



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας τελικών IoT κόμβων με χρήση simulator σε δίκτυα LPWAN

Κέβιν Αλίτι

A.M. 235989

Επιβλέπων

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων

Απόστολος Γκάμας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Παπαχρήστος Νικόλαος, Υπ. Διδάκτορας

Μέλοι Επιτροπής Αξιολόγησης

Γαροφαλάκης Ιωάννης, Καθηγητής

Βλάχος Κυριάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Πάτρα, 2021

© Copyright συγγραφής Κέβιν Αλίνι, 2021

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας, Απόστολος Γκάμας, Παπαχρήστος Νικόλαος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Ευχαριστώ τον κύριο Χρήστο Μπούρα για την εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας, καθώς και τους κυρίους Απόστολο Γκάμα και Παπαχρήστο Νικόλα για την αξιοσημείωτη βοήθεια τους πάνω στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για όλους τους καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών για την μεταλαμπάδευση γνώσεων που μου προσέφεραν στα χρόνια της φοίτησης μου στη σχολή.

Περίληψη

Το “Διαδίκτυο των Πραγμάτων” (“Internet of Things” – IoT) είναι μια συλλογή από συσκευές με ηλεκτρονικά, λογισμικά, αισθητήρες, ενεργοποιητές τα οποία είναι συνδεδεμένα με τη χρήση του διαδικτύου για τη συλλογή και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Οι συσκευές IoT είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες και ισχύ επεξεργασίας που τις επιτρέπουν να αναπτυχθούν σε πολλά περιβάλλοντα.

Οι συσκευές του IoT πολλές φορές δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση στο ρεύμα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να έχουν ένα μέσο τροφοδοσίας. Για τις συσκευές αυτές η λύση είναι η χρήση της μπαταρίας. Όμως για να μπορεί να γίνει η χρήση της μπαταρίας θα πρέπει η συσκευή να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από αυτή που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία.

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μιας συσκευής IoT καθορίζεται από έναν απλό υπολογισμό - η χωρητικότητα της μπαταρίας διαιρούμενη με το μέσο ρυθμό εκφόρτισης. Η ελαχιστοποίηση της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τη συσκευή ή η αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας θα αυξήσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η επιλογή της σωστής τεχνολογίας επικοινωνιών καθορίζεται συχνά από τις απαιτήσεις του συστήματος. Για ασύρματες επικοινωνίες, η αυξημένη εμβέλεια ή ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων συνήθως απαιτούν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, και επομένως η τεχνολογία επικοινωνιών χαμηλότερης ισχύος που θα ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις είναι συχνά η προφανής επιλογή.

Για τους αισθητήρες IoT υπάρχουν πολλές δημοφιλείς τεχνολογίες. Το LoRa, για παράδειγμα, προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής WAN χαμηλής ισχύος, μεγάλης εμβέλειας με εύρος αρκετών χιλιομέτρων, ενώ το Bluetooth Low Energy (BLE) επικοινωνεί μόνο σε μικρές αποστάσεις, αλλά καταναλώνει σημαντικά λιγότερο ρεύμα.

Στην συνέχεια αναλύονται οι αυξανόμενες τεχνολογικές απαιτήσεις ενός νέου ψηφιακού κόσμου, όπου όλες οι συσκευές θα είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους, αποτελώντας μέρος ενός συστήματος επικαλούμενο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Επιπλέον, εξετάζεται και ένας τύπος δικτύων το οποίο ονομάζεται LoRaWAN δίκτυα ή αλλιώς δίκτυα χαμηλής ισχύος μεγάλης εμβέλειας. Τα προαναφερόμενα δίκτυα έχουν την δυνατότητα να στέλνουν δεδομένα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας.

Η συγκεκριμένη εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Πανεπιστημίου Πατρών της Πολυτεχνικής Σχολής Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής. Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη και αξιοποίηση προσομοιωτή, ο οποίος επικεντρώνεται στην καλύτερη

διαχείριση μιας μπαταρίας τερματικής συσκευής. Επομένως, με την χρήση αυτού του προσομοιωτή και με διάφορα μαθηματικά μοντέλα θα κάνουμε πειράματα σε πολλά κρίσιμα δεδομένα, που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα του LoRa. Σκοπός αυτών των πειραμάτων είναι η εύρεση κατάλληλων αποτελεσμάτων/συμπερασμάτων, ώστε να μπορούμε να επιτύχουμε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Abstract

The Internet of Things (IoT) is a collection of devices with electronics, software, sensors, actuators that are connected using the internet to collect and exchange data with each other. IoT devices are equipped with sensors and processing power that allow them to be deployed in many environments.

IoT devices often cannot access power. This means that they must have a power supply, which is achieved either with batteries or with energy. For these devices the solution is to use the battery. However, in order to be able to use the battery, the device must consume less energy than that stored in the battery.

Access time booklet seated Especially from the simple layout - the capacity of the seating divided by the discharge format. Minimizing the application created by the device or using the market space will admire the duration of its use. Choosing the right dialog communications dialogs differences from the results of its use. For approaches, communications, long appearance or horizontal required required required supply time, and each time the communication technology, shorter time, each time I need to do, do, do, make the choice.

There are many popular technologies for IoT sensors. LoRa, for example, offers the ability to build low-power, long-range WANs with a range of several kilometers, while Bluetooth Low Energy (BLE) only communicates over short distances, but consumes significantly less power.

It then analyzes the growing technological demands of a new digital world, where all devices will be interconnected, forming part of an Internet of Things (IoT) system. In addition, a type of network called LoRaWAN networks or low-power long-range networks is being considered. The aforementioned networks have the ability to send data over very long distances, with very low power consumption.

The attempt to reproduce in the archive of the Undergraduate Program of the University of Patras of the Polytechnic School of Computer Engineering & Information. The object of the application is the utilization and utilization of a photographer, it is horizontally concentrated in each use during use, cash use. Application with the use of simulator applications and with mathematical elements and other miracles of money used with the objects in its application in the LoRa system. The purpose of experimental appearances is to find the approaches, dialogues, questions / conclusions required to achieve small differences in appearance.

Περιεχόμενα

1	1
Εισαγωγή	1
1.1 Ασύρματα Δίκτυα IoT	1
1.2 Στόχοι της Εργασίας	3
1.3 Μεθοδολογία Προσέγγισης	3
2	6
Internet of Things (IoT)	6
2.1 Ιστορική αναδρομή	6
2.2 IoT σήμερα	7
2.3 Εφαρμογές του IoT	9
2.3.1 Έξυπνο σπίτι	9
2.3.2 Έξυπνη πόλη	11
2.3.3 E-Health and IoT	12
2.4 Προκλήσεις του IoT	13
2.4.1 Ηθικές και κοινωνικές προκλήσεις	13
2.4.2 Τεχνολογικές προκλήσεις	15
2.4.3 Περιβαλλοντικές προκλήσεις	16
3	18
Ασύρματες τεχνολογίες IoT	18
3.1 Τεχνολογίες και Πρωτόκολλα IoT	18
3.2 Τεχνολογίες μικρής εμβέλειας	19
3.2.1 Bluetooth	19
3.2.2 IEEE 802.11/WiFi	19
3.2.3 Near-Field Communication (NFC)	20
3.3 Τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας	21
3.3.1 Κινητά δίκτυα επικοινωνίας 4G/5G	21
3.3.2 LoRa	22
4	24
Τεχνολογία Lora	24
4.1 Φυσικό επίπεδο	24
4.2 Χαρακτηριστικά LoRa	25
4.2.1 LoRaWAN	27
4.2.1.1 Τρόπος λειτουργίας	28
4.2.1.2 Ασφάλεια	29

4.3	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα LoRa	31
4.3.1	Πλεονεκτήματα	31
4.3.2	Μειονεκτήματα	32
4.4	Προσομοιωτές	32
4.4.1	Περιγραφή προσομοιωτή	34
4.4.2	Physimulator	34
4.4.3	FLoRa	35
4.4.4	NS-3 Module	37
4.4.5	LoRaSim	38
5		40
	<i>Κατανάλωση Ενέργειας στην LoRa</i>	40
5.1	LoRa and Energy	40
5.1.1	Μεθοδολογία και υποθέσεις	41
5.1.2	Ανταλλαγή δεδομένων με χρήση LoRa	43
5.1.2.1	Δομή πακέτων	43
5.2	Μοντελοποίηση LoRa	48
6		67
	<i>Συμπεράσματα, Προοπτικές και μελλοντική εργασία</i>	67
6.1.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	67
6.1.2	Μελλοντική Εργασία	68
	Βιβλιογραφία- Αναφορές	75

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1 Το πλήθος των χρηστών του Διαδικτύου από το 2005 μέχρι το 2019	1
Εικόνα 2 Οποιαδήποτε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή συνδέεται στο ίντερνετ	2
Εικόνα 3 Ένα τροποποιημένο μηχάνημα αυτόματης πώλησης της Coca-Cola 1982.....	7
Εικόνα 4 IoT σήμερα.....	8
Εικόνα 5 smart home.....	9
Εικόνα 6 Διασύνδεση συσκευών.....	11
Εικόνα 7 smart city.....	12
Εικόνα 8 IoT στην ιατροφαρμακευτική περίθαλψη	13
Εικόνα 9 Ασύρματες τεχνολογίες.....	18
Εικόνα 10 Ιστορική πορεία του προτύπου IEEE 802.11	20
Εικόνα 11 Κινητά δίκτυα επικοινωνίας.....	22
Εικόνα 12 LoRa.....	23
Εικόνα 13 LoRa.....	25
Εικόνα 14 Μεταδιδόμενο πακέτο LoRa	26
Εικόνα 15 LoRa Alliance	29
Εικόνα 16 LoRa security	30
Εικόνα 17 Flowchart describing the process of the simulation.	33
Εικόνα 18 Παράδειγμα εκτέλεσης του physimulator	34
Εικόνα 19 Παράδειγμα εκτέλεσης σεναρίου του Omnet ++	36
Εικόνα 20 Παράδειγμα ns3	37
Εικόνα 21 Παράδειγμα εκτέλεσης του LoRaSim.....	38
Εικόνα 22 Προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο	41
Εικόνα 23 Το πλαίσιο LoRa.....	44
Εικόνα 24 Δομή LoRa.....	46
Εικόνα 25 Πλαίσιο προσομοίωσης LPWAN βασισμένο σε σχεδιασμό για αξιολόγηση και βελτιστοποίηση πολλαπλών επιπέδων.....	51
Εικόνα 26 Επιπτώσεις της διακύμανσης καναλιού και του μεγέθους ωφέλιμου φορτίου στο ρυθμό εξαγωγής ενέργειας και δεδομένων	52
Εικόνα 27 Κατανάλωση ενέργειας ανά μεταδιδόμενο byte	53
Εικόνα 28 Μεγέθυνση διαγράμματος Εικόνας 27	53
Εικόνα 29 Διάγραμμα Συνολικής ενέργειας για κόμβους	54
Εικόνα 30 Διάγραμμα χρόνου αναμονής για κόμβους.....	55
Εικόνα 31 Διάγραμμα DER για κόμβους	55
Εικόνα 32 Διάγραμμα σχετικών συγκρούσεων για κόμβους	56
Εικόνα 33 Διάγραμμα Κατανάλωσης Ενέργειας για διαφορετικά SF.....	61
Εικόνα 34 Σχέση SF με Time On Air.....	61
Εικόνα 35 Συνολική Ενέργεια για διαφορετικά Time On Air.....	62
Εικόνα 36 Χρόνος Αναμονής για διαφορετικά Time On Air.....	62
Εικόνα 37 Διάγραμμα συγκρούσεων για διαφορετικά SF.....	63
Εικόνα 38 Ενέργεια για διαφορετικές αποστάσεις	64
Εικόνα 39 Χρόνος Αναμονής για διαφορετικές αποστάσεις.....	65

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Transmission Power & Power Consumption	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης. 6
Πίνακας 2: παράμετροι LoRa.....	51
Πίνακας 3: Spreading Factor & Chirp Code Length	60

Ακρωνύμια

IoT	Internet of Things
LoRA	Long Range
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
LPWAN	Low Power Wide Area Network
DER	Data Extraction Rate
RFID	Radio Frequency Identification system
MAC	Medium Access Control
LAN	Local Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
ToF	Time of Flight
WiFi	Wireless Fidelity
NFC	Near-Field Communication
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-Input Multiple- Output
FDD	Frequency Division Duplexing
TDD	Test Driven Development
CSS	Chirp Spread Spectrum

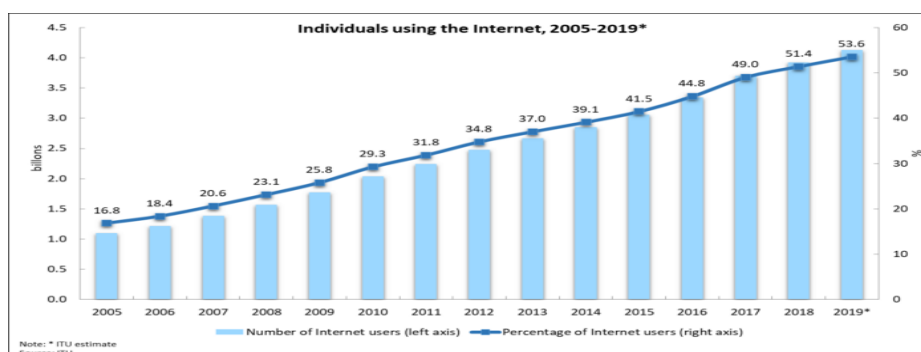
SF	Spreading Factor
CRC	Cyclic Redudancy Check
FEC	Forward Error Correction

1

Εισαγωγή

1.1 Ασύρματα Δίκτυα IoT

Όπως προαναφέρθηκε, ο ρόλος που έχει αποκτήσει το Ίντερνετ στην σημερινή κοινωνία, είναι καταλυτικός σε σχέση με τα προηγούμενα έτη. Συγκεκριμένα, αποτελεί το κατεξοχήν εργαλείο αναζήτησης δεδομένων, πληροφοριών, ειδήσεων και παράλληλα θεωρείται πηγή γνώσης αλλά και μέσο επικοινωνίας. Οι ηλικίες των χρηστών του Διαδικτύου ποικίλουν και ενδείκνυται πως τα παιδιά έρχονται σε άμεση είτε έμμεση επαφή με το Ίντερνετ σε μικρότερη ηλικία απ' ό,τι στο παρελθόν. Όπως διαγράφεται και στην παρακάτω εικόνα, κατά την χρονική περίοδο του 2019 το πλήθος των ανθρώπων που είχαν πρόσβαση στο διαδίκτυο ανέρχεται στα 53,6% του πληθυσμού!



Εικόνα 1 Το πλήθος των χρηστών του Διαδικτύου από το 2005 μέχρι το 2019

Η εξέλιξη των Τεχνολογιών Επικοινωνίας Πληροφοριών παρουσιάζεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1830, όπου σημειώθηκαν μερικές από τις εξελίξεις και κορυφώθηκαν στο IoT. Ο τηλεγράφος θεωρείται ως η πρώτη μεγάλη εφεύρεση της ασύρματης τεχνολογίας επικοινωνίας. Έπειτα από αυτήν την εξαιρετικά σημαντική εφεύρεση, έρχεται η δημιουργία του τηλεφώνου, που ακολουθείται από τη γέννηση των υπολογιστών. Η εφεύρεση υπολογιστών τη δεκαετία του 1920 επέτρεψε την επίλυση πολύπλοκων υπολογισμών, συμπεριλαμβανομένης της διάσπασης προηγουμένως άθραυστων κωδικών και υπολογισμών, συμπεριλαμβανομένης της διάσπασης κώδικα στο Bletchley Park. Η αρχιτεκτονική αυτής της πρώιμης μηχανής έγινε το θεμέλιο για την υπολογιστική θεωρία που ακολούθησε (Newman, 1955). Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη του Προσωπικού Υπολογιστή (PC) στη δεκαετία του 1970.



Εικόνα 2 Οποιαδήποτε ηλεκτρική ή ηλεκτρονική συσκευή συνδέεται στο ίντερνετ

Ως επακόλουθο της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας αποτελεί η δημιουργία μιας νέας εποχή και ένας διαφορετικός τρόπος χρήσης του διαδικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πως είναι ευρέως γνωστό ότι η πρόσβαση στο διαδίκτυο δεν επιτυγχάνεται μόνο από τους ανθρώπους μέσω κάποιων συσκευών, αλλά παράλληλα και από αυτόνομα αντικείμενα που έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν μεταξύ τους και ταυτόχρονα στο διαδίκτυο, δημιουργώντας το λεγόμενο Internet of Things (IoT). Έκτοτε, διάφορες συσκευές όπως ψυγεία, θερμοσίφωνες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν και να στέλνουν δεδομένα μεταξύ τους. Πρακτικά, ο στόχος του IoT είναι να παρέχει στους χρήστες όσο γίνεται μεγαλύτερο έλεγχο διαφορετικών συσκευών μέσω ίντερνετ και φυσικά μέσω εξ' αποστάσεων.

Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί μια σειρά από προϋποθέσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Για παράδειγμα, η κατανάλωση ισχύος της φορητής συσκευής αποτελεί ένα πολύ βασικό κομμάτι για την υλοποίηση του. Δεδομένου ότι ο χρήστης μπορεί να μην έχει την δυνατότητα την συγκεκριμένη στιγμή φορτίσει ξανά την συσκευή του, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα, αλγόριθμοι αλλά και υλικό (hardware) που θα επικεντρώνεται στην όσο το δυνατό μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

1.2 Στόχοι της Εργασίας

Για να επιτευχθεί η υλοποίηση των παραπάνω, έχουν προταθεί ποικίλα πρωτόκολλα, αλγόριθμοι και ερευνητικό υλικό. Ένα από τα οποία είναι το LoRa, που προσπαθεί να λύσει τα προαναφερόμενα προβλήματα εξετάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στη μελέτη των διαθέσιμων εξομοιωτών - όπου περιγράφονται στην βιβλιογραφία - δικτύων IoT για την τεχνολογία LoRa, και η εξομοίωση διάφορων σεναρίων δικτύων IoT με γνώμονα την βελτιστοποίηση τους.

1.3 Μεθοδολογία Προσέγγισης

Η διπλωματική εργασία ασχολείται με το αναπτυσσόμενο IoT το οποίο αφορά την διασύνδεση συσκευών, όπου επικεντρώνεται στην πρόκληση του τομέα σχετικά με την διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας σε συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες.

Συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της διασύνδεσης των συσκευών, δίνοντας έμφαση στο LoRa. Κάτω από τα πλαίσια της έρευνας, επρόκειτο να μελετηθούν κάποιοι προσομοιωτές για διάφορα σενάρια δικτύων IoT σε LoRa, καθώς αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο που εγγυάται στην εύρεση λύσεων στα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Εν συνεχεία, η Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας έχει την παρακάτω δομή και ακολουθεί τα εξής κεφάλαια:

Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξεταστεί πιο λεπτομερώς το IoT, κάνοντας μία ιστορική ανάδρομή, όπου θα αναφερθεί η πρώτη του εμφάνιση και εφαρμογή, δίνοντας και μερικούς ορισμούς. Επιπροσθέτως, θα επισημανθεί η αλλαγή της έννοιας του IoT μέσα στο πέρασμα του χρόνου, από το πως το αντιλαμβάνονταν και το τι σήμαινε στις αρχές της ανακάλυψης του στο πως το αντιλαμβάνονται και το τι σημαίνει σήμερα, ως προς τις τεχνολογικές καινοτομίες αλλά και στην εγκαθίδρυση του στο διαδίκτυο. Στην συνέχεια θα ακολουθήσει μία αναφορά στα σημερινά δεδομένα του IoT και θα δοθούν παραδείγματα χρήσης, τα οποία χρησιμοποιούνται τα τελευταία έτη. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα εξεταστούν ποικίλες προκλήσεις του IoT ως προς διάφορους τομείς, οι οποίοι υπάρχουν σήμερα και η κοινωνία καλείται να τις αντιμετωπίσει, έτσι ώστε να επιτευχθεί η εδραίωση αυτών των τεχνολογιών για την βελτίωση του ανθρώπινου βίου.

Στο 3ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ασύρματες τεχνολογίες που υποστηρίζουν το IoT. Χαρακτηριστικά, θα πραγματοποιηθεί μια επισκόπηση χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών για τα συστήματα αυτά, όπου στην συνέχεια θα χωριστούν σε κατηγορίες μικρής και μεγάλης εμβέλειας. Ενδεικτικά, στην πρώτη κατηγορία θα αναφερθούν οι επικρατέστερες, όπως είναι Bluetooth, Wi-Fi, NFC και στην δεύτερη κατηγορία τα 4G/5G και αντίστοιχα θα ακολουθήσει και μια σύντομη εισήγηση στο LoRa.

Στο 4ο κεφάλαιο έπεται μια πλήρης εισαγωγή του LoRa, δηλαδή στην τεχνολογία του υλικού, τον τρόπο λειτουργίας της, την τοπολογία, την ασφάλεια παράλληλα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Αναλυτικότερα, γίνεται αναφορά στους διαθέσιμους εξομοιωτές που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και την επιστημονική κοινότητα, με παρουσίαση προσομοιωτών της, όπως είναι Physimulator, FLoRA, Ns3 module, LoRaSim.

Στο κεφάλαιο 5ο γίνεται πιο λεπτομερής εξαγωγή πειραμάτων και προσομοιώσεων σε συνδυασμό με μαθηματικούς τύπους για την επίτευξη της εξοικονόμησης ενέργειας στο LoRa. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι αλλαγές στην τάση της ενέργειας που μπορεί να προκύψουν αν αλλοιωθεί σε κάθε περίπτωση και μία άλλη παράμετρο, όπως το πλήθος των τελικών κόμβων, το Time On Air, του ADR καθώς και άλλων παραμέτρων. Για τα οποία επρόκειτο να ακολουθήσει περαιτέρω ανάλυση και επεξήγηση. Επίσης, βάσει των αλλαγών που θα προκύπτουν σε καθένα από τα προαναφερθέντα, μέλλεται να ακολουθήσουν αντίστοιχα διαγράμματα τα οποία θα εξεταστούν και αναλυθούν σύμφωνα με τα αποτελέσματα τους.

Τέλος στο 6ο κεφάλαιο ακολουθεί μια σύνοψη της πτυχιακής εργασίας, όπου θα παρατεθούν τα συμπερασματικά αποτελέσματα της έρευνας και η παρουσίαση ερευνητικών και πρακτικών θεμάτων τα οποία, αναμφίβολα, θα αποτελέσουν το αντικείμενο ενασχόλησης και μελέτης στα επόμενα χρόνια.

2

Internet of Things (IoT)

2.1 Ιστορική αναδρομή

Φλέγοντα ζητήματα αποτελούν στην σήμερον ημέρα, οι καινοτομίες που διαδραματίζονται στον κλάδο της μηχανικής Η/Υ και πληροφορική, όπως Internet of Things. Ωστόσο, τι ακριβώς σημαίνει ο όρος Internet of Things; Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) περιγράφει το δίκτυο φυσικών αντικειμένων - "πράγματα" - που είναι ενσωματωμένα με αισθητήρες, λογισμικό και άλλες τεχνολογίες με σκοπό τη σύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων με άλλες συσκευές και συστήματα μέσω του Διαδικτύου.

Οι συσκευές του IoT έχουν εξελιχθεί λόγω της σύγκλισης πολλαπλών τεχνολογιών, αναλυτικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο, μηχανικής μάθησης, αισθητήρων εμπορευμάτων και ενσωματωμένων συστημάτων **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..** Τα παραδοσιακά πεδία των ενσωματωμένων συστημάτων, των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, των συστημάτων ελέγχου, του αυτοματισμού (συμπεριλαμβανομένου του αυτοματισμού σπιτιού και κτιρίων) και άλλα συμβάλλουν στην ενεργοποίηση του Διαδικτύου των πραγμάτων. Υπάρχουν ορισμένες σοβαρές ανησυχίες σχετικά με τους κινδύνους στην ανάπτυξη του IoT, ιδίως στους τομείς της ιδιωτικής ζωής και της ασφάλειας, και κατά συνέπεια έχουν ξεκινήσει βιομηχανικές και κυβερνητικές κινήσεις για την αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης διεθνών προτύπων.



Εικόνα 3 Ένα τροποποιημένο μηχάνημα αυτόματης πώλησης της Coca-Cola 1982

Η κύρια ιδέα ενός δικτύου έξυπνων συσκευών συζητήθηκε ήδη από το 1982, με ένα τροποποιημένο μηχάνημα αυτόματης πώλησης της Coca-Cola στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon να γίνει η πρώτη συσκευή συνδεδεμένη στο Διαδίκτυο που ήταν σε θέση να αναφέρει το απόθεμά της και εάν τα νέα φορτωμένα ποτά κρύο ή όχι **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

Το έγγραφο του Mark Weiser το 1991 για τον πανταχού παρόν υπολογισμό, «Ο υπολογιστής του 21ου αιώνα», καθώς και ακαδημαϊκοί χώροι όπως το UbiComp και το PerCom παρήγαγαν το σύγχρονο όραμα του IoT.

Το 1994, ο Reza Raji περιέγραψε την ιδέα στο IEEE Spectrum ως «'μετακίνηση' μικρών πακέτων δεδομένων σε ένα μεγάλο σύνολο κόμβων, έτσι ώστε να ενσωματώσει και να αυτοματοποιήσει τα πάντα, από οικιακές συσκευές σε ολόκληρα εργοστάσια». Μεταξύ 1993 και 1997, αρκετές εταιρείες πρότειναν λύσεις όπως το Microsoft's at Work ή το Novell's NEST. Ο τομέας κέρδισε δυναμική όταν ο Bill Joy οραματίστηκε την επικοινωνία μεταξύ συσκευών ως μέρος του πλαισίου του «Six Webs», που παρουσιάστηκε στο Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ στο Νταβός το 1999.

Ο όρος «Ιντερνετ των πραγμάτων» επινοήθηκε από τον Kevin Ashton από την Procter & Gamble, αργότερα το Auto-ID Center του MIT, το 1999, αν και προτιμά τη φράση «Διαδίκτυο για πράγματα». Σε αυτό το σημείο, θεώρησε την αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID) ως απαραίτητη για το Διαδίκτυο των πραγμάτων, που θα επέτρεπε στους υπολογιστές να διαχειρίζονται όλα τα μεμονωμένα πράγματα. Ορίζοντας το Διαδίκτυο των πραγμάτων ως «απλώς το χρονικό σημείο όπου περισσότερα «πράγματα ή αντικείμενα» συνδέθηκαν στο Διαδίκτυο από ό, τι οι άνθρωποι», η Cisco Systems εκτιμά ότι το IoT «γεννήθηκε» μεταξύ 2008 και 2009, με την αναλογία πραγμάτων / ανθρώπων από 0,08 το 2003 σε 1,84 το 2010.

2.2 IoT σήμερα

Από τους πιθανούς τομείς εφαρμογής του Internet of Things, έξυπνες πόλεις (smart cities) (και περιοχές), έξυπνα αυτοκίνητα και κινητά, έξυπνα σπίτια (smart home) και υποβοηθούμενη διαβίωση. Ακόμη το IoT έχει εφαρμογή και στις έξυπνες βιομηχανίες, στην δημόσια ασφάλεια, ενέργεια και

προστασία του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με αυτήν την εξέλιξη, η πλειονότητα των κυβερνήσεων στην Ευρώπη, στην Ασία και στην Αμερική θεωρούν τώρα το Διαδίκτυο των πραγμάτων ως χώρο καινοτομίας και ανάπτυξης.

Οι περισσότεροι από τους οποίους δίνουν μεγάλη προσοχή ή ακόμη και επιταχύνουν τον ρυθμό επινοώντας νέους όρους για το IoT και προσθέτοντας επιπλέον στοιχεία σε αυτό. Επιπλέον, οι τελικοί χρήστες στον ιδιωτικό και επιχειρηματικό τομέα απέκτησαν σήμερα σημαντική ικανότητα στην αντιμετώπιση έξυπνων συσκευών και δικτυακών εφαρμογών.



Εικόνα 4 IoT σήμερα

Καθώς το Διαδίκτυο των πραγμάτων συνεχίζει να αναπτύσσεται, το περαιτέρω δυναμικό εκτιμάται από ένα συνδυασμό με σχετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις και έννοιες όπως το Cloud computing, το Future Internet, Big Data, robotics και Semantic τεχνολογίες. Φυσικά, η ιδέα δεν είναι καινούργια αλλά γίνεται πλέον εμφανής καθώς αυτές οι σχετικές έννοιες έχουν αρχίσει να αποκαλύπτουν συνέργειες συνδυάζοντάς τις.

Ωστόσο, το Διαδίκτυο των πραγμάτων εξακολουθεί να ωριμάζει, ιδίως λόγω ορισμένων παραγόντων, οι οποίοι περιορίζουν την πλήρη εκμετάλλευση του IoT [1][1].

Σήμερα απέκτησε σημαντική ικανότητα στην αντιμετώπιση έξυπνων συσκευών και δικτυακών εφαρμογών. Καθώς το Διαδίκτυο των πραγμάτων συνεχίζει να αναπτύσσεται, το περαιτέρω δυναμικό εκτιμάται από ένα συνδυασμό με σχετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις και έννοιες όπως το Cloud Computing, το Future Internet, τα Big Data, η ρομποτική και το Σημαιολογικό [3].

Στην παρούσα εργασία, επρόκειτο να αναλυθεί μια κατηγορία ασύρματων δικτύων που ονομάζεται LoRaWAN, το οποίο είναι ένας τύπος ασύρματης σύνδεσης μεγάλης εμβέλειας με χαμηλή ισχύ. Ο συγκεκριμένος τύπος ειδικεύεται σε περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει περιορισμός ενέργειας, δηλαδή σε αισθητήρες που βρίσκονται σε συσκευές που χρησιμοποιούν μπαταρία για την ενέργεια τους.

Χαρακτηριστικά, οι βασικές αρχές της παραπάνω κατηγορίας είναι τα εξής:

- Μεγάλη εμβέλεια. Η εμβέλεια θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από δύο χιλιόμετρα.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τα πρωτόκολλα έχουν σαν γνώμονα την μικρότερη κατανάλωση, την όσον το δυνατόν μικρότερη μετάδοση δεδομένων με χαμηλό bit rate.

- Χαμηλό κόστος. Το πρωτόκολλο δεν θα πρέπει να είναι περίπλοκο , γιατί με αυτό τον τρόπο θα οδηγήσει στην αύξηση της πολυπλοκότητας του hardware της συσκευής.

2.3 Εφαρμογές του IoT

Αξίζει να σημειωθεί πως η βελτίωση του hardware, η δημιουργία των διάφορων δικτυακών τεχνολογιών και Πρωτοκόλλων έχει οδηγήσει στην δυνατότητα εφαρμογής του IoT σε πολλούς τομείς. Συγκεκριμένα, εισάγεται η δυνατότητα αυτοματισμού και επικοινωνίας μεταξύ μηχανών. Οι τομείς αυτοί θα μπορούσαν πιθανότητα να είναι η διαχείριση Έξυπνες Πόλεις (και περιοχές), Έξυπνα αυτοκίνητα και κινητά, Έξυπνα σπίτια και ούτω καθεξής.

2.3.1 Έξυπνο σπίτι

Ένα έξυπνο σπίτι παρέχει μια έξυπνη διεπαφή διαχείρισης σπιτιού και ένα άνετο περιβάλλον διαβίωσης. Τα έξυπνα σπίτια αποτελούν, αναμφίβολα, ένα από τα σημαντικά ερευνητικά θέματα στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) [4]. Μια ποικιλία αισθητήρων βασισμένων σε IoT που συνδέονται με ασύρματα δίκτυα, εγκαθίστανται σε έξυπνα σπίτια, για να βελτιώσουν τη ζωή των κατοίκων του σπιτιού. Οι αρχιτέκτονες των αρχιτεκτονικά έξυπνων σπιτιών επιθυμούν την ικανότητα να διαμορφώνουν διαισθητικά τα έξυπνα σπίτια τους και να ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών πριν από την έναρξη της κατασκευής. Επομένως, απαιτούνται αξιόπιστα, χαμηλού κόστους δοκιμαστικά κρεβάτια για να εξεταστεί η αρχιτεκτονική σχεδίαση.

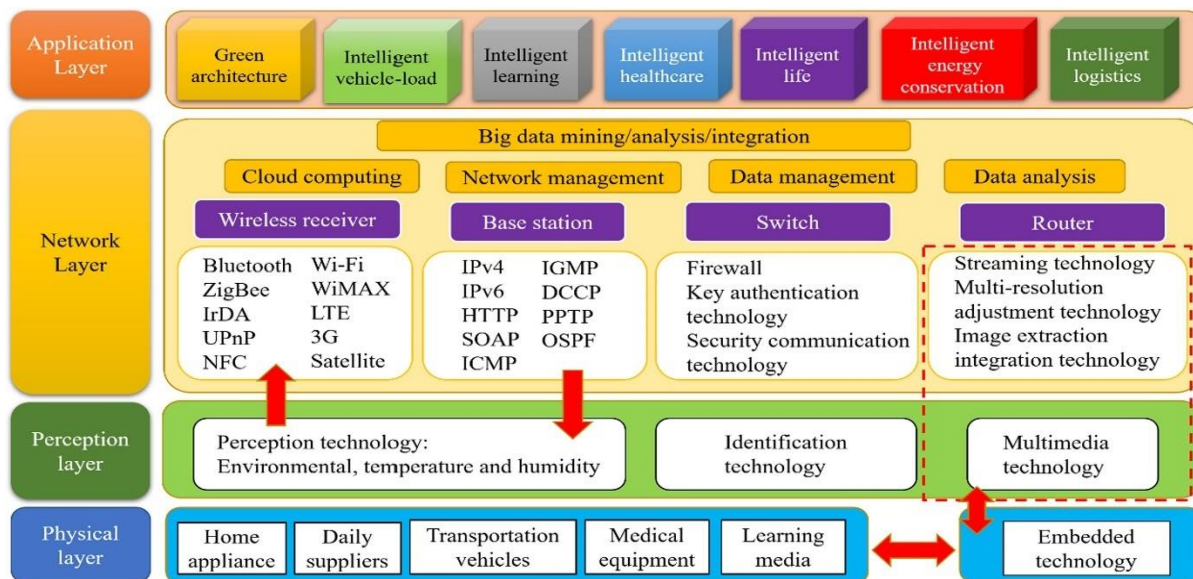


Εικόνα 5 smart home

Επιπλέον, οι έξυπνοι οίκοι πρέπει να παρακολουθούν την αλληλεπίδραση μεταξύ χρηστών και στοιχείων σπιτιού, για να παρέχουν τις κατάλληλες υπηρεσίες. Οι αισθητήρες εντοπίζουν διάφορα είδη συνόλων δεδομένων περιβάλλοντος. Ωστόσο, οι μεμονωμένοι αισθητήρες λειτουργούν ανεξάρτητα και αναφέρουν απλές πληροφορίες. Προκειμένου να εφαρμοστεί αξιόπιστος υπολογιστής παντού και να ανιχνευθεί η κατάσταση διαβίωσης, πρέπει να τοποθετηθούν πολλοί αισθητήρες. Ωστόσο, η ανακατασκευή υλικού για αυτόν τον τύπο εγκατάστασης διεπαφής αυξάνει σημαντικά το κόστος.

Η κύρια ιδέα του IoT είναι «η ολοκλήρωση της αρετής και της πραγματικότητας και η διασύνδεση όλων των πραγμάτων», η οποία μπορεί επίσης να γίνει κατανοητή ως το φαινόμενο ότι όλα τα πράγματα στον κόσμο, είτε «άνθρωποι», «πράγματα», «χρόνος», «τοποθεσίες» ή «αντικείμενα», μπορούν να διασυνδεθούν από το Διαδίκτυο. Το ETSI ορίζει το IoT ως ιεραρχία τριών επιπέδων, καθένα από τα οποία συνδέεται άρρηκτα με τις δικές του λειτουργίες. Αυτά τα τρία επίπεδα είναι αισθητήρας, δίκτυο και εφαρμογή, όπως φαίνεται και εξηγείται στην Εικόνα 6, ως εξής [5]:

1. Επίπεδο αισθητήρα (Sensor Layer): Το οποίο στρώμα αποτελείται από στοιχεία ικανά να ανιχνεύουν, να παρακολουθούν και να αναγνωρίζουν. Επίσης, είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία πληροφοριών, όπως RFID, θερμοκρασίας και υγρασίας.
2. Επίπεδο δικτύου (Network Layer): Το συγκεκριμένο επίπεδο αποτελείται από στοιχεία που μπορούν να επιτυγχάνουν επικοινωνία και μετάδοση. Οι πληροφορίες μεταδίδονται σε αντίστοιχες συσκευές για επικοινωνία και ανταλλαγή με ενσύρματο ή ασύρματο τρόπο, όπως LoRa, Wi-Fi και Bluetooth.
3. Επίπεδο εφαρμογής (Application Layer): Περιλαμβάνει το επίπεδο που αποτελείται κυρίως από συσκευές υλικού, οι οποίες επεξεργάζονται τις πληροφορίες ανάλογα με έναν απτό ή άυλο τρόπο. Όσον αφορά τον απτό τρόπο, οι πληροφορίες εμφανίζονται σε διεπαφές λογισμικού υπολογιστή για να επιτρέπουν στους χρήστες να γνωρίζουν την τρέχουσα κατάσταση και την πρόοδο, επιτρέποντάς τους να επεξεργάζονται και να ενεργούν ανάλογα. Όσον αφορά τον άυλο τρόπο, εάν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, το κλιματιστικό θα ενεργοποιηθεί και η θερμοκρασία θα ρυθμιστεί στους 26 °C, εμποδίζοντας τους χρήστες να αισθάνονται άβολα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.



Εικόνα 6 Διασύνδεση συσκευών

2.3.2 Έξυπνη πόλη

Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο συσκευών ή «πραγμάτων», που προβλέπεται να φτάσει τα 20 δισεκατομμύρια μονάδες το 2020, πυροδότησε μια νέα φυλή εφαρμογών και υπηρεσιών που ονομάζονται εφαρμογές Internet of Things (IoT), μια κατηγορία εφαρμογών όπου η λογική τροφοδοτείται από δεδομένα και πόρους από τον φυσικό κόσμο [6].

Μεταξύ αυτών, οι εφαρμογές Έξυπνης πόλης που βασίζονται σε IoT κερδίζουν ενδιαφέρον επειδή το IoT έχει δείξει να είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για πολλά προβλήματα της Έξυπνης πόλης, όπως η αποτελεσματική μεταφορά, ο ψηφιακός τουρισμός ή η φιλική προς το περιβάλλον διαχείριση αποβλήτων. Για παράδειγμα, οι συνδέσεις μέσω Διαδικτύου δίνουν στην πόλη την άποψη της «κυκλοφορίας των πτηνών» και τους επιτρέπει να κατασκευάζουν εξυπνότερες μεταφορές που προσαρμόζονται στις αλλαγές στην πόλη. Τα δοχεία απορριμμάτων που συνδέονται στο Διαδίκτυο δείχνουν πότε και πού χρειάζεται συλλογή απορριμμάτων, επιτρέποντας έναν καλύτερο σχεδιασμό διαδρομών για απορριματοφόρα, εξοικονομώντας ενέργεια, ακόμη και τα δεδομένα που προέρχονται από εικονικές πηγές, όπως σε πολλούς ιστότοπους, μπορούν να συμμετέχουν και να συμβάλλουν στο τοπίο εφαρμογών IoT.

Παρόλο που οι τεχνολογίες IoT επιτρέπουν καλύτερες εφαρμογές Έξυπνης πόλης, η ετερογένεια και η δυναμική φύση των συσκευών και της υποδομής Έξυπνης πόλης, καθώς και η ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας, καθιστούν δύσκολη την κατασκευή εφαρμογών Έξυπνης πόλης. Ενώ ορισμένες ομάδες

έχουν επικεντρωθεί στο Cloud computing ως λύση στην πολυπλοκότητα και την κλίμακα, άλλες έχουν προσεγγίσει τις έξυπνες εφαρμογές της πόλης ως παραδοσιακά καταναμημένα συστήματα. Αυτό οδήγησε σε διάφορες ομάδες να εκμεταλλεύονται παραδοσιακές προσεγγίσεις καταναμημένων συστημάτων όπως γενικές μεταδόσεις μηνυμάτων ή προσεγγίσεις ανταλλαγής δεδομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί από καιρό για την κατασκευή εφαρμογών Καταναμημένων Συστημάτων.

Ωστόσο, τα πολύπλοκα χαρακτηριστικά τέτοιων συστημάτων έξυπνης πόλης εξακολουθούν να απαιτούν ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο αφαίρεσης, έτσι ώστε οι προγραμματιστές να μπορούν να επικεντρωθούν στη συνολική λογική των εφαρμογών παρά στις τεχνικές λεπτομέρειες.



Εικόνα 7 smart city

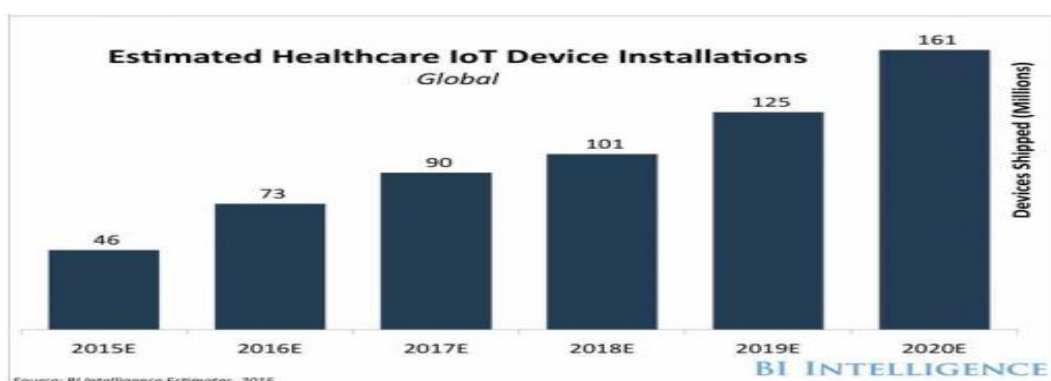
2.3.3 E-Health and IoT

Το Internet of Things (IoT) είναι δημοφιλή παράδειγμα ICT και οι δυνατότητές του μπορούν να συνδυαστούν για τη διαμόρφωση της επόμενης γενιάς συστημάτων eHealth.

Μεγάλα δεδομένα στην Ηλεκτρονική Υγεία παρέχουν την δυνατότητα μετατροπής έρευνας η οποία βασίζεται σε υποθέσεις, σε μια έρευνα που αποτελεί βάση δεδομένων, χρησιμοποιώντας την επεξεργασία μεγάλων όγκων ετερογενών ιατρικών δεδομένων [7]. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή που βασίζεται στην αναζήτηση, είναι δυνατό να βρεθούν αδύναμα σήματα σε μεγάλα δεδομένα. Συγκεκριμένα, δεδομένης της εφαρμογής E-Health, είναι πλέον δυνατόν να αξιοποιηθούν ασήμαντες και μη-ασήμαντες συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών σημάτων αισθητήρα και υφιστάμενων μεγάλων δεδομένων, προκειμένου να βρούμε νέους τρόπους για την παροχή απομακρυσμένων διαγνωστικών, την καλύτερη κατανόηση των ασθενειών και την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων για θεραπευτική.

Η συγκέντρωση και ανάλυση τέτοιων αδύναμων σημάτων θα παρέχει αποδείξεις για συνδέσεις μεταξύ προβλημάτων υγείας και περιβαλλοντικών ζητημάτων γρηγορότερα και καλύτερα από την ασήμαντη εξόρυξη δεδομένων αισθητήρων. Κατά συνέπεια, ένα λογισμικό που μπορεί να συγκεντρώσει και να αναλύσει τέτοια σήματα έχει σημαντικές δυνατότητες για την αντιστοίχιση εφαρμογών E-Health και κρίσιμων προκλήσεων που σχετίζονται με μη προφανείς τρόπους σε σενάρια IoT.

Ξεκινώντας από την εισαγωγή του στο περιβάλλον ηλεκτρονικής υγείας, οι τεχνολογίες IoT αναπτύσσονται συνεχώς σε ό, τι αφορά τις εγκαταστάσεις συσκευών (Εικόνα 8) που δείχνει αυτή η τάση καθώς το IoT έχει γίνει μια θεμελιώδης τεχνολογία στο ιατρικό περιβάλλον [8].



Εικόνα 8 IoT στην ιατροφαρμακευτική περίθαλψη

2.4 Προκλήσεις του IoT

Όπως συμβαίνει συνήθως σε κάθε νέα τεχνολογία, η εισαγωγή και η εδραίωση του IoT ακολουθείται από μια σειρά προκλήσεων διαφορετικής φύσης η κάθε μία, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν από την επιστημονική και τεχνολογική κοινότητα. Παρακάτω μέλλεται να αναλυθούν μερικές από τις βασικότερες προκλήσεις που έχουν κληθεί να αντιμετωπιστούν.

2.4.1 Ηθικές και κοινωνικές προκλήσεις

Το Διαδίκτυο πλέον δεν αποτελεί μόνο μια καινοτομία αλλά και ένα αναπόσπαστο κομμάτι της κοινωνικής και οικονομικής ζωής, καθώς και ανάπτυξης παγκοσμίως. Θεωρείται πως επρόκειτο να εξελιχθεί σε ακόμα πιο γρήγορους ρυθμούς, αποκτώντας έναν ρόλο ανεκτίμητη αξίας όπου θα

αποτελέσει βασικό θεμέλιο για την ομαλή λειτουργία της κοινωνικής ζωής καθώς και εργασιακής, σύμφωνα με τις αντιλήψεις των ψηφιακών οικονομιών. Ένα νέο στάδιο της ανάπτυξης του θα μπορούσε να εισαχθεί από το αναδυόμενο όραμα για ένα Ίντερνετ πραγμάτων (IoT), το οποίο θα συνδέει δισεκατομμύρια αντικείμενα - «πράγματα» όπως αισθητήρες, οθόνες και συσκευές αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας (RFID) - στο Διαδίκτυο. Η κλίμακα ενός IoT θα μπορούσε να ξεπεράσει κατά πολύ τη χρήση του Διαδικτύου καθώς το γνωρίζαμε και έχει τεράστιες κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Υπάρχουν <10 δισεκατομμύρια άνθρωποι στον πλανήτη, αλλά οι εκτιμήσεις κυμαίνονται από 50 δισεκατομμύρια συσκευές με δυνατότητα Internet έως το 2020 έως ένα τρισεκατομμύριο μακροπρόθεσμα [9].

Για να λειτουργήσει το σύνολο των τεχνικών καινοτομιών για ψηφιακές οικονομίες και κοινωνίες, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής, οι τεχνολόγοι και οι διαμορφωτές γνώμης πρέπει να κατανοήσουν τις κοινωνικές και πολιτικές προκλήσεις που θέτουν οι ποικίλες χρήσεις του IoT. Εάν αναπτυχθούν οι σωστές πρακτικές, πολιτικές και επιχειρηματικά μοντέλα, το IoT είναι πιθανό να ενθαρρύνει σημαντικές κοινωνικές, οικονομικές και καινοτόμες υπηρεσίες τα επόμενα χρόνια και δεκαετίες της ανάπτυξής του. Μία πρόβλεψη συνδέει την εφαρμογή του IoT στην κατασκευή με μια «τέταρτη» βιομηχανική επανάσταση ή αυτό που ονομάστηκε «Βιομηχανία 4.0» (Lffler and Tschiesner, 2013). Και οι δικτυωμένες ψηφιακές οικονομίες θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν το δυναμικό αυτού του κύματος καινοτομίας IoT για ένα ευρύ φάσμα τομέων, όχι μόνο για τη μεταποίηση. Θα μπορούσε να γίνει ένα πανταχού παρόν χαρακτηριστικό της καθημερινής ζωής και της εργασίας.

Ωστόσο, το μέλλον του IoT είναι πολύ αναπόφευκτο. Οι τεχνικές δυνατότητες δεν θα οδηγήσουν αναπόφευκτα σε επιτυχημένες δημόσιες και ιδιωτικές υποδομές που υποστηρίζουν την καθημερινή ζωή και την εργασία. Στην πραγματικότητα, το IoT θα μπορούσε να υπονομεύσει τις βασικές αξίες όπως η ιδιωτικότητα, η ισότητα, η εμπιστοσύνη και η ατομική επιλογή, εάν δεν σχεδιάζονται, εφαρμόζονται και διέπονται από κατάλληλους τρόπους.

Το Διαδίκτυο αναδιαμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης έχει πρόσβαση σε πληροφορίες, άτομα, υπηρεσίες και τεχνολογίες, αναδιαμορφώνοντας τον τρόπο με τον οποίο πράτει διάφορες δραστηριότητες (Dutton, 1999). Το IoT θα βασιστεί σε τέτοιους μετασχηματισμούς ενσωματώνοντας ετικέτες, αισθητήρες και ενεργοποιητές σε αντικείμενα που δικτυώνονται μέσω ενός ανοιχτού τυπικού πρωτοκόλλου Διαδικτύου, τηλέφωνα, αυτοκίνητα, εμπορευματοκιβώτια αποστολής και πολλά άλλα δεν θα είναι πλέον απλά φυσικά αντικείμενα. Θα μεταφέρουν περισσότερες πληροφορίες μαζί τους και θα γίνουν τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών καθώς και φυσικά αντικείμενα. Τις επόμενες δεκαετίες, αυτές οι συσκευές αναμένεται να είναι συστατικά σημαντικών υποδομών έξυπνων πόλεων, έξυπνων ενεργειακών υπηρεσιών, δικτύων μεταφορών, logistics, υπηρεσιών υγείας και ιατρικής

περίθαλψης, νοικοκυριών και άλλων τομέων, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών εφαρμογών στον τομέα της ψυχαγωγίας και της δημιουργικής βιομηχανίας. Η συνάφεια του IoT καλύπτει όλο το φάσμα των δικτυωμένων οικονομιών και κοινωνιών. Ωστόσο, θα απαιτήσουν κοινωνικές και οργανωτικές καινοτομίες, αλλά και καινοτομία στην πολιτική και τους κανονισμούς πληροφοριών και επικοινωνιών, όπως η προστασία της ιδιωτικής ζωής, η προστασία δεδομένων και τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας (ΔΠΙ).

2.4.2 Τεχνολογικές προκλήσεις

Το Internet of things (IoT) είναι μια πολύ μοναδική πλατφόρμα που γίνεται πολύ δημοφιλής μέρα με τη μέρα. Ο λόγος για να συμβεί αυτό είναι η πρόοδος στην τεχνολογία και η ικανότητά της να συνδέεται με τα πάντα. Αυτό το χαρακτηριστικό της σύνδεσης από μόνο του προσφέρει πολλές ευκαιρίες και ένα τεράστιο εύρος ανάπτυξης. Το γεγονός ότι η τεχνολογία σε διάφορους τομείς εξελίχθηκε με την πάροδο των ετών, είναι ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται μια ταχεία αλλαγή στο σχήμα, το μέγεθος και την ικανότητα διαφόρων οργάνων, εξαρτημάτων και των προϊόντων που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή [10].

Αυτό το όφελος της απλουστευμένης τεχνολογίας όταν συνοδεύεται από μια πλατφόρμα όπως το IoT διευκολύνει την εργασία, καθώς επίσης ωφελεί τόσο τον κατασκευαστή όσο και τον τελικό χρήστη. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων δίνει την ευκαιρία να κατασκευαστούν αποτελεσματικές διοικήσεις, εφαρμογές για κατασκευή, λύσεις διάσωσης, σωστή καλλιέργεια και πολλά άλλα.

Ένα θέμα που μπορεί να προκύψει είναι η ασφάλεια καθώς πολλές συσκευές χρησιμοποιούν δεδομένα για τις διεργασίες τους. Αυτά τα δεδομένα είναι ζωτικής σημασίας και ιδιωτικά. Η ακεραιότητα, η εμπιστευτικότητα και η προσβασιμότητα πρέπει να είναι διαθέσιμα μόνο για τον επικυρωμένο χρήστη και τους διακομιστές με έλεγχο ταυτότητας. Ακόμη και με την πιο αποτελεσματική μεθοδολογία ελέγχου ταυτότητας, υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα στη διαδικασία. Τα δεδομένα αποστέλλονται συχνότερα στο ανοιχτό μη ασφαλές κανάλι, το οποίο έχει μεγάλο κίνδυνο να παραβιάσει και να επεξεργαστεί τα ζωτικά δεδομένα. Πολλές τεχνικές έχουν εισαχθεί και έχουν βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια σε αυτόν τον τομέα, παρόλα αυτά παραμένει μια μεγάλη πρόκληση.

Επιπλέον, ένα άλλο θέμα το οποίο αποτελεί πρόκληση για τα σημερινά δεδομένα είναι η κατανάλωση ενέργειας των συσκευών IoT. Οι τεχνολογίες για την αποθήκευση της ενέργειας πρέπει να πληρούν διάφορα απαιτούμενα όπως η παροχή κατάλληλων μπαταριών που θα ενσωματώνονται σε

μικρές συσκευές που θα έχουν ενσωματωμένους επεξεργαστές και κάποιους αισθητήρες. Αυτό σήμερα είναι μια πρόκληση και ένα ανοικτό θέμα προς έρευνα.

Μια τέτοια ανοικτή ερευνητική περιοχή είναι η ασύρματη φόρτιση. Σήμερα, ωστόσο μπορούμε να μεταδώσουμε ισχύ σε μικρή μόνο απόσταση. Παρόλα αυτά η ασύρματη φόρτιση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αυτή την χρονική στιγμή βρίσκεται σε αρκετά πρώιμο στάδιο.

2.4.3 Περιβαλλοντικές προκλήσεις

Όσον αφορά το περιβάλλον το IoT , διαθέτει ταυτόχρονα θετικές και αρνητικές συνέπειες, οι οποίες αξίζει να λαμβάνονται υπόψιν. Η περιβαλλοντική υποβάθμιση είναι μία από τις μεγαλύτερες ανησυχίες, λόγω της αύξησης των ενεργειακών αναγκών και των ηλεκτρονικών αποβλήτων που παράγονται από τις ίδιες τις συσκευές αλλά και από το γεγονός ότι πλέον μια συσκευή θεωρείται σε σύντομο χρονικό διάστημα παλιά με αποτέλεσμα να αποσύρεται. Παραδείγματα ερευνητικών θεμάτων για το περιβάλλον είναι: μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση του μεγέθους των συσκευών μείωσης της ποσότητας μη βιοδιασπώμενων υλικών, διάφορες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία κ.λπ.

Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι εκτός από τα παραπάνω έχει και θετικές συνέπειες το IoT στο περιβάλλον, συγκεκριμένα αυτό της χρήσης IoT στην παρακολούθηση δασών λιμνών κλπ. Συνεπώς, το IoT έχει την δυνατότητα να προσφέρει μια σειρά από ευκαιρίες και με την συνεχή εξέλιξή του θα καταφέρει να τις αυξήσει και να απαλείψει τις αρνητικές επιπτώσεις της χρήσης του.

3

Ασύρματες τεχνολογίες IoT

3.1 Τεχνολογίες και Πρωτόκολλα IoT

Όπως έχει προαναφερθεί παραπάνω,, οι συσκευές IoT συνδέονται και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός δικτύου. Επομένως για να επιτύχουν την σύνδεση σε αυτό το δίκτυο, υπάρχουν δύο τρόποι, που πραγματώνονται είτε ενσύρματα είτε ασύρματα. Χαρακτηριστικά, μέσω ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να γίνει ή μέσω μικρής εμβέλειας ή μέσω μεγάλης. Παρακάτω θα παρουσιαστούν κάποιοι από τους τρόπους που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ασύρματης επικοινωνίας μικρής και μεγάλης εμβέλειας.



Εικόνα 9 Ασύρματες τεχνολογίες

3.2 Τεχνολογίες μικρής εμβέλειας

3.2.1 Bluetooth

Το Bluetooth θεωρείται μια τεχνολογία μικρής εμβέλειας που δημιουργήθηκε την δεκαετία του 90 και αποτελεί πρότυπο για ασύρματα προσωπικά δίκτυα. Λειτουργεί στο ελεύθερο φάσμα 2,4 GHz, με αποτέλεσμα οι συσκευές που υποστηρίζουν Bluetooth να μπορούν να μεταδώσουν σε όλα τα μέρη του κόσμου. Στο Bluetooth γίνεται άμεση σύνδεση δύο συσκευών (συσκευή προς συσκευή). Η τεχνολογία αυτή δίνει την δυνατότητα σύνδεσης χωρίς καλωδίωση σε αντικείμενα όπως ποντίκια σε υπολογιστή, σύνδεση φορητών συσκευών/wearable με κινητό όταν βρίσκονται σε μικρή απόσταση.

3.2.2 IEEE 802.11/WiFi

Το IEEE 802.11 είναι μέρος του συνόλου πρωτοκόλλων IEEE 802 του τοπικού δικτύου (LAN) και καθορίζει το σύνολο των πρωτοκόλλων ελέγχου πρόσβασης μέσων (MAC) και φυσικών επιπέδων (PHY) για την εφαρμογή ασύρματης επικοινωνίας τοπικού δικτύου (WLAN) σε διάφορες συχνότητες συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, 2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz και 60 GHz ζώνες συχνοτήτων [11].

Πρόκειται για τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα ασύρματης δικτύωσης υπολογιστών στον κόσμο, που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα δίκτυα σπιτιού και γραφείου για να επιτρέπουν σε φορητούς υπολογιστές, εκτυπωτές, smartphone και άλλες συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους και να έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο χωρίς σύνδεση καλωδίων. Δημιουργούνται και συντηρούνται από το Ινστιτούτο Μηχανικών Ηλεκτρονικών και Ηλεκτρονικών (IEEE) LAN / MAN Standards Committee (IEEE 802). Η βασική έκδοση του προτύπου κυκλοφόρησε το 1997 και είχε μεταγενέστερες τροποποιήσεις. Το πρότυπο και οι τροποποιήσεις παρέχουν τη βάση για προϊόντα ασύρματου δικτύου που χρησιμοποιούν τη μάρκα WiFi. Ενώ κάθε τροποποίηση ανακαλείται επισήμως όταν ενσωματώνεται στην τελευταία έκδοση του προτύπου, ο εταιρικός κόσμος τείνει να εμπορεύεται τις αναθεωρήσεις, επειδή δηλώνουν συνοπτικά τις δυνατότητες των προϊόντων τους. Ως αποτέλεσμα, στην αγορά, κάθε αναθεώρηση τείνει να γίνει το δικό της πρότυπο.

Τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με το IEEE 802.2 και έχουν σχεδιαστεί για να συνεργάζονται άψογα με το Ethernet και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για τη μεταφορά της κίνησης πρωτοκόλλου Διαδικτύου.

Αν και οι προδιαγραφές IEEE 802.11 απαριθμούν κανάλια που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν, η διαθεσιμότητα φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που επιτρέπεται ποικίλλει σημαντικά ανά ρυθμιστικό τομέα.

Network Standard: IEEE	Release Date	Frequency Band (GHz)	Bandwidth (MHz)	Transmission Data Rates Mbits/s	Transmission Techniques
802.11	June 1997	2.4	22	1,2	DSSS ¹ , FHSS ²
802.11a	September 1999	5	20	6,9,12,18,24,36,48, 54	OFDM ³
802.11g	June 2003	2.4	20	6,9,12,18,24,36,48, 54	OFDM
802.11n	October 2009	2.4, 5	20: 40:	7.2 to 72.2 15 to 150	MIMO ⁴ -OFDM 4 streams
802.11ac	December 2013	5	20: 40: 80: 160:	7.2 to 96.3 15 to 200 32.5 to 433 65 to 866	MIMO-OFDM 8 streams
802.11ad	December 2012	60	2160	Up to 7000	OFDM, Single carrier
802.11ah	October 2013	0.9	1: 2: 4: 8: 16:	0.3 to 4.0, 0.15 (MCS10) 0.65 to 7.8 1.35 to 18 2.925 to 39 5.85 to 78	MIMO-OFDM
802.11p	July 2010	5.9	10:	3 to 27	OFDM

Εικόνα 10 Ιστορική πορεία του προτύπου IEEE 802.11

3.2.3 Near-Field Communication (NFC)

Το Near-Field Communication (NFC) είναι ένα σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας για επικοινωνία μεταξύ δύο ηλεκτρονικών συσκευών σε απόσταση 4 cm (1 / in) ή μικρότερη. Το NFC προσφέρει σύνδεση χαμηλής ταχύτητας με απλή εγκατάσταση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση ασύρματων συνδέσεων με περισσότερες δυνατότητες [12].

Οι συσκευές NFC μπορούν να λειτουργούν ως ηλεκτρονικά έγγραφα ταυτότητας και κάρτες. Χρησιμοποιούνται σε συστήματα ανεπαφικών πληρωμών και επιτρέπουν την αντικατάσταση ή τη συμπλήρωση πληρωμών μέσω κινητού, όπως πιστωτικές κάρτες και έξυπνες κάρτες ηλεκτρονικών εισιτηρίων. Αυτό ονομάζεται μερικές φορές NFC / CTLS ή CTLS NFC, με συντομογραφία CTLS χωρίς επαφή. Το NFC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κοινή χρήση μικρών αρχείων όπως επαφές και γρήγορες συνδέσεις εκκίνησης για κοινή χρήση μεγαλύτερων μέσων όπως φωτογραφίες, βίντεο και άλλα αρχεία.

3.3 Τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας

3.3.1 Κινητά δίκτυα επικοινωνίας 4G/5G

Η τεχνολογία δικτύων κινητής τηλεφωνίας κινείται με μεγάλο ρυθμό, και σήμερα έχει δύο μεγάλες κατηγορίες: Ασύρματο Fourth-generation (4G) και fifth-generation (5G) wireless. Η αφομοίωση του κόσμου του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) στις τεχνολογίες 4G και 5G, καθιστά αυτή την τεχνολογία πολύ σημαντική για το μέλλον του IoT [13].

Το 4G είναι συνώνυμο με την τεχνολογία Long Term Evolution (LTE), η οποία αποτελεί εξέλιξη του υπάρχοντος ασύρματου προτύπου 3G. Στην πραγματικότητα, το LTE είναι μια προηγμένη μορφή 3G που σηματοδοτεί μια τολμηρή αλλαγή από υβριδικά δίκτυα δεδομένων και φωνής σε δίκτυο IP μόνο δεδομένων.

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν στο LTE να επιτυγχάνει υψηλότερη απόδοση δεδομένων από τα προηγούμενα δίκτυα 3G: MIMO και OFDM. Το ορθογώνιο πολυπλέγμα διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι μια τεχνική μετάδοσης που χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό φορέων με στενή απόσταση που διαμορφώνονται με χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων. Πρόκειται για ένα σύστημα φασματικής απόδοσης που επιτρέπει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται ένα κοινό κανάλι.

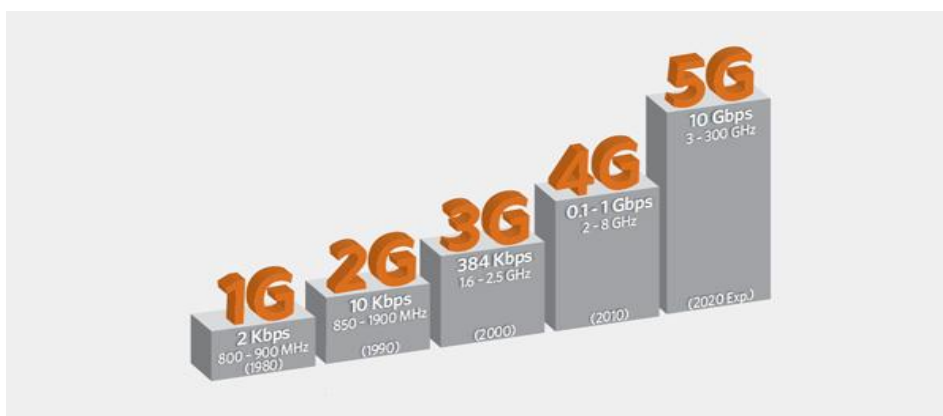
Η τεχνική πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (MIMO) βελτιώνει περαιτέρω την απόδοση των δεδομένων και την απόδοση του φάσματος χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές στον πομπό και το δέκτη. Χρησιμοποιεί πολύπλοκη επεξεργασία ψηφιακού σήματος για τη δημιουργία πολλαπλών ροών δεδομένων στο ίδιο κανάλι.

Το πρότυπο LTE χρησιμοποιεί και τις δύο μορφές λειτουργιών διπλής όψης: Διπλής όψης διαίρεσης συχνότητας (FDD) και διπλής όψης διαίρεσης χρόνου (TDD).

Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες δικτύων LTE, και από την άποψη των καταναλωτών, διαφέρουν κυρίως ως προς τη θεωρητική ταχύτητα υπό ιδανικές συνθήκες.

Το 5G είναι η επόμενη ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία πέμπτης γενιάς που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11ac. Το 5G θα παρέχει καλύτερες ταχύτητες και κάλυψη από το τρέχον 4G. Το 5G λειτουργεί με σήμα 5 GHz και έχει ρυθμιστεί να προσφέρει ταχύτητες έως 1 Gb / s για δεκάδες συνδέσεις ή δεκάδες Mb / s για δεκάδες χιλιάδες συνδέσεις.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G), θα επιτρέψουν πολλές καινοτόμες εφαρμογές IoT όπως έξυπνη πόλη, υγεία για κινητά και άλλες τεράστιες περιπτώσεις χρήσης IoT να ορίζονται σε 5G πρότυπα. Για να ξεκλειδώσετε πραγματικά την κρυφή αξία τέτοιων κρίσιμων αποστολών εφαρμογών IoT σε μεγάλη κλίμακα στην εποχή των 5G, προηγμένες δυνατότητες αυτοπροστασίας απαιτούνται σε δίκτυα Narrowband IoT (NB-IoT) που βασίζονται σε 5G για την αποτελεσματική καταπολέμηση των κυβερνοεπιθέσεων όπως εκτεταμένες επιθέσεις Distributed Denial of Service (DDoS). Η εμφάνιση του NB-IoT έφερε ελπίδα για τη διάδοση και την εφαρμογή των προτύπων του Διαδικτύου για κινητά. Σήμερα, η τεχνολογία NB-IoT έχει εισαχθεί στα πρότυπα Third Generation Partnership Project (3GPP), όπου οι συσκευές IoT χαμηλής εναέριας μεταφοράς (low-overhead) και χαμηλής μετάδοσης δεδομένων (low-data-transmission) μπορούν να έχουν ασφαλή πρόσβαση στο δίκτυο πυρήνα πέμπτης γενιάς (5G) μέσω του δικτύου πρόσβασης 3GPP. Ωστόσο, σύμφωνα με το ισχύον πρότυπο 3GPP, αυτές οι συσκευές NB-IoT εξακολουθούν να χρησιμοποιούν την παραδοσιακή διαδικασία ελέγχου ταυτότητας του κανονικού εξοπλισμού χρήστη για την εφαρμογή αμοιβαίου ελέγχου ταυτότητας μεταξύ συσκευών NB-IoT και δικτύων πυρήνα 5G, η οποία φέρνει πολλά έξοδα επικοινωνίας και αποθήκευσης, και θα είναι πιο σοβαρή όταν πολλές συσκευές NB-IoT ενεργοποιούνται ταυτόχρονα [37].



Εικόνα 11 Κινητά δίκτυα επικοινωνίας

3.3.2 LoRa

Πρόσφατα προέκυψαν νέες τεχνολογίες πομποδεκτών που επιτρέπουν την αποτελεσματική επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Παράδειγμα τέτοιων τεχνολογιών LPWAN είναι οι τύποι πομποδεκτών LoRa [14]. Αυτοί οι νέοι τύποι πομποδεκτών στοχεύουν εφαρμογές όπου χιλιάδες συσκευές χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή για τη συλλογή μετρήσεων αισθητήρων. Μια τυπική εφαρμογή είναι η συλλογή μετρήσεων σε μια πόλη. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε μια εγκατάσταση όπου απλές συσκευές στέλνουν δεδομένα με ένα hop σε ισχυρό

δέκτη, ο οποίος στη συνέχεια προωθεί δεδομένα μέσω σταθερής ενσύρματης υποδομής σε ένα σημείο συλλογής δεδομένων.

Αυτοί οι πομποδέκτες είναι δυνητικά πολύ χρήσιμοι για την κατασκευή πιο γενικών δικτύων IoT που ενσωματώνουν αμφίδρομες επικοινωνίες πολλαπλών λυκίσκων που επιτρέπουν την αίσθηση και την ενεργοποίηση. Οι πομποδέκτες έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν σε μεγάλες αποστάσεις με έναν μικρό προϋπολογισμό ενέργειας που θα μας επέτρεπε να οικοδομήσουμε πιο αποτελεσματικές υποδομές IoT από ό,τι είναι δυνατόν σήμερα. Για παράδειγμα, οι χρησιμοποιούμενοι πομποδέκτες ZigBee όπως το Chipcon CC2420 καλύπτουν ένα εύρος επικοινωνίας 20 m χρησιμοποιώντας 84,5 μ J (μήνυμα 40 byte) σε ένα ενσωματωμένο περιβάλλον. Ένας πομποδέκτης LoRa Semtech SX1272 μπορεί να καλύψει απόσταση 150 m χρησιμοποιώντας 86,5 mJ στο ίδιο περιβάλλον [15].



Εικόνα 12 LoRa

4

Τεχνολογία Lora

4.1 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο του LoRa έχει ως σκοπό να κάνει δύο συσκευές να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους σε απόσταση έως 15 χιλιόμετρα. Έτσι, διατηρείται το χαμηλό ενεργειακό κόστος, ενώ αυξάνεται η απόσταση μετάδοσης, έχοντας χαμηλό κόστος. Το LoRa λειτουργεί σε ζώνη χωρίς άδεια κάτω των 1GHz για λειτουργίες επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας. Η παραπάνω τεχνολογία αποτελεί μέρος της Chirp Spread Spectrum Modulation (CSS) έχει ως αποτέλεσμα την εξισορρόπηση μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της "ευαισθησίας" στον θόρυβο μέσα στο κανάλι μετάδοσης. Με αυτόν το τρόπο, διατηρείται το χαμηλό ενεργειακό κόστος, ενώ αυξάνεται η απόσταση μετάδοσης [16].

Μια συσκευή LoRa μπορεί να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αλλάζουν οι παράμετροι: SF (spreading factor), bandwidth, coding rate, και ισχύς μετάδοσης. Η σωστή επιλογή αυτών των παραμέτρων έχει σημαντική επίπτωση στην κατανάλωση ενέργειας.

Η σχέση που συνδέει τον ρυθμό συμβόλων με το SF είναι η εξής:

$$R_b = SF * \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \text{ bits/s}$$

Αυτό το είδος διαμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε κυρίως για στρατιωτικές και διαστημικές επικοινωνίες. Γενικά, για την αξιολόγηση της διαμόρφωσης χρησιμοποιείται BER vs E_b/N_0 (Λόγος ενέργειας κάθε bit προς τον θόρυβο). Η γενική μαθηματική σχέση που υπολογίζει το BER βασισμένο στο SINR είναι η εξής:

$$\frac{E_b}{N_0(dB)} = SNR(dB) + 10 \log \frac{BW}{R_b}$$



Εικόνα 13 LoRa

4.2 Χαρακτηριστικά LoRa

Το πρωτόκολλο LoRa ορίζει το επίπεδο σύνδεσης, περιγράφοντας τον τρόπο διαμόρφωσης των δεδομένων στο μεταδιδόμενο σήμα. Το πρωτόκολλο είναι ιδιόκτητο, δεν διατίθενται ελεύθερα όλες οι πληροφορίες. Ωστόσο, αρκεί να γνωρίζουμε ότι λόγω του χρησιμοποιούμενου CSS, η κατανάλωση ισχύος δεν εξαρτάται από το περιεχόμενο των δεδομένων, όπως ισχύει για διαμορφώσεις που χρησιμοποιούν π.χ. On-Off Keying (OOK). Η απαραίτητη ενέργεια για μια μετάδοση εξαρτάται επομένως μόνο από τον επονομαζόμενο χρόνο στον αέρα (ToA) και την ισχύ εξόδου. Τα ToA για ένα συγκεκριμένο ωφέλιμο φορτίο μπορούν να υπολογιστούν με τους τύπους του οδηγού σχεδιασμού του προμηθευτή. Οι πιο σχετικοί όροι που επηρεάζουν τα ToA του LoRa είναι [17]:

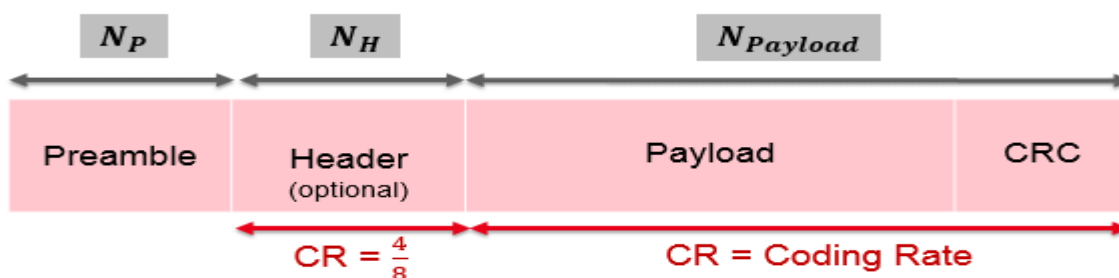
- (i) Το εύρος ζώνης (BW) της μετάδοσης που μπορεί να ρυθμιστεί σε 125, 250 ή 500 kHz. Ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης δίνει καλύτερη ταχύτητα, αλλά μειώνει την ευαισθησία του δέκτη.
- (ii) Ο συντελεστής διασποράς (SF) (τιμές μεταξύ 7 - 12) επηρεάζει σε μεγάλο

βαθμό το ρυθμό bit και το πιθανό εύρος. Η αύξηση της τιμής διπλασιάζει το χρόνο για ένα μεταδιδόμενο σύμβολο, αλλά έχει επίσης θετικό αντίκτυπο στην ευαισθησία του δέκτη.

- (iii) Ο ρυθμός κώδικα (CR) (κυμαίνεται από 1-4) ($CR = 4 + n$, το n είναι από 1 έως 4) Δηλώνει ότι κάθε 4 χρήσιμα bit κωδικοποιούνται από 5, 6, 7 ή 8 bit μετάδοσης, δηλαδή καθορίζει τα πρόσθετα bits που προστίθενται σε κάθε πακέτο 4 bit που μαζί σχηματίζουν έναν codeword. Τα επιπλέον είναι bits που χρησιμοποιούνται για Forward Error Correction (FEC), μια τεχνική για την ανάκτηση μερικώς κατεστραμμένων μεταδόσεων. Το CR επηρεάζει αρνητικά τους ToA, αλλά κάνει την επικοινωνία πιο ισχυρή.

Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τον ισοδύναμο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί με το LoRa. Μπορεί να κυμαίνεται από 300 bit / s έως 5,5 kbit / s. Όπως πολλά άλλα πρωτόκολλα επιπέδου σύνδεσης, το LoRa προσθέτει επιπλέον σταθερούς παράγοντες σε κάθε μεταδιδόμενο πακέτο που αυξάνει περαιτέρω το ToA.

- (i) Το προοίμιο, όπου και απαιτείται για το συγχρονισμό του δέκτη και του πομπού. Το ελάχιστο μήκος είναι 6 + 4 σύμβολα.
- (ii) Η προαιρετική κεφαλίδα. Παρέχει πληροφορίες σχετικά με το μήκος ωφέλιμου φορτίου, το FEC-rate και εάν υπάρχει πεδίο για Cyclic Redudancy Check (CRC) που περιλαμβάνεται στο πακέτο.
- (iii) Το προαιρετικό CRC στο τέλος κάθε πακέτου προσθέτει περίπου 5 σύμβολα στη μετάδοση.



Εικόνα 14 Μεταδιδόμενο πακέτο LoRa

4.2.1 LoRaWAN

Σε αντίθεση με το LoRa, η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου LoRaWAN είναι ανοιχτή. Ορίζει το δεύτερο και το τρίτο επίπεδο στο μοντέλο διασύνδεσης ανοιχτού συστήματος (μοντέλο OSI). Διαμορφώνει ένα LPWAN που έχει τοπολογία star-of-stars: πολλές πύλες, τοποθετημένες σε όλο τον κόσμο για την αναμετάδοση μηνυμάτων μεταξύ των τελικών συσκευών και ενός δεδομένου κεντρικού διακομιστή.

Το πρωτόκολλο φροντίζει για τη δρομολόγηση πακέτων προς τη σωστή τελική συσκευή, ελέγχει την πρόσβαση για μεταδόσεις και καθορίζει την κρυπτογράφηση δεδομένων. Σε αντίθεση με το φυσικό επίπεδο του LoRa, το LoRaWAN υποστηρίζεται από την «Συμμαχία LoRa» (LoRa Alliance), η οποία αποτελείται από μεγάλες εταιρείες όπως η Semtech, IBM, STMicro κλπ. Ο πρωταρχικός ρόλος του επιπέδου αυτού είναι να καθορίσει τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις διάφορες παραμέτρους έτσι ώστε να πετύχει την καλύτερη αυτονομία μπαταρίας της συσκευής, την χωρητικότητα του δικτύου, το QoS κλπ. Το LoRaWAN διαθέτει τρεις διαφορετικές κατηγορίες συσκευών τελικού σημείου για την αντιμετώπιση των διαφορετικών αναγκών που αντικατοπτρίζονται στο ευρύ φάσμα εφαρμογών [18]:

- Κλάση A - Τερματικές συσκευές χαμηλής ισχύος, αμφίδρομες: Η προεπιλεγμένη κλάση που πρέπει να υποστηρίζεται από όλες τις τελικές συσκευές LoRaWAN, η επικοινωνία κλάσης A ξεκινά πάντα από την τελική συσκευή και είναι πλήρως ασύγχρονη. Κάθε μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης μπορεί να σταλεί ανά πάσα στιγμή και ακολουθείται από δύο μικρά παράθυρα downlink, δίνοντας την ευκαιρία για αμφίδρομη επικοινωνία ή εντολές ελέγχου δικτύου, εάν χρειάζεται. Αυτός είναι ένας τύπος πρωτοκόλλου ALOHA. Η τελική συσκευή μπορεί να εισέλθει σε κατάσταση αδράνειας χαμηλής κατανάλωσης για όσο διάστημα ορίζεται από τη δική της εφαρμογή: δεν υπάρχει απαίτηση δικτύου για περιοδικές αφύπνιση. Αυτό καθιστά την κατηγορία A τον χαμηλότερο τρόπο λειτουργίας ισχύος, επιτρέποντας παράλληλα την επικοινωνία uplink ανά πάσα στιγμή. Επειδή η επικοινωνία downlink πρέπει πάντα να ακολουθεί μετάδοση uplink με χρονοδιάγραμμα που ορίζεται από την εφαρμογή τελικής συσκευής, η επικοινωνία downlink πρέπει να αποθηκεύεται σε προσωρινή μνήμη στον διακομιστή δικτύου μέχρι το επόμενο συμβάν uplink.
- Κλάση B - Αμφίδρομες τελικές συσκευές με ντετερμινιστική καθυστέρηση κατερχόμενης ζεύξης: Εκτός από τα παράθυρα λήψης που ξεκινούν από την κλάση A, οι συσκευές κλάσης B συγχρονίζονται με το δίκτυο χρησιμοποιώντας περιοδικούς φάρους και ανοίγουν «ping slots» downlink σε προγραμματισμένες ώρες. Αυτό παρέχει

στο δίκτυο τη δυνατότητα αποστολής επικοινωνιών downlink με ντετερμινιστικό λανθάνοντα χρόνο, αλλά εις βάρος κάποιας πρόσθετης κατανάλωσης ενέργειας στην τελική συσκευή. Ο λανθάνων χρόνος μπορεί να προγραμματιστεί έως και 128 δευτερόλεπτα για να ταιριάζει σε διαφορετικές εφαρμογές και η πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά χαμηλή για να εξακολουθεί να ισχύει για εφαρμογές με μπαταρία.

- Κλάση Γ - Χαμηλότερη καθυστέρηση, αμφίδρομες τελικές συσκευές: Εκτός από τη δομή κλάσης A της ζεύξης που ακολουθείται από δύο παράθυρα downlink, η κλάση Γ μειώνει περαιτέρω την καθυστέρηση στην downlink διατηρώντας τον δέκτη της τελικής συσκευής ανοιχτό ανά πάσα στιγμή που η συσκευή δεν εκπέμπει. Με βάση αυτό, ο διακομιστής δικτύου μπορεί να ξεκινήσει μετάδοση downlink ανά πάσα στιγμή με την παραδοχή ότι ο δέκτης τελικής συσκευής είναι ανοιχτός, οπότε δεν υπάρχει καθυστέρηση. Ο συμβιβασμός είναι η αποστράγγιση ισχύος του δέκτη (έως ~ 50mW) και έτσι η κατηγορία Γ είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου υπάρχει συνεχής ισχύς. Για συσκευές με μπαταρία, είναι δυνατή η προσωρινή εναλλαγή λειτουργίας μεταξύ κατηγοριών A & C και είναι χρήσιμη για διαλείπουσες εργασίες, όπως ενημερώσεις υλικολογισμικού over-the-air.

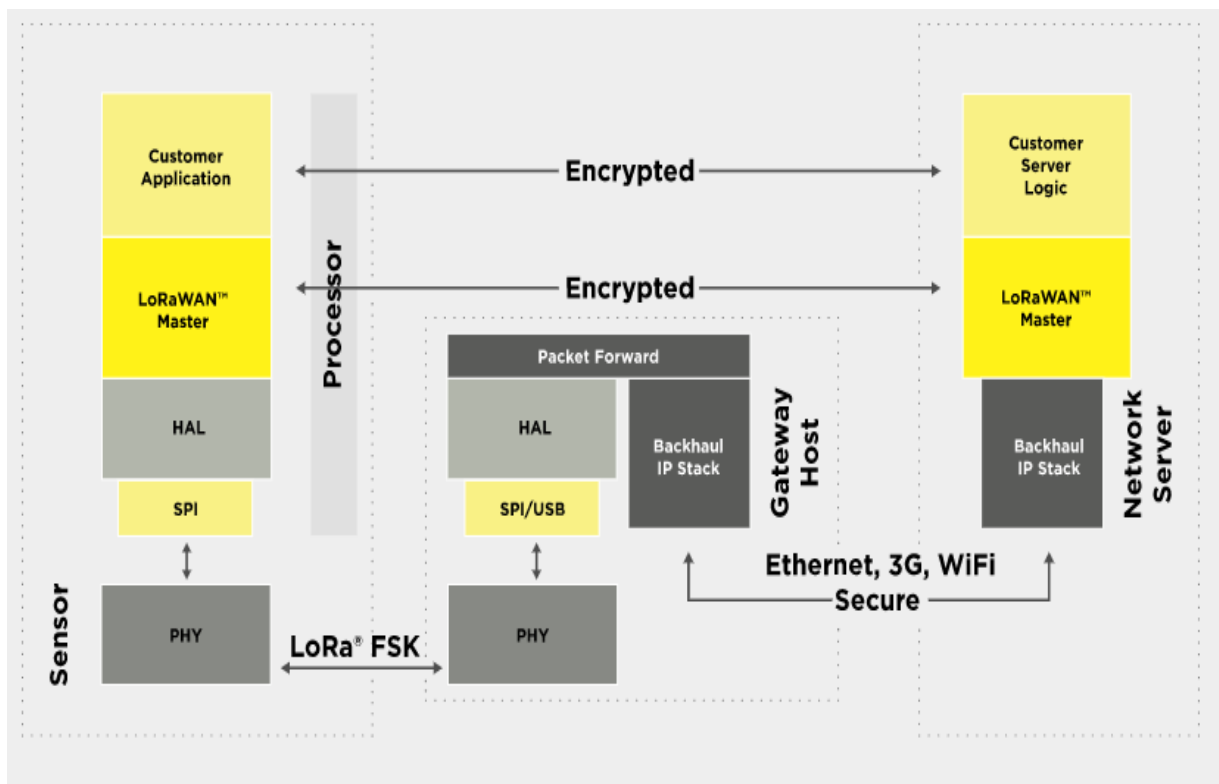
4.2.1.1 Τρόπος λειτουργίας

Ένα τυπικό σύστημα που βασίζεται στο LoRa αποτελείται συνήθως από τα εξής συστατικά στοιχεία:

- Τελικοί χρήστες- τελικοί κόμβοι: αποτελούν αντικείμενα τα οποία συνήθως χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι τροφοδοτούνται από μπαταρία χωρίς να είναι υποχρεωτικό αυτό.
- Πύλη: κεραία η οποία δέχεται δεδομένα από τις τελικές συσκευές και τις προωθεί στον εξυπηρετητή δικτύου και το αντίθετο. Τα δεδομένα που στέλνουν οι τελικοί κόμβοι είναι συνήθως δεδομένα που έχουν αντληθεί από τους ενσωματωμένους
- Εξυπηρετητής δικτύου: εξυπηρετητές που δρομολογούν τα μηνύματα από τις τελικές συσκευές στη σωστή εφαρμογή και το αντίστροφο.

Η αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN® αναπτύσσεται σε μια τοπολογία αστέρα-αστεριών στην οποία οι πύλες μεταδίδουν μηνύματα μεταξύ τελικών συσκευών και κεντρικού διακομιστή δικτύου. Οι

πύλες συνδέονται με το διακομιστή δικτύου μέσω τυπικών συνδέσεων IP και λειτουργούν ως διαφανής γέφυρα, απλώς μετατρέποντας πακέτα RF σε πακέτα IP και αντίστροφα. Η ασύρματη επικοινωνία επωφελείται από τα χαρακτηριστικά Long Range του φυσικού στρώματος LoRa, επιτρέποντας τη σύνδεση μίας λυκίσκου μεταξύ της τελικής συσκευής και μιας ή πολλών πυλών. Όλες οι λειτουργίες είναι ικανές αμφίδρομης επικοινωνίας και υπάρχει υποστήριξη για ομάδες διευθύνσεων πολλαπλής διανομής για αποτελεσματική χρήση του φάσματος κατά τη διάρκεια εργασιών όπως αναβαθμίσεις Firmware Over-The-Air (FOTA) ή άλλα μηνύματα μαζικής διανομής.



Εικόνα 15 LoRa Alliance

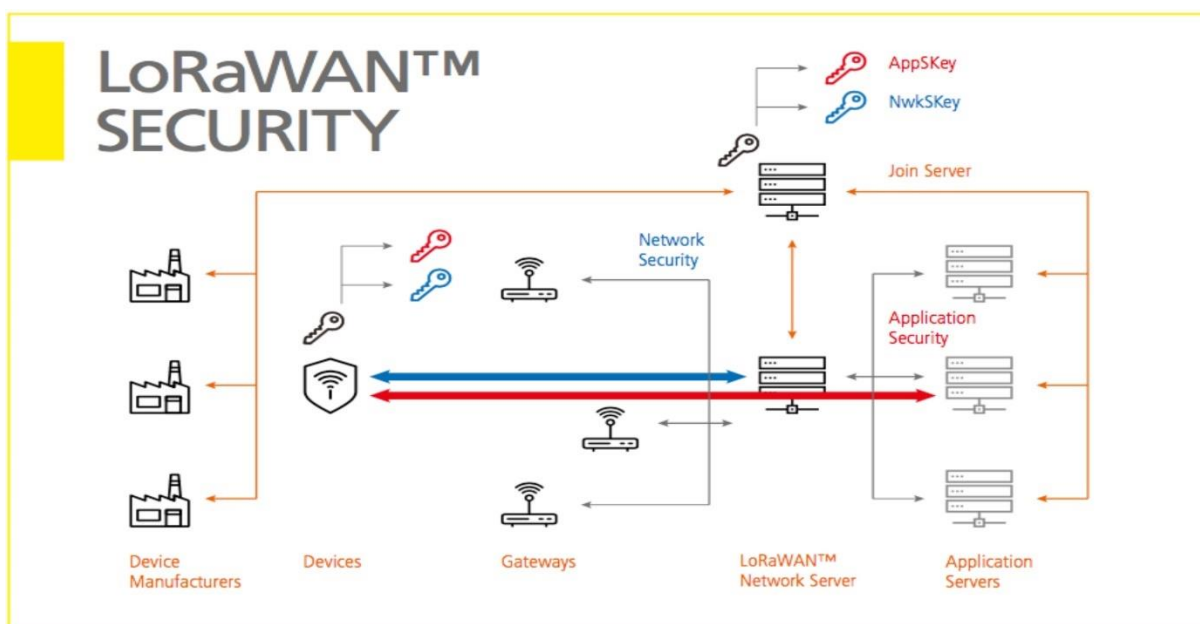
4.2.1.2 Ασφάλεια

Η ασφάλεια αποτελεί πρωταρχικό μέλημα για οποιαδήποτε μαζική ανάπτυξη IoT και η προδιαγραφή LoRaWAN καθορίζει δύο επίπεδα κρυπτογραφίας:

- Ένα μοναδικό κλειδί σύνδεσης δικτύου 128 bit κοινόχρηστο μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή δικτύου
- Ένα μοναδικό κλειδί περιόδου σύνδεσης εφαρμογής 128 bit (AppSKey) μοιράστηκε από κοινού σε άκρο σε επίπεδο εφαρμογής

Οι αλγόριθμοι AES χρησιμοποιούνται για την παροχή ελέγχου ταυτότητας και ακεραιότητας πακέτων στον διακομιστή δικτύου και κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο στον διακομιστή εφαρμογών. Παρέχοντας αυτά τα δύο επίπεδα, καθίσταται δυνατή η εφαρμογή κοινόχρηστων δικτύων «πολλών ενοικιαστών» χωρίς ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου να έχει ορατότητα των δεδομένων ωφέλιμου φορτίου των χρηστών.

Τα πλήκτρα μπορούν να ενεργοποιηθούν με εξατομίκευση (ABP) στη γραμμή παραγωγής ή κατά τη θέση σε λειτουργία, ή μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσω του αεροσκάφους (OTAA) στο πεδίο. Το OTAA επιτρέπει στις συσκευές να κλειδώνονται ξανά εάν είναι απαραίτητο.



Εικόνα 16 LoRa security

4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα LoRa

4.3.1 Πλεονεκτήματα

Το LoRa είναι μια αρκετά ανταγωνιστική λύση για την κάλυψη της ανάγκης για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων με χαμηλό rate. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει στους χρήστες του [19].

- Αισθητήρες χαμηλής ισχύος και ευρεία περιοχή κάλυψης μετρημένη σε χιλιόμετρα.
- Λειτουργεί με δωρεάν (χωρίς άδεια) συχνότητες, χωρίς εκ των προτέρων κόστος αδειοδότησης για τη χρήση της τεχνολογίας.
- Χαμηλή ισχύς σημαίνει μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας για συσκευές. Οι μπαταρίες αισθητήρα μπορούν να διαρκέσουν για 2–5 χρόνια (Κλάση A και Κλάση B)
- Η συσκευή Single LoRa Gateway έχει σχεδιαστεί για να φροντίζει χιλιάδες τελικές συσκευές ή κόμβους.
- Είναι εύκολο να αναπτυχθεί λόγω της απλής αρχιτεκτονικής του.
- Χρησιμοποιείται ευρέως για εφαρμογές M2M / IoT.
- Καλύτερο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου (100 bytes), σε σύγκριση με το SigFox που είναι 12 bytes
- Ανοιχτό: μια ανοιχτή συμμαχία και ένα ανοιχτό πρότυπο. Ανοιχτή τεχνολογία σε σύγκριση με τον ανταγωνιστή SigFox.
- Η μεγάλη εμβέλεια επιτρέπει λύσεις όπως εφαρμογές έξυπνης πόλης.
- Το χαμηλό εύρος ζώνης το καθιστά ιδανικό για πρακτικές εφαρμογές IoT με λιγότερα δεδομένα ή / και με μεταδόσεις δεδομένων που δεν είναι σταθερές.
- Χαμηλό (εr) κόστος σύνδεσης.
- Ασύρματο, εύκολο στη ρύθμιση και γρήγορη ανάπτυξη.
- Ασφάλεια: ένα επίπεδο ασφάλειας για το δίκτυο και ένα για την εφαρμογή με κρυπτογράφηση AES.
- Πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία.
- Με την υποστήριξη των CISCO, IBM και 500 άλλων εταιρειών-μελών του LoRa Alliance.

4.3.2 Μειονεκτήματα

Ορισμένα από τα μειονεκτήματα τα οποία είναι μειονεκτήματα, δεν είναι ακριβώς μειονεκτήματα αλλά περιορισμοί για κάποιες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης.

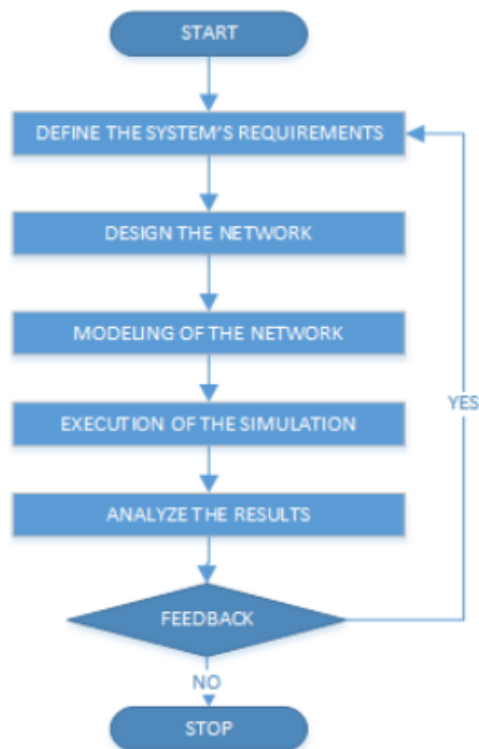
- Μη ιδανικό για μεγάλα ωφέλιμα φορτία δεδομένων, το ωφέλιμο φορτίο περιορίζεται σε 100 byte.
- Μη ιδανικό για συνεχή παρακολούθηση (εκτός από συσκευές κλάσης C).
- Δεν είναι ιδανικός υποψήφιος για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο που απαιτούν χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και απαιτήσεις jitter.
- Συγκέντρωση των δικτύων LoRaWAN: η ύπαρξη περισσότερων δικτύων LoRaWAN, δημιουργεί προκλήσεις συνύπαρξης καθώς η ανάπτυξη πυλών κατοικεί σε αστικές περιοχές.
- Το μειονέκτημα της ανοιχτής συχνότητας είναι ότι ενδέχεται να επηρεάσετε αυτήν τη συχνότητα και ο ρυθμός δεδομένων μπορεί να είναι χαμηλός. (Για GSM ή με άδεια χρήσης συχνότητας μπορείτε να μεταδώσετε σε αυτήν τη συχνότητα χωρίς καμία παρέμβαση. Οι χειριστές GSM που χρησιμοποιούν συγκεκριμένες συχνότητες πληρώνουν ένα μεγάλο τέλος αδειοδότησης στην κυβέρνηση για τη χρήση αυτών των συχνοτήτων. Το LoRa λειτουργεί σε συχνότητες που είναι ανοιχτές και δεν χρειάζονται κατάσταση Λάβετε υπόψη ότι οι ανοιχτές συχνότητες είναι διαφορετικές από χώρα σε χώρα).

4.4 Προσομοιωτές

Ο σχεδιασμός δικτύου με συγκεκριμένες παραμέτρους είναι μια δύσκολη εργασία, επειδή η επιλογή των διαφόρων παραμέτρων δεν είναι μοναδική, αλλά θα πρέπει να είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη κατάσταση ή εφαρμογή. Για αυτόν τον λόγο, είναι σημαντικό να χρησιμοποιήσετε έναν προσομοιωτή [18].

Γενικά, ένα λογισμικό προσομοίωσης θα πρέπει να παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να καθορίζει την τοπολογία του δικτύου, να καθορίζει τα χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά κάθε κόμβου, τη σύνδεση μεταξύ τους και το μοντέλο κυκλοφορίας και τους αλγόριθμους δρομολόγησης πακέτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, ο χρήστης θα πρέπει να λάβει τις μετρήσεις απόδοσης για το προσομοιωμένο δίκτυο και εάν είναι διαθέσιμο στο λογισμικό προσομοίωσης για να

λάβει κάποια οπτικοποίηση αυτών των μετρήσεων. Αυτές οι μετρήσεις για προσομοίωση LoRa θα μπορούσαν να είναι Ρυθμός εξαγωγής δεδομένων (DER), Κατανάλωση ενέργειας δικτύου (NEC) και ρυθμός σφάλματος bit κ.λπ.



Εικόνα 17 Flowchart describing the process of the simulation.

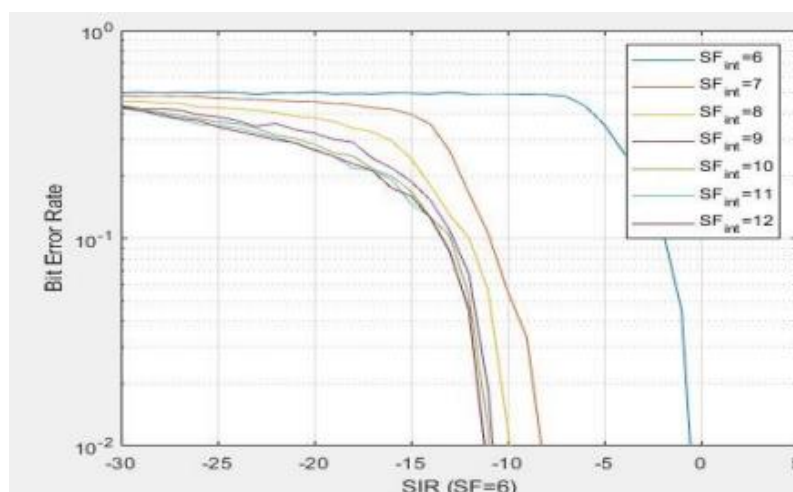
Υπάρχουν προσομοιωτές που παρέχουν μια καλή γραφική διεπαφή και άλλοι που μπορούν να παρέχουν μόνο μερικές γραφικές αναπαραστάσεις μέσω γραφημάτων ή ακόμη και γραμμής εντολών όπως εξόδους. Σε γενικές γραμμές, οι προσομοιωτές μπορεί να είναι δωρεάν ανοιχτού κώδικα ή εμπορικοί, αλλά εδώ θα εξετάσουμε μόνο δωρεάν προσομοιωτές για ακαδημαϊκούς σκοπούς ή ανοιχτού κώδικα, και μέχρι τώρα δεν υπάρχουν προσομοιωτές LoRa. Μια άλλη σημαντική πτυχή ενός προσομοιωτή είναι η απόδοσή του.

4.4.1 Περιγραφή προσομοιωτή

Λόγω του ερευνητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος για τα LoRa δίκτυα, έχουν σχεδιαστεί διάφοροι εξομοιωτές όπως οι παρακάτω:

- PhySimulator [21]
- FLoRA [22]
- Ns-3 module [24]
- LoRaSim [23]

4.4.2 Physimulator



Εικόνα 18 Παράδειγμα εκτέλεσης του physimulator

Ο πρώτος προσομοιωτής ονομάζεται PHY Simulator και στοχεύει στην εφαρμογή του επιπέδου σύνδεσης του LoRa. Το PhySimulator είναι γραμμένο στα MATLAB. Ο στόχος αυτού του προσομοιωτή είναι να ελέγξει τη λήψη δύο αλληλεπικαλυπτόμενων-παρεμβαλλόμενων μεταδόσεων LoRa που έχουν διαμορφωθεί με διαφορετικούς παράγοντες διάδοσης.

Μετά από κάθε εκτέλεση του προγράμματος, 8 αριθμοί δημιουργούνται, δείχνοντας το πακέτο, το σύμβολο και το ποσοστό σφάλματος 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.

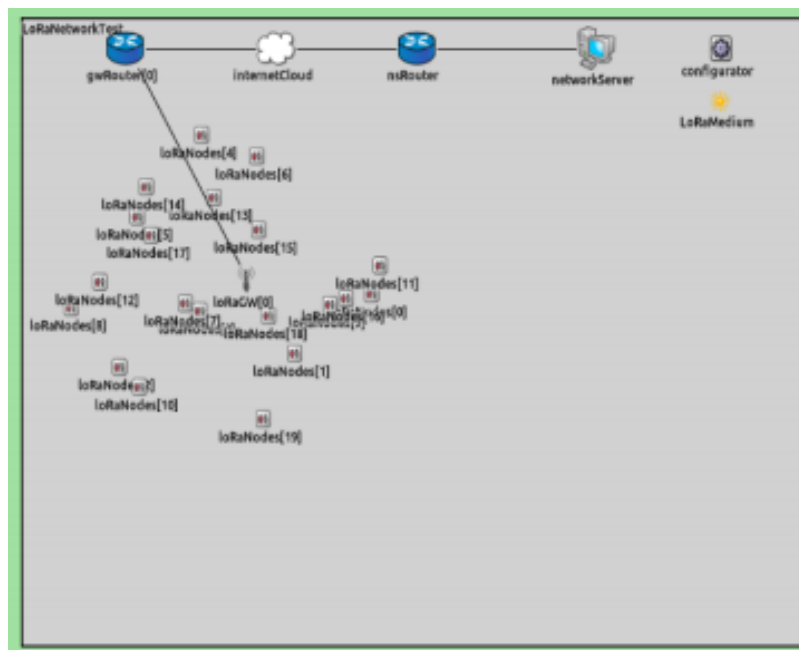
Αυτός ο προσομοιωτής δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επεξεργάζεται διάφορες παραμέτρους (αλλάζοντας τις τιμές των μεταβλητών στον κώδικα). Για παράδειγμα, μπορείτε να αλλάξετε το εύρος ζώνης, τα κομμάτια ωφέλιμου φορτίου και τις μέγιστες δοκιμές ανά βήμα κ.λπ. Όλες αυτές οι παράμετροι δεν μπορούν να αλλάξουν μέσω γραφικής διεπαφής, αλλά ο χρήστης πρέπει να τις επεξεργαστεί αλλάζοντας απευθείας τον κωδικό MATLAB.

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα γραφικής παράστασης χρησιμοποιώντας physimulator, είναι ένα διάγραμμα που δείχνει το ποσοστό σφάλματος bit και το SIR χρησιμοποιώντας το physimulator.

4.4.3 FLoRa

Ο προσομοιωτής FLoRa, είναι ένα πλαίσιο προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας τη γνωστή βιβλιοθήκη προσομοίωσης διακριτών συμβάντων OMNeT ++ που διανέμεται με την Ακαδημαϊκή Δημόσια Άδεια, οπότε είναι δωρεάν για μη κερδοσκοπική ή ακαδημαϊκή χρήση. Παρά το πλαίσιο OMNeT ++, το FLoRa βασίζεται επίσης στο INET Framework, το οποίο είναι μια βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα για το OMNeT ++ και σκοπός του είναι να βοηθήσει τη διαδικασία πειραματισμού για διαφορετικά πρωτόκολλα δικτύου. Το FloRa είναι γραμμένο σε C ++.

Επιτρέπει τη δημιουργία κόμβων LoRa, πυλών και διακομιστή δικτύου [25]. Επιπλέον, οι μονάδες της στοχεύουν στην προσομοίωση του φυσικού επιπέδου και του πρωτοκόλλου LoraWan MAC [26]. Σε αντίθεση με το άλλο λογισμικό προσομοίωσης, αυτό παρέχει μια πολύ καλή γραφική διεπαφή, επειδή βασίζεται στο OMNeT ++ και σε γραφική αναπαράσταση του δικτύου. Προσφέρει ένα ακριβές μοντέλο για το φυσικό στρώμα LoRa και επίσης δίνει έμφαση στην παροχή στατιστικών στοιχείων για την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.



Εικόνα 19 Παράδειγμα εκτέλεσης σεναρίου του Omnet ++

Τα χαρακτηριστικά του προσομοιωτή FLoRa σύμφωνα με περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

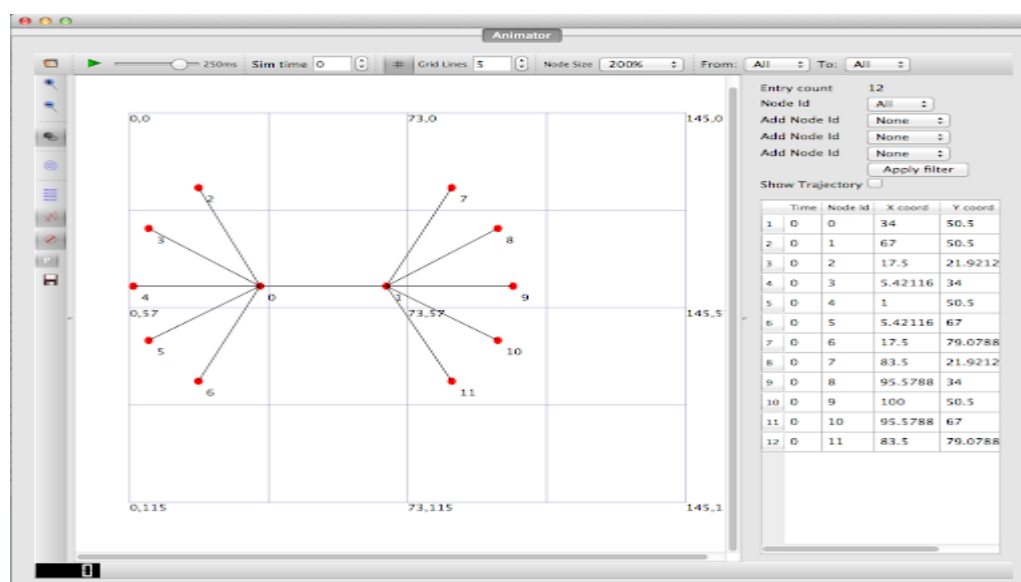
- Ακριβές μοντέλο φυσικού στρώματος LoRa (συμπεριλαμβανομένων συγκρούσεων και εφέ σύλληψης).
- Προσομοιώσεις με μία (ή περισσότερες) πύλες στο δίκτυο.
- Προσομοιώσεις από άκρο σε άκρο, συμπεριλαμβανομένης της ακριβούς μοντελοποίησης του δικτύου backhaul.
- Στατιστικά της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο Μετά από κάθε εκτέλεση, δημιουργείται ένας αριθμός αρχείων που περιέχουν τα στατιστικά δεδομένα. Επίσης, το FLoRa παρέχει μερικά δείγματα σεναρίων.

4.4.4 NS-3 Module

Η τρίτη περίπτωση δεν αποτελεί ένας ξεχωριστός εξομοιωτής όπως τα υπόλοιπα προγράμματα. Για την ακρίβεια είναι ένα module, που βασίζεται στον εξομοιωτή ns3. Ο ns-3 είναι ένας διακριτού χρόνου εξομοιωτής για συστήματα διαδικτύου και χρησιμοποιείται για ερευνητική και εκπαιδευτική χρήση και είναι ανοικτού λογισμικού.

Ο εξομοιωτής αυτός έχει γραφτεί στην γλώσσα προγραμματισμού C++ και δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιεί την γραμμή εντολών με rython. Το εξεταζόμενο module υποστηρίζει την A κλάση του πρωτοκόλλου LoRaWAN. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται προσομοίωση για συσκευές που στέλνουν μόνο uplink μεταδόσεις και ο server μόνο downlink μεταδόσεις. Το module προσομοιώνει όλα τα επίπεδα του LoRa, προσπαθώντας να δώσει μια εύκολα ρυθίσιμη και παραμετροποιήσιμη λύση, όπου μπορούν να ενταχθούν διάφοροι νέοι αλγόριθμοι στην πλευρά του server. Δίνονται επίσης μέσω της κλάσης LoRaRadioEnergyModel στατιστικά δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας των καταστάσεων στο φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου. Το παρόν εργαλείο εξετάστηκε σε τρία σενάρια:

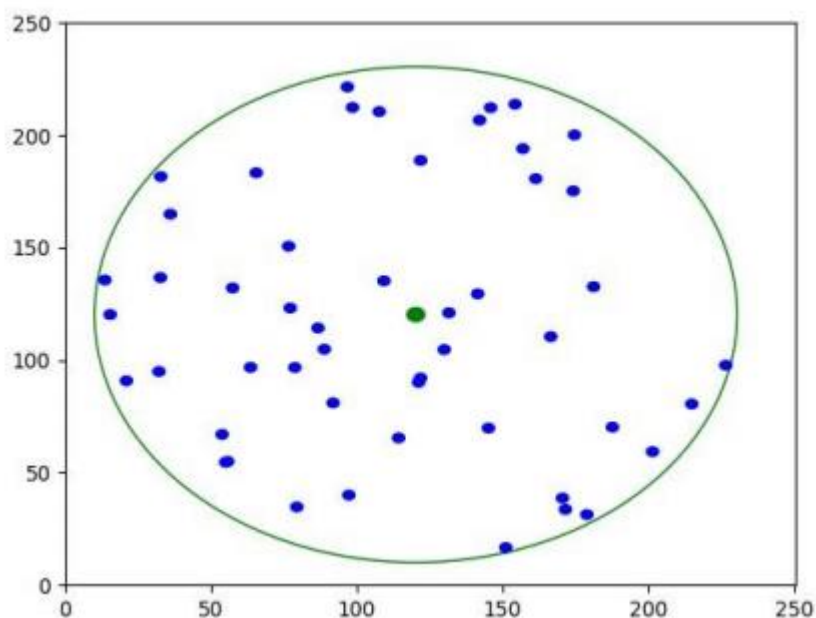
1. Στο πρώτο σενάριο θεωρεί κυκλική τοπολογία με μία πύλη η οποία βρίσκεται στο κέντρο, και δεν απαιτείται η χρήση acknowledgments.
2. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες πύλες, χρησιμοποιώντας κυκλική τοπολογία παρομοίως.
3. Τέλος, επαναλήφθηκε



Εικόνα 20 Παράδειγμα ns3

4.4.5 LoRaSim

Τέλος, ο εξομοιωτής LoRaSim που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Lancaster, είναι ένας διακριτών γεγονότων εξομοιωτής και χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της δυνατότητας επεκτασιμότητας του LoRa. Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να τοποθετήσει σε διδιάστατο χώρο διάφορους κόμβους. Ο εξομοιωτής αυτός έχει γραφτεί στην γλώσσα προγραμματισμού python και χρησιμοποιεί τις βιβλιοθήκες NumPy, Matplotlib, Simpy.



Εικόνα 21 Παράδειγμα εκτέλεσης του LoRaSim

5

Κατανάλωση Ενέργειας σε δίκτυο LoRa

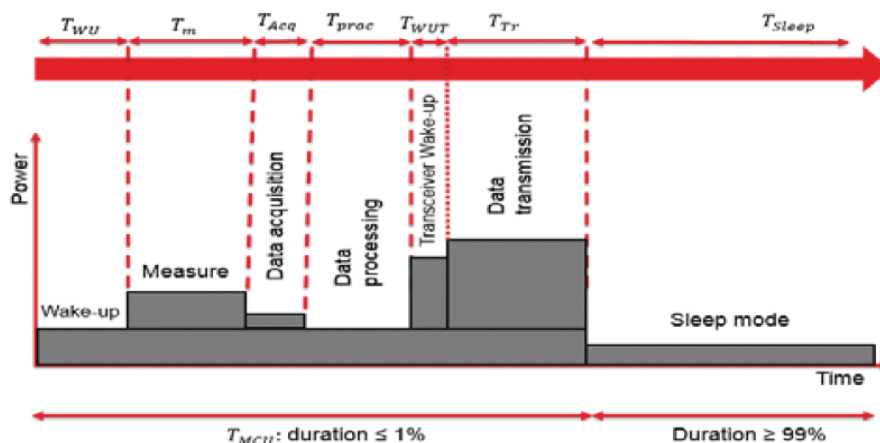
5.1 LoRa and Energy

Η μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό των κόμβων αισθητήρων. Οι αισθητήρες επικοινωνίας πρέπει να εκτελούν τις ακόλουθες εργασίες για τις περισσότερες εφαρμογές: αίσθηση συμβάντων, εκτέλεση τοπικής επεξεργασίας πληροφοριών για αισθητήρια συμβάντα και μετάδοση πακέτων στο σημείο πρόσβασης. Κάθε εργασία χρειάζεται μια ποσότητα κατανάλωσης ενέργειας σε μια δεδομένη χρονική διάρκεια. Επομένως, ένα ακριβές μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας του αισθητήρα είναι απαραίτητο για την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της εκτίμησης της διάρκειας ζωής του αισθητήρα [25][29].

Για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του αισθητήρα επικοινωνίας, η διαμόρφωση LoRa είναι ένας καλός υποψήφιος για μετάδοση δεδομένων. Στην πραγματικότητα, αυτή η τεχνολογία λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων ISM και χαρακτηρίζεται από χαμηλή κατανάλωση ισχύος με επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας.

5.1.1 Μεθοδολογία και υποθέσεις

Η Εικόνα 22 απεικονίζει μια πιθανή ακολουθία λειτουργίας του κόμβου αισθητήρα και επιτρέπει τον καθορισμό διαφορετικών τρόπων λειτουργίας που διαχειρίζεται η μονάδα επεξεργασίας.



Εικόνα 22 Προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο

Σε αυτό το σημείο, ορίζονται διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του κόμβου. Πριν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, η ενεργοποίηση του κόμβου γίνεται από τη μονάδα επεξεργασίας. Η κατανάλωση ενέργειας E_{wu} κατά την περίοδο αφύπνισης T_{wu} εκφράζεται ως:

$$E_{wu} = P_{ON} \cdot T_{wu}, \quad (1)$$

όπου P_{ON} είναι η αναλωμένη ισχύς από τον μικροελεγκτή. Μετά τον χρόνο αφύπνισης, ο αισθητήρας πραγματοποιεί απλές ή πολλαπλές μετρήσεις. Η εξίσωση (2) παρουσιάζει την ποσότητα ενέργειας που διασκορπίζεται E_m κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης:

$$E_m = (P_{ON} + P_m) \cdot T_m, \quad (2)$$

όπου P_m και T_m είναι η καταναλωμένη ισχύς και η αντίστοιχη χρονική διάρκεια των μετρήσεων. Στη συνέχεια, η κατανάλωση ενέργειας από τη διεπαφή απόκτησης που δηλώνεται E_{Acq} είναι:

$$E_{Acq} = (P_{ON} + P_{Acq}) \cdot T_{Acq}, \quad (3)$$

όπου P_{Acq} και T_{Acq} είναι η διασκορπισμένη ισχύς και η χρονική διάρκεια της διεπαφής απόκτησης.

Μετά το βήμα απόκτησης, ο μικροελεγκτής προχωρά στην επεξεργασία δεδομένων. Η διάρκεια του T_{proc} εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας του μικροελεγκτή S_{MCU} και από τον αριθμό των οδηγιών N_{inst} ($T_{proc} = \frac{N_{inst}}{S_{MCU}}$). Στο (4) υπολογίζουμε την κατανάλωση ενέργειας από τη μονάδα επεξεργασίας:

$$E_{proc} = P_{ON} \cdot T_{proc}. \quad (4)$$

Στη συνέχεια, η κατανάλωση ενέργειας E_{WUT} κατά την αφύπνιση του πομποδέκτη T_{WUT} δίνεται από:

$$E_{WUT} = (P_{ON} + P_{WUT}) \cdot T_{WUT}, \quad (5)$$

όπου P_{WUT} είναι η κατανάλωση ισχύος κατά την αφύπνιση του πομποδέκτη. Στη συνέχεια, η κατανάλωση ενέργειας E_{Tr} από τη λειτουργία μετάδοσης εκφράζεται ως:

$$E_{Tr} = (P_{ON} + P_{Tr}) \cdot T_{Tr}, \quad (6)$$

όπου P_{Tr} είναι η διασκορπισμένη ισχύς για τη μετάδοση δεδομένων και το T_{Tr} είναι η αντίστοιχη χρονική διάρκεια, δίνεται από το (7):

$$T_{Tr} = N_{bit} \cdot T_{bit}, \quad (7)$$

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

Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας από τον μικροελεγκτή E_{MCU} σε on-state T_{MCU} δίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{MCU} = P_{ON} \cdot T_{MCU}, \quad (8)$$

όπου το T_{MCU} εξαρτάται από τον συνολικό χρόνο εργασίας στις διάφορες λειτουργίες, μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$T_{MCU} = T_{WU} + T_m + T_{Acq} + T_{proc} + T_{WUT} + T_{Tr} \quad (9)$$

Εν κατακλείδι, η συνολική κατανάλωση ενέργειας E_{Active} κατά τη διάρκεια της ενεργής λειτουργίας του μικροελεγκτή εκφράζεται ως το άθροισμα της κατανάλωσης ισχύος κάθε τμήματος του κόμβου. Δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{Active} = E_{wu} + E_m + E_{Acq} + E_{proc} + E_{WUT} + E_{Tr} \quad (10)$$

Τέλος, η συνολική κατανάλωση ενέργειας που χρησιμοποιείται από τον αισθητήρα επικοινωνίας για την αποστολή δεδομένων για έναν κύκλο δίνεται από το (11):

$$E_{Total} = E_{Active} + E_{Sleep}, \quad (11)$$

όπου το E_{Sleep} είναι η διασκορπισμένη ενέργεια από τον κόμβο του ύπνου. Εκφράζεται ως:

$$E_{Sleep} = P_{Sleep} \cdot T_{Sleep}, \quad (12)$$

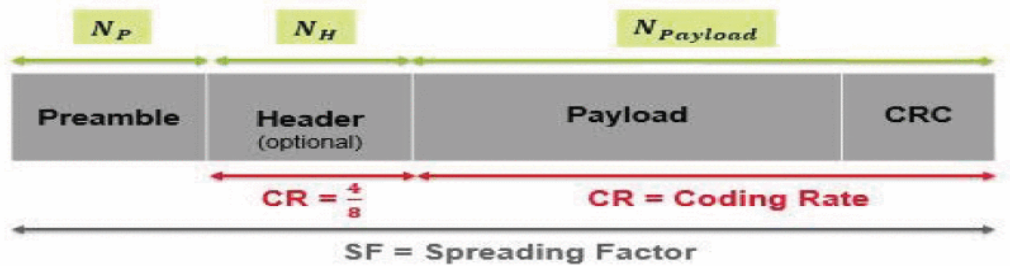
όπου P_{Sleep} και T_{Sleep} είναι η κατανάλωση ενέργειας και η διάρκεια του χρόνου σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας.

5.1.2 Ανταλλαγή δεδομένων με χρήση LoRa

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης επικοινωνίας μεταξύ του κόμβου αισθητήρα και της πύλης χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LoRa. Θεωρείται ότι ο αισθητήρας επικοινωνίας μεταδίδει δεδομένα χρησιμοποιώντας το σχήμα διαμόρφωσης LoRa της Semtech, το οποίο βασίζεται στην τεχνική CSS που χρησιμοποιεί παλμούς chirp διαμορφωμένης γραμμικής συχνότητας διαμορφωμένης ευρείας ζώνης για την κωδικοποίηση πληροφοριών [27].

5.1.2.1 Δομή πακέτων

Το πλαίσιο ξεκινά με ένα προοίμιο που χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό μεταξύ του δέκτη και του πομπού. Μετά το προοίμιο, μια προαιρετική κεφαλίδα φέρει το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου και τις πληροφορίες σχετικά με τη διαμόρφωση LoRa. Σημειώνεται ότι η κεφαλίδα κωδικοποιείται πάντα με CR = 48. Το ωφέλιμο φορτίο αποστέλλεται μετά την κεφαλίδα, κωδικοποιείται με CR. Ένας προαιρετικός Cyclic Redundancy Check (CRC) αποστέλλεται στο τέλος του πλαισίου. Η Εικόνα 23 απεικονίζει το πλαίσιο LoRa



Εικόνα 23 Το πλαίσιο LoRa

Για να υπολογισθεί ο αριθμός συμβόλου ωφέλιμου φορτίου χρησιμοποιείται αρχικά ο υπολογισμός χρόνου-on-air (ή διάρκειας πακέτου) Είναι το άθροισμα του προοιμίου και η διάρκεια ωφέλιμου φορτίου:

$$T_{\text{Packet}} = T_{\text{Preamble}} + T_{\text{Payload}}, \quad (13)$$

όπου T_{Packet} , T_{Preamble} και T_{Payload} είναι αντίστοιχα η διάρκεια πακέτου, η προοίμια διάρκεια και η διάρκεια ωφέλιμου φορτίου. Η προοίμιο εκφράζεται ως:

$$T_{\text{Preamble}} = (4.25 + N_p) \cdot T_{\text{Symbol}}, \quad (14)$$

όπου N_p είναι ο αριθμός συμβόλου προοιμίου και T_{Symbol} είναι η περίοδος συμβόλων. Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή chip $2SF$ με το ρυθμό chip. Στη συνέχεια, υπενθυμίζοντας ότι το εύρος ζώνης BW είναι ίσο με το ρυθμό chip, η περίοδος συμβόλων δίνεται από (15):

$$T_{\text{Symbol}} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (15)$$

Η διάρκεια ωφέλιμου φορτίου ορίζεται ως:

$$T_{\text{Payload}} = N_{\text{Payload}} \cdot T_{\text{Symbol}} \quad (16)$$

Για ένα δεδομένο ωφέλιμο φορτίο PL , σε byte, έναν παράγοντα διασποράς SF και έναν ρυθμό κωδικοποίησης CR , ο αριθμός των συμβόλων N_{Payload} που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του ωφέλιμου φορτίου μπορεί να υπολογιστεί στο (17):

$$N_{\text{Payload}} = 8 + \max\left(\text{ceil}\left(\frac{\Theta(\text{PL}, \text{SF})}{\Gamma(\text{SF})}\right) \cdot \frac{1}{\text{CR}}, 0\right) \quad (17)$$

όπου το ανώτατο όριο δείχνει τη λειτουργία οροφής,

$\Theta(\text{PL}, \text{SF}) = 8 \cdot \text{PL} - 4 \cdot \text{SF} + 16 + 28 - 20 \cdot \text{H}$, με $\text{H} = 0$ όταν είναι ενεργοποιημένη η κεφαλίδα και $\text{H} = 1$ όταν δεν είναι και $\Gamma(\text{SF}) = \text{SF} - 2 \cdot \text{DE}$ με $\text{DE} = 1$ όταν είναι ενεργοποιημένη η βελτιστοποίηση χαμηλού ρυθμού δεδομένων και $\text{DE} = 0$ για την άλλη περίπτωση.

Παρουσιάζεται η ενέργεια ανά χρήσιμο bit E_{bit} σε αυτό το έγγραφο, το οποίο είναι μια σημαντική μέτρηση για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ισχύος του κόμβου του αισθητήρα. Η έκφραση E_{bit} δίνεται [31]:

$$E_{\text{bit}} = \frac{E_{\text{total}}}{8 \cdot \text{PL}} = \frac{P_{\text{cons}}(P_{T_r}) \cdot T_{\text{Packet}}}{8 \cdot \text{PL}} \quad (18)$$

όπου PL , E_{total} και $P_{\text{cons}}(P_{T_r})$ το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου, η συνολική κατανάλωση ενέργειας και η συνολική κατανάλωση ισχύος που εξαρτάται από την ισχύ μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (13), (14) και (16), η ενέργεια ανά χρήσιμο bit μπορεί να ξαναγραφεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$E_{\text{bit}} = \frac{P_{\text{cons}}(P_{T_r}) \cdot T_{\text{Packet}}}{8 \cdot \text{PL}} = \frac{P_{\text{cons}}(P_{T_r}) \cdot (N_{\text{Payload}} + N_P + 4,25) \cdot T_{\text{Symbol}}}{8 \cdot \text{PL}} \quad (19)$$

Αντικαθιστώντας το T_{Symbol} με την έκφρασή του στην Εξίσωση (15), μπορούμε να γράψουμε το E_{bit} ως συνάρτηση του παράγοντα διασποράς SF. Όπως φαίνεται, το E_{bit} είναι μια αυξανόμενη συνάρτηση σύμφωνα με τον SF

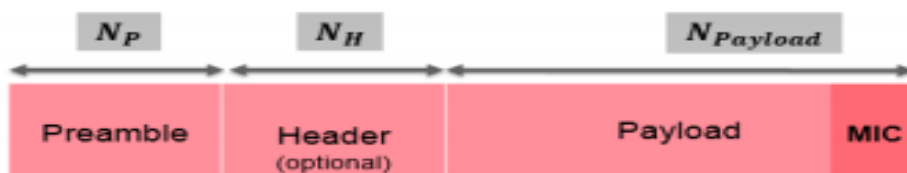
$$E_{\text{bit}} = \frac{P_{\text{cons}}(P_{T_r}) \cdot T_{\text{Packet}}}{8 \cdot \text{PL}} = \frac{P_{\text{cons}}(P_{T_r}) \cdot (N_{\text{Payload}} + N_P + 4,25) \cdot 2^{\text{SF}}}{8 \cdot \text{PL} \cdot \text{BW}} \quad (20)$$

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει διαφορετικά επίπεδα ισχύος μετάδοσης και αντίστοιχη κατανάλωση ρεύματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον πομποδέκτη LoRa SX1272.

Transmission Power (dBm)	Power Consumption (mW)
20	412,5
17	297
13	92,4
7	95.4

Πίνακας 1 Transmission Power & Power Consumption

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 22, μετά από κάθε μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης, ο κόμβος του αισθητήρα ανοίγει δύο σύντομες υποδοχές λήψης στην Κλάση A. Το πρώτο μήνυμα RX1 χρησιμοποιεί το ίδιο κανάλι συχνότητας με το πλαίσιο ανερχόμενης ζεύξης (το RX Delay 1 είναι ίσο με 1 s για το SX1272 Πομποδέκτης LoRa). Το δεύτερο παράθυρο λήψης RX2 χρησιμοποιεί μια σταθερή ρυθμιζόμενη συχνότητα και ρυθμό δεδομένων (το RX Delay 2 είναι ίσο με 2 s για το SX1272) [32]. Αυτά τα μηνύματα RX μπορούν να θεωρηθούν ως επιβεβαίωση μετάδοσης (ACK). Η εσωτερική δομή του μηνύματος ACK απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Το πακέτο ACK τελειώνει με τον κωδικό ακεραιότητας μηνυμάτων (MIC).



Εικόνα 24 Δομή LoRa

Για τον υπολογισμό του εύρους επικοινωνίας του συστήματος LoRaWAN, μπορούν να βρεθούν διαφορετικές δηλώσεις που φτάνουν από πολλά χιλιόμετρα σε μέγιστο εύρος 15 km. Το εύρος επικοινωνίας που σημειώνεται d μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας την έκφραση L_{path} απώλειας διαδρομής:

$$L_{path} = \left(\frac{4\pi \cdot f}{c}\right)^2 \cdot d^n \quad (21)$$

όπου f είναι η συχνότητα LoRa, c είναι η ταχύτητα φωτός και n είναι ο εκθέτης απώλειας διαδρομής, μπορεί να είναι ίσος με 2 (για ελεύθερο χώρο), 3 (για αστική περιοχή) και 6 (για υψηλή παρεμπόδιση).

Στη συνέχεια, ο προϋπολογισμός συνδέσμου L_{budget} για τη διαδρομή μετάδοσης εκφράζεται ως

$$L_{\text{budget}} = \frac{P_{Tr}}{S_R(SF, BW)} \quad (22)$$

όπου τα P_{Tr} και $S_R(SF, BW)$ είναι, αντίστοιχα, η μεταδιδόμενη ισχύς και η ευαισθησία του δέκτη, η οποία εξαρτάται από τον παράγοντα διάδοσης και το εύρος ζώνης. Η ευαισθησία του δέκτη καθορίζεται από την ελάχιστη ισχύ λήψης για την ανίχνευση του σήματος. Αυτή η ευαισθησία λαμβάνεται για ένα ελάχιστο σήμα το Noise Ratio (SNR) ίσο με το $\frac{E_{bit}}{N_0}$, όπου το E_{bit} είναι η ενέργεια ανά bit και το N_0 είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου. Καθορίζει το SNR_0 ίσο με αυτό το ελάχιστο:

$$SNR_0 = \frac{E_{bit}}{N_0} \quad (23)$$

Έχουμε $E_{bit} = S_r \cdot T_{bit}$ όπου S_r είναι η λαμβανόμενη ισχύς και T_{bit} είναι η διάρκεια bit. Η σχέση μεταξύ T_{bit} και T_{chirp} είναι $T_{bit} = T_{chirp} \cdot 2^{SF}$. Υποθέτοντας ότι $T_{chirp} = \frac{1}{BW}$ Η εξίσωση (23) μπορεί να γραφτεί:

$$SNR_0 = \frac{S_r \cdot 2^{SF}}{NF \cdot k \cdot T \cdot BW} \quad (24)$$

Στη συνέχεια, η εξίσωση (24) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$S_r = \frac{NF \cdot k \cdot T \cdot BW \cdot SNR_0}{2^{SF}} \quad (25)$$

Χρησιμοποιώντας το φύλλο δεδομένων του πομποδέκτη SX1272 [33], η ευαισθησία του δέκτη μπορεί να οριστεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$S_R(SF, BW) = SNR(SF) \cdot N_0 = SNR(SF) \cdot NF \cdot k \cdot T \cdot BW \quad (26)$$

όπου NF , k , T και $SNR(SF)$ είναι το σχήμα θορύβου αρχιτεκτονικής δέκτη, η σταθερά Kelvin, η θερμοκρασία και η αναλογία σήματος προς θόρυβο, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (25) και (26), το $SNR(SF)$ δίνεται στην εξίσωση (27):

$$\text{SNR}(\text{SF}) = \frac{\text{SNR}_0}{2^{\text{SF}}} \quad (27)$$

όπου το SNR_0 ισούται με 15 dB για τον πομποδέκτη SX1272 [28].

Στη συνέχεια, για να έχουμε την τιμή εκτίμησης του μέγιστου εύρους επικοινωνίας του συνδέσμου LoRa, υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν κέρδη κεραίας και ορίζουμε την απώλεια διαδρομής L_{path} ίση με το L_{budget} . Η εξίσωση (28) απεικονίζει την έκφραση L_{path} :

$$L_{\text{path}} = \frac{P_{T_r}}{S_R(\text{SF}, \text{BW})} = \frac{P_{T_r}}{\text{SNR}(\text{SF}) \cdot \text{NF} \cdot k \cdot T \cdot \text{BW}} = \frac{P_{T_r} \cdot 2^{\text{SF}}}{\text{SNR}_0 \cdot \text{NF} \cdot k \cdot T \cdot \text{BW}} \quad (28)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (21), (22) και (26)-(28), το εύρος LoRaWAN που σημειώνεται d μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$d = \left(\frac{L_{\text{path}}}{\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f}{c} \right)^2} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f}{c} \right)^2 \cdot \frac{P_{T_r} \cdot 2^{\text{SF}}}{\text{SNR}_0 \cdot \text{NF} \cdot k \cdot T \cdot \text{BW}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (29)$$

Το εύρος LoRaWAN είναι μια αυξανόμενη συνάρτηση σύμφωνα με το SF (που σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υψηλές τιμές SF για να φτάσουμε στο μεγάλο εύρος LoRaWAN).

5.2 Μοντελοποίηση LoRa

Αυτή η ενότητα επικεντρώνεται στο σχήμα διαμόρφωσης LoRa λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση διακύμανσης του συντελεστή διασποράς και του ρυθμού κωδικοποίησης, οι οποίες είναι κρίσιμες παράμετροι που επιτρέπουν την ανταλλαγή μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και διάρκειας μπαταρίας αισθητήρα. Για τα παρακάτω πειράματα χρησιμοποιείται ένας προσομοιωτής του LoRa που είναι γραμμένος σε python [35].

Στην συγκεκριμένη έρευνα, θεωρούνται τα σχήματα LoRa PHY και LoRaWAN MAC ως μια πρώτη αντιπροσωπευτική περίπτωση. Εισάγονται και τα δύο επίπεδα με έμφαση στις ρυθμιζόμενες παραμέτρους που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα, ένας αριθμός παραμέτρων μπορεί να ρυθμιστεί και στο επίπεδο εφαρμογής.

- 1) LoRa PHY: Όπως ήδη προαναφερθεί το LoRa, συντομογραφία Long Range, είναι μια ιδιόκτητη τεχνική διαμόρφωσης που αναπτύχθηκε από την Cycleo. Αργότερα η Ευρωπαϊκή Ένωση εξαγοράστηκε από την Semtech. Η τεχνική διαμόρφωσης βασίζεται Chirp Spread Spectrum (CSS), το οποίο είναι παρόμοιο με το DirectSequence Spread Spectrum (DSSS). Το LoRa κωδικοποιεί πληροφορίες μέσω chirps, σε αντίθεση με τη διαμόρφωση με ψευδοτυχαίες δυαδικές ακολουθίες στο DSSS. Ένα chirp είναι ένα ημιτονοειδές σήμα του οποίου η συχνότητα αυξάνεται μονοτονικά (upchirp) ή μειώνεται (downchirp). Η διάρκεια του συμβόλου βασίζεται στον παράγοντα διάδοσης (SF) και στο εύρος ζώνης (BW). Κάθε σύμβολο LoRa αποτελείται από 2 SF chirps το καθένα που καλύπτει ολόκληρο το εύρος ζώνης. Η διάρκεια του συμβόλου ενός συμβόλου LoRa όπως προαναφέρθηκε ορίζεται ως:

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (15)$$

Ένα μήνυμα LoRa αποτελείται από ένα προοίμιο και δεδομένα. Το προοίμιο περιέχει μόνο upchirps, ενώ το τμήμα δεδομένων περιλαμβάνει upchirps με ασυνέχειες. Η θέση των ασυνεχών –σε συχνότητα– είναι αυτή που κωδικοποιεί τις μεταδιδόμενες πληροφορίες. Για να διασφαλιστεί ότι πολλαπλά πακέτα μπορούν να αποδιαμορφωθούν ταυτόχρονα, τα πακέτα LoRa μπορούν να κωδικοποιηθούν με διαφορετικούς ορθογώνιους παράγοντες διάδοσης. Αυτό αποδίδει έναν ισχυρό και μακρινό σύνδεσμο επικοινωνίας για συσκευές ΙΤ.

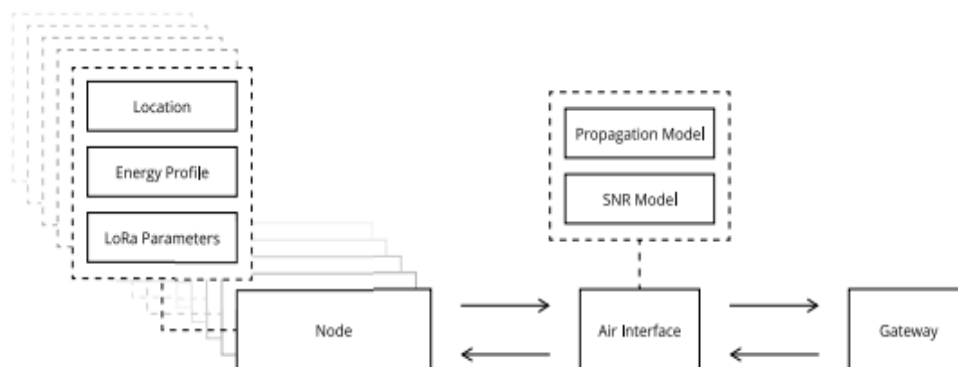
- 2) LoRaWAN MAC: Πάνω από το φυσικό στρώμα LoRa, το LoRaWAN καθορίζει το επίπεδο ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης (MAC) και την αρχιτεκτονική του δικτύου. Σε αντίθεση με την ιδιόκτητη τεχνική διαμόρφωσης LoRa, το LoRaWAN είναι ένα ανοιχτό πρότυπο που καθορίζεται από το LoRa Alliance. Το LoRaWAN ορίζει τρεις κατηγορίες συσκευών, κάθε μία στοχεύει σε διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Γενικά, οι συσκευές LoRa ξεκινούν την επικοινωνία μέσω της μετάδοσης ενός μηνύματος στην πύλη. Μέσω επιβεβαιωμένων μηνυμάτων, οι κόμβοι μπορούν να ζητήσουν επιβεβαιώσεις για να διασφαλιστεί ότι τα πακέτα λαμβάνονται με επιτυχία από την πύλη. Μετά από ένα μήνυμα ανερχόμενης ζεύξης, ο κόμβος ανοίγει δύο υποδοχές για λήψη κίνησης κατερχόμενης ζεύξης από την πύλη. Αυτό το σχήμα επικοινωνίας είναι βελτιστοποιημένο για χαμηλή ισχύ λόγω του σχεδιασμού που επικεντρώνεται στο uplink. Το LoRaWAN υποχρεώνει κάθε συσκευή LoRa να εφαρμόζει αυτό το σχήμα. Οι συμβατές συσκευές ονομάζονται συσκευές κατηγορίας A. Οι συσκευές κλάσης B και Γ επεκτείνουν τις δυνατότητες επικοινωνίας των συσκευών κατηγορίας A, ορίζοντας επιπλέον υποδοχές λήψης.

Οι συσκευές κλάσης B έχουν περιοδικές υποδοχές λήψης, ενώ οι συσκευές κατηγορίας Γ ακούνε συνεχώς εισερχόμενα μηνύματα. Αυτές οι πρόσθετες υποδοχές λήψης ζεύξης μειώνουν τον λανθάνοντα χρόνο κατερχόμενης ζεύξης, αλλά παράγουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας

- 3) Ρυθμιζόμενες παράμετροι: Το LoRaWAN διευκολύνει τον έλεγχο του χρόνου ομιλίας, του ρυθμού δεδομένων και της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων LoRa προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Αυτό γίνεται προσαρμόζοντας τον ρυθμό δεδομένων και την ισχύ μετάδοσης στα χαρακτηριστικά διάδοσης του συνδέσμου LoRa. Η αύξηση του συντελεστή εξάπλωσης οδηγεί σε υψηλότερο χρόνο λειτουργίας, ο οποίος επιτρέπει στον δέκτη να αποδιαμορφώνει καλύτερα το μήνυμα. Παρά το καλύτερο εύρος, ένας κόμβος θα καταναλώνει περισσότερη ισχύ κατά τη μετάδοση με υψηλότερο συντελεστή διασποράς. Εκτός από την τροποποίηση του συντελεστή διασποράς, η ισχύς μετάδοσης μπορεί να αλλάξει για να αυξήσει περαιτέρω το εύρος ή να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας.

Οι συσκευές LoRaWAN πρέπει να συμμορφώνονται με τους κανονισμούς που επιβάλλονται στις βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές ζώνες ραδιοφώνου στις οποίες λειτουργούν. Αυτοί οι κανονισμοί περιλαμβάνουν έναν περιορισμό στον κύκλο λειτουργίας των μεταδόσεων και της διεγερμένης ισχύος μετάδοσης. Συγκεκριμένα, το LoRaWAN επιβάλλει έναν περιορισμό κύκλου λειτουργίας ανά ζώνη. Μετά τη μετάδοση ενός μηνύματος, ο κόμβος πρέπει να περιμένει T_{off} δευτερόλεπτα πριν μεταδώσει ξανά σε αυτήν τη ζώνη σύμφωνα. Λαμβάνοντας υπόψη την περίπτωση 1 της αποστολής μηνύματος με μέγεθος ωφέλιμου φορτίου 51 bytes και συντελεστή διασποράς 12 και τηρώντας ένα όριο κύκλου λειτουργίας 1%, η διακοπή είναι 4 λεπτά [34].

$$T_{off} = \frac{T_{air}}{T_{dc}} - T_{air} \quad [s] \quad (30)$$



Εικόνα 25 Πλαίσιο προσομοίωσης LPWAN βασισμένο σε σχεδιασμό για αξιολόγηση και βελτιστοποίηση πολλαπλών επιπέδων

Αναλύοντας την επίδραση του μήκους του πακέτου σε διαφορετικές παραμέτρους απόδοσης, εκτιμήθηκε ο αντίκτυπος των νέων δυνατοτήτων στο πλαίσιο και κυρίως στις επιλογές για εκτέλεση ρυθμού προσαρμοστικών δεδομένων (Adaptive Data Rate (ADR)) και χρήση επιβεβαιωμένων μηνυμάτων. Όπου με προεπιλεγμένες παραμέτρους - για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν - εμφανίζονται στον Πίνακα 2.

Παράμετροι	Τιμή
Διακύμανση καναλιού σ	7.8 dB
Αριθμός κόμβων	100
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων λ	0.02 bps
Αρχική ισχύς μετάδοσης	14 dBm
Κανάλια	868.1, 868.3 and 868.5 MHz
Κανάλι RX2	868.525 MHz
RX2 Data Rate	DR3 (SF 9)
Cell Radius	1000 m

Πίνακας 2 παράμετροι LoRa

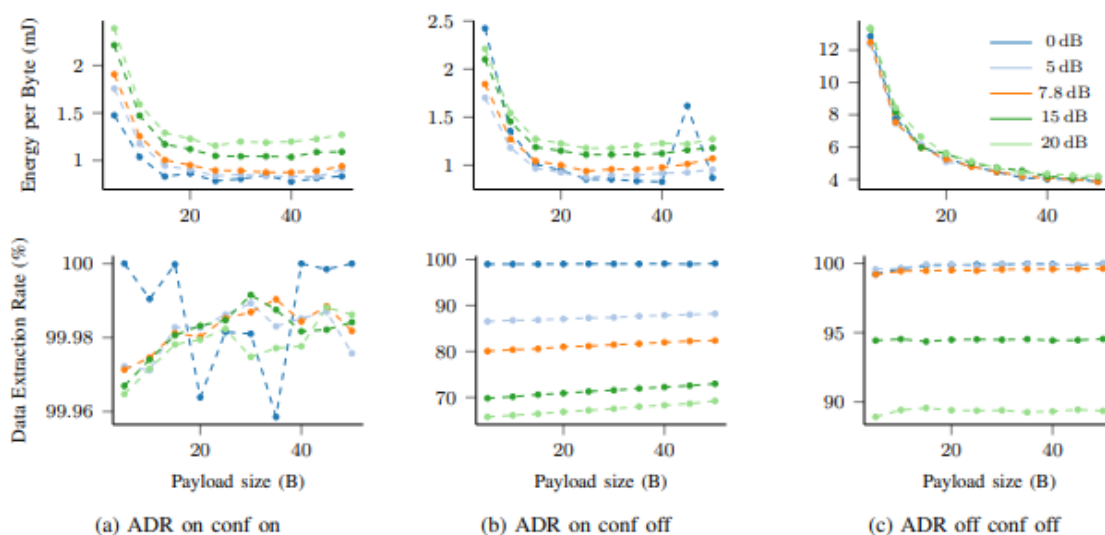
Η απόδοση του δικτύου και των μεμονωμένων κόμβων έχουν αξιολογηθεί με βάση το ρυθμό εξαγωγής δεδομένων (DER), την ενέργεια ανά byte ωφέλιμου φορτίου και τη διακύμανση του καναλιού.

Ο ρυθμός εξαγωγής δεδομένων καθορίζει τη μέση αναλογία του αριθμού των μοναδικά λαμβανόμενων πακέτων στο σταθμό βάσης προς τα μοναδικά μεταδιδόμενα πακέτα ανά κόμβο. Υποδεικνύει πόσο αξιόπιστα λαμβάνονται τα bytes ωφέλιμου φορτίου από την πύλη. Διαφέρει από την

αναλογία επιτυχίας παράδοσης πακέτων επειδή δεν περιλαμβάνει εκ νέου μεταδόσεις στον υπολογισμό των μοναδικών πακέτων που μεταδίδονται. Ως εκ τούτου, το DER μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση εκ νέου μεταδόσεων προκειμένου να αντιμετωπιστεί η απώλεια πακέτων.

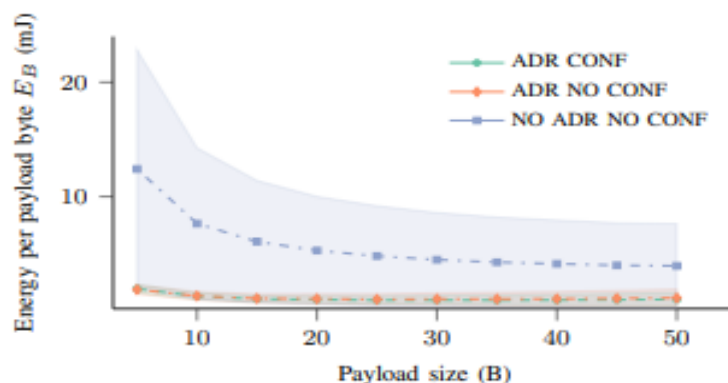
$$DER = \frac{\text{Αριθμός byte που έχουν ληφθεί με μοναδικό τρόπο}}{\text{Αριθμός byte που έχουν μεταδοθεί με μοναδικό τρόπο}}$$

Εάν το κανάλι είναι δυναμικό, το αποτέλεσμα του ADR ακυρώνεται και μειώνει ακόμη και τον ρυθμό εξαγωγής δεδομένων (Εικόνα 26), δηλαδή λιγότερα πακέτα λαμβάνονται με επιτυχία από το gateway.

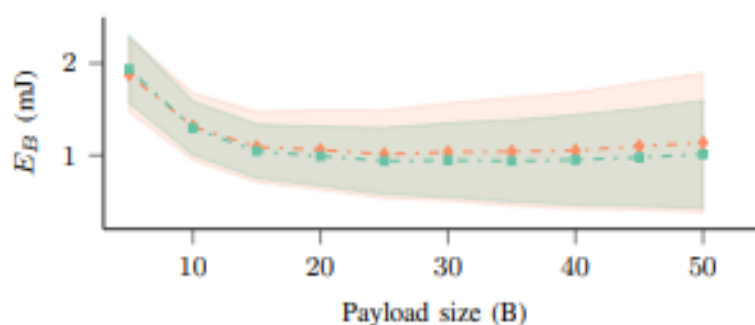


Εικόνα 26 Επιπτώσεις της διακύμανσης καναλιού και του μεγέθους ωφέλιμου φορτίου στο ρυθμό εξαγωγής ενέργειας και δεδομένων

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας ανά μεταδιδόμενο byte ωφέλιμου φορτίου για διαφορετικές διαμορφώσεις. Η απενεργοποίηση του προσαρμοστικού DER μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη μέση κατανάλωση ενέργειας έως και κατά τάξη μεγέθους και να αυξήσει σημαντικά τη διάδοσή της. Όπου στην Εικόνα 28 γίνεται μεγέθυνση του διαγράμματος της Εικόνας 27 για την εμφάνιση της περαιτέρω μείωσης ενέργειας απενεργοποιώντας επιβεβαιωμένα μηνύματα, ειδικά μειώνοντας την εξάπλωση για μεγαλύτερα μεγέθη πακέτων.



Εικόνα 27 Κατανάλωση ενέργειας ανά μεταδιδόμενο byte



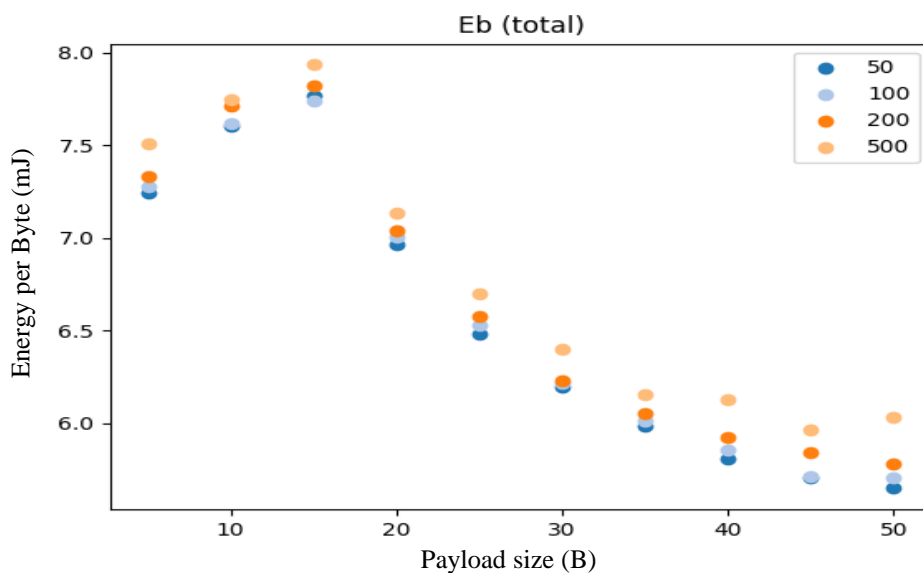
Εικόνα 28 Μεγέθυνση διαγράμματος Εικόνας 27

Έχοντας αξιολογηθεί τον αντίκτυπο του μήκους του πακέτου ως πρώτη ευκαιρία βελτιστοποίησης πολλαπλών επιπέδων. Όπως αναμενόταν, η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά byte ωφέλιμου φορτίου μειώνεται κατά την αποστολή μεγαλύτερων πακέτων (Εικόνα 27). Για εξοικονόμηση ενέργειας, δεδομένα που δεν είναι κρίσιμα για το χρόνο μπορούν να συσσωρευτούν, διότι αυξάνοντας το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου

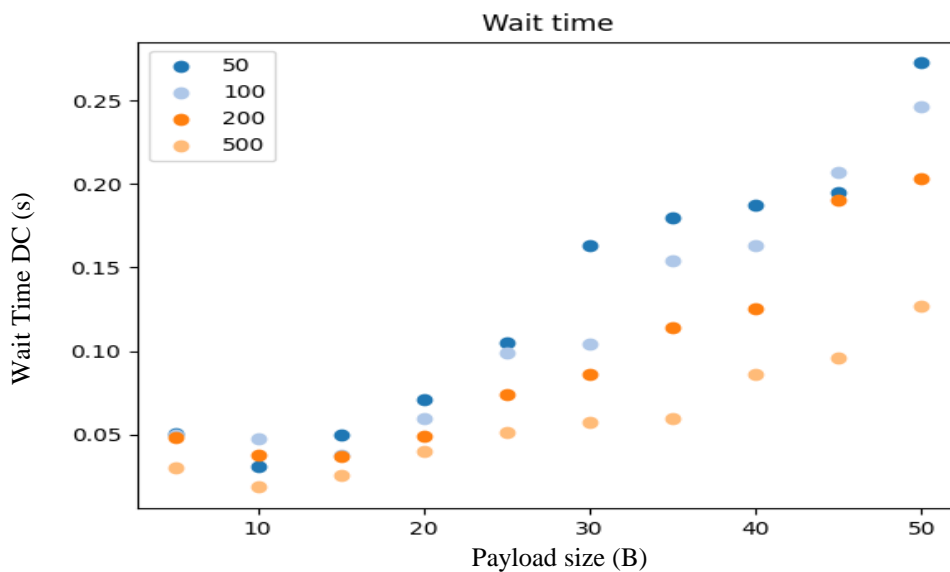
- (i) μειώνεται η επιβάρυνση που σχετίζεται με τις πληροφορίες κεφαλίδας,
- (ii) η επιβάρυνση της εκκίνησης και της προετοιμασίας μιας μετάδοσης μειώνεται,
- (iii) μειώνεται ο αριθμός των αναμεταδόσεων σε ένα σταθερό περιβάλλον διάδοσης,
- (iv) ο αριθμός των παραθύρων λήψης ζεύξης είναι επίσης χαμηλότερος.

Για ταχύτερη προσαρμογή στο κανάλι, οι συσκευές LoRa θα μπορούσαν πρώτα να στείλουν 20 μικρότερα πακέτα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο χρόνο λειτουργίας και ενέργεια για πακέτα που αποστέλλονται με μη βέλτιστες παραμέτρους.

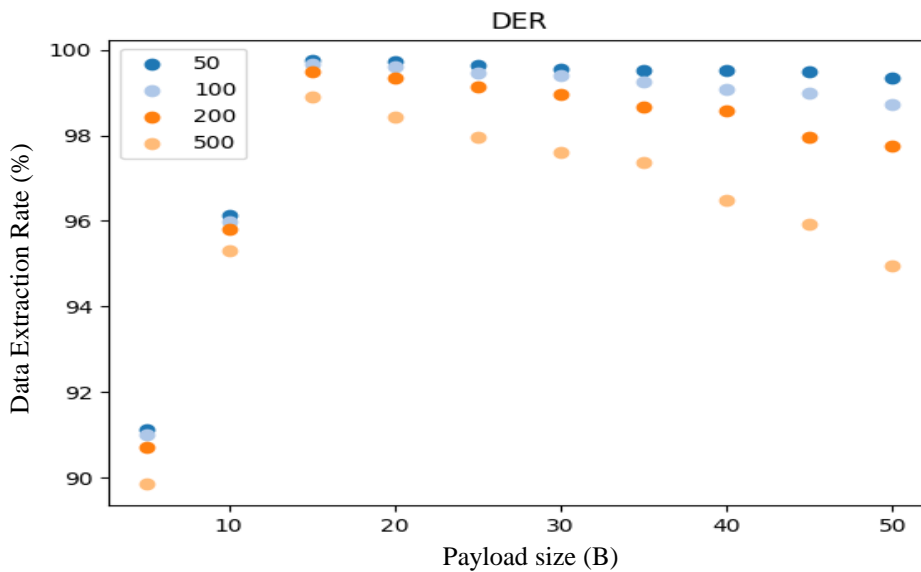
Παράλληλα μπορεί να εξετασθεί τι θα γίνει αν υπάρχει διαφορετικός αριθμός κόμβων. Για την επαρκή αξιολόγηση του δικτύου, κάθε πείραμα έχει επαναληφθεί 1000 φορές μέσω προσομοιώσεων [35]. Σε αυτή την φάση θα αναλυθούν τα πειράματα με αλλαγή μόνο στον αριθμό των κόμβων, χωρίς να πραγματοποιηθεί καμία αλλαγή σε οποιαδήποτε άλλη μεταβλητή ή δεδομένα στον προσομοιωτή. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν τα εξής δεδομένα όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα πειράματα:



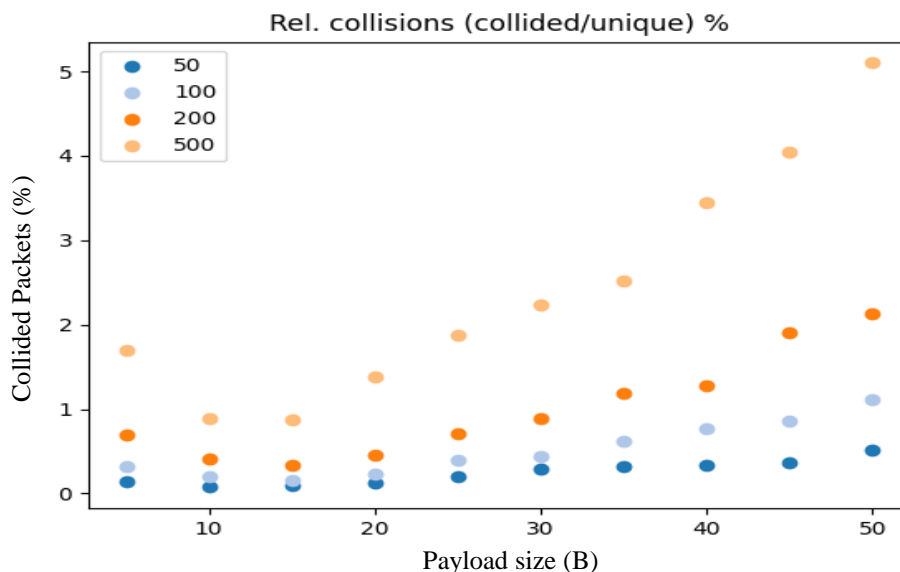
Εικόνα 29 Διάγραμμα Συνολικής ενέργειας για κόμβους



Εικόνα 30 Διάγραμμα χρόνου αναμονής για κόμβους



Εικόνα 31 Διάγραμμα DER για κόμβους



Εικόνα 32 Διάγραμμα σχετικών συγκρούσεων για κόμβους

Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι όσοι περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν τόσες περισσότερες συγκρούσεις, μικρότερο χρόνο αναμονής αλλά και λιγότερα δεδομένα που χάθηκαν. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 29 παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων μειώνονται και η καταναλωμένη ενέργεια.

Αυτό επιβεβαιώνεται και στο διάγραμμα στην Εικόνα 30 όπου με μεγαλύτερο αριθμό κόμβων προκύπτει μικρότερος χρόνος αναμονής και κατ' επέκταση μικρότερο E_{Sleep} και συνολικά μικρότερη E_{Total} που καταναλώνει το σύστημα.

Επίσης, αποδεικνύεται και από την εξίσωση όπου συνδυάζει την κατανάλωση ενέργειας μαζί με την μπαταρία που διαθέτει το σύστημα μας σύμφωνα με το πείραμα (Εικόνα 29) και είναι παραγόμενο της εξίσωσης (10) και είναι [28]

$$T = \tau n = \frac{\tau(E_0 - SOC \cdot E_0)}{P_{Tx} \cdot t_{Tx} + P_s \cdot t_s + N \cdot P_{Rx} \cdot t_{Rx} + P_w \cdot t_w} \quad (31)$$

όπου T η συνολική κατανάλωση ενέργειας, τ είναι ο χρόνος λειτουργίας ενός πλήρους κύκλου, E_0 η αρχική ενέργεια που αποθηκεύεται στην μπαταρία, SOC είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας στο οποίο η συσκευή σταματά να λειτουργεί κανονικά, n είναι ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων κύκλων λειτουργίας, P_{Tx} η ισχύς που καταναλώνεται από τη συσκευή κατά τη μεταφορά δεδομένων, P_s που καταναλώνεται από τη συσκευή σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, P_{Rx} που

καταναλώνεται από τη συσκευή σε λειτουργία λήψης, ισχύς P_w που καταναλώνεται από τη συσκευή κατά την επεξεργασία των ληφθέντων δεδομένων και N είναι ο αριθμός των τελικών κόμβων, όπου ο δέκτης λειτουργεί σε κατάσταση λήψης N φορές περισσότερο από ό, τι πριν.

Ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα στην Εικόνα 31 παρατηρείται ένα πιο ομαλό DER με περισσότερους κόμβους. Όπου και το DER προκύπτει σύμφωνα με τον τύπο **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.:**

$$DER = e^{(-2N \cdot T_{packet} \cdot \lambda)}$$

Όπου N είναι ο αριθμός των πομπών, T_{packet} ο χρόνος πακέτου και λ είναι ο ρυθμός μετάδοσης όλων των κόμβων.

Ακόμη από το διάγραμμα της Εικόνας 32 παρατηρούνται οι σχετικές συγκρούσεις για διαφορετικό αριθμό κόμβων. Συγκεκριμένα όσο περισσότεροι κόμβοι υπάρχουν τόσες είναι και οι περισσότερες συγκρούσεις και αυτό συμβαίνει εξαιτίας των παρακάτω.

Όταν δύο μεταδόσεις LoRa αλληλεπικαλύπτονται στον δέκτη, υπάρχουν αρκετές συνθήκες που καθορίζουν εάν ο δέκτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει, ένα ή δύο πακέτα ή καθόλου. Αυτές οι συνθήκες είναι η Συχνότητα φορέα (CF), ο παράγοντας διασποράς (SF), η ισχύς και ο συγχρονισμός.

Επικάλυψη υποδοχής: Η λήψη πακέτων ξεκινά την ώρα a και τελειώνει την ώρα b . Ορίζουμε το διάστημα λήψης (a_i, b_i) για το πακέτο $i \in \mathbb{N}$, δηλαδή λήψη που ξεκινά από το a_i και τελειώνει στο b_i . Ορίζουμε το μεσαίο σημείο $m_i = \frac{a_i + b_i}{2}$ και μήκος μέσου σημείου $d_i = \frac{b_i - a_i}{2}$. Δύο πακέτα, x και y , επικαλύπτονται όταν επικαλύπτονται τα διαστήματα λήψης, δηλαδή:

$$O(x,y) = |m_x - m_y| < d_x + d_y \quad (32)$$

Φέρουσα συχνότητα: Όταν δύο μεταδόσεις αλληλεπικαλύπτονται χρονικά, αλλά όχι στη Συχνότητα Φορέα (CF), δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους και μπορούν και οι δύο να αποκωδικοποιηθούν (υποθέτοντας ότι ένας δέκτης ακούει και στις δύο συχνότητες φορέα). Η επικάλυψη σε CF ορίζεται ως η απόλυτη διαφορά αυτών των συχνοτήτων και η ανεκτή μετατόπιση συχνότητας, η οποία εξαρτάται από το εύρος ζώνης. Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε την κατάσταση όταν δύο μεταδόσεις συγκρούονται στο CF C_{freq} ως:

$$C_{freq}(x,y) = \begin{cases} 1, & |f_x - f_y| < f_{threshold} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (33)$$

όπου τα f_x και f_y είναι οι κεντρικές συχνότητες μετάδοσης x και y , και το $f_{threshold}$ είναι η ελάχιστη ανεκτή μετατόπιση συχνότητας. Η ελάχιστη ανεκτή μετατόπιση συχνότητας για το Semtech SX1272 είναι 60 kHz για εύρος ζώνης 125 kHz, 120 kHz για εύρος ζώνης 250 kHz και 240 kHz για εύρος ζώνης 500 kHz.

Spreading Factor: Το Spreading Factor (SF) που χρησιμοποιούνται στο LoRa είναι ορθογώνιοι. Οι μεταδόσεις με διαφορετικά SF (και τα ίδια CF και BW) μπορούν επομένως να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς (υποθέτοντας δύο διαθέσιμες διαδρομές λήψης). Ως εκ τούτου, ορίζουμε την κατάσταση όταν δύο συγκρούσεις συγκρούονται στο SF C_{SF} ως:

$$C_{SF}(x, y) = \begin{cases} 1, & SF_x = SF_y \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (34)$$

όπου SF_x και SF_y είναι το SF της μετάδοσης x και y .

Ισχύς: Καθώς το LoRa είναι μια μορφή διαμόρφωσης συχνότητας, εμφανίζει το αποτέλεσμα σύλληψης. Το αποτέλεσμα σύλληψης εμφανίζεται όταν υπάρχουν δύο σήματα στον δέκτη και το ασθενέστερο σήμα καταστέλλεται από το ισχυρότερο σήμα. Η διαφορά στην ισχύ σήματος που λαμβάνεται μπορεί επομένως να είναι σχετικά μικρή. Όταν η διαφορά είναι πολύ μικρή, ωστόσο, ο δέκτης αλλάζει μεταξύ των δύο σημάτων, πράγματι δεν είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει καμία μετάδοση. Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε την κατάσταση όταν το πακέτο x συγκρούεται με το πακέτο y στην ισχύ σήματος που λαμβάνεται ως:

$$C_{pwr}(x, y) = \begin{cases} 1, & |P_x - P_y| < P_{threshold} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (35)$$

όπου P_x είναι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος μετάδοσης x και P_y είναι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος μετάδοσης y και το $P_{threshold}$ είναι το κατώφλι ισχύος.

Συγχρονισμός: Μπορούμε επίσης να συμπεράνουμε ότι τα πακέτα μπορούν να αλληλεπικαλύπτονται, αρκεί να υπάρχουν άθικτα τουλάχιστον 5 προοίμια σύμβολα (σε περίπτωση αδύναμου πακέτου). Με άλλα λόγια, το κρίσιμο τμήμα της λήψης πακέτων ξεκινά από τα 5 τελευταία προοίμια σύμβολα, έτσι μπορούμε να επαναπροσδιορίσουμε το διάστημα για μετάδοση x ως $x_{cs} = (a_x + T_{sym} \cdot (N_{pp} - 5), b_x)$, όπου το T_{sym} είναι ο χρόνος συμβόλων και το N_{pp} είναι ο αριθμός των προγραμματισμένων προοιμίων συμβόλων. Επομένως, το πακέτο x συγκρούεται με το πακέτο y όταν επικαλύπτεται στην κρίσιμη ενότητα του x_{cs} :

$$C_{cs}(x, y) = \begin{cases} 1, & O(x_{cs}, y) \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (36)$$

Περίληψη: Όταν όλες οι συνθήκες όπως ορίζονται στην εξίσωση (32), την εξίσωση (33), την εξίσωση (34), την εξίσωση (35) και την εξίσωση (36) είναι αληθείς, τότε το πακέτο x και y συγκρούονται:

$$C(x, y) = O(x, y) \wedge C_{freq}(x, y) \wedge C_{SF}(x, y) \wedge C_{pwr}(x, y) \wedge C_{cs}(x, y)$$

Χρησιμοποιείται αυτό το μοντέλο συμπεριφοράς σύγκρουσης στις προσομοιώσεις..

Ένα διαφορετικό και πολύ σημαντικό πείραμα που θα μπορούσαμε να κάνουμε είναι οι αλλαγές που προκύπτουν με στην ενέργεια αν αλλάζουμε το Spreading Factor [30]. Για την επαρκή αξιολόγηση του δικτύου, κάθε πείραμα έχει επαναληφθεί 100 φορές μέσω προσομοιώσεων [35]. Το Spreading Factor είναι ένα από τα πιο βασικά στοιχεία στο LoRa και θα δούμε πιο κάτω.

Το Spreading Factor (SF) αποφασίζει για τον αριθμό των chirps, του φορέα των δεδομένων, που αποστέλλονται ανά δευτερόλεπτο. Το δίκτυο αποφασίζει τον παράγοντα διάδοσης (βαθμολογείται μεταξύ 7-12) με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες μεταξύ της συσκευής επικοινωνίας και της πύλης. Αυτό προϋποθέτει ότι η λειτουργία Adaptive Data Rate είναι ενεργοποιημένη, η οποία συνιστάται για όλες τις συσκευές εκτός από τις συνεχώς κινούμενες.

Το χαμηλότερο SF σημαίνει ότι περισσότερες chirps αποστέλλονται ανά δευτερόλεπτο. Ως εκ τούτου, μπορείτε να κωδικοποιήσετε περισσότερα δεδομένα ανά δευτερόλεπτο. Το υψηλότερο SF συνεπάγεται λιγότερα chirps ανά δευτερόλεπτο. Ως εκ τούτου, υπάρχουν λιγότερα δεδομένα για κωδικοποίηση ανά δευτερόλεπτο. Σε σύγκριση με το χαμηλότερο SF, η αποστολή της ίδιας ποσότητας δεδομένων με υψηλότερο SF χρειάζεται περισσότερο χρόνο μετάδοσης, γνωστή ως χρόνος λειτουργίας. Περισσότερος χρόνος αέρα σημαίνει ότι το μόντεμ λειτουργεί και λειτουργεί περισσότερο και καταναλώνει περισσότερη ενέργεια.

Το πλεονέκτημα του υψηλού SF είναι ότι ο πιο εκτεταμένος χρόνος στον αέρα δίνει στον δέκτη περισσότερες ευκαιρίες για δειγματοληψία της ισχύος σήματος που οδηγεί σε καλύτερη ευαισθησία. Η καλύτερη ευαισθησία σημαίνει ότι μπορείτε να λάβετε το σήμα πιο μακριά, ώστε να έχετε καλύτερη κάλυψη. Θεωρητικά, κάθε βήμα στο SF διπλασιάζει το χρόνο για τη μετάδοση του ίδιου όγκου δεδομένων, βλέπε σχήμα 1. Κάθε βήμα στο SF συσχετίζεται με περίπου 2,5 dB προϋπολογισμό επιπλέον συνδέσμου.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει το μήκος πακέτου chirp με βάση την παράμετρο SF. Η τροποποίηση αυτής της παραμέτρου παρέχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της αύξησης της απόστασης επικοινωνίας και της μείωσης του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Κάθε σύμβολο απλώνεται μέσω ενός κωδικού chirp

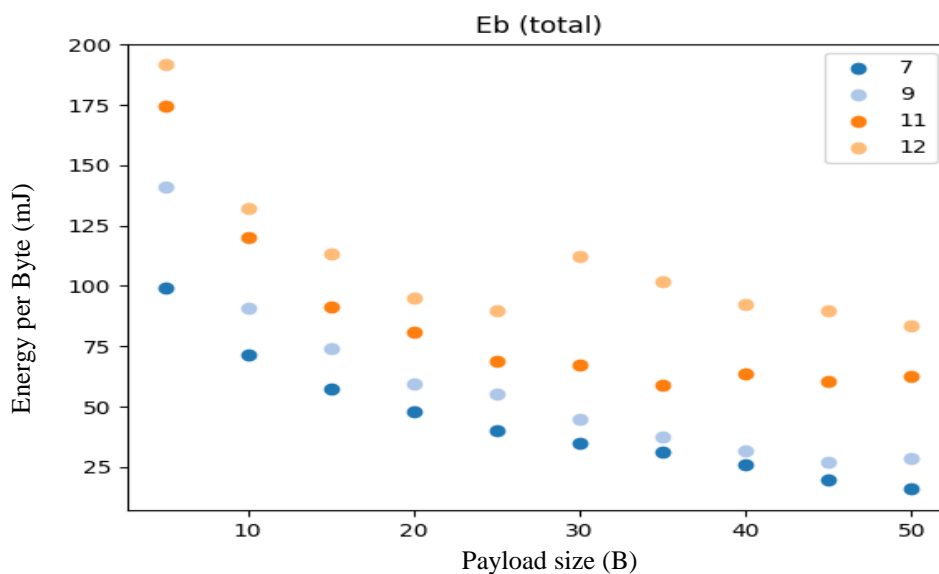
του οποίου το μήκος είναι 2^{SF} . Ο δέκτης διαιρεί τον ληφθέντα κωδικό σε μπλοκ μήκους $\frac{2^{SF}}{SF}$ τα οποία μπορούν στη συνέχεια να αποκωδικοποιηθούν.

Spreading Factor (SF)	Chirp Code Length (Bit)
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

Πίνακας 3 Spreading Factor & Chirp Code Length

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (13), η Εικόνα 33 εμφανίζει την κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές τιμές SF. Όπου είναι για SF=7, για SF=9, για SF=12 και για SF=11 με το ελάχιστο datarate αλλά χωρίς αλλαγές στο unqi byte. Το κανάλι εύρους ζώνης έχει οριστεί στα 125 kHz. Όταν το SF είναι υψηλό, η κατανάλωση ενέργειας επίσης παρατηρείται να είναι μεγαλύτερη. Σημειώνεται ότι η αύξηση του αριθμού των bit κωδικοποίησης προκαλεί αύξηση της μετάδοσης πακέτων, η οποία επιτρέπει την κατανάλωση περισσότερης ισχύος από τη μονάδα ραδιοφώνου.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (20) σημειώνεται ότι αυτή η ενέργεια μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των χρήσιμων bits. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή SF, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για την αποστολή ενός πακέτου, οπότε απαιτείται περισσότερη κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση δεδομένων.

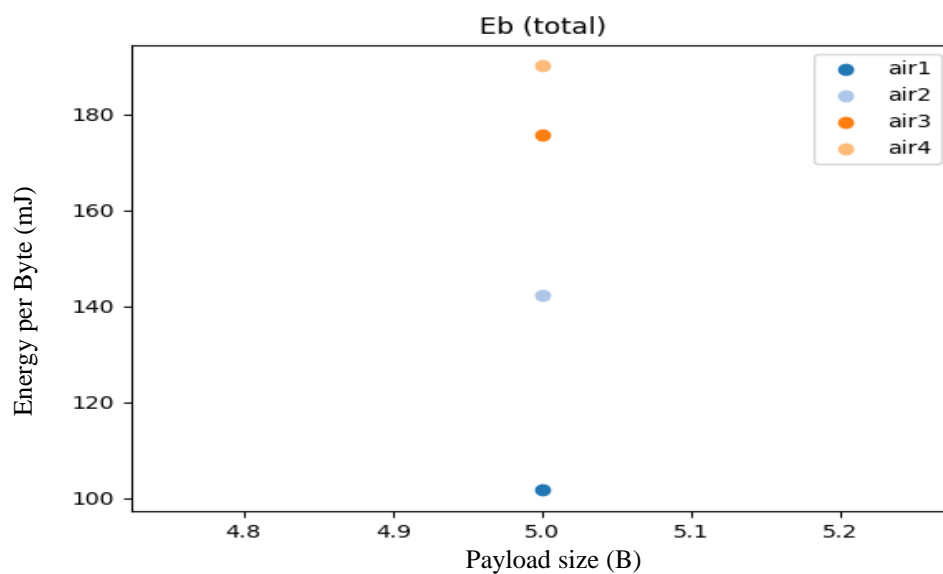


Εικόνα 33 Διάγραμμα Κατανάλωσης Ενέργειας για διαφορετικά SF

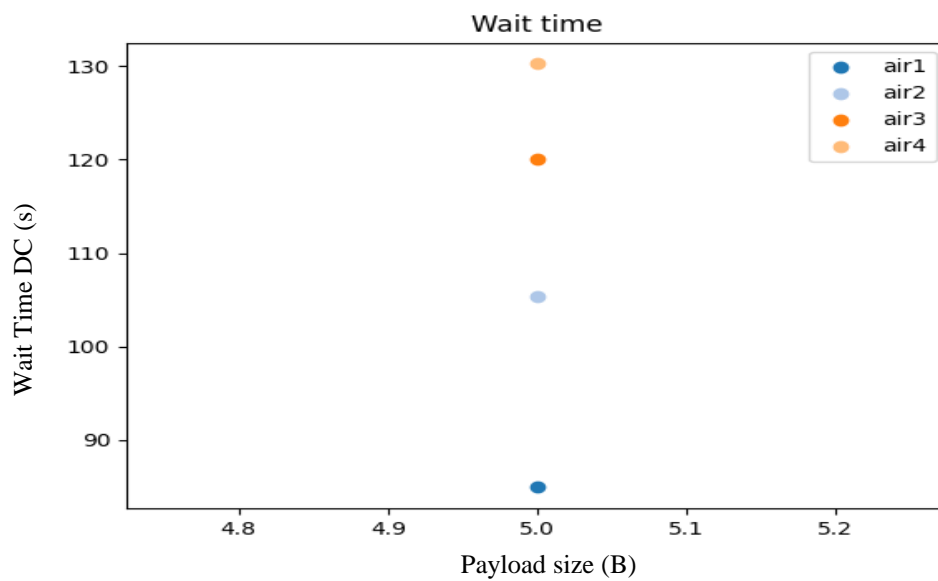
Spreading Factor (SF)	Time On Air (ms)
7	41
8	72
9	144
10	289
11	578
12	991

Εικόνα 34 Σχέση SF με Time On Air

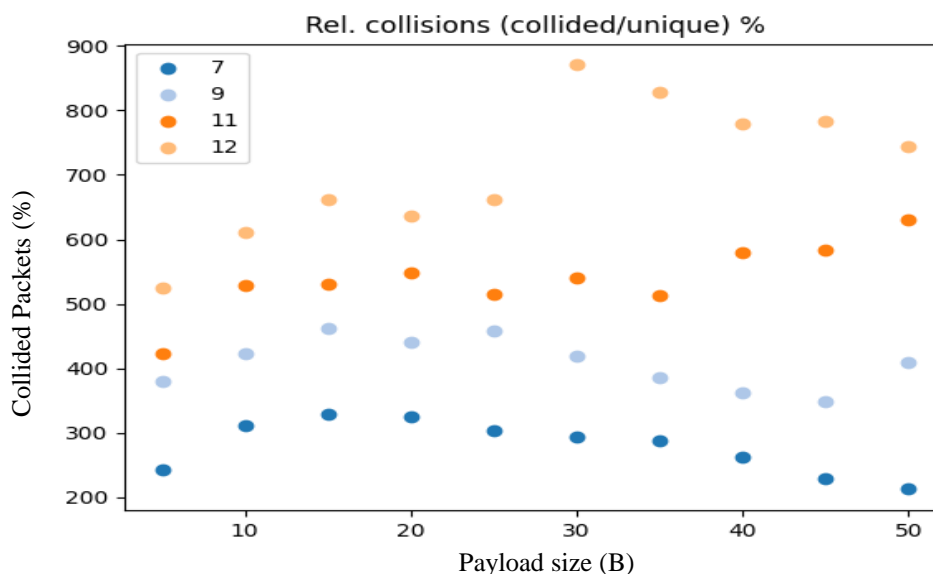
Σε αυτό το σημείο έχουν παρθεί 4 σήματα με διαφορετικό Time On Air για air1= 39,1-57,56ms, air2= 156,67-193.536ms, air3= 626.688-774.144ms, air4= 958.464-1253.376ms και όπως φαίνεται στην Εικόνα 35 έχουμε σαφέστατα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας όπου μπορούμε να το διακρίνουμε και από την Εικόνα 36 και τον χρόνο αναμονής και σε συνδυασμό με την εξίσωση (13)



Εικόνα 35 Συνολική Ενέργεια για διαφορετικά Time On Air



Εικόνα 36 Χρόνος Αναμονής για διαφορετικά Time On Air



Εικόνα 37 Διάγραμμα συγκρούσεων για διαφορετικά SF

Στην Εικόνα 37 βλέπουμε το διάγραμμα συγκρούσεων για διαφορετικά SF, όπου παρατηρείται ότι με μεγαλύτερο SF έχουμε και περισσότερες συγκρούσεις, δηλαδή οι συγκρούσεις εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το SF του κάθε σήματος. Η συμπεριφορά αυτή αναλύεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την Εικόνα 32 όπου είναι το διάγραμμα συγκρούσεων για διαφορετικό αριθμό κόμβων.

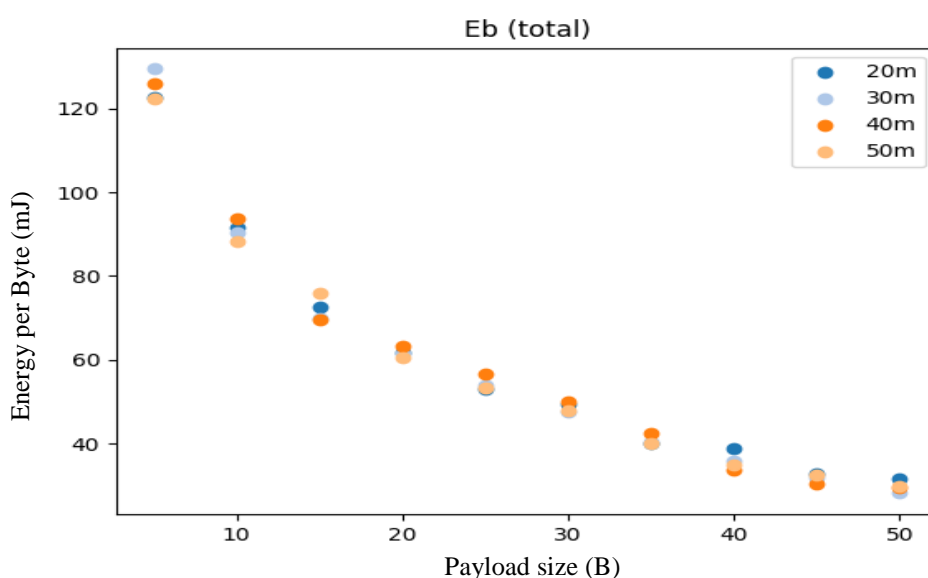
Χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο LoRaWAN, το θεωρητικό μέγιστο εύρος που μπορεί να επιτευχθεί σε καθορισμένο επίπεδο ισχύος επιτυγχάνεται με SF ίσο με 12. Στην πραγματικότητα, με SF = 12, ο κόμβος αισθητήρα χρειάζεται 10 dBm για τη μετάδοση δεδομένων για 5 χλμ στην αστική περιοχή με μικρά εμπόδια. Ωστόσο, ο αισθητήρας χρειάζεται 25 dBm για τη μετάδοση των ίδιων δεδομένων για την ίδια απόσταση με SF = 7.

Η μέγιστη περιοχή LoRaWAN ως συνάρτηση του SF σε διαφορετικές δυνάμεις μετάδοσης γίνεται χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (29). Διαπιστώνεται πως όταν το SF αυξάνεται, το εύρος LoRaWAN αυξάνεται. Για μια σταθερή τιμή SF, το εύρος LoRaWAN αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος μετάδοσης. Στην πραγματικότητα, για να επιτευχθεί ένα εύρος επικοινωνίας 4 km με SF ίσο με 9, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε και τα 17 και τα 20 dBm. Ωστόσο, για υψηλές περιοχές επικοινωνίας (μεγαλύτερες από 10 km), η ισχύς μετάδοσης πρέπει να είναι σταθερή 20 dBm με SF ίσο με 12. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι πολύ σημαντικές για τη σύλληψη του ενεργειακού μας μοντέλου: ορίζοντας μια απόσταση μετάδοσης LoRaWAN και χρησιμοποιώντας αποτελέσματα στις Εκόνες 36 και 37, παρέχεται η ιδέα για τη βέλτιστη ισχύ εξόδου και τον παράγοντα διασποράς που θα

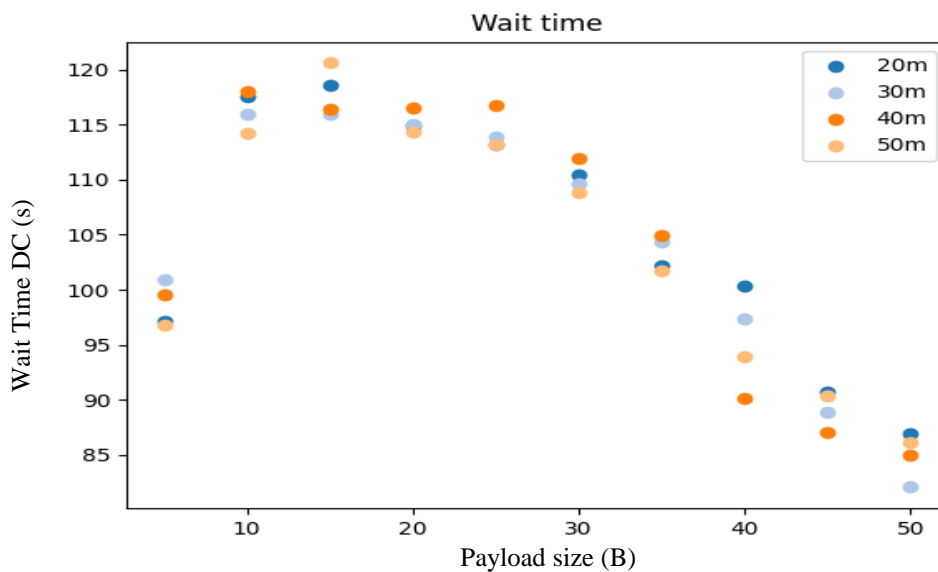
χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή, οι οποίες συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας από τον κόμβο του αισθητήρα.

Το μέγιστο εύρος επιτυγχάνεται με το SF ισούται με 12 και στις δύο περιπτώσεις (μπορούμε να φτάσουμε στα 4 km με 7 dBm και 6,1 km με 13 dBm). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι, εάν αυξηθεί το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου, η ενέργεια ανά χρήσιμο bit μειώνεται για υψηλές τιμές SF (για χαμηλές τιμές SF, η διακύμανση ωφέλιμου φορτίου δεν έχει σημαντική επίδραση στην ενέργεια ανά χρήσιμο bit). Για να επιτευχθούν τα 3 km με μέγεθος ωφέλιμου φορτίου ίσο με 4 byte, πρέπει να διαμορφώσουμε το SF στα 11 με ισχύ μετάδοσης 7 dBm που καταναλώνει 0,21 mJ / bit. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας ισχύ μετάδοσης 13 dBm, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το SF ίσο με 9 για να φτάσουμε στην ίδια απόσταση 3 km με κατανάλωση ενέργειας μόλις 0,08 mJ / bit.

Στο ερώτημα με το ίδιο SF τότε η απόσταση αν παίζει σημαντικό ρόλο ή όχι απαντάει το διάγραμμα Κατανάλωσης Ενέργειας που φαίνεται στην Εικόνα 38. Παρατηρείται ότι αν και είναι πολύ μικρές οι διαφορές για τόσο κοντινές αποστάσεις, για μεγαλύτερη απόσταση έχουμε και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, όπου και επιβεβαιώνεται από το διάγραμμα χρόνου αναμονής που φαίνεται στην Εικόνα 39, προκύπτει μικρότερος χρόνος αναμονής για μικρότερη απόσταση και κατ' επέκταση μικρότερο E_{Sleep} και συνολικά μικρότερη E_{Total} που καταναλώνει το σύστημα.



Εικόνα 38 Ενέργεια για διαφορετικές αποστάσεις



Εικόνα 39 Χρόνος Αναμονής για διαφορετικές αποστάσεις

Συνοπτικά, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που βρέθηκαν, παρατηρείται ότι υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ του εύρους επικοινωνίας LoRaWAN, του spreading factor και της ισχύος μετάδοσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η αύξηση της ισχύος μετάδοσης είναι πιο ενδιαφέρουσα από την άποψη της καταναλισκόμενης ενέργειας από την αύξηση του spreading factor.

6

Συμπεράσματα, Προοπτικές και μελλοντική εργασία

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Το IoT καθημερινά τείνει να εγκαθιδρυθεί στην κοινωνία και όσο περισσότερο εξελίσσεται η τεχνολογία τόσο πιο βασικό ρόλο θα παίζει και στην καθημερινή ζωή του πολίτη. Η δυνατότητα διασύνδεσης των συσκευών που βρίσκονται σε αποστάσεις μικρότερες ή ακόμα και μεγάλες όπως μελετήσαμε στην παρούσα εργασία, και η κατανάλωση ενέργειας για κάθε μία περίπτωση είναι ένα βασικό κομμάτι για την εξέλιξη της τεχνολογίας. Με άλλα λόγια ο τομέας αυτός είναι ένας τομέας που θα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο μέλλον.

Καθώς η κατανάλωση ενέργειας έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία για τις συσκευές IoT που χρησιμοποιούν ασύρματη τεχνολογία, έπρεπε να αναφέρουμε τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε σήμερα αλλά και φυσικά τους τρόπους για να τις αντιμετωπίσουμε. Για αυτόν τον λόγο αρχικά μετά από μια ιστορική αναδρομή, για μια καλύτερη κατανόηση του IoT αναφέρθηκαν κάποιες σημερινές εφαρμογές τους και τις προκλήσεις σε κοινωνικό, οικολογικό και τεχνολογικό επίπεδο που αντιμετωπίζουν. Στην συνέχεια μετά από μια ανασκόπηση στις διαθέσιμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των συσκευών σήμερα επικεντρωθήκαμε στα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί αρκετά στο μέλλον στο LoRa . Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι ασύρματης σύνδεσης αλλά αυτός στον οποίο δόθηκε μεγαλύτερη βάση είναι η ασύρματη σύνδεση με την χρήση του LoRa.

Σε αυτή την Διπλωματική, παρουσιάζεται ένα βελτιστοποιημένο ενεργειακό μοντέλο για κόμβους αισθητήρων που χρησιμοποιούν τεχνολογίες LoRa. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει την ανάλυση

διαφορετικών λειτουργιών και σεναρίων LoRaWAN για μια συγκεκριμένη εφαρμογή IoT που βασίζεται στην κατηγορία A της LoRaWAN.

Στην συνέχεια, για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου, παρατέθηκαν διαφορετικά σενάρια LoRaWAN και έχει οδηγηθεί το συμπέρασμα ότι η DER παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής του κόμβου. Επιπλέον, το προτεινόμενο ενεργειακό μοντέλο αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τρόπους LoRaWAN.

Αποδείχθηκε με αριθμητικά αποτελέσματα ότι η κατανάλωση ενέργειας αλλάζει με διαφορετικές παραμέτρους LoRaWAN όπως συντελεστής εξάπλωσης, ρυθμός κωδικοποίησης, μέγεθος ωφέλιμου φορτίου και εύρος ζώνης. Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων είναι πολύ σημαντική για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου του αισθητήρα. Επιπροσθέτως, αναφέρεται μέσω αυτής της έρευνας ότι υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ του εύρους επικοινωνίας LoRaWAN, του παράγοντα διάδοσης και της ισχύος μετάδοσης. Συγκεκριμένα, με την παραπάνω μελέτη διαπιστώνεται η εξαιρετική σημασία στην επιλογή των παραμέτρων LoRaWAN.

6.2 Μελλοντική Εργασία

Το IoT αποτελεί έναν τομέα της τεχνολογίας ο οποίος θα έχει καθοριστικό ρόλο στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Όπως κάθε τεχνολογία που βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, έτσι και το IoT έχει πληθώρα από ανοικτά ερευνητικά θέματα μπορούμε να καταπιαστούμε.

Στο κεφάλαιο 2 αναφέραμε κάποιες από αυτές τις προκλήσεις όμως αυτή στην οποία επικεντρωθήκαμε στην συγκεκριμένη εργασία ήταν η κατανάλωση ενέργειας. Συμπερασματικά, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, εκτός από το υλικό, θα πρέπει να βελτιωθούν οι μπαταρίες, οι μηχανισμοί αλλά και οι αλγόριθμοι που υπάρχουν. Η επιστήμη των υπολογιστών υπόσχεται να συμβάλει σε αυτή την κατεύθυνση μέσω των δεδομένων που παράγονται από τις συσκευές IoT.

Χαρακτηριστικά, η υπολογιστική νέφος έχει ήδη αρχίσει να ενσωματώνεται στο IoT, όπου μπορεί μέσω αυτού να γίνουν πολλοί δύσκολοι υπολογισμοί. Επομένως, η ενσωμάτωση της υπολογιστικής νέφος θα συμβάλει σημαντικά στην ώθηση του IoT, αφού όλο και περισσότεροι πολύπλοκοι αλγόριθμοι οι οποίοι δεν ήταν δυνατόν να εκτελεστούν στο IoT μέχρι σήμερα, θα μπορούν να εκτελούνται.

Παράρτημα:

Αναλυτική περιγραφή αρχικοποιήσεων του κώδικα για τα παραπάνω διαγράμματα

```
1 import numpy as np
2
3 ##### SIMULATION SPECIFIC PARAMETERS #####
4 start_with_fixed_sf = False
5 start_sf = 7 # Αρχικοποίηση για το διάγραμμα με διαφορετικά SF
6
7 scaling_factor = 0.1
8 transmission_rate_id = str(scaling_factor)
9 transmission_rate_bit_per_ms = scaling_factor*(12*8)/(1000) # 12*8 bits per hour (1 typical packet per hour)
10 simulation_time = 1000 * 30/scaling_factor
11 cell_size = 10
12 adr = True
13 confirmed_messages = True
14
15 payload_sizes = range(5, 55, 5) # Αρχικοποίηση για το διάγραμμα με διαφορετικά Air Time
16 path_loss_variances = [7.9] # [0, 5, 7.8, 15, 20]
17
18 MAC_IMPROVEMENT = False
19 num_locations = 50
20 num_of_simulations = 1000
21 locations_file = "Locations/"+{}_locations_{}_sim.pkl".format(num_locations, num_of_simulations)
22 results_file = "results/{}_{}_cnst_num_bytes.p".format(adr, confirmed_messages, transmission_rate_id)
23
24 ##### SIMULATION SPECIFIC PARAMETERS #####
25
26 ##### DEFAULT PARAMETERS #####
27 LOG_ENABLED = True
28 MAX_DELAY_BEFORE_SLEEP_MS = 500
29 PRINT_ENABLED = False
30 MAX_DELAY_START_PER_NODE_MS = np.round(simulation_time / 10)
31 track_changes = True
32 middle = np.round(cell_size / 2)
33 load_prev_simulation_results = True
34
35 ##### DEFAULT PARAMETERS #####
```



```

1 # Time parameters are expressed in ms
2
3 class LoRaParameters:
4     # Radio wakeup time from SLEEP mode
5
6     RADIO_OSC_STARTUP = 1
7     # Radio PLL lock and Mode Ready delay which can vary with the temperature
8     RADIO_SLEEP_TO_RX = 2
9     # Radio complete Wake-up Time with margin for temperature compensation
10    RADIO_WAKEUP_TIME = (RADIO_OSC_STARTUP + RADIO_SLEEP_TO_RX)
11    RECEIVE_DELAY1 = 1000
12    RECEIVE_DELAY2 = 2000
13    JOIN_ACCEPT_DELAY1 = 5000
14    JOIN_ACCEPT_DELAY2 = 6000
15
16    RX_WINDOW_1_DELAY = RECEIVE_DELAY1 - RADIO_WAKEUP_TIME
17    RX_WINDOW_2_DELAY = RECEIVE_DELAY2 - RADIO_WAKEUP_TIME
18
19    RX_JOIN_WINDOW_1_DELAY = JOIN_ACCEPT_DELAY1 - RADIO_WAKEUP_TIME
20    RX_JOIN_WINDOW_2_DELAY = JOIN_ACCEPT_DELAY2 - RADIO_WAKEUP_TIME
21
22    RX_1_NO_ACK_AIR_TIME = [170, 90, 47, 38, 21, 15] # do not change order (index == DR)
23    RX_1_NO_ACK_ENERGY_MJ = [6.4, 3.3, 1.6, 1.3, 0.7, 0.5] # do not change order (index == DR)
24
25    RX_2_ACK_AIR_TIME = 160
26    RX_2_ACK_ENERGY_MJ = 5.6
27
28    RX_2_NO_ACK_AIR_TIME = 40
29    RX_2_NO_ACK_ENERGY_MJ = 1.3
30
31    RX_2_DEFAULT_FREQ = 868525000
32    RX_2_DEFAULT_SF = 9
33
34    SPREADING_FACTORS = [12, 11, 10, 9, 8, 7] # Αρχικοποίηση για τα διάγραμμα με διαφορετικά SF για κάθε πείραμα
35
36    DEFAULT_CHANNELS = [868100000, 868300000, 868500000]
37    CHANNELS = [868100000, 868300000, 868500000, 868525000]
38    CHANNEL_DUTY_CYCLE_PROC = {868100000: 1, 868300000: 1, 868500000: 1, 868525000: 10} # in procent
39    CHANNEL_DUTY_CYCLE = {868100000: 1 / 100, 868300000: 1 / 100, 868500000: 1 / 100,
40    | | | | | 868525000: 10 / 100} # not in procent
41
42    JOIN_TX_TIME_MS = 160
43    JOIN_TX_ENERGY_MJ = 9
44
45    # Time and Energy consumption of RX1 after join request
46    # when a DL message is received
47    JOIN_RX_TIME_MS = 120

```

```

1 import numpy as np
2
3
4 class Config:
5     LOG_ENABLED = True
6     MAX_DELAY_BEFORE_SLEEP_MS = 500
7     SIMULATION_TIME = 1000
8     PRINT_ENABLED = False
9     CELL_SIZE = 500
10    MAX_DELAY_START_PER_NODE_MS = np.round(SIMULATION_TIME / 10)
11    num_nodes = 100 # Αρχικοποίηση για το διάγραμμα με διαφορετικά nodes
12    track_changes = True
13

```

```
15
16 v def tp_to_rss(self, indoor: bool, tp_dBm: int, d: float):
17     bpl = 0 # building path loss
18     if indoor:
19         bpl = np.random.choice([17, 27, 21, 30]) # according Rep. ITU-R P.2346-0
20     Lpl = 10 * self.gamma * np.log10(d / self.d0) + np.random.normal(self.Lpld0, self.std) + bpl
21     if Lpl < 0:
22         Lpl = 0
23     return tp_dBm - self.GL - Lpl
24
25
26 class COST231:
27
28     def __init__(self, fc, W=None, b=None, hr=None, hm=2, phi=None, hb=15, metropolitan_center=True):
29
30         # default described in Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: Theory
31         # and Practice no data about propagation path on page 87
32         roof_height = round(np.random.uniform(0, 1)) * 3
33         num_of_floors = round(2 + round(np.random.uniform(0, 1)) * (5 - 2))
34         if hr is None:
35             hr = 3 * num_of_floors + roof_height
36         if phi is None:
37             phi = 90
38         if b is None:
39             b = np.random.uniform(20, 50) # Αρχικοποίηση για το διάγραμμα με διαφορετική απόσταση
40         if W is None:
41             W = b / 2
42
43         # fc Carrier Frequency(800-2000MHz)
44         # W Street Width(m)
45         # b distance b/w building(m)
46         # hr height of roof
47         # hm mobile antenna ht(1-3m)
48         # phi incident angle related to street(0-90degree)
49         # hb base station ant. ht(4-50m)
50         # d Link distance
51
52         # Formulas based on "Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: Theory
53         # and Practice" and https://www.itu.int/dms\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-6-201202-S!PDF-E.pdf
54
55         # The basic propagation loss, Lb, is calculated as the sum of three components:
56         # 1. the free-space loss, L0,
57         # 2. the roof-to-street loss, Lrts, produced in the street where the receiver is located,
58         # as result of the diffraction on the next rooftop;
59         # 3. and the multiscreen diffraction loss, Lmsd, produced by multiple diffractions on the building rooftops
```

```
1 # Time parameters are expressed in ms
2
3 class LoRaParameters:
4     # Radio wakeup time from SLEEP mode
5
6     RADIO_OSC_STARTUP = 1
7     # Radio PLL lock and Mode Ready delay which can vary with the temperature
8     RADIO_SLEEP_TO_RX = 2
9     # Radio complete Wake-up Time with margin for temperature compensation
10    RADIO_WAKEUP_TIME = (RADIO_OSC_STARTUP + RADIO_SLEEP_TO_RX)
11    RECEIVE_DELAY1 = 1000
12    RECEIVE_DELAY2 = 2000
13    JOIN_ACCEPT_DELAY1 = 5000
14    JOIN_ACCEPT_DELAY2 = 6000
15
16    RX_WINDOW_1_DELAY = RECEIVE_DELAY1 - RADIO_WAKEUP_TIME
17    RX_WINDOW_2_DELAY = RECEIVE_DELAY2 - RADIO_WAKEUP_TIME
18
19    RX_JOIN_WINDOW_1_DELAY = JOIN_ACCEPT_DELAY1 - RADIO_WAKEUP_TIME
20    RX_JOIN_WINDOW_2_DELAY = JOIN_ACCEPT_DELAY2 - RADIO_WAKEUP_TIME
21
22    RX_1_NO_ACK_AIR_TIME = [170, 90, 47, 38, 21, 15] # do not change order (index == DR)
23    RX_1_NO_ACK_ENERGY_MJ = [6.4, 3.3, 1.6, 1.3, 0.7, 0.5] # do not change order (index == DR)
24
25    RX_2_ACK_AIR_TIME = 160
26    RX_2_ACK_ENERGY_MJ = 5.6
27
28    RX_2_NO_ACK_AIR_TIME = 40
29    RX_2_NO_ACK_ENERGY_MJ = 1.3
30
31    RX_2_DEFAULT_FREQ = 868525000
32    RX_2_DEFAULT_SF = 9
33
34    SPREADING_FACTORS = [12, 11, 10, 9, 8, 7] # Αρχικοποίηση για το διάγραμμα με διαφορετικά SF για κάθε πείραμα
35
36    DEFAULT_CHANNELS = [868100000, 868300000, 868500000]
37    CHANNELS = [868100000, 868300000, 868500000, 868525000]
38    CHANNEL_DUTY_CYCLE_PROC = {868100000: 1, 868300000: 1, 868500000: 1, 868525000: 10} # in procent
39    CHANNEL_DUTY_CYCLE = {868100000: 1 / 100, 868300000: 1 / 100, 868500000: 1 / 100,
40    | | | | | 868525000: 10 / 100} # not in procent
41
42    JOIN_TX_TIME_MS = 160
43    JOIN_TX_ENERGY_MJ = 9
44
45    # Time and Energy consumption of RX1 after join request
46    # when a DL message is received
```


Βιβλιογραφία- Αναφορές

- [1]. https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
- [2]. Dr. Ovidiu Vermesan, Peter Friess (2013, January). Internet of Things - Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems. Denmark: River Publishers.
- [3]. <https://www.youtube.com/watch?v=T3dGLqZrjIQ&list=PLvVOZcBqIHvnlXJJWaUjHIMb1Xg8aGCif&index=2>
- [4]. Wonsik Lee, Seoungjae Cho, Phuong Chu, Hoang VuM Sumi Helal, Wei Song, Young-Sik Jeong, Kyungeun Cho. (2016, October). Automatic agent generation for IoT-based smart house simulator.
- [5]. IWen-Tsai Sunga, SUNG-Jubg Hsiao. (2020, January). The application of thermal comfort control based on Smart House System of IoT.
- [6]. Nam K Giang, Rodger Lea, Michael Blackstock, (2016, December). On Building Smart City IoT Applications: a Coordination-based Perspective. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.1145/3009912.3009919>
- [7]. George Suciu, Victor Suciu, Alexandru Martian, Razvan Craciunescu, Alexandru Vulpe, Ioana Marcu, Simona Halunga, Octavian Fratu (2015). Big Data, Internet of Things and Cloud Convergence – An Architecture for Secure E-Health. Ανάκτηση από <https://link.springer.com/article/10.1007/s10916-015-0327-y>
- [8]. Noemi Scarpato, Alessandra Pieroni, Luca Di Nunzio and Francesca Fallucchi (2017, December). ‘E-health-IoT Universe: A Review.
- [9]. ‘Dutton, W. H. (2014 , May). ‘Putting things to work: social and policy challenges for the Internet of things.
- [10]. S. Balaji, K. N. (2019). ‘IoT Technology, Applications and Challenges: A Contemporary Survey. Ανάκτηση από <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-019-06407-w>
- [11]. https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
- [12]. <https://el.wikipedia.org/wiki/NFC>
- [13]. B.G.Gopal, P.G.Kuppusamy. (2015, January). A Comparative Study on 4G and 5G Technology for Wireless Applications.
- [14]. LoRa Alliance®: <https://lora-alliance.org>
- [15]. Martin Bor, John Vidler, Utz Roedig. (2016, February). LoRa for the Internet of Things.
- [16]. Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Nikolaos Papachristos. (2019, February). Performance evaluation of LoraWan physical layer integration on IoT devices. Thessaloniki: IEEE.
- [17]. E B’aumker, A Miguel Garcia and P Woias. (2019). Minimizing power consumption of LoRa® and LoRaWAN for low-power wireless sensor nodes.

- [18]. Christos Bouras, Apostolos Gkamas, Spyridon Aniceto Katsampiris Salgado, Vasileios Kokkinos (2019). Comparison of LoRa Simulation Environments.
- [19]. Gilles Callebaut, Geoffrey Ottoy, Liesbet Van der Perre. (2019, April). Cross-Layer Framework and Optimization for Efficient Use of the Energy Budget of IoT Nodes. Marrakesh: IEEE.
- [20]. Ram, P. (2018). LPWAN, LoRa, LoRaWAN and the Internet of Things. Ανάκτηση από <https://medium.com/coinmonks/lpwan-lora-lorawan-and-the-internet-of-things-aed7d5975d5d>
- [21]. <http://lora.tti.unipa.it>
- [22]. <https://flora.aalto.fi>
- [23]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3199902.3199913>
- [24]. <https://www.nsnam.org/about/>
- [25]. Slabicki, M., Premasankar, G., Di Francesco, M., Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments, NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Taipei, 2018, pp. 1-9.doi: 10.1109/NOMS.2018.8406255
- [26]. Lluís Casals, Bernat Mir, Rafael Vidal, Carles Gomez. (2017, October). Modeling the Energy Performance of LoRaWAN.
- [27]. ‘Taoufik Bouguera Jean-Francois Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Guillaume Andrieux. (2018, November). Energy consumption modeling for communicating sensors using LoRa technology. Sweden: IEEE.
- [28]. Madiyar Nurgaliyev, Ahmet Saymbetov, Yevhen Yashchysyn, Nurzhigit Kuttybay, Didar Tukymbekov (2020, February). Prediction of energy consumption for LoRa based wireless sensors network.
- [29]. ‘AN1200.13, D. G. (2013 , July). SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem. Semtech Corporation.
- [30]. Hafiz Husnain Raza Sherazi, Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia (2018, May). When Renewable Energy Meets LoRa: A Feasibility Analysis on Cable-less Deployments. IEEE.
- [31]. <https://www.thethingsnetwork.org/article/how-spreading-factor-affects-lorawan-device-battery-life>
- [32]. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Randa Jaouadi, Guillaume Andrieux. (2018, June). Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN.
- [33]. LoRaWAN® Specification v1.1. Ανάκτηση από https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1/
- [34]. SX1272 Development Kit User Guide. Ανάκτηση από <https://www.semtech.com>
- [35]. G. Callebaut, “LoRaWAN Network Simulator,” doi: 10.5281/zenodo.1217124. [Online]. Available: <https://github.com/GillesC/LoRaEnergySim/tree/v0.1.0>
- [36]. Martin Bor, Utz Roedig, Thiemo Voigt, Juan M. Alonso (2016, November), “Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?”, Malta.
- [37]. Jin Cao, Pu Yu, Maode Ma, Weifeng Gao, (2018, June). Fast Authentication and Data Transfer Scheme for Massive NB-IoT Devices in 3GPP 5G Network. IEEE

