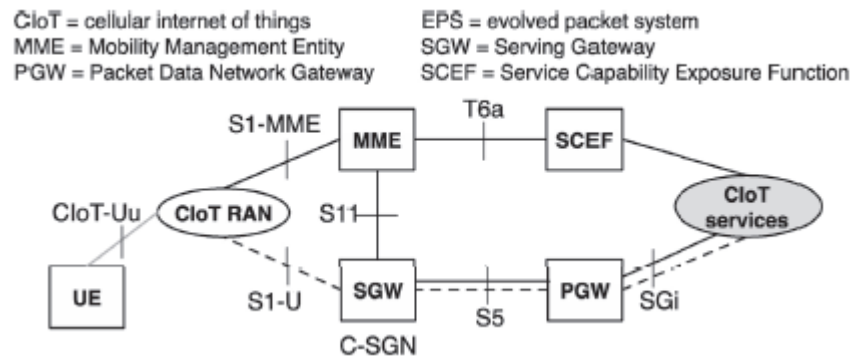


Σχήμα 10 : Λειτουργία NB-IoT (Chen et al., 2017)

Στο Stand-alone σενάριο, το NB-IoT αναπτύσσεται αυτόνομα σε φάσμα 200 kHz, ενώ η κατανάλωση ενέργειας στους σταθμούς βάσης χρησιμοποιείται για τη μετάδοση και την αύξηση της κάλυψης (Wang et al., 2017). Σε λειτουργία Guard-band η λειτουργία, το NB-IoT και το LTE βρίσκονται μεταξύ τους και επομένως μοιράζονται τον ίδιο ενισχυτή ισχύος και την ισχύ μετάδοσης (Yu et al., 2017). Εντούτοις, σε λειτουργία in-band, το NB-IoT αναπτύσσεται σε μια ευρεία ζώνη LTE, όπου η ισχύς μετάδοσης στους σταθμούς βάσης μοιράζεται μεταξύ αυτών των δύο τεχνολογιών χωρίς συμβιβασμό απόδοσης (Ratasuk et al., 2016).

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 9 και 10, η αρχιτεκτονική δικτύου του NB-IoT βασίζεται στο Evolved

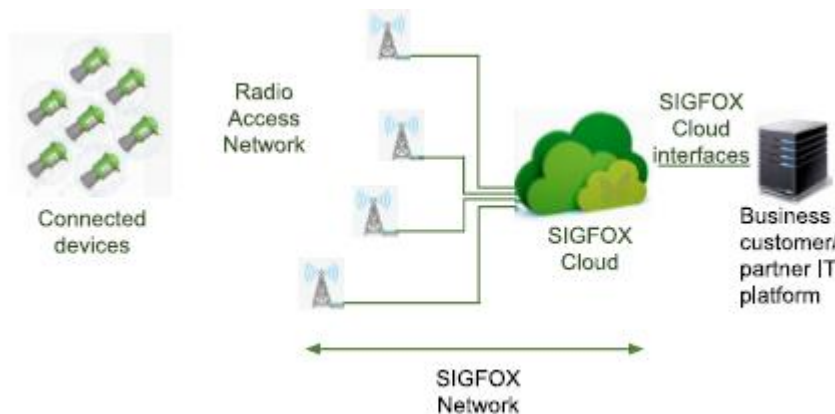
Packet System (EPS), το οποίο περιλαμβάνει δύο βελτιστοποιήσεις, συγκεκριμένα, τη βελτιστοποίηση επιπέδου χρήστη και τη βελτιστοποίηση επιπέδου ελέγχου. Και οι δύο βελτιστοποιήσεις επιπέδου επιλέγουν την καλύτερη διαδρομή για τα δεδομένα κατερχόμενης και ανοδικής ζεύξης. Η κατερχόμενη ζεύξη βασίζεται στο OFDMA με απόσταση υποφορέα 15 kHz, ενώ η ανερχόμενη ζεύξη υποστηρίζει πολυτονικές και μονοτονικές μεταδόσεις. Η πολυτονική μετάδοση έχει απόσταση υποφορέα 15 kHz και βασίζεται στο SC-FDMA, ενώ στην μονοτονική μετάδοση, η απόσταση του υποφέροντος έχει δύο τιμές, 15 kHz ή 3,75 kHz (Lin et al., 2016).



Σχήμα 11 : Αρχιτεκτονική δικτύου NB-IoT (Finnegan and Brown, 2018)

2.3 Sigfox

Το Sigfox είναι μια αποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση της συνδεσιμότητας δικτύου LPWA. Εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της σημαντικής απόδοσης στην επικοινωνία, έχει διευρυνθεί μια επιτυχημένη αγορά στην Ευρώπη, ιδιαίτερα στη Γαλλία, όπου η Sigfox Company θεμελιώθηκε το 2009. Οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να αγοράζουν τελικές συσκευές και συνδρομές από παρόχους δικτύου ώστε καθένα από αυτά να συνδεθεί σε περιφερειακά δίκτυα Sigfox, χωρίς η ανάπτυξη πυλών να αποτελεί προϋπόθεση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, το Sigfox χρησιμοποιεί έναν διακομιστή cloud για τη λήψη και επεξεργάζεται τα δεδομένα ανίχνευσης ενώ, στη συνέχεια, τα αποστέλλει σε έναν διακομιστή υποστήριξης.



Σχήμα 12 : Αρχιτεκτονική δικτύου Sigfox (Iotconnectivity, 2019)

Επιπλέον, οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα μέσω μιας διαδικτυακής

πύλης και αναμετάδοσης των δεδομένων διά υλοποίησης επανακλήσεων (Nolan et al., 2016). Πρόκειται για μια τεχνολογία εξαιρετικά στενής ζώνης, η οποία λειτουργεί στις ζώνες υπό 1 GHz χωρίς άδεια. Συγκεκριμένα, χωρίζει τις υποζώνες (868.180 MHz–868.220 MHz) σε 400 ξεχωριστές υποζώνες 100 Hz, σαράντα εκ των οποίων είναι δεσμευμένες (Waspmote sigfox networking guide, 2015). Λόγω της εξαιρετικά στενής ζώνης, έχει πολύ χαμηλό θόρυβο και επιτρέπει την αποκωδικοποίηση μιας εύκολης σηματοδότησης. Η κάλυψη του Sigfox ενδέχεται να αγγίζει τα 20–50 km και 3–10 km σε αγροτικές και αστικές περιοχές, αντίστοιχα.

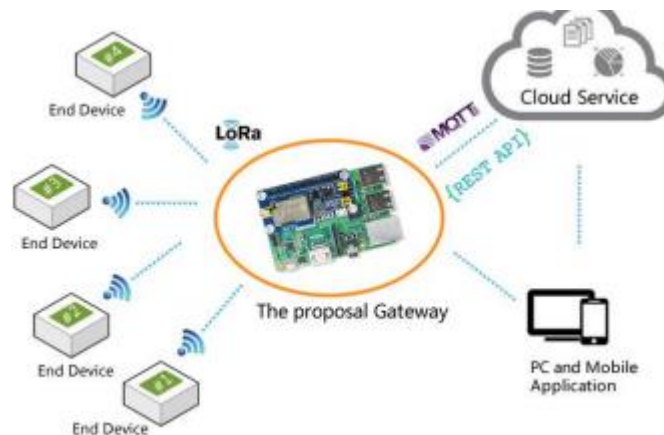
Το Sigfox μοιράζεται την ίδια συχνότητα με το LoRa και ως εκ τούτου θα πρέπει να διέπεται από τους κανονισμούς του κύκλου λειτουργίας για τη διασφάλιση της επιτυχημένης επικοινωνίας χωρίς παρεμβολές. Επιπρόσθετα, το Sigfox υποστηρίζει μόνο την επικοινωνία ανερχόμενης ζεύξης στην αρχική στιγμή και αργότερα εξελίσσεται σε μια αμφίδρομη επικοινωνία με σημαντική ασυμμετρία ζεύξης. Η επικοινωνία κατερχόμενης ζεύξης προηγείται μόνο μετά την επικοινωνία ανερχόμενης ζεύξης που η συσκευή θα πρέπει να περιμένει ως απόκριση. Επιπλέον, η uplink επικοινωνία και η επικοινωνία κατερχόμενης ζεύξης προσαρμόζονται σε διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης, στα οποία λειτουργούν αντίστοιχα η δυαδική μετατόπιση φάσης (BPSK) και το Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) (Μαργκέλης κ.ά., 2015).

Κεφάλαιο 3^ο

Τεχνολογίες LoRa

3.1 Αρχιτεκτονική LoRa

Το Σχήμα 13 παρέχει μια επισκόπηση υψηλού επιπέδου της αρχιτεκτονικής εφαρμογών LoRa.



Σχήμα 13 : Η επισκόπηση της αρχιτεκτονικής εφαρμογής LoRa

Η εφαρμογή που βασίζεται στο LoRa αποτελείται από τελικές συσκευές, πύλη και διακομιστή δικτύου ή εφαρμογή web που φιλοξενείται στο cloud. Στο μέσο του διαγράμματος υφίσταται πύλη που αποτελείται από μίνι υπολογιστή Raspberry Pi και πρόσθετη κάρτα LoRa. Το αριστερό μισό του διαγράμματος απεικονίζει μία ή περισσότερες τελικές συσκευές LoRa. Το δεξί μισό του διαγράμματος απεικονίζει την αλληλεπίδραση με μια εφαρμογή web που φιλοξενείται στο cloud χρησιμοποιώντας την Πλατφόρμα νέφους RESTful APIs και το πρωτόκολλο MQTT (Mahmoud MS, Mohamad AAH., 2016) (Casals L et al., 2017) (BeagleBone Black, 2022).

Τα δεδομένα και οι χρήσιμες πληροφορίες είναι προσβάσιμα σε εξουσιοδοτημένους χρήστες μέσω επιτραπέζιων υπολογιστών, διαδικτυακών εφαρμογών και εφαρμογών για κινητό, ενώ η τοπολογία δικτύου μεταξύ τελικών συσκευών και η πύλη είναι αστεροειδής. Οι τελικές συσκευές και οι πύλες συνδέονται ασύρματα χρησιμοποιώντας επικοινωνία LoRa. Οι πύλες και οι διακομιστές δικτύου συνδέονται με τη χρήση IP backhaul συνδέσεων, συνήθως Ethernet ή 4G με επικοινωνία όπως τα πρωτόκολλα RESTful HTTP και MQTT. Στη βασική αρχιτεκτονική των παραπάνω, η πύλη πρότασης είναι το στοιχείο κλειδί που λειτουργεί ως αμφίδρομο ρελέ ή πρωτόκολλο μετατροπέα, με την εφαρμογή web που φιλοξενείται στο cloud και είναι υπεύθυνο για την αποκωδικοποίηση των πακέτων που αποστέλλονται από τις τελικές συσκευές και τη δημιουργία των πακέτων που θα πρέπει να σταλούν πίσω στις τελικές συσκευές.

3.2 Raspberry PI

Το Raspberry είναι ένας μικρός υπολογιστής (πλακέτα) που δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση προγραμμάτων υπολογιστή σχετικά ελαφρού βάρους. Οι προδιαγραφές του Raspberry Pi δεν είναι αντίστοιχες ενός PC σε γενικότερο επίπεδο λόγω του μικρού τους μεγέθους. Στα χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνονται ιδιοτυπίες όπως για παράδειγμα μεγαλύτερη μνήμη σε σύγκριση με τον ελεγκτή, ασύρματη και Ethernet επικοινωνία, Extended 40- κεφαλίδα GPIO, κ.λπ. Ενδεικτικό είναι το περιεχόμενο του σχήματος 14 (Bor M., Roedig U., 2017).



Σχήμα 14 : Raspberry Pi 3b+

Η επιλογή του Raspberry Pi 3B + ως συσκευή χρησιμοποιείται, αφού ως Smart Gateway απαιτεί μικρό μέγεθος υπολογιστή, προκειμένου να εγκατασταθεί σε δύσκολο περιβάλλον. Όπως αναφέρεται στην έρευνα των Dongare A. et al., (2017) το Raspberry Pi δύναται να υποστηρίξει διάφορα είδη εφαρμογών Internet of Things. Σε αυτή την περίπτωση, έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως νέο εργαλείο στο ενσωματωμένο έργο.

3.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών για multi-hop πρωτόκολλα LoRa

Ο Πίνακας 1 συγκρίνει τα χαρακτηριστικά διαφορετικών πολλαπλών αλμάτων πρωτοκόλλων LoRa. Το Two-Hop RT-LoRa διαθέτει ξεχωριστές υποδοχές μετάδοσης σε κάθε κόμβο λαμβάνοντας υπόψη την εξασθένηση του σήματος των συμμετεχόντων κόμβων, ενώ παράλληλα επιτρέπει σε κάθε κόμβο να μεταδίδει δεδομένα εντός των εκχωρημένων υποδοχών μετάδοσης, επιτρέποντας έτσι την αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων. Το LoRaBlink επιτρέπει την πρόσβαση σε κανάλια με αυλακώσεις εφοδιάζοντας το δίκτυο με ένα μήνυμα Beacon για το συγχρονισμό χρόνου, ενώ παράλληλα επιτρέπει σε έναν κόμβο να μεταδίδει μόνο δεδομένα στα όρια των υποδοχών. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιεί την δυνατότητα της ταυτόχρονης μετάδοσης, αφού πολλοί κόμβοι έχουν την δυνατότητα να εκπέμπουν ένα beacon μήνυμα ή δεδομένα ταυτόχρονα.

Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση ενδέχεται ακόμα να αντιμετωπίσει συγκρούσεις στην περίπτωση που ένας δέκτης λάβει πολλαπλά δεδομένα από δύο ή περισσότερους κόμβους ταυτόχρονα, όπου η διαφορά στη λήψη ισχύος είναι μικρότερη από ένα ορισμένο όριο. Σε αυτή την περίπτωση, το CT-LoRa καταβάλλει

προσπάθειες με σκοπό να βελτιώσει την αξιοπιστία των μεταδόσεων δεδομένων δίνοντας διαφορετικές χρονικές μετατοπίσεις σε διαφορετικούς ταυτόχρονους πομπούς. Παρόλαυτα, οι προαναφερθείσες δύο προσεγγίσεις προκαλούν υπερφόρτωση, δεδομένου ότι εμπερικλείουν την απόσπαση μηνυμάτων και δεδομένων. Εύκολα επομένως εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι συγκεκριμένες συνθήκες δεν είναι ιδανικές για βιομηχανική παρακολούθηση και έλεγχο εφαρμογών με σχετικά μεγάλη διακίνηση δεδομένων.

Το LoRa-Mesh εκδίδει ένα μήνυμα ερωτήματος όποτε μια πύλη πρόκειται να λάβει δεδομένα από έναν συγκεκριμένο κόμβο. Ταυτόχρονα, στα δίκτυα αισθητήρων, κάθε κόμβος τείνει να στέλνει περιοδικά ένα δεδομένο σε μια πύλη. Με αυτόν τον τρόπο απόκτησης δεδομένων ενδέχεται να προκληθεί μετάδοση πάρα πολλών μηνυμάτων ελέγχου για την απόκτηση δεδομένων. Στο Sync-LoRa-Mesh, ένας κόμβος αναμετάδοσης δημιουργεί ένα αξιόπιστο δέντρο με υπόγειους κόμβους, ταυτόχρονα αποκτά δεδομένα από αυτούς τους κόμβους συγχρονισμένα από προγραμματιζόμενες υποδοχές ενώ, στη συνέχεια, λειτουργεί ως ένας από τους κόμβους LoRaWAN για να προωθήσει τα συλλεγμένα δεδομένα σε μια πύλη.

Στο Two-hop RT-LoRa, οι κόμβοι μοιράζουν τη μετάδοση δεδομένων τους με άλλους κόμβους μέσω διακομιστή, έτσι ώστε σε κάθε κόμβο να μπορούν να κατανεμηθούν υποδοχές μετάδοσης έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στον χρόνο του περιορισμού. Στο CT-LoRa, μια πύλη μπορεί να δημιουργήσει έναν χρονοδιάγραμμα πραγματικού χρόνου για τους κόμβους, και κάθε κόμβος μπορεί να στείλει δεδομένα από τα μέσα αποστράγγισης χωρίς παρεμβολές εντός των διαθέσιμων θυρίδων. Αξίζει να αναφερθεί ότι άλλες προσεγγίσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα συγκεκριμένα πρωτόκολλα (λαμβανομένων υπόψη όλων εκτός από το Two-hop RT-LoRa) δεν περιορίζουν τον αριθμό των υποστηριζόμενων ασύρματων αναπηδήσεων και κόμβων, εν αντιθέσει με το Sync-LoRa-Mesh, που περιορίζει τον αριθμό των κόμβων, των οποίων ένας ηλεκτρονόμος έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει υπό έναν περιορισμό στο μέγεθος δεδομένων που το LoRaWAN επιτρέπει σε μία μόνο μετάδοση.

Επιπρόσθετα, στο Two-hop RTLoRa, μια πύλη επιτρέπει μόνο δύο ασύρματα hops, αφού περισσότερα ασύρματα άλματα ενδέχεται να οδηγήσουν σε υψηλότερες ποσότητες διακίνησης δεδομένων. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα δεδομένα σε έναν κόμβο 2 hop χρειάζεται να μεταδοθούν δύο φορές για να φτάσουν στην πύλη και κάθε μετάδοση μπορεί με εύκολο τρόπο να παρεμβαίνει σε άλλες μεταδόσεις σε μεγάλης εμβέλειας δίκτυα LoRa. Στο CT-LoRa, τα δεδομένα μεταδίδονται στην πύλη χρησιμοποιώντας flooding. Όλοι οι κόμβοι χρειάζεται να παραμείνουν ενεργοί κατά τη διάρκεια των δεδομένων μετάδοσης και αναμεταδίδουν δεδομένα με ταυτόχρονο τρόπο. Στο LoRaBlink, οι κόμβοι ελέγχουν τις αναμεταδόσεις δεδομένων χρησιμοποιώντας την απόσταση αναπήδησης στην πύλη έτσι ώστε ένας κόμβος να αναμεταδίδει δεδομένα μόνο στην περίπτωση, που έχει μικρότερη απόσταση

αναπήδησης από την πύλη προς τον αποστολέα.

Από την άλλη πλευρά, το Two-Hop RT-LoRa βελτιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας, αφού επιτρέπει σε έναν κόμβο να παραμείνει ενεργός κατά τη διάρκεια της εκχώρησης υποδοχών, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιεί τη βέλτιστη συγκεντρωτική μετάδοση. Στα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του Two-hop RT-LoRa συγκαταλέγεται η χρήση υποδοχής μετάδοσης δεδομένων βάσει προγραμματισμού, που δεν επιτρέπει συγκρούσεις δεδομένων. Επομένως, στην περίπτωση που ένα μέγεθος υποδοχής έχει βελτιστοποιηθεί, το εν προκειμένω βέλτιστο μπορεί να υποστηριχθεί από τον αριθμό των κόμβων. Στο LoRaBlink και στο CTLoRa, ο χρόνος απόρριψης καθίσταται ένας κύκλος λειτουργίας που βελτιστοποιείται με την εκμετάλλευση της ταυτόχρονης μετάδοσης. Παρόλα αυτά, ένα μονό δεδομένο αναμεταδίδεται πολλές φορές από πολλούς κόμβους μέχρι αυτό να φτάσει στην πύλη.

| Χαρακτηριστικά | LoRaBlink | CT-LoRa | LoRa-Mesh | Sync-LoRa-Mesh | Two-hop RT-LoRa |
|-------------------------------|--|---|---|--|--|
| Αξιοπιστία | Απόκτηση δεδομένων χρησιμοποιώντας απευθείας υπερχειλίση που αξιοποιεί την έννοια ταυτόχρονης μη καταστροφικής μετάδοσης | Απόκτηση δεδομένων βασισμένων στην υπερχειλίση που αξιοποιεί την έννοια με βάση το χρονοδιάγραμμα μετάδοσης | Απόκτηση δεδομένων κατασκευάζοντας ένα αξιόπιστο δέντρο και διευθετώντας μια σειρά ανεξάρτητων κόμβων | Απόκτηση δεδομένων χρησιμοποιώντας προγραμματισμό θέσεων, χρησιμοποιώντας LoRaWan για την προώθηση δεδομένων σε μια πύλη | Απόκτηση δεδομένων χρησιμοποιώντας προγραμματισμό θέσεων υπολογίζοντας την εξασθένιση σήματος για την απόσταση και την παρεμπόδιση |
| | Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή μόνο για υπόγειους κόμβους | Υψηλή |
| Υποστήριξη πραγματικού χρόνου | Δεν αναφέρεται | Ο προγραμματιστής πραγματικού χρόνου χρησιμοποιείται | Δεν αναφέρεται | Δεν υποστηρίζεται | Χρησιμοποιεί προγραμματιστή πραγματικού χρόνου για όλους τους κόμβους |

| | | ι εύκολα | | | |
|---|--|---|--|--|--|
| | Δεν αναφέρεται | Ναι | Όχι | Όχι | Ναι |
| Υποστηριζόμενος αριθμός ασύρματων αναπηδήσεων | Κανένας περιορισμός | Κανένας περιορισμός | Κανένας περιορισμός | Κανένας περιορισμός | Δύο αναπηδήσεις, αλλά υποστηρίζει μέχρι πέντε αναπηδήσεις μέσα σε δύο θύρες |
| Κατανάλωση ενέργειας | Κάθε κόμβος έχει ένα χαμηλό κύκλο καθηκόντων, αλλά παραμένει ενεργός για μετάδοση δεδομένων βασισμένη στην υπερχειλίση | Κάθε κόμβος έχει ένα χαμηλό κύκλο καθηκόντων, αλλά παραμένει ενεργός κατά τη διάρκεια κάθε προγραμματισμένης θέσης, για μία μετάδοση δεδομένων βασισμένη στην υπερχειλίση | Όλοι οι κόμβοι παραμένουν ενεργοί όσο η σειρά εγκαθιστά ένα μονοπάτι, ενώ οι κόμβοι στο μονοπάτι παραμένουν ενεργοί κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων | Όλοι οι κόμβοι του υποδικτύου παραμένουν ενεργοί κατά τη διάρκεια των προγραμματισμένων ληφθέντων και μεταδιδόμενων θέσεων | Κάθε κόμβος παραμένει ενεργός μόνο κατά τη διάρκεια των προγραμματισμένων θέσεων |
| | Μεσαία αλλά υψηλή σε υψηλή κίνηση | Μεσαία αλλά υψηλή σε υψηλή κίνηση | Υψηλή | Μεσαία | Χαμηλή και βελτιστοποιημένη |
| Γενικά | Μετάδοση | Μετάδοση της | Απόκτηση | Προγραμματισ | Διανομή μιας |

| | | | | | |
|--------------------------------|---|---|---|---|--|
| | του οροσήμου και μετάδοση δεδομένων με υπερχειλίση | θέσης προγραμματισμού και δεδομένων με υπερχειλίση | δεδομένων βάσει ερωτημάτων | μός θέσεων υποδικτύου για απόκτηση συγχρονισμένων δεδομένων | φοράς ελάχιστων πληροφοριών του προφίλ εργασιών |
| | Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή | Μεσαία | Χαμηλή |
| Αριθμός υποστηριζόμενων κόμβων | Δεν αναφέρεται αλλά είναι κατάλληλο για χαμηλή κίνηση | Δεν αναφέρεται αλλά είναι κατάλληλο για χαμηλή κίνηση | Δεν αναφέρεται αλλά είναι κατάλληλο για χαμηλή κίνηση | Περιορισμένος αριθμός των κόμβων στο υποκείμενο ενός υποδικτύου στο μεγιστοποιημένο μέγεθος πακέτου του LoRaWan | Μέγιστη υποστήριξη αντικειμένου στο μήκος μιας θέσης μετάδοσης |

Πίνακας 1: Σύγκριση των χαρακτηριστικών διαφορετικών πολλαπλών αλμάτων πρωτοκόλλων LoRa

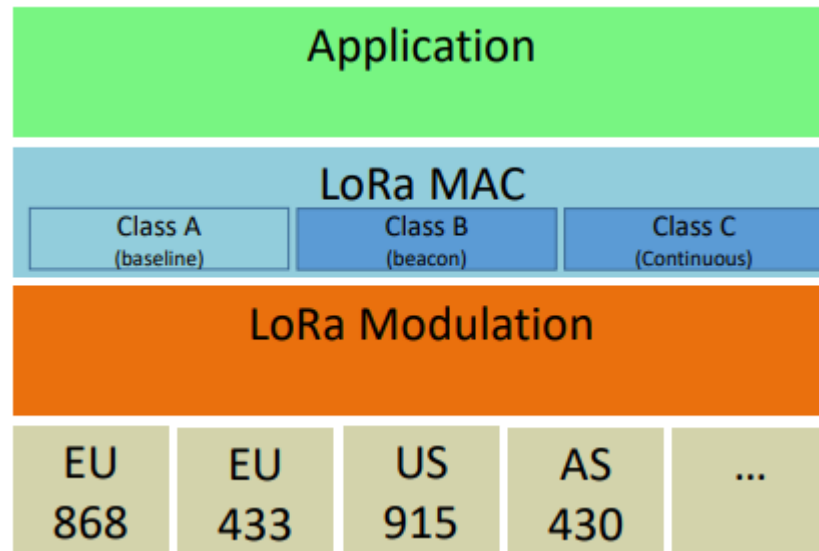
3.4 Τεχνολογία LoRa

3.4.1 Προσομοίωση Δικτύου

Η τεχνολογία LoRa αποτελείται από δύο μέρη, το πρώτο είναι το LoRa και το δεύτερο είναι το LoRaWAN. Το LoRa είναι μια ιδιόκτητη ασύρματη τεχνολογία που ανήκει στη Semtech, που προέρχεται από τη διαμόρφωση φάσματος κατανομής chirp (CSS), ενώ το LoRaWAN είναι ένα ανοιχτό πρότυπο πρωτόκολλο δικτύου (LoRa Alliance, 2022). Το φυσικό στρώμα του LoRa στοχεύει να παρέχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με ενεργειακά αποδοτικό τρόπο για συσκευές περιορισμένης ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, με υποτιθέμενη ικανότητα κάλυψης άνω των 15 km Line of Site (LoS). Το γεγονός ότι είναι παρόμοιο με τη διαμόρφωση φάσματος εξάπλωσης chirp επιτρέπει την παροχή στο δίκτυο μιας αντιστάθμισης μεταξύ του ρυθμού δεδομένων για την ευαισθησία εντός του εύρους ζώνης ενός καναλιού.

Επιπλέον, αυτό το γεγονός βοηθά στη διατήρηση των χαρακτηριστικών χαμηλής ισχύος του

πληκτρολογίου μετατόπισης συχνότητας, ενώ παράλληλα αυξάνει την κάλυψη, με χαμηλό κόστος. Καθώς το φυσικό στρώμα του LoRa είναι αποκλειστικό, δεν υπάρχουν πολλές διαθέσιμες πληροφορίες και η τεκμηρίωση δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμη στην επιστημονική κοινότητα (LoRa Alliance, 2022)(Bouras C., Kokkinos V., Papachristos N.,2018). Στο Σχήμα 15 εμφανίζεται η στοίβα LoRa, που απεικονίζει τα επίπεδα των τεχνολογιών LoRa.



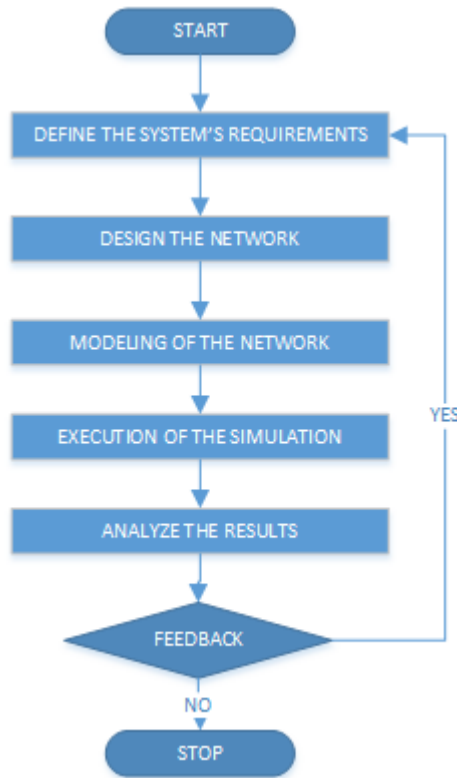
Σχήμα 15 : Η στοίβα LoRa (LoRa Alliance, 2022)

Σε αντίθεση με το φυσικό επίπεδο του LoRa, το LoRaWAN υποστηρίζεται από την LoRa Alliance, η οποία καθορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας του δικτύου και συγκεκριμένα το πρωτόκολλο επιπέδου MAC (Medium Access Control). Πρωταρχικός στόχος του είναι να προσδιορίσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής, τη χωρητικότητα του δικτύου, το QoS (Quality of Service) κ.λπ. Το πρωτόκολλο LoRaWAN κατηγοριοποιεί τις συσκευές-κόμβους σε 3 κατηγορίες περιοχών A, B και Γ. Όλες οι συσκευές πρέπει να υποστηρίζουν τουλάχιστον τις λειτουργίες Κλάσης A. Οι άλλες δύο κατηγορίες είναι προαιρετικές και ανάλογα με το υλικό ενδέχεται να πιστοποιηθούν για τις άλλες κατηγορίες.

Έτσι, η κλάση A επιτρέπει την επικοινωνία των τελικών συσκευών με τον διακομιστή, όπου κάθε τελική συσκευή στέλνει μετάδοση ανερχόμενης σύζευξης (uplink) και ακολουθούν δύο μικρά παράθυρα κατερχόμενης σύζευξης (downlink). Πρόκειται για την πιο αποδοτική κατηγορία ενέργειας. Η κλάση B προσθέτει στην κλάση A τη δυνατότητα στις τελικές συσκευές να ανοίγουν επιπλέον μεταδόσεις κατερχόμενης ζεύξης με σταθερή καθυστέρηση. Τέλος, η κλάση Γ θεωρεί ότι οι τελικές συσκευές διαθέτουν διαρκώς ανοιχτά παράθυρα λήψης. Από τις τρεις κατηγορίες, η κλάση A είναι η πιο αποδοτική σε ενέργεια και η κλάση Γ χρειάζεται τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, προκειμένου να λειτουργήσει.

3.4.2 Προσομοίωση Δικτύου

Ο σχεδιασμός δικτύου με συγκεκριμένες παραμέτρους παραμένει μια πρόκληση, καθώς υφίσταται πληθώρα επιλογών διαφορετικών παραμέτρων, που όμως θα πρέπει να κρίνονται κατάλληλες για τη συγκεκριμένη κατάσταση ή εφαρμογή. Εξαιτίας των προαναφερθέντων συνθηκών, κρίνεται επιτακτική ανάγκη η χρήση ενός προσομοιωτή.



Σχήμα 16 : διάγραμμα ροής διαδικασίας προσομοίωσης

Σε γενικότερο επίπεδο, ένα λογισμικό προσομοίωσης θα πρέπει να παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να ορίσει την τοπολογία του δικτύου, να καθορίσει τα χαρακτηριστικά κάθε κόμβου, τη σύνδεση μεταξύ τους, το μοντέλο κυκλοφορίας και τους αλγόριθμους δρομολόγησης πακέτων των οποίων υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, ο χρήστης θα πρέπει να λάβει τις μετρήσεις απόδοσης για το προσομοιωμένο δίκτυο και στην περίπτωση, που είναι διαθέσιμο στο λογισμικό προσομοίωσης να αποκτήσει οπτικοποίηση αυτών των μετρήσεων. Αυτές οι μετρήσεις για μια προσομοίωση LoRa θα μπορούσαν να είναι ο ρυθμός εξαγωγής δεδομένων (DER), η κατανάλωση ενέργειας δικτύου (NEC) (Georgiou O., Raza U., 2017), ο ρυθμός σφάλματος bit κ.λπ.

Υπάρχουν προσομοιωτές που παρέχουν μια καλή γραφική διεπαφή και άλλοι που μπορούν να παρέχουν μόνο ορισμένες γραφικές αναπαραστάσεις μέσω διαγραμμάτων, ή ακόμα και εξόδους όπως γραμμή εντολών. Γενικά, οι προσομοιωτές μπορεί να είναι ανοιχτού κώδικα ή εμπορικοί, εν προκειμένω θα αναφερθούν μόνο οι δωρεάν προσομοιωτές ή ανοιχτού κώδικα για ακαδημαϊκούς σκοπούς. Μια άλλη σημαντική επισήμανση ενός προσομοιωτή είναι η απόδοσή του. Πρώτα απ' όλα, οι χρήστες θα πρέπει να ορίσουν με σαφήνεια το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί, ώστε να ορίσουν σωστά τις απαιτήσεις

του συστήματος και το περιβάλλον. Στη συνέχεια μπορούν να προχωρήσουν στη μοντελοποίηση αυτού του δικτύου, ώστε να ορίσουν αφενός τις λεπτομέρειες σε μεγαλύτερο βαθμό, αφετέρου τις απαραίτητες παραμέτρους. Η επόμενη φάση περιέχει την εκτέλεση αυτής της προσομοίωσης, έτσι ώστε να λάβουν τα αποτελέσματα. Τέλος, μετά την ανάλυση αυτών των πληροφοριών μπορούν είτε να επαναλάβουν όλα τα προαναφερθέντα βήματα με τη δεδομένη ανατροφοδότηση στο λογισμικό προσομοίωσης είτε να σταματήσουν τη διαδικασία και να αναλύσουν τα αποτελέσματα.

3.4.3 mLoRa

Ως νευραλγικής σημασίας τεχνολογία για την εκπλήρωση των αυστηρών απαιτήσεων (π.χ. χαμηλή ισχύς, μεγάλη εμβέλεια και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα) για το Διαδίκτυο των πραγμάτων, το LoRa χαίρει ευρέως διαδεδομένης προσοχής τόσο από τον ακαδημαϊκό χώρο όσο και από τη βιομηχανία (LoRa Alliance, 2022), (GSMA, 2022). Το LoRa έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πληθώρα τομέων, όπως για παράδειγμα σε αστικές περιοχές, αγροτικό τομέα, μεταφορές και ούτω καθεξής. Η τοπολογία star-of-stars εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε δίκτυα LoRa, όπου χιλιάδες κόμβοι LoRa συνδέονται με μια ενιαία πύλη LoRa. Εντούτοις, η συγκεντρωτική δομή δικτύου προκαλεί μεγάλη σύγκρουση πακέτων, εντείνοντας την απώλεια πακέτων και την υποβάθμιση της απόδοσης.

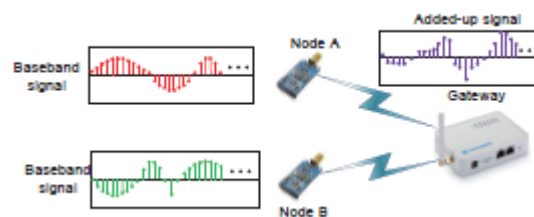
Μία ακόμη δυσμενής συνθήκη έγκειται στο ότι τα δίκτυα LoRa υιοθετούν το πρωτόκολλο ALOHA για απλότητα και εξοικονόμηση ενέργειας. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου, οι κόμβοι LoRa μεταδίδουν πακέτα χωρίς ανίχνευση καναλιού. Στην περίπτωση αυτή, εάν η πύλη LoRa αποτύχει να αποκωδικοποιήσει ένα πακέτο, το οποίο μεταδίδεται από τον κόμβο λόγω συγκρούσεων, το συγκεκριμένο πακέτο θα μεταδοθεί εκ νέου μετά από έναν τυχαίο χρόνο επιστροφής, επομένως επιδεινώνεται περαιτέρω το πρόβλημα σύγκρουσης στα δίκτυα LoRa. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχει προταθεί υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την επίλυση του προβλήματος της σύγκρουσης στις παραδοσιακές ασύρματες τεχνικές (π.χ. WiFi, Zigbee) (Sinha RS et al., n.d.), (Bouras C., Kokkinos V., Papachristos N.,2018), (Croce D et al.,2018) και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις στρατηγικές αποφυγής και επίλυσης συγκρούσεων.

Το αίτημα αποφυγής σύγκρουσης προϋποθέτει ότι οι κόμβοι χρειάζεται αρχικά να εξετάσουν την κατάσταση του καναλιού και, στη συνέχεια, να προγραμματίσουν τους συνδέσμους ανάλογα με την υφιστάμενη κατάσταση του καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση, η ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο και ο ακριβής συγχρονισμός είναι δύο κρίσιμοι παράγοντες, οι οποίοι προκαλούν όμως δαπάνες σε πόρους. Για την ανάλυση της σύγκρουσης, ο μοναδικός χρόνος των χαρακτηριστικών τομέα (π.χ. σταθερό σχήμα κυματομορφής) σε ασύρματο δίκτυο, αξιοποιεί τεχνικές ή τη διαφορά ισχύος μεταξύ πακέτων για την αποκωδικοποίηση των ταυτόχρονων πακέτων σε μία σύγκρουση (Georgiou O., Raza U.,2017), (PhySimulator.,2022), (FloRa.,2022), με άμεσο αποτέλεσμα τη βελτίωση αφενός της απόδοσης και αφετέρου της αποτελεσματικότητας.

Ωστόσο, τα προαναφερθέντα σχήματα αποκωδικοποίησης δεν μπορούν να εφαρμοστούν για την αποκωδικοποίηση των συγκρουόμενων πακέτων που οφείλονται σε διάφορα σχήματα κυματομορφής πεδίου χρόνου στο LoRa. Εξαιτίας αυτών των παραμέτρων αντιπροτείνεται ένα πρωτόκολλο που ονομάζεται mLoRa για την αποκωδικοποίηση των πακέτων που συγκρούστηκαν σε δίκτυα LoRa από ένα άλλο νέο τομέα προοπτικής-συχνότητας. Το mLoRa αξιοποιεί στο έπακρο τις ιδιότητες λειτουργίες σε φυσικό επίπεδο για την επίλυση της σύγκρουσης, όπως CSS, διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση M-FSK, στόχος των οποίων είναι η αποσύνθεση των m πακέτων που συγκρούονται σε m πακέτα χωρίς απευθείας σύγκρουση. Εν προκειμένω, αυτονόητο είναι ότι η θεωρητική απόδοση που βασίζεται το mLoRa είναι m -πλάσια από το συμβατικό δίκτυο LoRa.

Ωστόσο, προκύπτουν τρεις κύριες προκλήσεις για την πρακτική εφαρμογή του mLoRa. Πρώτον, είναι ασυνήθιστο να αποκωδικοποιούνται τα πακέτα που συγκρούονται σε μια σύγκρουση, καθώς θα προστεθούν σήματα βασικής ζώνης από διαφορετικούς κόμβους επάνω στην πύλη LoRa. Δεύτερον, ο αναπόφευκτος θόρυβος στα πραγματικά ασύρματα κανάλια παραμένει μια αναπάντητη πρόκληση για το σχεδιασμό του mLoRa, καθώς ο μετριασμός του θορύβου έχει μεγάλη σημασία για τη συνολική απόδοση αποκωδικοποίησης του mLoRa. Τρίτον, το LoRa έχει μια ιδιότητα M-ary FSK υψηλής τάξης σε σύγκριση με παραδοσιακές ασύρματες τεχνικές, που προκαλεί στενή απόσταση υποφορέων.

Επομένως, στην παραμικρή μετατόπιση της συχνότητας φορέα (CFO) υπάρχει η πιθανότητα να καταστήσει το αποκωδικοποιημένο αποτέλεσμα με τεράστια απόκλιση από την πραγματικότητα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 17, δύο κόμβοι LoRa (π.χ. κόμβος A και ο κόμβος B) στέλνουν πακέτα στην πύλη LoRa ταυτόχρονα και στη συνέχεια προκαλείται σύγκρουση.

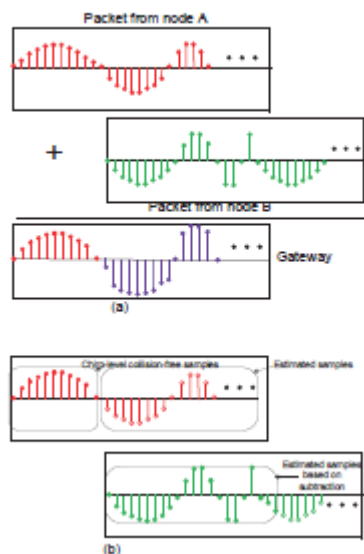


Σχήμα 17 : Το σενάριο σύγκλισης όταν δύο κόμβοι LoRa (π.χ. κόμβος A και κόμβος B) μεταδίδουν πακέτα στην πύλη LoRa

Τα δείγματα ζώνης βάσης των δύο κόμβων θα προστεθούν στην πύλη εντελώς διαφορετικά από τα αρχικά σήματα. Ο δέκτης αποτυγχάνει να αποκωδικοποιήσει τα σοβαρά παραμορφωμένα σήματα. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα, αρχικά αποκωδικοποιούνται τα συγκρουόμενα πακέτα σύμφωνα με τη διαμόρφωση CSS, όπου αυτά συγκρούστηκαν ώστε να μπορούν να αποκωδικοποιηθούν με επιτυχία σε δείγμα προς δείγμα, και στη συνέχεια με τον τρόπο chirp – by – chirp. Ταυτόχρονα, εφαρμόζεται το σχέδιο κινούμενου μέσου όρου για τον μετριασμό του θορύβου καθώς το πλάτος του σήματος παραμένει σταθερό με βάση τη διαμόρφωση M-FSK. Τα πακέτα LoRa

αποτελούνται από την εισαγωγή και τα μέρη ωφέλιμου φορτίου. Ειδικότερα, η εισαγωγή αποτελείται από πολλά τυπικά $ur\text{-chirp}$.

Σε θεωρητικό επίπεδο, ο παράγωγος δείκτης bin πρέπει να είναι ίσος με μηδέν μετά την αποκωδικοποίηση του τυπικού $ur\text{-chirp}$. Εντούτοις, αυτό δεν ισχύει στην πράξη λόγω του αναπόφευκτου CFO στην διαδικασία αποκωδικοποίησης, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μετατόπιση κάδου. Τέλος, μπορεί να ληφθούν οι πραγματικές τιμές bin στο τμήμα ωφέλιμου φορτίου μέσω της αφαίρεσης της μετατόπισης του bin από τις παραγόμενες τιμές bin . Συγκεκριμένα, υπάρχει μια χρονική μετατόπιση επιπέδου $chirp$ μεταξύ της σύγκρουσης δύο πακέτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 18(α). Για την επίλυση της σύγκρουσης, το mLoRa εξάγει τη χρονική μετατόπιση μεταξύ των δύο συγκρουόμενων πακέτων με βάση τη σχεδιασμένη ανίχνευση στρατηγικής εισαγωγής και, στη συνέχεια, λαμβάνει τα δείγματα χωρίς σύγκρουση σε επίπεδο $chirp$ και αντίστοιχες συχνότητες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 18(β). Σύμφωνα με αυτές τις συχνότητες και δείγματα χωρίς σύγκρουση, το mLoRa μπορεί να αξιοποιήσει τα ακόλουθα δείγματα εντός του ίδιου $chirp$ που έχουν επικαλυφθεί με το πακέτο από τον κόμβο B το οποίο ονομάζεται πακέτο B, αξιοποιώντας αφενός τη σταθερή γραμμική διαμόρφωση $chirp$ αφενός το σταθερό πλάτος.



Σχήμα 18 : Η διαδικασία αποκωδικοποίησης για τα πακέτα που συγκρούονται με βάση την προκύπτουσα αντιστάθμιση χρόνου.

Στη συνέχεια, αφαιρώντας τα εκτιμώμενα δείγματα από τα προστιθέμενα δείγματα βασικής ζώνης, το mLoRa είναι σε θέση να εξάγει μερικά δείγματα στο πρώτο $chirp$ του πακέτου B. Σχετικά με την επόμενη επανάληψη, τα προαναφερθέντα δείγματα στο πακέτο B μπορούν να θεωρούνται ως δείγματα δίχως σύγκρουση, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα υπόλοιπα δείγματα εκτίμησης εντός του ίδιου $chirp$ στο πακέτο B. Με την επανάληψη των πράξεων εκτίμησης και αφαίρεσης, το mLoRa μπορεί να αποκωδικοποιήσει με επιτυχία τα πακέτα που συγκρούονται σε ένα δείγμα-κατά δείγμα και

στη συνέχεια chirp – by – chirp.

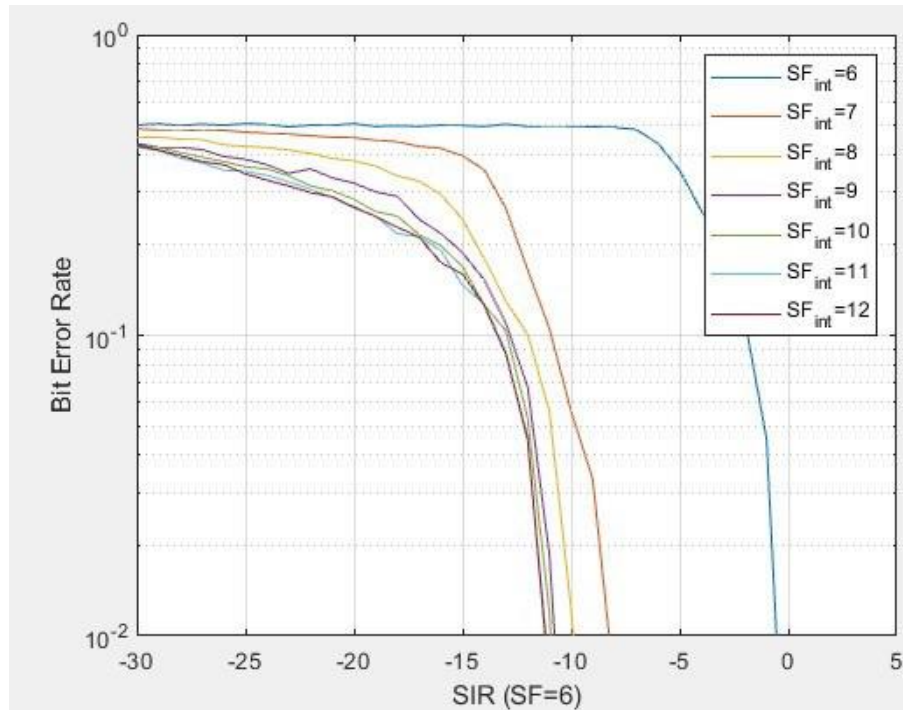
3.5 Περιβάλλοντα προσομοίωσης LoRa

Στη συγκεκριμένη ενότητα επιχειρείται η παρουσίαση των ακόλουθων προσομοιωτών LoRa: PhySimulator (PhySimulator.,2022), FLoRa (FloRa.,2022), Ns-3 module (Reynders B;Wang; Q; Pollin S.,2018), LoRaSim (LoRaSim.,2022)

Physimulator

Ο πρώτος προσομοιωτής ονομάζεται PhySimulator και στοχεύει στην υλοποίηση του επιπέδου σύνδεσης του LoRa. Το PhySimulator είναι γραμμένο σε MATLAB. Ο στόχος αυτού του προσομοιωτή είναι να δοκιμάσει τη λήψη δύο μεταδόσεων LoRa που αλληλοεπικαλύπτονται με παρεμβολές που έχουν διαμορφωθεί με διαφορετικούς παράγοντες διασποράς. Μετά το πέρας κάθε εκτέλεσης του προγράμματος, δημιουργούνται 8 ψηφία που δείχνουν το πακέτο, το σύμβολο και το ποσοστό σφάλματος σε bit. Συγκεκριμένα, η έξοδος είναι το πακέτο, το σύμβολο και ο ρυθμός σφάλματος bit για κάθε παράγοντα διασποράς, που παρεμβάλλεται με οποιονδήποτε άλλο παράγοντα διασποράς.

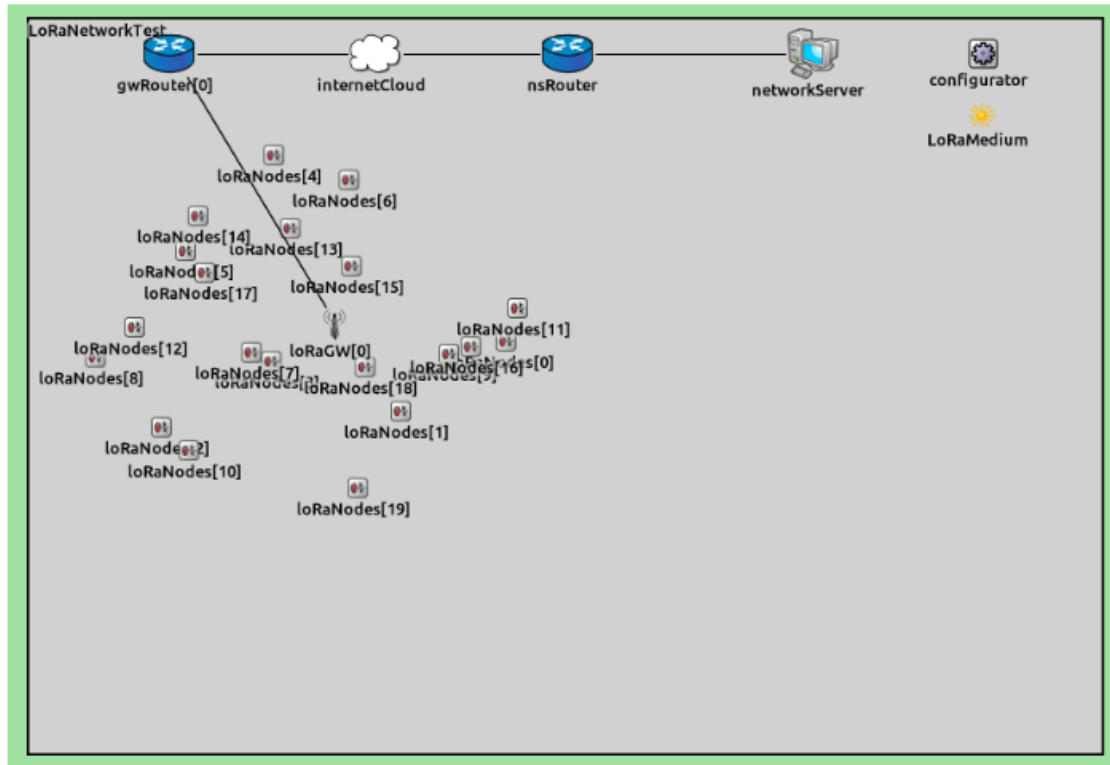
Ο συγκεκριμένος προσομοιωτής παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να επεξεργαστεί διάφορες παραμέτρους (όπως για παράδειγμα την αλλαγή των τιμών των μεταβλητών στον κώδικα). Αναλυτικότερα, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του εύρους ζώνης, των bit ωφέλιμου φορτίου και των μέγιστων δοκιμών ανά βήμα κ.λπ. Όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι δεν μπορούν να αλλάξουν μέσω μιας γραφικής διεπαφής, εντούτοις ο χρήστης χρειάζεται να τις επεξεργαστεί τροποποιώντας απευθείας τον κώδικα MATLAB. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια γραφική παράσταση που δείχνει το ποσοστό σφάλματος bit και το SIR με τη χρήση του physimulator. Στο Σχήμα 19. παρουσιάζεται ένα παράδειγμα γραφικής παράστασης με χρήση PhySimultor.



Σχήμα 19 : ένα παράδειγμα γραφικής παράστασης Ber-Sir

FLoRa

Εξετάζοντας ακόμη ένα πλαίσιο προσομοίωσης, σημειώνεται ότι ο προσομοιωτής FLoRa, χρησιμοποιεί τη γνωστή βιβλιοθήκη προσομοίωσης διακριτών συμβάντων OMNeT++ η οποία διανέμεται υπό την Ακαδημαϊκή Δημόσια Άδεια, γεγονός που την καθιστά δωρεάν για ακαδημαϊκή ή μη κερδοσκοπική χρήση. Εκτός από το πλαίσιο OMNeT++, μια άλλη βάση του FLoRa είναι το INET Framework, το οποίο αποτελεί μια βιβλιοθήκη με ανοιχτό κώδικα για το OMNeT++ που έχει ως στόχο τη διεκπεραίωση της διαδικασίας πειραματισμού, που αφορά σε διαφορετικά πρωτόκολλα δικτύου. Αξίζει να αναφερθεί ότι το FloRa είναι γραμμένο σε C++.



Σχήμα 20 : Ένα παράδειγμα FLoRa (FloRa.,2022)

Στο Σχήμα 20, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του αποτελέσματος GUI του προσομοιωτή FLoRa που επιτρέπει τη δημιουργία κόμβων LoRa, πυλών και διακομιστή δικτύου (FloRa, 2022) και τις ενότητες του στοχεύουν στην προσομοίωση του φυσικού επιπέδου και του πρωτοκόλλου LoraWan MAC. Σε αντίθεση με το προηγούμενο λογισμικό προσομοίωσης, το συγκεκριμένο παρέχει μια πολύ καλή γραφική διεπαφή, καθώς βασίζεται στο OMNeT ++ και μια γραφική αναπαράσταση του δικτύου. Εν ολίγοις, προσφέρει ένα ακριβές μοντέλο για το φυσικό επίπεδο LoRa, δίνοντας ταυτόχρονα έμφαση στην παροχή στατιστικών και στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Τα κύρια χαρακτηριστικά του προσομοιωτή FloRa σύμφωνα με το (FloRa,2022) συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Ακριβές μοντέλο του φυσικού στρώματος LoRa (συμπεριλαμβανομένων των συγκρούσεων και του εφέ σύλληψης)
- Προσομοιώσεις με μία (ή περισσότερες) πύλες στο δίκτυο
- Προσομοιώσεις από άκρο σε άκρο, συμπεριλαμβανομένης της ακριβούς μοντελοποίησης του δικτύου backhaul
- Στατιστικά στοιχεία κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο

Μετά από κάθε εκτέλεση, δημιουργείται ένας αριθμός αρχείων, τα οποία περιλαμβάνουν τα στατιστικά δεδομένα. Τέλος, το FLoRa παρέχει τη δυνατότητα μερικών δειγμάτων σεναρίων.

NS-3 module

Σχετικά με το συγκεκριμένο λογισμικό προσομοίωσης θα σημειώναμε αρχικά ότι δεν πρόκειται για έναν

ξεχωριστό προσομοιωτή τόσο, όσο για μια ενότητα που συνδέεται στο ns-3, έναν δηλαδή δωρεάν προσομοιωτή δικτύου διακριτών συμβάντων, που έχει σχεδιαστεί για ακαδημαϊκούς και ερευνητικούς σκοπούς. Ακόμη, φαίνεται να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα πρωτοκόλλων και δικτύων, συμπεριλαμβανομένων δικτύων IP και μη IP, καθώς και ασύρματων προσομοιώσεων. Το Ns-3 έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την αρθρωτή διαμόρφωση και παρέχει τη δυνατότητα εργασίας τόσο σε γραφικό περιβάλλον όσο και σε γραμμή εντολών. Είναι γραμμένο σε C++ και python. Η συγκεκριμένη μονάδα παρουσιάζει συμβατότητα με την κλάση A των προδιαγραφών LoRaWAN 1.0. Αναλυτικότερα, θα λέγαμε ότι προσομοιώνει την περίπτωση όπου οι συσκευές στέλνουν μόνο μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης και ο διακομιστής στέλνει μόνο μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης.

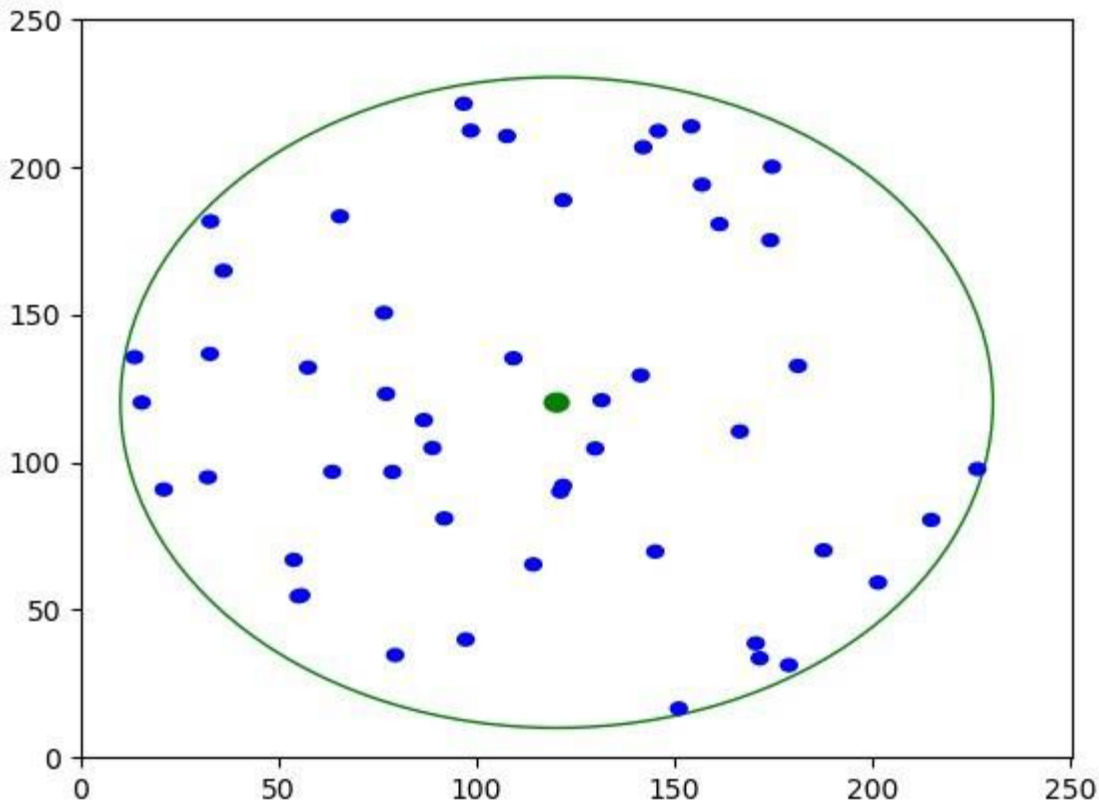
Η προαναφερθείσα κατηγορία αποτελεί το αποδοτικότερο ενεργειακά σύστημα τελικής υπηρεσίας, σε αντίθεση με τις άλλες δύο διαθέσιμες κατηγορίες LoRa. Έν προκειμένω, το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο MAC καθώς και το Transport and Application, έχουν δημιουργηθεί στοχεύοντας σε μια ευέλικτη και εξαιρετικά παραμετροποιήσιμη λύση. Το module ns-3 δηλαδή, δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων αλγορίθμων από την πλευρά του διακομιστή (Reynders B., Wang Q., Pollin S.,2018). Επιπλέον, περιλαμβάνει μια επιπλέον κλάση για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας που ονομάζεται LoRaRadioEnergyModel, παρακολουθώντας την ενέργεια των καταστάσεων του φυσικού στρώματος του πρωτοκόλλου LoRa. Η συγκεκριμένη εφαρμογή διερευνήθηκε και αξιολογήθηκε από τους δημιουργούς της με τη χρήση τριών σεναρίων.

- Το πρώτο σενάριο εξετάζει μια κυκλική τοπολογία με μία πύλη που βρίσκεται στο κέντρο, χωρίς επιβεβαιώσεις
- Το δεύτερο σενάριο χρησιμοποιεί περισσότερες πύλες, χρησιμοποιώντας επίσης κυκλική τοπολογία.
- Το τελευταίο σενάριο χρησιμοποιεί ένα δίκτυο όπως το πρώτο σενάριο με τη διαφορά ότι τα μηνύματα χρειάζονται επιβεβαίωση. Το τελευταίο σενάριο σύμφωνα με τους Reynders B., Wang Q., Pollin S.,2018, καταδεικνύει ότι είναι αδύνατο να αναγνωριστούν όλα τα πακέτα.

LoRaSim

Το τελευταίο εργαλείο, που διερευνήθηκε είναι το LoRaSim, ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων που στοχεύει στην ανάλυση της ικανότητας επεκτασιμότητας ενός δικτύου LoRa και των συγκρούσεών του. Η συγκεκριμένη εφαρμογή επιτρέπει την τοποθέτηση των κόμβων LoRa σε ένα δισδιάστατο πλέγμα. Το LoRaSim είναι γραμμένο σε python έκδοση 2.7, γεγονός που θεωρείται μειονέκτημα καθώς ενημερώνεται μόνο η έκδοση 3 της python. Επίσης, χρησιμοποιεί βιβλιοθήκες NumPy, matplotlib και SimPy python. Αυτό το εργαλείο έχει τέσσερις διαφορετικές προσομοιώσεις, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές ιδιότητες του δικτύου και των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν προσομοιώσεις για έναν μόνο σταθμό βάσης και έναν που μπορεί να προσομοιώσει έως και 4 σταθμούς βάσης. Μια άλλη

κατηγοριοποίηση των προσομοιώσεων αποτελεί ο τύπος των κεραιών, αφού υφίστανται αρχεία που προσομοιώνουν κόμβους με κατευθυντικές κεραιές.



Σχήμα 21 : Ένα παράδειγμα γραφικής παράστασης LoRaSim, με χρήση ενός sink, 50 κόμβους (μπλε: κόμβοι, πράσινο sink)

Στον συγκεκριμένο προσομοιωτή, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει αλλαγή του αριθμού παραμέτρων, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των κόμβων, και ο αριθμός των σταθμών βάσης που χρειάζεται να προσομοιωθεί. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η επιλογή μεταξύ πλήρους και απλοποιημένου ελέγχου των συγκρούσεων, του αριθμού των δικτύων LoRa, του χρόνου που θα εκτελεστεί η προσομοίωση και της απόστασης μεταξύ δύο σταθμών βάσης. Η εφαρμογή του LoraSim, παρέχει στο χρήστη κάποιες γραφικές παραστάσεις στην περίπτωση, που η μεταβλητή έχει οριστεί σε 1, αλλά η πλειονότητα των πληροφοριών παρουσιάζεται μέσω της γραμμής εντολών και αποτυπώνει αυτές τις λεπτομέρειες σε ένα αρχείο που ονομάζεται expX.dat. Εκτός των απεικονίσεων μέσω των γραφημάτων δεν υφίσταται γραφική διεπαφή, οπότε ο χρήστης είναι ανάγκη να χρησιμοποιήσει τη γραμμή εντολών.

Συνολική Σύγκριση

Σε αυτή την ενότητα, επιχειρείται η παρουσίαση μιας συνολικής σύγκρισης των χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων προσομοιωτών. Μερικά από τα χαρακτηριστικά που αξιολογήθηκαν είναι η υποστήριξη του λειτουργικού συστήματος, ο τύπος άδειας, το GUI, η διαθεσιμότητα των στατιστικών στοιχείων κατανάλωσης ενέργειας και η διαθέσιμη τεκμηρίωση. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει ο χρήστης σε ποια πλατφόρμα πρέπει να λειτουργεί, ποιες γλώσσες προγραμματισμού πρέπει να γνωρίζει για το

συγκεκριμένο πρόβλημα που χρειάζεται να επιλυθεί και κυρίως προκειμένου να καταστεί σαφές στην επιστημονική κοινότητα και στους ερευνητές αν είναι ανοιχτού κώδικα. Όλοι οι προαναφερθέντες λόγοι επέβαλλαν την περαιτέρω διερεύνηση και αξιολόγηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Συν τοις άλλοις, κρίνεται σκόπιμη και απαραίτητη η επέκταση των υπαρχόντων εργαλείων λαμβάνοντας υπόψη πρόσθετες επιστημονικές πτυχές, καινοτομίες, όπως άλλωστε συνέβη με το module ns-3 ώστε να αξιοποιηθούν τα υπάρχοντα πρωτόκολλα και η «υποδομή» για άλλα πρωτόκολλα όπως το εν προκειμένω το LoRa.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, διερευνήθηκε η ύπαρξη σχετικών εκδόσεων, ιστότοπου και κοινότητας που υποστηρίζουν κάθε λογισμικό. Επιπλέον, κρίθηκε απαραίτητη η ύπαρξη οπτικοποιημένων δεδομένων καθώς και στατιστικών στοιχείων έτσι ώστε να υπάρξει κατανόηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για να ελεγχθεί το μοντέλο του συστήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, και οι τέσσερις προσομοιωτές αποτελούν διακριτά συμβάντα. Αναλυτικότερα, αυτό σημαίνει ότι μοντελοποιούν το σύστημα ως μια ακολουθία διακριτών γεγονότων στο πεδίο του χρόνου. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει στους προσομοιωτές να μετακινηθούν στο επόμενο συμβάν, υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει καμία αλλαγή στο σύστημα μεταξύ δύο διαδοχικών γεγονότων, επομένως δεν υπάρχει ανάγκη συνεχούς παρακολούθησης του συστήματος.

Σχετικά με τις γλώσσες προγραμματισμού που έχουν χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση των προσομοιωτών, όλοι οι προσομοιωτές βασίζονται σε γνωστά περιβάλλοντα προγραμματισμού με μεγάλη κοινότητα υποστήριξης. Όλα τα παραπάνω είναι εξαιρετικά σημαντικά καθώς ένας ερευνητής έχει τη δυνατότητα εύκολα να επεκτείνει τις δυνατότητες του προσομοιωτή εφαρμόζοντας νέες ενότητες (όπως για παράδειγμα την υποστήριξη νέων πρωτοκόλλων δικτύου ή την ενσωμάτωση πρόσθετων εργαλείων στο υπάρχον διαθέσιμο περιβάλλον κ.λπ.). Συνοπτικά, το PhySimulator υλοποιείται στο Matlab, το FLoRa υλοποιείται σε C++, το Ns-3 module υλοποιείται σε C++ και python και το LoRaSim υλοποιείται σε python. Οι FLoRa μέσω OMNeT++ και Ns-3 μέσω NetAnim έχουν πιο εκτεταμένη γραφική διεπαφή σε σύγκριση με τους άλλους προσομοιωτές. Το PhySimulator και το LoraSim ορίζουν μόνο καποιες πλοκές.

Όλοι οι υπό εξέταση προσομοιωτές έχουν δημοσιευτεί στην επιστημονική κοινότητα ενώ αναλυτικότερα η ενότητα FloRa, ns-3 διαθέτει 1 σχετική δημοσίευση, οι PhySimulator και LoRaSim διαθέτουν 2, και όλοι οι προσομοιωτές διαθέτουν τη δική τους ιστοσελίδα εκτός του module Ns-3. Εν τούτοις, το Ns-3 αποτελεί ένα έργο ανοιχτού κώδικα, ανοιχτό σε μια μεγάλη κοινότητα που το υποστηρίζει (Kabir M et al.,n.d.). Το FloRa, το Physimulator, το LoRasim διαθέτουν αφενός σχετικές δημοσιεύσεις αφετέρου σχετικό ιστότοπο, εν αντιθέσει με το module Ns-3 που διαθέτει μόνο 1 σχετική δημοσίευση. Συμπερασματικά, οι τρεις προσομοιωτές διαθέτουν λεπτομερέστερες πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία εγκατάστασης και τον τρόπο χρήσης των εργαλείων. Το module Ns-3 πρόκειται περί

ανοιχτού κώδικα, ο οποίος είναι διαθέσιμος στο Github.

Το LoRA, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι μια τεχνολογία για την υλοποίηση εφαρμογών IoT όπου οι συσκευές τροφοδοτούνται συνήθως από μπαταρία, επομένως αβίαστα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας είναι βασικός παράγοντας για την ανάπτυξη εφαρμογών IoT. Ως εκ τούτου, η διερεύνηση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω στατιστικών για την κατανάλωση ενέργειας καθίσταται βαρύνουσα σημασίας ενός προσομοιωτή LoRA. Εκ των προσομοιωτών που μελετήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι μόνο οι μονάδες FLoRa και Ns-3 υποστηρίζουν στατιστικές κατανάλωσης ενέργειας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που μελετήθηκε είναι η άδεια χρήσης κάθε προσομοιωτή. Το Flora είναι διαθέσιμο δωρεάν για ακαδημαϊκή και σπουδαστική χρήση. Το LoRaSim, από την άλλη πλευρά, παρέχεται με την άδεια Creative Commons Attribution 4.0. Αυτό σημαίνει ότι είναι δωρεάν για χρήση, κοινή χρήση και αλλαγή του κώδικα, δίνοντας την κατάλληλη πίστωση στους δημιουργούς και την παροχή συνδέσμου με την άδεια χρήσης.

Όλοι οι προσομοιωτές μπορούν να εκτελεστούν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα με τον ένα ή τον άλλο τρόπο. Το PhySimulator μπορεί να εκτελεστεί οπουδήποτε μπορεί να εκτελεστεί το Matlab, επομένως τα υποστηριζόμενα λειτουργικά συστήματα περιλαμβάνουν Linux MacO και Windows. Με τον ίδιο τρόπο, το LoraSim μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε λειτουργικό σύστημα μπορεί να υποστηρίξει python. Έτσι, το LoraSim χρησιμοποιείται σε Windows, Linux και MacO. Το λειτουργικό module ns-3, επειδή βασίζεται στο ns-3, μπορεί να εκτελεστεί στα Windows μόνο χρησιμοποιώντας μια εικονική μηχανή και υποστηρίζει εγγενώς Linux και MacOS. Τέλος, ο προσομοιωτής FloRa και το module Ns-3 επικεντρώνονται στην παροχή πληροφοριών, που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας.

Κεφάλαιο 4^ο

PLC (Power Line Communication) με την τεχνολογία LoRa

Standard LoRa – Overview

4.1 Πομπός

Αρχικά, ένα σύμβολο LoRa απεικονίζεται ως μια chirp κυματομορφή βάσης, η οποία μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των συχνοτήτων f_0 και f_1 εντός της διάρκειας του συμβόλου T_s . Το σήμα chirp, c , εντός εύρους ζώνης, B , αναπαριστάται ως:

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{[(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF}] kT \frac{B}{2^{SF}}}$$

Αναλυτικότερα, που k είναι ο δείκτης χρόνου, ενώ το c περιγράφει μια κυματομορφή της οποίας η συχνότητα αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο. Το LoRa διαμορφώνει πληροφορίες μεταδίδοντας κυκλικά μετατοπισμένες εκδόσεις της chirp κυματομορφής βάσης. Σχετικά με το 2^{SF} , θα σημειώναμε ότι πρόκειται περί δυνατών διακριτών μετατοπίσεων, όπου το SF ορίζεται ως ο παράγοντας διασποράς. Το $s(nT_s)$ αποτελεί μια μετατόπιση δεδομένης της προαναφερθείσας κυκλικής μετατόπισης. Το εύρος του από πιθανές διακριτές τιμές προέρχονται από τον παράγοντα διασποράς, ενώ ταυτόχρονα εμπίπτει στο $0, 1, 2, \dots, 2^{SF-1}$. Για παράδειγμα, η επιλογή $SF = 7$ παρέχει 27 πιθανές κυκλικές μετατοπίσεις. Στο LoRa, η τιμή της κυκλικής μετατόπισης σε ένα συγκεκριμένο σύμβολο εμπεριέχει τις πληροφορίες, ώστε κάθε σύμβολο να δύναται να κωδικοποιεί 2^{SF} bits. (Ghanaatian R et al., 2019)

4.2 Δέκτης

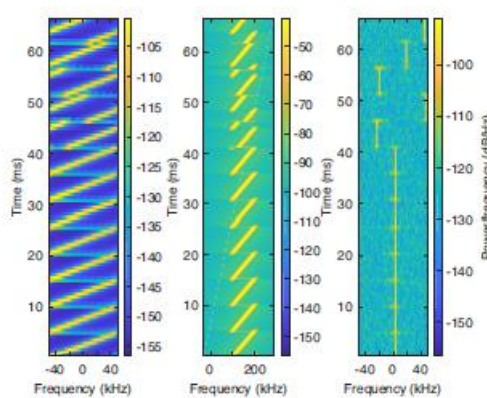
Στην περίπτωση, που υπάρξει τέλειος συγχρονισμός χρόνου και συχνότητας, ένας δέκτης δύναται να ανιχνεύσει το λαμβανόμενο σύμβολο πολλαπλασιάζοντάς το με τοπικά συζευγμένα αντίγραφα των ιδανικών κυματομορφών chirp σε όλες τις πιθανές μετατοπίσεις, δηλ. $s(nT_s) = 0, 1, 2, \dots, 2^{SF-1}$. Στη συνέχεια, το σύμβολο αναπαρίσταται ως τιμή του $s(nT_s) = 0, 1, 2, \dots, 2^{SF-1}$, αποδίδοντας την υψηλότερη αξία συσχέτισης. Στην ιδανική περίπτωση, θα εξέλιπε η ανάγκη εκτέλεσης αυτής της συσχέτισης σε κυματομορφές 2^{SF} . Σε αντικατάσταση, λοιπόν, μειώνεται η διαδικασία σε αποδοτικότερο υπολογιστικά Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (FFT). Όπως συχνά αναφέρεται (Vangelista L., 2017), αυτό ενδέχεται να επιτευχθεί πολλαπλασιάζοντας αρχικά τη λαμβανόμενη κυματομορφή με το σύνθετο συζυγές της βάσης προς τα πάνω, δηλαδή, η βάση προς τα κάτω. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα που προκύπτει έχει τη δυνατότητα να υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία από ένα FFT. Ο δείκτης του μέγιστου bin σε αυτό το FFT καταδεικνύει το ανιχνευμένο προαναφερθέν σύμβολο.

4.3 Συγχρονισμός

Το φυσικό επίπεδο LoRa προαπαιτεί ότι 8 βασικά up-chirps, ακολουθούμενα από 2 down-chips βάσης χρειάζεται να μεταδοθούν ως εισαγωγή. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι τα παράθυρα δειγματοληψίας του δέκτη παρουσιάζουν απειροελάχιστες πιθανότητες να οριοθετηθούν με τέλειο τρόπο εντός των παραθύρων συμβόλων του πομπού, οπότε είναι αρκετά πιθανή μια οποιαδήποτε μετατόπιση δείγματος Q. Ο συγχρονισμός εκτελείται από επαναλαμβανόμενη αναζήτηση, στοχεύοντας στην διαρκή επανάληψη του ίδιου ληφθέντος συμβόλου. Το σενάριο αυτό είναι πιθανό καθώς η μετατόπιση είναι ίδια για τα 8 βασικά up-chip. Λαμβάνοντας υπόψη τη συγκεκριμένη μετατόπιση, τα ακόλουθα σύμβολα πληροφοριών μετατοπίζονται με δείγματα Q έτσι ώστε τα σύμβολα που λαμβάνονται να συγχρονίζονται εγκαίρως με τα παράθυρα δειγματοληψίας του δέκτη (Augustin A et al., 2016) .

4.4 Ανωμετατροπή – UpConversion

Τα chirp της βάσης της ζώνης βάσης δημιουργούνται ως το αναλυτικό σήμα. Στον τομέα της συχνότητας, αυτό το σήμα ποικίλλει μεταξύ $-\frac{F_s}{2}$ έως $\frac{F_s}{2}$, με εύρος ζώνης F_s . Πριν τη μετάδοση, αυτό το σήμα μετατρέπεται προς τα πάνω χρησιμοποιώντας την ανάμιξη τετραγώνου από έναν φορέα συχνότητας f_c . Το chirp που προκύπτει είναι με επίκεντρο $f_c \pm \frac{F_x}{2}$.



Σχήμα 22 : Φασματογράμματα (αριστερά) του πομπού βασικής ζώνης εύρους ζώνης 100 kHz σήματος που περιλαμβάνει μια εισαγωγή 8 συμβόλων και 4 σύμβολα πληροφοριών, (μέση) το μετατρεπόμενο σήμα πομπού, με φέρουσα συχνότητα 150 kHz, (δεξιά) η λήψη και η αποκορύφωση (δηλαδή μετά τον πολλαπλασιασμό με τη βασική down-chip) σε SNR 10 dB. Σημειώνεται ότι τα 2 σύμβολα συγχρονισμού down-chip που απαιτούνται από το στρώμα LoRa Physica παραλείπονται.

4.5 LoRa σε PLC

4.5.1 Εισαγωγή στα PLC

Σε σχετική μελέτη (Petäjäjärvi J et al., 2017) παρουσιάστηκε η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων απόδοσης της εφαρμογής LoRa λαμβάνοντας υπόψη διάφορες μετρήσεις απόδοσης όπως η ισχύς μετάδοσης (TP), ο συντελεστής διάδοσης (SF), η κάλυψη και η απόδοση δεδομένων. Χρησιμοποιώντας τη ζώνη της Ευρωπαϊκής Βιομηχανικής Επιστημονικής Ιατρικής (ISM) των 868 MHz, το SF των 12 και την προεπιλεγμένη TP των 14 dBm (25 mW), η μελέτη αξιολόγησε την ανάπτυξη της τεχνολογίας LoRa διαφορετικών διαμορφώσεων, όπως για παράδειγμα η χρήση 125 kHz, το εύρος της ζώνης καναλιών 250 kHz (CB), όπως άλλωστε και διάφορες αποστάσεις κάλυψης από 2 km έως 30 km.

Η προαναφερθείσα μελέτη κατέδειξε ότι η τεχνολογία LoRa αποδίδει επαρκώς σε εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλη χρήση δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο, οδηγούμαστε αβίαστα στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για μια νέα τεχνολογία, η οποία έχει πληροί δυνατότητες ώστε εφαρμοστεί σε έξυπνα συστήματα μέτρησης όπως για παράδειγμα οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, φυσικού αερίου και νερού. Επίσης, μία επιπρόσθετη έρευνα μελέτησε μια υβριδική αρχιτεκτονική επικοινωνίας LoRa-3G σχετικά με την ανάπτυξη ενός συστήματος παρακολούθησης, που αφορά στη βελτιστοποίηση των εργασιών συντήρησης σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου (Campo G et al., 2018). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές πραγματοποίησαν μια δοκιμή απόδοσης της επίδρασης διαφορετικών μεταβλητών εδάφους στο εύρος επικοινωνίας LoRa.

Η προαναφερθείσα μελέτη διεξήχθη με την εγκατάσταση ενός κόμβου μετάδοσης LoRa σε διάφορες θέσεις και αποστάσεις από την πύλη. Παράλληλα, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας το SF από 7 σε 12, χρησιμοποιώντας την ευρωπαϊκή ζώνη ISM 868 MHz και 125 kHz CB ενώ χρησιμοποιήθηκε κέρδος κεραίας 2,7 dBi τόσο για πύλες όσο και για κόμβους. Ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα συμπεράσματα ήταν ότι το Line of Sight (LoS) αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες για την απόδοση του δικτύου LoRa. Συμπερασματικά, κατά την ανάπτυξη του δικτύου LoRa, διαπιστώθηκε ότι οι κόμβοι μετάδοσης χρειάζεται να βρίσκονται σε υψηλά και απομονωμένα σημεία, προκειμένου να διασφαλίζεται το LoS και να ελαχιστοποιούνται τα περιττά μπλοκαρίσματα.

Σε αυτό το σημείο, χρειάζεται να αναφερθεί και μια επιπρόσθετη ανάλυση της τεχνολογίας LoRa και των λειτουργικών στοιχείων της (Augustin A et al., 2016). Στη συγκεκριμένη έρευνα, χρησιμοποιήθηκαν δοκιμές πεδίου και προσομοιώσεις, προκειμένου να αξιολογηθούν τα φυσικά επίπεδα, όπως άλλωστε και τα επίπεδα ζεύξης δεδομένων του δικτύου LoRa. Η προαναφερθείσα δοκιμή πραγματοποιήθηκε μέσω μιας βάσης δοκιμών με την τοποθέτηση τελικών συσκευών LoRa σε διάφορες υπαίθριες τοποθεσίες, ενώ παράλληλα ο βιομηχανικός δρομολογητής Cisco910 τοποθετήθηκε σε εσωτερικό χώρο ως πύλη. Χρησιμοποιώντας την προεπιλεγμένη ισχύ μετάδοσης των 14 dBm, τα

αποτελέσματα της δοκιμής καταδεικνύουν μεν ότι το υψηλό SF παρέχει καλύτερη κάλυψη, με κόστος δε το χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Εντούτοις, στην πραγματική εφαρμογή των πρωτοκόλλων δικτύου LoRa, το SF συνήθως προσαρμόζεται αυτόματα, προκειμένου να διατηρεί την ποιότητα μετάδοσης σήματος. Οι μελετητές στο σύνολό τους τονίζουν τους περιορισμούς πόρων υλικού, όπως για παράδειγμα οι απαιτήσεις ισχύος και μνήμης, αφού επιδρούν περιοριστικά στη δυνατότητα εφαρμογής των συμβατικών κυψελοειδών δικτύων στην εφαρμογή του IoT. Συμπερασματικά, οι ερευνητές επεσήμαναν ότι η επικράτηση της τεχνολογίας LoRa αφήνει ευρύ πεδίο επικοινωνίας προσοδοφόρο για εφαρμογές IoT, ιδιαίτερα έξυπνα συστήματα μέτρησης, εξαιτίας της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και των προσαρμοστικών επιπέδων μετάδοσης σε συνάρτηση πάντα με το εύρος μετάδοσης.

Σε μια επιπρόσθετη σχετική μελέτη (Zanella A., Zorzi M., 2016), οι ερευνητές παρουσίασαν μια ανασκόπηση της τεχνολογίας LoRa, όπως επίσης και τις κύριες τεχνολογικές της ερμηνείες και τη σύγκρισή της με άλλες παραδοσιακές προσεγγίσεις στις ασύρματες τεχνολογίες IoT που λειτουργούν στο φάσμα ISM. Συνάμα, επιχειρήθηκε δοκιμή απόδοσης εγκατάστασης ενός ιδιωτικού δικτύου LoRa με απώτερο στόχο την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο σύνολο κτήριου πολλαπλών καταστημάτων. Οι ερευνητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η εφαρμογή του δικτύου LoRa προσφέρει σχετικά ικανοποιητική απόδοση σε εφαρμογές IoT σε σύγκριση με άλλες ενσύρματες και ασύρματες τεχνολογίες. Επιπρόσθετα, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι ενώ το LPWAN ενστερνίστηκε τα βασικά χαρακτηριστικά των παλαιών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως για παράδειγμα την κινητικότητα των χρηστών και τη διαχείριση πόρων, ενώ ταυτόχρονα η χρήση ενός ελαφρύτερου επιπέδου ελέγχου καθιστά το LPWAN μια προτιμώμενη υποψήφια τεχνολογία για υπηρεσίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων, όπως σε εφαρμογές έξυπνων δικτύων.

Χρειάζεται να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι άλλοι ερευνητές (Ghiasimonfared A et al., 2017), πρότειναν ένα υβριδικό δίκτυο αισθητήρων IoT LoRa και Power Line Communication (LoRa-PLC) για τη διαχείριση και τη βελτίωση της μέτρησης ενέργειας στην πανεπιστημιούπολη χρησιμοποιώντας αφενός το LoRa ως λύση εξωτερικού χώρου και αφετέρου το Power Line Communication (PLC) ως λύση εσωτερικού χώρου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, πολλές μονάδες SX1272 LoRa χρησιμοποιήθηκαν ως τελικές συσκευές καταναμημένες γύρω από τον χώρο των γραφείων και μέσα στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Το kit εκκίνησης S7G2 χρησιμοποιήθηκε ως πύλη για τη μετάδοση μηνυμάτων από τους αισθητήρες τελικής συσκευής στον διακομιστή δικτύου για επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων. Το δίκτυο LoRa προσαρμόστηκε με τέτοιον τρόπο ώστε να χρησιμοποιεί CB 125 kHz και σταθερό SF 7.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών φάνηκε ότι η σταδιακή αύξηση των εμποδίων και της απόστασης διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο στην αξιοπιστία του δικτύου LoRa. Συμπερασματικά, η μελέτη

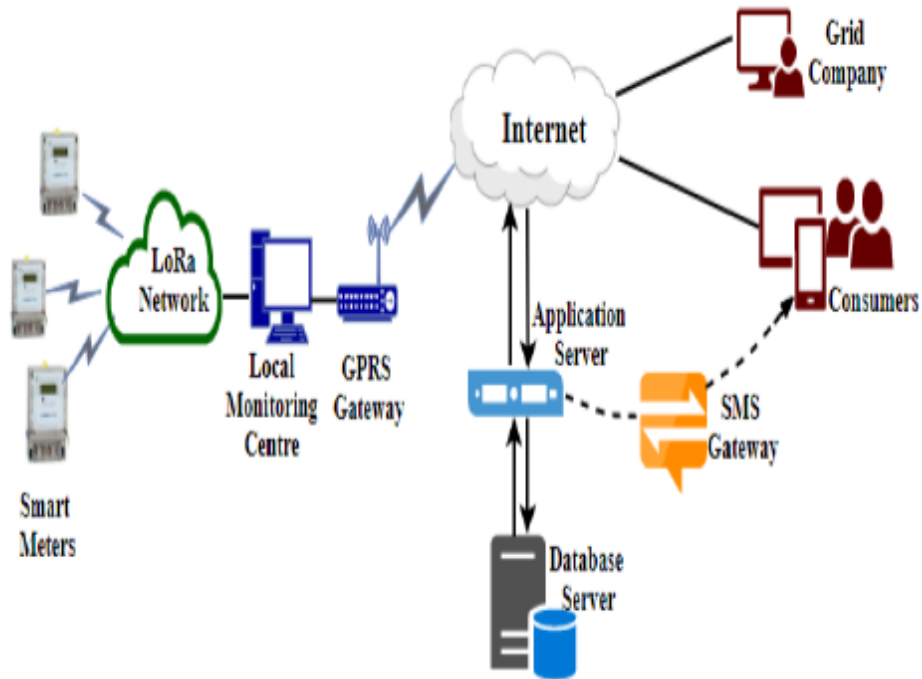
κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ενώ η τεχνολογία LoRa θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παροχή εφαρμογών IoT σε εσωτερικούς χώρους, λειτουργεί αποτελεσματικότερα στην περίπτωση, που χρησιμοποιείται ως λύση εσωτερικού χώρου. Η αξιολόγηση της απόδοσης του LPWAN εφαρμόστηκε σε συστήματα έξυπνων δικτύων που βασίζονται στη συγκεκριμένη τεχνολογία (Haidine A., Aqqaal A., Dahbi A., 2018). Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έναν προσομοιωτή δικτύου συστήματος LoRaSim που διαμορφώθηκε με ποικίλες παραμέτρους LoRa PHY, όπως Ισχύς Μετάδοσης (TP), Φέρουσα Συχνότητα (CF), SF και CB.

Ο προσομοιωτής πραγματοποίησε χρήση του ρυθμού εξαγωγής δεδομένων (DER) και της κατανάλωσης ενέργειας δικτύου (NEC) ως δείκτες απόδοσης για την ανάπτυξη LoRa. Χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα αποτελέσματα, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας LoRa σε καταναλωμένα έξυπνα δίκτυα δεν αποτελεί εφικτή επιλογή, αφού απαιτείται μεγάλος αριθμός πυλών LoRa για τη διαχείριση της τεράστιας κυκλοφορίας από όλους τους τελικούς κόμβους. Ο κύριος προβληματισμός συνίστατο στο εάν το δίκτυο LoRa δύναται να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να χειρίζεται όλες τις πληροφορίες παρακολούθησης από εφαρμογές Smart Distributed Grids (SDG), συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης βίντεο που απαιτεί υψηλή απόδοση δεδομένων. Ωστόσο, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα απόδοσης θεωρούνται ικανοποιητικά σχετικά με τη διαχείριση εφαρμογών έξυπνου δικτύου μικρής κυκλοφορίας, όπως για παράδειγμα η παρακολούθηση των δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας από τους χρήστες.

Τα αποτελέσματα και τα βασικά ευρήματα από τις παραπάνω σχετικές εργασίες χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς σε αυτή τη μελέτη για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του προτεινόμενου συστήματος παρακολούθησης της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για αποκεντρωμένα μίνι δίκτυα. Σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες, η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό του συστήματος χαμηλού κόστους και στις απαιτήσεις συστήματος με γνώμονα τους ενδιαφερόμενους φορείς, χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη υποδομή και το υλικό για την ανάπτυξη του συστήματος.

4.5.2 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Συστήματος

Το Σχήμα 23 απεικονίζει την εννοιολογική αρχιτεκτονική πλαισίου του προτεινόμενου συστήματος. Σύμφωνα με αυτό, το σύστημα ενσωματώνει την εφαρμογή του IoT για την παρακολούθηση πληροφοριών δαπάνης ενέργειας οποιουδήποτε έξυπνου μετρητή και μεταδίδει δεδομένα στον διακομιστή cloud. Τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας των καταναλωτών συλλέγονται μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου LoRa που είναι εγκατεστημένο μεταξύ έξυπνων μετρητών και ενός τοπικού κέντρου παρακολούθησης, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται στον διακομιστή cloud διά μέσου μιας πύλης GPRS. Όλες οι λογικές λήψεις αποφάσεων, όπως η απομακρυσμένη σύνδεση ή η αποσύνδεση των έξυπνων μετρητών, η επεξεργασία λογαριασμών και ο έλεγχος ταυτότητας χρήστη πραγματοποιούνται στον διακομιστή cloud.

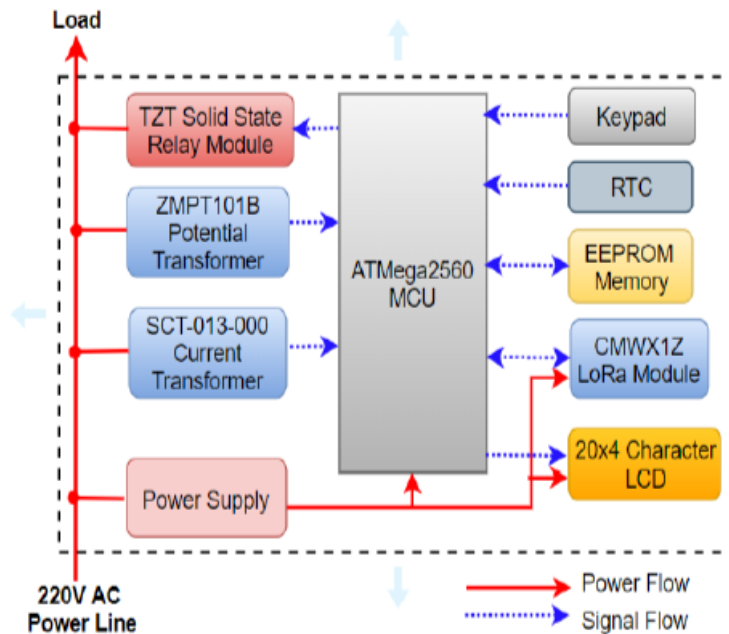


Σχήμα 22 : Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Συστήματος

Συν τοις άλλοις, η πύλη Υπηρεσίας Σύντομων Μηνυμάτων (SMS) ενσωματώθηκε στο σύστημα, προκειμένου να παρέχει στους καταναλωτές τη δυνατότητα ειδοποίησης χρήσης, στην περίπτωση που οι προπληρωμένες μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας πρόκειται να εξαντληθούν.

4.5.3 Διαμόρφωση μονάδας έξυπνου μετρητή

Η μονάδα έξυπνου μετρητή συνιστά το ενσωματωμένο τμήμα του προτεινόμενου συστήματος. Η συγκεκριμένη μονάδα σχεδιάστηκε με στόχο να διαθέτει τρία κύρια χαρακτηριστικά: πρώτον, τη δυνατότητα ακριβούς μέτρησης και καταγραφής της κατανάλωσης ενέργειας, δεύτερον τη δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης από την εταιρεία κοινής ωφέλειας και τρίτον την αξιόπιστη σύνδεση επικοινωνίας με το τοπικό κέντρο παρακολούθησης. Στο Σχήμα 23 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα της προτεινόμενης μονάδας έξυπνου μετρητή, επισημαίνοντας τα κύρια εξαρτήματα.



Σχήμα 23 : Μπλοκ διάγραμμα της προτεινόμενης μονάδας έξυπνου μετρητή.

Η ακριβής μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας πραγματοποιείται με τη χρήση αποδοτικών αλλά λιγότερο δαπανηρών μονάδων αισθητήρων που είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Ο αισθητήρας ρεύματος αποτελείται από έναν μη επεμβατικό μετασχηματιστή ρεύματος διαιρούμενου πυρήνα SCT-013-000, ο οποίος δύναται να αντέξει ρεύματα έως και 100 A. Η συγκεκριμένη μονάδα έχει επιλεγεί εξαιτίας της ευρείας εμβέλειας μέτρησης ρεύματος και της ευελιξίας στην καλωδίωση, καθώς δεν απαιτεί άμεση επαφή με το καλώδιο τροφοδοσίας (Abubakar I et al, 2017). Ο αισθητήρας τάσης αποτελείται από έναν μονοφασικό μετασχηματιστή τάσης ZMPT101B, ο οποίος δύναται να αντέξει έως και 250 AC τάση.

Η επιλογή της συγκεκριμένης μονάδας οφείλεται στην υψηλή ακρίβειά της, καθώς και στο ενσωματωμένο ποτενσιόμετρο επένδυσης για τη ρύθμιση της εξόδου αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC). Η μονάδα έξυπνου μετρητή ελέγχεται εξ αποστάσεως χρησιμοποιώντας μια μονάδα ρελέ στερεάς κατάστασης TZT που συνδέει ή αποσυνδέει το φορτίο του καταναλωτή από την κύρια παροχή ρεύματος. Επιπλέον, σε ενσωματωμένα συστήματα και εφαρμογές IoT, το Ρολόι Πραγματικού Χρόνου (RTC) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της ακριβούς ώρας και ημερομηνίας των μετρήσεων του αισθητήρα και των λειτουργιών του μικροεπεξεργαστή για συγχρονισμό με τον απόλυτο χρόνο αναφοράς (Barai GR, Krishnan S., Venkatesh B, 2016). Το RTC ενδέχεται να αποτελεί μέρος του IC του μικροεπεξεργαστή ή μιας εξωτερικής μονάδας που συνδέεται με τον μικροεπεξεργαστή μέσω σειριακής διεπαφής.

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια εξωτερική μονάδα DS1307 RTC καθώς διαθέτει μια ενσωματωμένη εφεδρική μπαταρία, η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση του χρόνου ακόμα και στην περίπτωση που δεν υφίσταται κύρια παροχή ρεύματος (Electronic Wings, 2018). Σχετικά με τον μικροελεγκτή του τμήματος της μονάδας, έπειτα από ενδελεχή ανάλυση, χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα

ATmega2560 με βάση το Arduino εξαιτίας του χαμηλού κόστους, της άφθονης ικανότητας επεξεργασίας, και της διάθεσης μεγάλου αριθμού ενσωματωμένων εισόδων ADC, καθώς είναι σχετικά εύκολα διαθέσιμη στην τοπική αγορά.

4.5.4 Δίκτυο LoRa-GPRS

Κάθε μονάδα έξυπνου μετρητή ενσωματώθηκε με μια μονάδα CMWX1ZZABZ LoRa (εμφανίζεται στο Σχήμα 24), η οποία λειτουργεί στη ζώνη χωρίς άδεια των 868 MHz και CB των 125 kHz (Hackaday Project, 2018). Η ισχύς μετάδοσης στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων περιορίστηκε στα 14 dBm σύμφωνα με τις προδιαγραφές LoRa PHY, γεγονός που καθιστά την ισχύ του σήματος επιρρεπή σε εξασθένηση από διάφορα εμπόδια κτηρίων και άλλες κατασκευές.



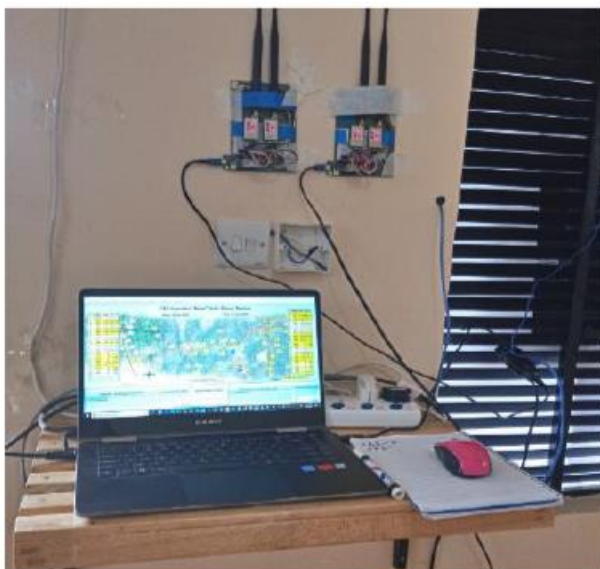
Σχήμα 24 : Μονάδα CMWX1ZZABZ LoRa που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των μονάδων έξυπνου μετρητή και του τοπικού κέντρου παρακολούθησης.

Προκειμένου να αυξηθεί η ευρωστία του μεταδιδόμενου σήματος έναντι παρεμβολών, χρησιμοποιήθηκε υψηλός συντελεστής SF 12. Επιπλέον, έχουν εγκατασταθεί στην κορυφή μερικών πόλων σταθμοί βάσης πύλης LoRa, όπως απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 25, προκειμένου να ενδυναμωθεί η ισχύς του σήματος γύρω από το κέντρο του μίνι δικτύου.



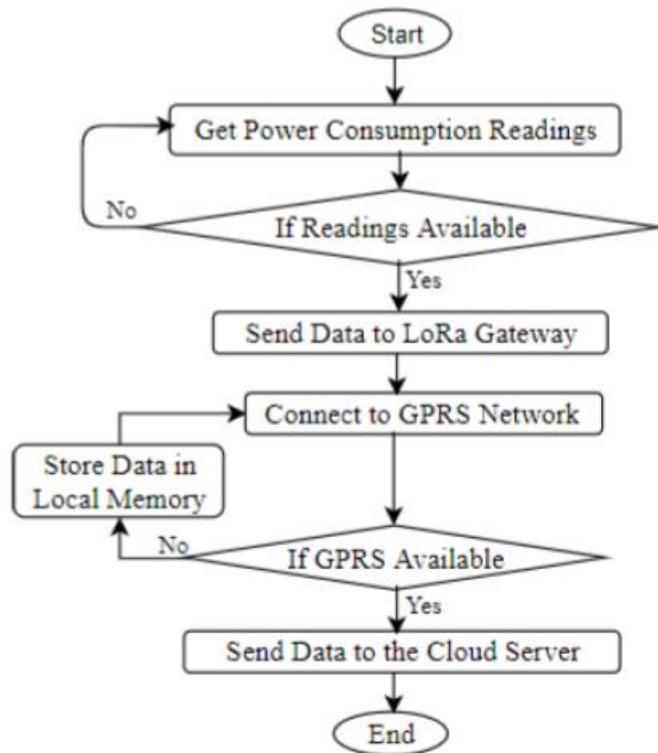
Σχήμα 25 : Σταθμός βάσης LoRa που εγκαταστάθηκε στον πόλο.

Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ανήκαν στις συσκευές LoRa κλάσης Γ, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να στέλνουν συνεχώς δεδομένα στην πύλη και να λαμβάνουν συνεχώς μηνύματα κατερχόμενης ζεύξης, καθώς τροφοδοτούνται από την παροχή ρεύματος κεντρικά του δικτύου. Συνυπολογίζοντας τα προαναφερθέντα δεδομένα, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι δεν πραγματοποιείται αξιοσημείωτη κατανάλωση ρεύματος (Eric B., 2018). Στο Σχήμα 26 απεικονίζεται ένα τοπικό κέντρο παρακολούθησης συνδεδεμένο σε μια πύλη GPRS, που χρησιμεύει για τη μετάδοση δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας στον διακομιστή cloud μέσω του υπάρχοντος δικτύου κυψελοειδούς επικοινωνίας.



Σχήμα 26 : Τοπικό Κέντρο Παρακολούθησης και Πύλη GPRS

Στο Σχήμα 27 φαίνεται το διάγραμμα ροής που απεικονίζει τον αλγόριθμο της μονάδας απόκτησης δεδομένων μεταξύ των μονάδων LoRa και GPRS σχετικά με τον τρόπο συλλογής και αποστολής δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας από κάθε μονάδα έξυπνου μετρητή στον διακομιστή cloud.

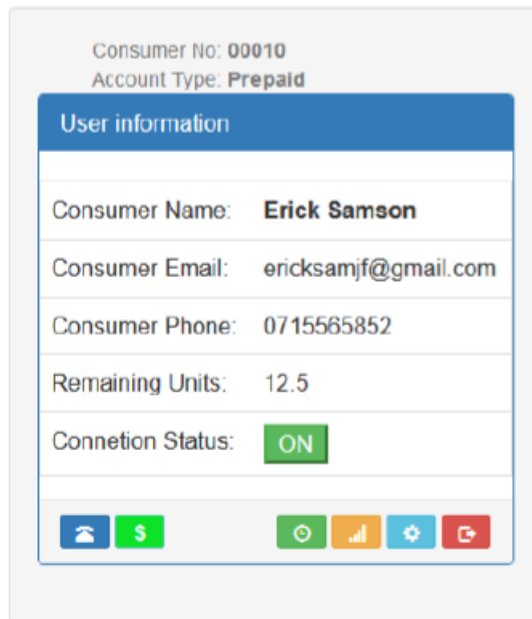


Σχήμα 27 : Αλγόριθμος διαγράμματος ροής της μονάδας μετάδοσης δεδομένων.

4.5.5 Διαμόρφωση διακομιστή Cloud

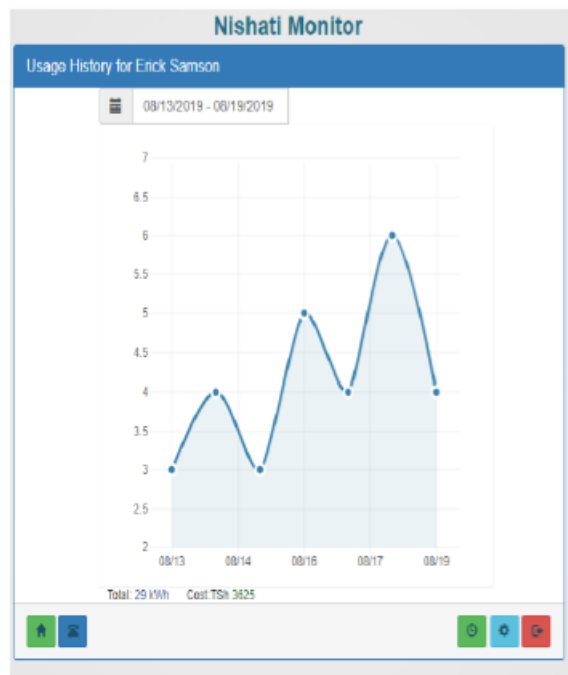
Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η υπερφόρτωση επεξεργασίας δεδομένων μεταξύ των έξυπνων μετρητών, τόσο του τοπικού κέντρου παρακολούθησης και όσο και του διακομιστή cloud, όλες οι βασικές υπολογιστικές εργασίες που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας εκτελούνται τοπικά στη μονάδα έξυπνων μετρητών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο διακομιστής cloud επωμίζεται μόνο τον χειρισμό της αποθήκευσης και παρουσίασης δεδομένων, της παρακολούθησης και της ειδοποίησης χρήσης. Ο διακομιστής cloud αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας πλαίσια PHP Laravel και JavaScript ενώ η βάση δεδομένων αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων MySQL. Το προφίλ καταναλωτή στον διακομιστή cloud που εμφανίζει βασικές πληροφορίες όπως πληροφορίες επικοινωνίας καταναλωτή, την κατάσταση των υπολοίπων πιστώσεων ηλεκτρικής ενέργειας και την κατάσταση σύνδεσης τροφοδοσίας μεταξύ της μονάδας έξυπνου μετρητή και του κέντρου μικρού δικτύου, παρουσιάζεται στο σχήμα 28.

Nishati Monitor



Σχήμα 28 : Διεπαφή προφίλ χρήστη - καταναλωτή διακομιστή Cloud

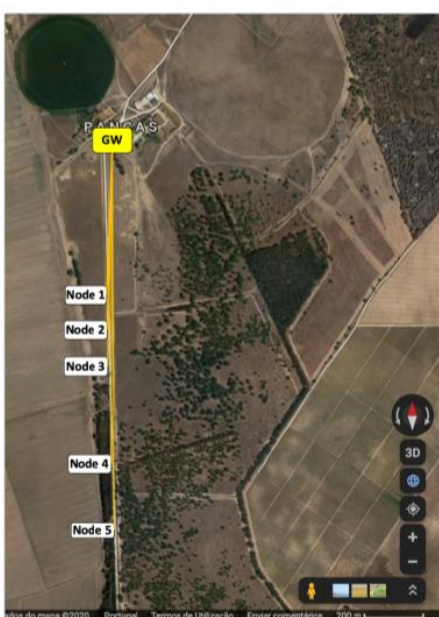
Οι σύνδεσμοι προς άλλες ενότητες διακομιστή cloud, όπως για παράδειγμα η υποστήριξη πελατών, το σύστημα πληρωμών, το ιστορικό χρήσης ενέργειας και οι ρυθμίσεις λογαριασμού βρίσκονται στο κάτω μέρος της διεπαφής του προφίλ καταναλωτή. Επίσης, οι ιστορικές πληροφορίες κατανάλωσης ενέργειας για τις προηγούμενες επτά ημέρες σε γραφική μορφή για τον ίδιο λογαριασμό καταναλωτή, παρουσιάζονται στο Σχήμα 29. Επιπρόσθετα, η διεπαφή εμφανίζει το σχετικό κόστος του επιλεγμένου χρονικού πλαισίου, το οποίο εν προκειμένω εκφράζεται σε Σελίνια Τανζανίας (TZS.), καθώς πρόκειται για το επίσημο τοπικό νόμισμα της Τανζανίας όπου διεξήχθη η μελέτη.



Κεφάλαιο 5ο

Case study

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του LoRa σε πλημμύρα εκβολών κατασκευάστηκαν δύο πειραματικά σενάρια. Το πρώτο σενάριο εφαρμόστηκε σε αγροτική περιοχή, μακριά από τις εκβολές έτσι ώστε να αποφευχθεί η επίδραση του νερού, σε στερεά γη για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την ποιότητα μετάδοσης. Το δεύτερο σενάριο, ο στόχος, εφαρμόστηκε σε μια προαστιακή περιοχή στις εκβολές του ποταμού Τάγου, με επικοινωνία πάνω από το νερό και μάλιστα σε ποικίλα επίπεδα νερού. Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την αξιολόγηση που συλλέχθηκαν από τις δύο ρυθμίσεις : (α) σχετικά με την ποιότητα της επικοινωνίας LoRa κατά την εξέταση μικρών υψών κόμβων σε σχέση με το νερό και το έδαφος και (β) σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας στην ποιότητα της επικοινωνίας. Η συγκεκριμένη αξιολόγηση βασίστηκε στις απαιτήσεις αξιοπιστίας που προέρχονται από το έργο AQUAMON. Πρόκειται για ένα ερευνητικό έργο, το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη μιας πλατφόρμας αξιόπιστης παρακολούθησης στα περιβάλλοντα νερού (Casimiro A et al., 2019). Στο σχήμα 30 φαίνονται οι θέσεις, στις οποίες τοποθετήθηκαν οι κόμβοι αμφοτέρων σεναρίων.



(a) Rural area.



(b) Sub-urban area near an estuary.

Σχήμα 30 : Φυσική θέση κόμβων

Εν προκειμένω, το κάθε ένα δίκτυο περιλαμβάνει πέντε κόμβους και μια πύλη. Οι αποστάσεις πύλης προς κόμβους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

| Αναγνωριστικό κόμβου | Απόσταση από την πύλη [m] |
|----------------------|---------------------------|
| 1 | 550 |
| 2 | 650 |
| 3 | 722 |
| 4 | 1100 |
| 5 | 1300 |

Πίνακας 2 : Αποστάσεις πύλης προς κόμβους

Στα συγκεκριμένα πειράματα, η θέση της πύλης παραμένει σταθερή στα 6,8 μέτρα άνω του εδάφους. Στην περίπτωση του σεναρίου των εκβολών (Σχήμα 30b), αυτό το ύψος κυμαίνεται από 4 έως 6,8 m, ανάλογα με την παλίρροια. Τα ύψη των κόμβων καθορίστηκαν στα 30 cm, 1 m και 2 m άνω του επιπέδου του εδάφους για το αγροτικό σενάριο (Σχήμα 30a) και άνω του νερού για το σενάριο των εκβολών (Σχήμα 30b). Στο σενάριο των εκβολών, οι θέσεις των κόμβων προσαρμόζονται διαρκώς με την πάροδο του χρόνου, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι, παρόλες τις αλλαγές της στάθμης του νερού, κάθε νέα εργασία απόκτησης δεδομένων (διάρκειας 15 λεπτών) πραγματοποιείται με τους κόμβους στο επιθυμητό ύψος. Σχετικά με την αξιολόγηση του δικτύου, τις μετρήσεις ισχύος σήματος, την αναλογία σήματος-θορύβου όπως άλλωστε και την απώλεια πακέτων, μετρήθηκε ο συνυπολογιζόμενος χρόνος μετ' επιστροφής.

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να επισημανθεί ότι πραγματοποιήθηκε χρήση ενός απλού πρωτοκόλλου επικοινωνίας μορφής αίτησης-απάντησης μεταξύ της πύλης και των κόμβων. Η λειτουργία της πύλης καθορίστηκε ως κύρια, αποστέλλοντας ένα πακέτο αιτήματος σε κάθε κόμβο ώστε να λάβει την αντίστοιχη απάντηση. Δεδομένων των σεναρίων, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χωριστά. Το καθορισμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας αμφοτέρων των σεναρίων λειτούργησε ως δικλείδα ασφαλείας, καθώς δεν παρατηρήθηκαν συγκρούσεις πακέτων, αφού μόνο ένα αίτημα αποστέλλονταν κάθε φορά. Σχετικά με το χρονικό όριο, καθορίστηκε ένα χρονικό διάστημα 2 δευτερολέπτων αναμονής απάντησης. Στην περίπτωση, που εμφανιζόταν ένα time-out, η απάντηση του μηνύματος θεωρούνταν αυτόματα ανεπιτυχής. Επιπρόσθετα, όλες οι απαντήσεις που ελήφθησαν, αποθηκεύτηκαν σε δεύτερο χρόνο στην πύλη προς περαιτέρω επεξεργασία. Σχετικά με τη διαμόρφωση πακέτων LoRa, πραγματοποιήθηκε χρήση μόνο πακέτων ανερχόμενης ζεύξης με ρητή κεφαλίδα και επαλήθευση CRC ωφέλιμου φορτίου. Όσον αφορά στο ωφέλιμο φορτίο, αξίζει να αναφερθεί ότι ήταν διαφορετικό τόσο για τα πακέτα

αιτημάτων και όσο και τα αντίστοιχα των απαντήσεων. Κάθε πακέτο αιτήματος δέχεται ωφέλιμο φορτίο 20 byte, ενώ ένα πακέτο απάντησης αποτελούνταν από 85 byte, τα οποία εμπεριείχαν δεδομένα απόδοσης και συντεταγμένες κόμβων, που δόθηκαν από δέκτη GPS. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν MHz (+14 dBm), με συντελεστή διασποράς SF12, ρυθμό κωδικοποίησης 4/5 και εύρος ζώνης 500 kHz. Σύμφωνα με τους κανονισμούς της ΕΕ, το επιτρεπόμενο εύρος ζώνης για συχνότητες στην περιοχή των 25 MHz f 1000 MHz είναι 100 kHz ή 120 kHz (Standard E., 2016). Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη το δεδομένο ότι η τεχνολογία LoRa εξυπηρετεί υψηλότερο εύρος ζώνης 500 kHz (το οποίο εξασφαλίζει βελτιωμένη απόδοση), αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί το πείραμα σε εύρος ζώνης 500 KHz με γνώμονα την αξιολόγηση της καλύτερης δυνατής περίπτωσης και όχι οποιασδήποτε περιορισμένης και συγκεκριμένης.

Σχετικά με τα κέρδη κεραίας, χρειάζεται να επισημανθεί ότι η κεραία πύλης διαθέτει 1,5 dBi ενώ οι κόμβοι διέθεταν μοναδιαία απολαβή κεραίας (1 dBi). Προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα, πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές κατά τη διάρκεια μερικών μηνών. Η κάθε μια δοκιμή περιείχε :

1. Τοποθέτηση της πύλης και των κόμβων σε συγκεκριμένες θέσεις στο επιθυμητό αρχικό ύψος.
2. Εκτέλεση του περιγραφόμενου πρωτοκόλλου διάρκειας 15 λεπτών. Εντούτοις, στην περίπτωση των εκβολών, κατά το υψηλό παλιρροϊκό επίπεδο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις 20 λεπτών για την αύξηση του αριθμού των δειγμάτων. Σε γενικότερο επίπεδο, δεν σημειώθηκε στατιστική διαφορά στην απώλεια πακέτων.
3. Τοποθέτηση των κόμβων σε νέο ύψος άνω του εδάφους και επανάληψη της διαδικασίας. Στο σχήμα 31 φαίνονται, στα αριστερά, την πύλη και στη μέση και δεξιά, το Arduino και το Raspberry PI, οι κόμβοι τοποθετημένοι σε στύλο με σημάδια ύψους. Η πύλη είναι επίσης ένα Raspberry PI που εκτελεί τον κύριο ρόλο του περιγραφόμενου πρωτοκόλλου.



Σχήμα 31 : Πύλη και κόμβοι αισθητήρων στο πεδίο παρακολούθησης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το κύριο ενδιαφέρον συγκεντρώνει η πρόληψη υπερχειλίσης, χρειάζεται να παρατηρηθεί η διακύμανση του παλιρροιακού επιπέδου. Στο συγκεκριμένο σενάριο, το μέσο πλάτος της παλίρροιας κυμαίνεται από 0 m κατά το φαινόμενο της άμπωτης έως 2,8 m κατά το φαινόμενο της υψηλής παλίρροιας. Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου πονήματος, η αναφορά σε φαινόμενο χαμηλής ή υψηλής παλίρροιας θεωρείται ένα χρονικό διάστημα περίπου 2 ωρών γύρω από τη χαμηλότερη και την υψηλότερη στάθμη νερού, αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 6^ο

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια ανάλυσης των ιδιωτικών δικτύων, που βασίζονται στο LoRa σχετικά με εφαρμογές Δικτύου των Πραγμάτων. Εν συνεχεία, παρουσιάστηκαν διαφόρων τύπων προβλήματα κατά τη χρήση τυπικού LoRa σε ιδιωτικά δίκτυα υπό τη λειτουργία ειδικών σεναρίων. Ως εκ τούτου, προτάθηκε ένα τροποποιημένο LoRaWAN, το οποίο υποστηρίζει τη δικτύωση πλέγματος και TEDS. Η δικτύωση με πλέγμα φάνηκε ότι βελτιώνει αφενός την κάλυψη και αφετέρου διευκολύνει την ανάπτυξη του δικτύου. Επιπρόσθετα, με την χρήση του TEDS, παρατηρήθηκε μείωση του ρυθμού σύγκρουσης στα συστήματα δικτύου. Επίσης, επισημάνθηκε ότι ενδεχομένως σε μελλοντικές εφαρμογές τα προτεινόμενα LoRaWAN μπορούν να δοκιμαστούν σε πραγματικά δίκτυα και να αξιολογηθεί η απόδοσή τους από διάφορες οπτικές γωνίες.

Συμπερασματικά, θα σημειώναμε ότι το LoRa αποτελεί ιδανική λύση όσον αφορά στην επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας του Δικτύου των Πραγμάτων. Επίσης, κατέστη σαφές ότι είναι πολύ σημαντική η επιλογή των ορθών μεταβλητών, όπως για παράδειγμα ο συντελεστής διασποράς, προκειμένου να διατηρηθεί ένα αποδεκτό επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής καθώς και να υπάρχει μεγαλύτερη κάλυψη, καλό QoS κ.λπ. Τηρουμένων των αναλογιών, είναι απαραίτητη η χρήση προσομοιωτή, αφού φαίνεται ότι δύναται να βοηθήσει τους προγραμματιστές και τους επιστήμονες να επιλέξουν τις σωστές παραμέτρους, εκτελώντας τις προσομοιώσεις με χαμηλό ρίσκο και απουσία δαπανηρών υλοποιήσεων και επενδύσεων. Συν τοις άλλοις, κατέστη δυνατό να συγκριθούν διαφορετικά πρωτόκολλα και τεχνολογίες χρησιμοποιώντας προσομοιωτές και να αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τεχνολογίας. Ακόμη, έγινε προσπάθεια να δοθεί στην επιστημονική κοινότητα μια γενική επισκόπηση των πιο κοινών προσομοιωτών που είναι διαθέσιμοι στη βιβλιογραφία για τις τεχνολογίες LoRa και μια σύγκριση μεταξύ τους.

Με βάση την έρευνα που έγινε στη Smart Gateway αρχιτεκτονική δικτύου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι το σύστημα που κατασκευάστηκε έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει 1 έως 5 πελάτες. Το σύστημα, επίσης δύναται να εγγραφεί και να ζητήσει αυτόματα τα δεδομένα, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να τρέξει την επικοινωνία LoRa μαζί με τις πληροφορίες του συστήματος που χρησιμοποιείται ως διεπαφή χρήστη. Η αδυναμία του έγκειται στο ότι δεν έχει πρόσβαση από το εξωτερικό της τοπικής πύλης. Επίσης, βασισμένο στη δοκιμή QoS, η μέση απόδοση παρατηρήθηκε ότι είναι 489 bit/s και η μέση απώλεια πακέτων είναι 26% για εμβέλεια επικοινωνίας 1 μέτρου. Πραγματοποιήθηκε, ακόμη, σύγκριση με τη χρήση του LoRaWAN, η οποία έδειξε ότι η απόδοση σε αυτό σύστημα έχει σταθερό

αποτέλεσμα αλλά μικρότερη αξία.

Η συγκεκριμένη παρατήρηση αποδίδεται στο ότι το σύστημα διαθέτει τη διαδικασία εισαγωγής δεδομένων στη βάση δεδομένων, παρέχοντας παράλληλα υπηρεσίες διακομιστή web, οι οποίες δεν υφίστανται γενικά στο σύστημα πύλης LoRa. Ωστόσο, έχει ένα μεγαλύτερο χαμένο πακέτο για έναν πελάτη σε σύγκριση με τη χρήση του LoRaWan.

Η πρόταση για περαιτέρω έρευνα εμπεριέχει την προσθήκη ενός μηχανισμού επικοινωνίας στις πύλες ή εναλλακτικά προσθήκης ενός κεντρικού δικτύου συγκεντρωτικά με πολλές πύλες, έτσι ώστε το δίκτυο να διαθέτει ευρύτερη κλίμακα. Σχετικά με την βελτίωση της ασφάλειας, προτείνεται η προσθήκη μορφής κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης. Επιπρόσθετα, η πρόταση οικοδόμησης του συστήματος με τη χρήση ενός πραγματικού αισθητήρα και η δοκιμή της παραμέτρου LoRa κατά τη διάρκεια του εγχειρήματος, παραμένει ισχυρή.

Όπως έχει αρκετές φορές επισημανθεί, οι τεχνολογίες LPWA παρέχουν επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας και χαμηλού κόστους σε βάρος του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Στη συγκεκριμένη εργασία, εξετάστηκαν οι ασύρματες επικοινωνιακές προσεγγίσεις στο Δίκτυο των Πραγμάτων και εισήχθη ο ορισμός και οι σχεδιαστικοί στόχοι των τεχνολογιών LPWA. Με τη διερεύνηση διαφορετικών LPWA τεχνολογιών, αξιολογήθηκαν τα χαρακτηριστικά τους σε διαφορετικές πτυχές, όπως η ζώνη συχνοτήτων, τα σχήματα διαμόρφωσης, ο ρυθμός δεδομένων κ.λπ. Επίσης, μελετήθηκαν οι περιπτώσεις κοινής χρήσης των τεχνολογιών LPWA και διερευνήθηκε η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας για τον συγκεκριμένο τομέα εφαρμογής. Επίσης, συζητήθηκαν οι προκλήσεις στην πραγματοποίηση αντισταθμίσεων μεταξύ διαφορετικών χαρακτηριστικών και προτάθηκαν πιθανές λύσεις για την αντιμετώπισή τους στο μέλλον.

Επιπλέον, προτάθηκε ένα πρωτόκολλο RT-LoRa δύο λυμάτων για χρήση στα βιομηχανικά συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου που απαιτούν σε πραγματικό χρόνο, αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση έγκειται στην κατασκευή ενός αξιόπιστου two-hop δέντρου, στην ύπαρξη καταναμημένου προγραμματισμού θυρίδων χαμηλής πολυπλοκότητας και στην βέλτιστη συγκέντρωση δεδομένων. Σε εφαρμογές IoT σε πραγματικό χρόνο, το προτεινόμενο πρωτόκολλο διαθέτει τη δυνατότητα να εκχωρήσει slots εύκολα σε 1-hop και 2-hop τερματικούς κόμβους με απώτερο στόχο κάθε κόμβος να ανταποκρίνεται στον χρονικό περιορισμό του, στην περίπτωση που μεταδίδει πακέτα στις εκχωρημένες υποδοχές. Συν τοις άλλοις, το πρωτόκολλο φάνηκε ότι μπορεί να υποσκελίσει το πρόβλημα της απώλειας πακέτων από εξασθένιση του σήματος με την ενεργοποίηση της μετάδοσης με δύο άλματα.

Επιπρόσθετα, έχοντας ως κύριο μέλημα την εξοικονόμηση ενέργειας, ένας κόμβος ρελέ 1-hop δείχθηκε ότι μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των μεταδόσεων με τη χρήση συνάθροισης δεδομένων. Από την προαναφερθείσα ανάλυση καταδείχθηκε ότι το συγκεκριμένο πρωτόκολλο δύναται να υποστηρίξει

εκατοντάδες κόμβους σε ένα μόνο κανάλι. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί μια προγραμματισμένη προσέγγιση υποδοχής, μπορεί να επιτύχει υψηλή αξιοπιστία στη μετάδοση δεδομένων, ανεξάρτητα από τον αριθμό των αναπτυγμένων κόμβων.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε προσπάθεια παρουσίασης μιας αξιολόγησης της οικονομικά αποδοτικής παρακολούθησης χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, εξαιτίας της αποκεντρωμένης φύσης των LoRa-GPRS για τα αποκεντρωμένα συστήματα μίνι δικτύων, τα περισσότερα κέντρα mini-grid παραμένουν σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμένη υποδομή ΤΠΕ, γεγονός, που δεν τα καθιστά ιδανική επιλογή σε δημόσια δίκτυα για την παρακολούθηση των έξυπνων μετρητών. Ακόμη, φάνηκε ότι ο συνδυασμός LPWAN και συμβατικών κυψελοειδών δικτύων παρέχει βέλτιστη λύση για τη διαχείριση αποκεντρωμένων κέντρων mini-grid.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια αξιολόγησης της απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, τα οποία προέκυψαν από τον διακομιστή cloud με τα δεδομένα αναφοράς που συλλέχθηκαν τοπικά χρησιμοποιώντας έναν τυπικό ψηφιακό μετρητή. Συνοπτικά, διαπιστώθηκε ότι το προτεινόμενο σύστημα διαθέτει ικανοποιητικά αποτελέσματα απόδοσης που υπόσχονται την πιθανή εφαρμογή του για παρακολούθηση IoT σε αποκεντρωμένα δίκτυα. Παρόλο που τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας που συλλέχτηκαν ήταν πάντα ελαφρώς χαμηλότερα σε σύγκριση με τις αναμενόμενες τιμές, το ποσοστό σφάλματος ήταν εντός των αποδεκτών προτύπων. Προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται, οι μονάδες LoRa χρειάζεται να διαμορφωθούν με χαμηλότερες τιμές SF, γεγονός που θα συμπαρασύρει αύξηση κόστους της εγκατάστασης περισσότερων πυλών LoRa σε όλο το κέντρο mini-grid. Ως μελλοντική εργασία, η ολοκληρωμένη υποδομή επικοινωνίας μίνι δικτύου καθίσταται απαραίτητη, προκειμένου να παραμείνει δυνατή η παρακολούθηση περισσότερων παραμέτρων όπως η ποιότητα ισχύος, η κλοπή ρεύματος, η τιμολόγηση του χρόνου χρήσης (ToU) και η αναφορά συμβάντων.

Βιβλιογραφία

- Abubakar I, Khalid SN, Mustafa MW, Shareef H, Mustapha M. Calibration of ZMPT101B voltage sensor module using polynomial regression for accurate load monitoring. *ARNPN J Eng Appl Sci.* 2017;12(4):1076–84.
- Ali, A., Shah, G.A., Farooq, M.O., Ghani, U., 2017. Technologies and challenges in developing machine-to-machine applications: a survey. *J. Netw. Comput. Appl.* 83, 124–139.
- Alliance, L., 2015a. Lorawan What is it. technical marketing work-group 1.0.
- Alliance, L., 2015b. Lpwa Technologies Unlock New Iot Market Potential. Machina Research, available at: www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRa-Alliance-Whitepaper-LPWA-Technologies.pdf.
- Alotaibi E., and B. Mukherjee, "A survey on routing algorithms for wireless Ad-Hoc and mesh networks," *Computer Networks*, vol. 56, no.2, pp. 940–965, Feb., 2012.
- Andreev, S., Galinina, O., Pyattaev, A., Gerasimenko, M., Tirronen, T., Torsner, J., Sachs, J., Dohler, M., Koucheryavy, Y., 2015. Understanding the iot connectivity landscape: a contemporary m2m radio technology roadmap. *IEEE Commun. Mag.* 53 (9), 32–40.
- Augustin A., J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 9, pp. 1–18, 2016.
- Barai GR, Krishnan S, Venkatesh B. Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - A review. 2015 IEEE Electr Power Energy Conf Smarter Resilient Power Syst EPEC 2015. 2016;138–45.
- Bardyn O. S. and N. S. J., T. Melly, "IoT: The era of LPWAN is starting now," in *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*, 2016, pp. 25–30.
- BeagleBone Black. <https://goo.gl/jkfCcL>,
- Beltran, F., Ray, S.K., Gutierrez, J.A., 2016. Understanding the current operation and future roles of wireless networks: Co-existence, competition and co-operation in the unlicensed spectrum bands. *IEEE J. Sel. Area. Commun.* 34 (11), 2829–2837.
- Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M., Ngqondi, T., 2019. A survey on low-power wide area networks for iot applications. *Telecommun. Syst.* 1–26.
- Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2017). Internet of Things and supply chain management: A literature review. *International Journal of Production Research* , 1–24. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140> .

- Berthelsen, E., Morrish, J., 2015. Forecasting the Internet of Things Revenue Opportunity. *Machina Res.*, London, UK. Tech. Rep.[Online]. Available: <https://machinaresearch.com/report.pdf/313>.
- Bor, M., Vidler, J.E., Roedig, U., 2016. Lora for the Internet of Things
- Bor M. and U. Roedig. Lora transmission parameter selection. In 2017 13th Int. Conf. on DCOSS, 2017.
- Bouras, C., Kokkinos, V., Papachristos N., Performance evaluation of LoraWan physical layer integration on IoT devices, in Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS 2018), Thessaloniki, Greece, 2018.
- Burrus, D. (2014). The Internet of Things is Far Bigger than Anyone Real- izes. Retrieved from <https://www.wired.com/insights/2014/11/the-internet-of-things-bigger/> , (Accessed 11 November 2018).
- Burns, J., Kirtay, S., Marks, P., 2015. Future Use of License Exempt Radio Spectrum. Plum Consulting, London, UK. Tech. Rep.
- Cano, C., Leith, D.J., Garcia-Saavedra, A., Serrano, P., 2017. Fair coexistence of scheduled and random access wireless networks: unlicensed lte/wifi. *IEEE/ACM Trans. Netw.*25 (6), 3267–3281.
- Campo G, Gomez I, Calatrava S, Martinez R, Santamaria A. Power Distribution Monitoring Using LoRa : Coverage Analysis in Suburban Areas. 2018;233–8.
- Casals L., B. Mir, R. Vidal, and C. Gomez. Modeling the energy performance of lorawan. *Sensors*, 2017.
- Casimiro, A.; Cecilio, J.; Ferreira, P.M.; Oliveira, A.; Freire, P.; Rodrigues, M.; Almeida, L. AQUAMON –A Dependable Monitoring Platform based on Wireless Sensor Networks for Water Environments; Safecomp 2019 Fast Abstracts; Springer; Turku, Finland, 2019.
- Chen, M., Miao, Y., Hao, Y., Hwang, K., 2017. Narrow band internet of things. *IEEE Access* 5, 20557–20577.
- Croce, D., Gucciardo, M., Mangione, M., Santaromita, G., Tinnirello, I., Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance, in *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 796-799, April 2018.doi: 10.1109/LCOMM.2018.2797057
- Dartmann, G., Song, H., Schmeink, A., 2019. Big Data Analytics for Cyber-Physical Systems: Machine Learning for the Internet of Things. Elsevier.
- Dongare A., C. Hesling, K. Bhatia, A. Balanuta, RL. Pereira, B. Iannucci, and A. Rowe. Openchirp: A low-power wide-area networking architecture. In 2017 IEEE Int. Conf. on PerCom Workshops, 2017.
- ElectronicWings. Sensors Modules Real Time Clock Rtc Ds1307 Module | Sensors Modul... [Internet]. 2018 Available from: <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/real-time-clock-rtc-ds1307-module>.
- Ergeerts, G., Nikodem, M., Subotic, D., Surmacz, T., Wojciechowski, B., De Meulenaere, P., Weyn, M., 2015. Dash7 alliance protocol in monitoring applications. In: 2015 10th International Conference on

- P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC). IEEE, pp. 623–628.
- Ericsson, A., 2016. Cellular Networks for Massive Iot—Enabling Low Power Wide Area Applications. no. January, pp. 1–13.
- Finnegan, J., Brown, S., 2018. A Comparative Survey of Lpwa Networking. arXiv: 1802.04222.
- FloRa official site, <https://flora.aalto.fi/>
- Georgiou, O., Raza, U., Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale? in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 2, pp. 162-165, April 2017. doi: 10.1109/L. WC.2016.2647247
- Gigli, M., & Koo, S. (2011). Internet of Things: Services and applications categorization. *Advances in Internet of Things*, 1 (2), 27–31. <https://doi.org/10.4236/ait.2011.12004> .
- Ghanaatian R., O. Afisiadis, M. Cotting, and A. Burg, “Lora digital receiver analysis and implementation,” in ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 2019, pp. 1498–1502.
- Ghiasimonfared A, Righini D, Marcuzzi F, Tonello AM. Development of a Hybrid LoRa / G3-PLC IoT Sensing Network : an Application Oriented Approach. 2017;(October):503–8.
- Ghosh D., and C. Lott, ”Uplink-downlink imbalance in wireless cellular networks,” in Proc. 2007 IEEE International Conference on Communications (ICC), Glasgow, UK, 24-28 June 2007, pp. 4275–4280.
- Goursaud, C., Gorce, J.-M., 2015. Dedicated Networks for Iot: Phy/mac State of the Art and Challenges. EAI endorsed transactions on Internet of Things.
- Gu, F., Niu, J., Duan, L., 2017. Waipo: a fusion-based collaborative indoor localization system on smartphones. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 25 (Augustin A et al., 2016), 2267–2280.
- Gu, F., Niu, J., Qi, Z., Atiquzzaman, M., 2018. Partitioning and offloading in smart mobile devices for mobile cloud computing: state of the art and future directions. *J. Netw. Comput. Appl.*
- Haidine A, Aqqal A, Dahbi A. Performance Evaluation of Low-Power Wide Area based on LoRa Technology for Smart Metering. 2018 6th Int Conf Wirel Networks Mob Commun. 2018;1–6.
- Hackaday. Project | Hackable CMWX1ZZABZ (LoRa) Devices | Hackaday.io [Internet]. 2018 Available from: <https://hackaday.io/project/35169/logs>.
- Hsieh C. L., Z. W. Ye, C. K. Huang, Y. C. Lee, C. H. Sun, and ..., “A vehicle monitoring system based on the LoRa technique,” *Int. J. Transp. Veh. Eng.*, vol. 11, no. 5, pp. 1093–1099, 2017.
- Huang, X. , Craig, P. , Lin, H. , & Yan, Z. (2016). SecIoT: A security framework for the Internet of Things. *Security and Communication Networks*, 9 (Mahmoud MS, Mohamad AAH., 2016), 3083–3094 .
- Jaccard, J. , & Jacoby, J. (2010). *Theory construction and model-building skills: A practical guide for the social scientist* . New York: The Guilford Press .
- Ingenu, 2019a. <https://www.ingenu.com/>.
- Ingenu, 2019b. <http://en.wikipedia.org/wiki/Ingenu.Iotconnectivity>, 2019.

<https://www.iotforall.com/iot-connectivity-comparison-lora-sigfox-rpma-lpwan-technologies/>.

Kabir, M., Syful I., Hossain, Md., Hossain, S., Detail Comparison of Network Simulators. 10.13140/RG.2.1.3040.9128.

Kang, W., Han, Y., 2015. Smartpdr: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization. *IEEE Sens. J.* 15 (5), 2906–2916.

Kaushal, H., Kaddoum, G., 2017. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 19 (1), 57–96.

Krizman, K.J., Biedka, T.E., Rappaport, S., 1997. Wireless position location: fundamentals, implementation strategies, and sources of error. In: *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 47. Institute of Electrical Engineers Inc (IEEE), pp. 919–923.

Lauridsen, M., Vejlgard, B., Kovacs, I.Z., Nguyen, H., Mogensen, P., 2017. Interference measurements in the european 868 mhz ism band with focus on lora and sigfox. In: *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE*. IEEE, pp. 1–6.

Laya, A., Kalalas, C., Vazquez-Gallego, F., Alonso, L., Alonso-Zarate, J., 2016. Goodbye, aloha! *IEEE Access* 4, 2029–2044.

Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58 (Augustin A et al., 2016), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008> .

Eric B. LoRa — LoRa documentation [Internet]. 2018. 2018 [cited 2019 Dec 19]. Available from: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#>.

Lin, X., Adhikary, A., Wang, Y.-P.E., 2016. Random access preamble design and detection for 3gpp narrowband iot systems. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 5 (6), 640–643.

LoRa alliance, "LoRaWAN what is it". Technical Marketing Workgroup 1.0, Nov., 2015. available on line: <https://loraalliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>.

LoRa alliance, LoRaWAN specification v1.0.3, July 2018. available online: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>.

LoRa alliance official site, <https://lora-alliance.org/>

LoRaSim site, <https://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/>

Lund, D. , MacGillivray, C. , Turner, V. , & Morales, M. (2014). *Worldwide and regional Internet of Things (IoT) 2014–2020 forecast: A virtuous circle of proven value and demand* . Framingham, MA, USA: Int. Data Corp. Tech. Rep . 248451 .

Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 3 (5), 164–173. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021> .

Mahmoud MS and AAH. Mohamad. A study of efficient power consumption wireless communication

techniques/modules for internet of things (iot) applications. 2016.

Margelis, G., Piechocki, R., Kaleshi, D., Thomas, P., 2015. Low throughput networks for the iot: lessons learned from industrial implementations. In: *Internet of Things (WFIoT), 2015 IEEE 2nd World Forum on*. IEEE, pp. 181–186.

Massam, P., Bowden, P., Howe, T., 2013. Narrow Band Transceiver. *Jan*, 9, pp. 115–121. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F., 2019. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express* 5 (1), 1–7.

Mesh Networking, 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_networking

Mobile IoT in the 5G future, <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2018/05/GSMA-5G-Mobile-IoT.pdf>

Navghane, S., Killedar, M., Rohokale, D.V., 2016. Iot based smart garbage and waste collection bin. *Int. J. Adv. Res. Electron. Commun. Eng.* 5 (5), 1576–1578.

Nolan, K.E., Guibene, W., Kelly, M.Y., 2016. An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things. In: *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2016 International*. IEEE, pp. 439–444. Nwave, 2019. <https://www.nwave.io/>.

Oppermann, F.J., Boano, C.A., Rømer, K., 2014. A decade of wireless sensing applications: survey and taxonomy. In: *The Art of Wireless Sensor Networks*. Springer, pp. 11–50

Ornes, S. (2016). The Internet of Things and the explosion of interconnectivity. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*: 113 (pp. 11059–11060)

Petajajarvi, J., Mikhaylov, K., Roivainen, A., Hanninen, T., Pettissalo, M., 2015. On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. In: *ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on*. IEEE, pp. 55–59.

Petäjäljärvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, Janhunen J, Iinatti J. Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *Int J Distrib Sens Networks*. 2017;13(3).

PhySimulator site, <http://lora.tti.unipa.it/>

Prihatmoko D., “Pemanfaatan Raspberry Pi Sebagai Server Web Untuk Penjadwalan Kontrol Lampu Jarak Jauh,” *J. Infotel*, vol. 9, no. 1, p. 84, 2017.

Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., Zhang, Y., Robert, M., Koskinen, J.-P., 2016. Overview of narrowband iot in lte rel-13. In: *Standards for Communications and Networking (CSCN), 2016 IEEE Conference on*. IEEE, pp. 1–7.

Rawat, D.B., Brecher, C., Song, H., Jeschke, S., 2017. *Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems*. Springer.

Reynders, B., Pollin, S., 2016. Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range

communication. In: Communications and Vehicular Technologies (SCVT), 2016 Symposium on. IEEE, pp. 1–5.

Reynders, B., Wang, Q., Pollin, S., A LoRaWAN module for ns-3: implementation and evaluation. In Proceedings of the 10th Workshop on ns-3 (WNS3 '18). ACM, New York, NY, USA, 61-68. DOI: <https://doi.org/10.1145/3199902.3199913>

Reynders, B., Meert, W., Pollin, S., 2016. Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. In: Telecommunications (ICT), 2016 23rd International Conference on. IEEE, pp. 1–6.

Raza U, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.

Rosmiati M., M. Fachru Rizal, and I. Wanti, “Monitoring Location Prototype Using Lora Module,” MATEC Web Conf., vol. 218, pp. 1–7, 2018.

Sanchez-Iborra, R., Cano, M.-D., 2016. State of the art in lp-wan solutions for industrial iot services. Sensors 16 (5), 708.

Semtech, AN 120022, LoRa Modulation Basics, May, 2015. Available online: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22pdf>

Semtech, 2019. <http://www.semtech.com/>.

Sinha, R.S., Wei, Y., Hwang, S.-H., 2017. A survey on lpwa technology: lora and nb-iot. Ict Express 3 (1), 14–21.

Sivaraman, V., Gharakheili, H.H., Vishwanath, A., Boreli, R., Mehani, O., 2015. Networklevel security and privacy control for smart- home iot devices. In: Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2015 IEEE 11th International Conference on. IEEE, pp. 163–167.

Song, H., Rawat, D.B., Jeschke, S., Brecher, C., 2016. Cyber-physical Systems: Foundations, Principles and Applications. Morgan Kaufmann.

Song, H., Srinivasan, R., Sookoor, T., Jeschke, S., 2017. Smart Cities: Foundations, Principles, and Applications. John Wiley & Sons.

Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., Hersent, O., 2015. Lorawan Specification. LoRa alliance. Standard, E. Short Range Devices (SRD) Operating in the Frequency Range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement; ETSI EN: Sophia Antipolis, France, 2016; Volume 300, p. 220.

Team, Insights (2017e). Why collaboration is essential for successful IoT implementation . Forbes Insights Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/insights-hitachi/2017/12/18/why-collaboration-is-essential-for-successful-iot-implementation/#27effd10e0> Accessed 01 February 2019 .

Telensa, 2019. <http://www.telensa.com/technology>.

Vangelista L. , “Frequency shift chirp modulation: The lora modulation,” IEEE Signal Processing

Letters, vol. 24, no. 12, pp. 1818–1821, Dec 2017.

Wang, Y.-P.E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., Bergman, J., Razaghi, H.S., 2017. A primer on 3gpp narrowband internet of things. *IEEE Commun. Mag.* 55 (3), 117–123.

Waspote sigfox networking guide, 2015. S. Weightless. Lpwan technology decisions: 17 critical features. <http://www.weightless.org/about/weightlessp>.

Weightless architecture, 2019. <https://www.radio-electronics.com/info/wireless/weightless-m2m-white-space-wireless-communications/network-architecture.php/>.

Weightless, 2019. <http://www.weightless.org/>.

Weyn, M., Ergeerts, G., Berkvens, R., Wojciechowski, B., Tabakov, Y., 2015. Dash7 alliance protocol 1.0: low-power, mid-range sensor and actuator communication. In: 2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, pp. 54–59.

Widianto A. A. F. and R. S. E. D., M. S. M. Pakpahan, “LoRa QoS Performance Analysis on Various Spreading Factor in Indonesia,” in 2018 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), 2018, pp. 1–5.

Worldwide and Regional Internet of Things (iot) 2014–2020 Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand, 2016. <https://www.business.att.com/content/article/IoT-worldwide/regional/2014-2020-forecast.pdf>.

Wortmann, F., & Flüchter, K. (2015). Internet of Things. *Business & Information Systems Engineering*, 57 (3), 221–224. <https://doi.org/10.1007/s12599-015-0383-3>

Yu, C., Yu, L., Wu, Y., He, Y., Lu, Q., 2017. Uplink scheduling and link adaptation for narrowband internet of things systems. *IEEE Access* 5, 1724–1734.

Zanella, A., 2016. Best practice in rss measurements and ranging. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 18 (4), 2662–2686.

Zanella A, Zorzi M. Long -Range Communications in Unlicensed Bands : The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios. 2016;(October):60–7.

Zhang, R., Wang, M., Cai, L.X., Zheng, Z., Shen, X., Xie, L.-L., 2015. Lte-unlicensed: the future of spectrum aggregation for cellular networks. *IEEE Wirel. Commun.* 22 (3), 150–159.

Zhou, H., Liu, B., Wang, D., 2012. Design and research of urban intelligent transportation system based on the internet of things. In: *Internet of Things*. Springer, pp. 572–580.