

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μεταπτυχιακή Διατριβή **Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**



Μελέτη Δικτύων IoT Με Χρήση Προσομοιωτή OMnet++

Νικόλαος Μαραγκός

Επιβλέπων Καθηγητής
Σωτήριος Γούδος

Δεκέμβριος 2023

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών

Μελέτη Δικτύων IoT Με Χρήση Προσομοιωτή OMnet++

Νικόλαος Μαραγκός

**Επιβλέπων Καθηγητής
Σωτήριος Γούδος**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή υποβλήθηκε
προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για απόκτηση

μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών
στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας

από τη Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών
του Ανοικτού Πανεπιστημίου Κύπρου

Δεκέμβριος 2023

Περίληψη

Η εξέλιξη και ταχεία ανάπτυξη του διαδικτύου διευκόλυνε την ανάπτυξη και επέκταση παγκοσμίως του διαδικτύου των πραγμάτων. Αυτή η εξάπλωση είχε εντυπωσιακά θετική επίδραση στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων, στην βιομηχανία, επιστήμες και έρευνα καθώς και σε κάθε τομέα δραστηριότητας. Παρόλα αυτά η ασύρματη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις και σε αποστάσεις που δεν καλύπτονται από τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ήταν ένα μεγάλο ζήτημα. Το θέμα αυτό διευκολύνεται με την εφαρμογή της τεχνολογίας LoRa. Η εργασία αυτή αποσκοπεί σε μια γενικότερη παρουσία του διαδικτύου των πραγμάτων, την εφαρμογή της τεχνολογίας LoRa σε δίκτυα του διαδικτύου των πραγμάτων και την παρουσίαση του προσομοιωτή OMNeT++ για την προσομοίωση τοπολογιών δικτύων όπου εφαρμόζεται τη τεχνολογία LoRa. Το πρώτο κεφάλαιο της διατριβής αναφέρεται στο διαδίκτυο των πραγμάτων, το δεύτερο κεφάλαιο στην τεχνολογία LoRa και την τρίτη στον προσομοιωτή OMNeT++

Summary

The evolution and rapid growth of the internet has facilitated the worldwide development and expansion of internet of things. This spread has had a remarkably positive effect on people's daily lives, industry, science and research as well as in every field of activity. However, the wireless communication over long distances, that cannot be covered by telecommunications networks, has been a significant issue. This matter comes to be facilitated by the application of LoRa technology. This thesis aims to introduce a more general presentation of the Internet of Things, the application of LoRa technology in Internet of Things networks and the presentation of the OMNeT++ simulator for the simulation of network topologies where LoRa technology is applied. The first chapter of the thesis refers to the internet of things, the second chapter to LoRa technology and the third to the OMNeT++ simulator.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα Δρ. Σωτήριο Γούδο, την Δρ. Αδαμαντία Περατικού, την κυρία Μαριάννα Προδρόμου, τους καθηγητές μου και το ακαδημαϊκό προσωπικό του Ανοικτού Πανεπιστήμιου της Κύπρου (ΑΠΚυ) για την υποστήριξή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο ΑΠΚυ.

Σας ευχαριστώ.

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 7 |
| 1.1 | Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Internet of Things..... | 7 |
| 1.2 | Έξυπνα Αντικείμενα και Έξυπνα Περιβάλλοντα..... | 8 |
| 1.3 | Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων στην βιομηχανία και η επικοινωνία μηχανής προς μηχανή.... | 9 |
| 1.4 | Πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων..... | 10 |
| 1.5 | Δίκτυα IoT..... | 13 |
| 1.5.1 | Αρχιτεκτονική και Μοντέλα Αναφοράς..... | 13 |
| 1.5.2 | Δίκτυα και Συνδεσιμότητα..... | 15 |
| 1.6 | Τα Δομικά Στοιχεία του διαδικτύου των πραγμάτων..... | 19 |
| 1.6.1 | Ενσωματωμένα Συστήματα – Embedded systems..... | 19 |
| 1.6.2 | Αισθητήρες - Sensors..... | 20 |
| 1.6.3 | Ενεργοποιητές - Actuators..... | 23 |
| 1.7 | Εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων στο περιβάλλον, έρευνα, επιστήμη και καθημερινή ζωή των χρηστών..... | 23 |
| 1.8 | Τοπολογίες Δικτύων IoT..... | 24 |
| 2 | Η Τεχνολογία LoRa | 27 |
| 2.1 | Τα Ασύρματα Πρωτόκολλα IoT..... | 28 |
| 2.2 | Λειτουργίες Κοινής Χρήσης Πολυμέσων..... | 29 |
| 2.2.1 | FDM (Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας)..... | 29 |
| 2.2.2 | TDM (Πολλαπλή διαίρεση χρόνου)..... | 30 |
| 2.2.3 | Φάσμα Διασποράς..... | 30 |
| 2.3 | Η Διαμόρφωση LoRa (φυσικό στρώμα)..... | 31 |
| 2.3.1 | Το Chirp..... | 32 |
| 2.3.2 | Κρυπτογράφηση Δεδομένων..... | 32 |
| 2.4 | Κατηγορίες Τερματικών Συσκευών (end users) LoRaWAN..... | 33 |
| 2.4.1 | Κατηγορία Α (Όλες οι συσκευές): ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας..... | 33 |
| 2.4.2 | Κατηγορία Β (Beacon): προγραμματισμένη υποδοχή (slot) λήψης..... | 34 |
| 2.4.3 | Κατηγορία Γ (Συνεχής): Συνεχής ακρόαση..... | 35 |
| 2.4.4 | Σύνοψη των Κατηγοριών Τελικών Συσκευών..... | 36 |
| 2.5 | Κανάλια..... | 37 |
| 2.6 | Επίπεδα Πρωτοκόλλου LoRaWAN..... | 38 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.7 | Μετάδοση και διάδοση ραδιοκύματος..... | 39 |
| 2.8 | Απόσταση, εξασθένηση σήματος και συχνότητα στα δίκτυα LoRa..... | 40 |
| 2.9 | Τοπολογία Δικτύων LoRa..... | 40 |
| 2.10 | Διόρθωση σφαλμάτων κατά την λήψη..... | 41 |
| 3 | Ο Προσομοιωτής Omnet..... | 42 |
| 3.1 | προσομοίωση | 43 |
| | Βιβλιογραφία | 51 |
| A | Τίτλος Παραρτήματος | A-1 |
| A.1 | Συντομογραφίες | A-1 |
| A.2 | Εικόνες | A-4 |
| A.1 | Πίνακες | A-5 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ευρεία επικράτηση του διαδικτύου μετά το 2000 επέτρεψε την ταχύτατη εξέλιξη του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Το διαδίκτυο των πραγμάτων εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς όπως τηλε-ιατρική, επιστήμη, έρευνα, στην βιομηχανία, περιβάλλον κ.α.

1.1 Το διαδίκτυο των πραγμάτων – Internet of Things

Το διαδίκτυο των πραγμάτων ευρέως αποδεκτό με τον όρο IoT (Internet of Things) Αποτελεί πλέον μια από τις πιο κυρίαρχες τεχνολογίες παγκοσμίως. Ετερογενείς συσκευές με διαφορετικά χαρακτηριστικά και λειτουργικά προγράμματα είναι συνδεδεμένες στο τοπικό δίκτυο ή στο διαδίκτυο (ίντερνετ) και ανταλλάσσουν δεδομένα με ένα κεντρικό εξυπηρετητή (server) ή μεταξύ τους.

Το διαδίκτυο των πραγμάτων γνωστό και ως IoT αποτελείται συνήθως από χαμηλού κόστους αισθητήρες (sensors), ενεργοποιητές (actuators), συσκευές περιορισμένων δυνατοτήτων και πόρων και γενικότερα χαρακτηρίζονται ως αντικείμενα (things/objects). Τα αντικείμενα αυτά είναι διασκορπισμένα στον χώρο, είτε αυτός ο χώρος είναι μια αστική περιοχή (ή μεγάλη αστική περιοχή) είτε μεγάλης έκτασης αγροτική περιοχή. Έχουν την δυνατότητα δικτύωσης και σύνδεσης με το διαδίκτυο ή/και με τοπικό δίκτυο (π.χ. LAN).

Το διαδίκτυο των πραγμάτων χαρακτηρίζεται ως

- (i) προσανατολισμένο στο ίντερνετ (Internet oriented) δίνοντας έμφαση στην χρήση και εκμετάλλευση της IP δικτυακής υποδομής και στην επίτευξη αποτελεσματικά κατάλληλης σύνδεσης μεταξύ συσκευών με την χρήση εύχρηστων και ελαφρών πρωτοκόλλων ώστε να εκπληρώσει τις απαιτούμενες απαιτήσεις

- (ii) προσανατολισμένο στα αντικείμενα (πράγματα) εστιάζοντας στα φυσικά αντικείμενα και μέσα ώστε να ενσωματωθούν και αναγνωριστούν στον εικονικό κόσμο γνωστό ως κυβερνοχώρο (cyber world).
- (iii) σημασιολογικά προσανατολισμένο, στοχεύοντας στη χρήση σημασιολογικών τεχνολογιών, κατανοώντας τα αντικείμενα και τα δεδομένα τους για την αναπαράσταση, αποθήκευση, διασύνδεση και διαχείριση του τεράστιου όγκου της παρεχόμενης πληροφορίας.

1.2 Έξυπνα αντικείμενα και έξυπνα περιβάλλοντα

Τα έξυπνα αντικείμενα είναι φυσικά αντικείμενα των οποίων ο επεξεργαστής, το σύστημα αποθήκευσης δεδομένων, οι αισθητήρες και η δυνατότητα σύνδεσης με δίκτυο ή το διαδίκτυο είναι ενσωματωμένα μέσα στα αντικείμενα.

Κάποια αντικείμενα μπορούν να επηρεάσουν το περιβάλλον τους όπως οι ενεργοποιητές. Η γενική ιδέα των έξυπνων πραγμάτων είναι ότι κάθε φυσικό αντικείμενο – πράγμα μπορεί να μετατραπεί σε έξυπνο. Δηλαδή απλά καθημερινά αντικείμενα όπως το ρολόι χειρός ή ένα στυλό μπορούν να μετατραπούν σε έξυπνα αντικείμενα εκτελώντας ένα σύνολο από δραστηριότητες. Η ικανότητα ενός έξυπνου αντικειμένου να επικοινωνεί με άλλα αντικείμενα και με το περιβάλλον τους αποτελεί βασική ιδέα του διαδικτύου των πραγμάτων.

Στενά συνδεδεμένα με τα έξυπνα αντικείμενα είναι τα έξυπνα περιβάλλοντα (smart environments). Ένα σύνολο από έξυπνα αντικείμενα σε εσωτερικό χώρο όπως π.χ. αυτοκίνητο, σπίτι, κ.α. ή εξωτερικά όπως περιοχή πόλης ή ολόκληρη πόλη δημιουργούν ένα κοινό χώρο σε έξυπνο περιβάλλον. Γενικότερα οι αισθητήρες (sensors) αποτελούν τον κύριο παράγοντα σε ένα έξυπνο περιβάλλον όπου συλλέγουν πληροφορία από το περιβάλλον και την διαθέτουν στις σχετιζόμενες εφαρμογές (applications) και υπηρεσίες (services).

1.3 Το διαδίκτυο των πραγμάτων στην βιομηχανία και η επικοινωνία μηχανής προς μηχανή

Η παρουσία του διαδικτύου των πραγμάτων στην βιομηχανία, είχε προηγηθεί της εμφάνισης και ταχείας εξάπλωσης τους για γενική χρήση από τους απλούς καθημερινούς χρήστες.

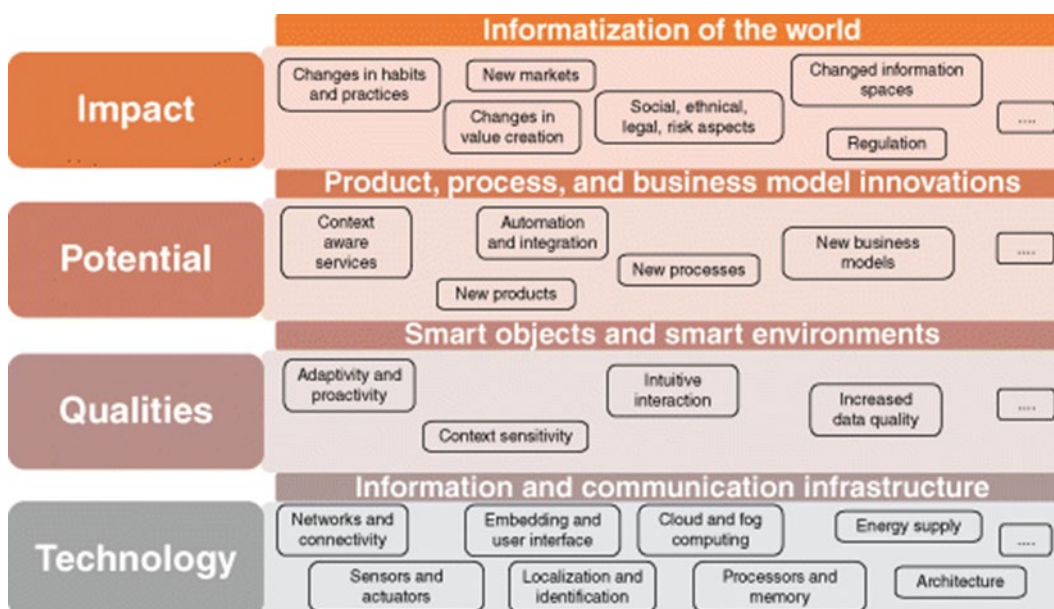
Ο πρόδρομος του διαδικτύου των πραγμάτων αναφερόμενος ως μηχανή προς μηχανή (Machine to Machine - M2M) προηγήθηκε του διαδικτύου των πραγμάτων. Η μηχανή προς μηχανή επικοινωνία αναφέρεται ως η απευθείας ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών/μηχανισμών χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε επικοινωνιακό κανάλι χωρίς απαραίτητα την ανθρώπινη επέμβαση ή παρεμβολή.

Η επικοινωνία M2M μπορεί να περιλαμβάνει εγκαταστάσεις βιομηχανικής παραγωγής, επιτρέποντας σε έναν αισθητήρα ή μετρητή να μεταδίδει τα δεδομένα που καταγράφει (π.χ. θερμοκρασία, απόδοση και επίπεδο αποθέματος) σε λογισμικό εφαρμογής που μπορεί να τα επεξεργαστεί περαιτέρω (π.χ. προσαρμόζοντας μια βιομηχανική διαδικασία με βάση τεχνικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία ή η ενεργοποίηση νέων διαδικασιών, όπως η υποβολή παραγγελιών για την αναπλήρωση του αποθέματος). Αυτή η επικοινωνία στόχευε στην παρακολούθηση απομακρυσμένων μηχανών από τις οποίες λαμβάνονταν δεδομένα, επεξεργάζονταν σε κάποιο κεντρικό σταθμό και τελικά αναμεταδόθηκαν σε αυτές τις μηχανές με προσαρμοσμένες παραμέτρους, εάν χρειαζόταν. Ένα βασικό κίνητρο για πολλούς οργανισμούς είναι να μειώσουν το κόστος διαχείρισης υπηρεσιών μέσω απομακρυσμένων διαγνωστικών, απομακρυσμένης αντιμετώπισης προβλημάτων, απομακρυσμένων ενημερώσεων και άλλων απομακρυσμένων δυνατοτήτων που μειώνουν την ανάγκη ανάπτυξης προσωπικού εξυπηρέτησης πεδίου. Το IoT φιλοξενεί τις ίδιες συσκευές/στοιχεία/μηχανήματα με τις εφαρμογές M2M, αλλά και πολύ μικρές (χαμηλής κατανάλωσης), προσωπικές και φθηνές συσκευές με μερικές φορές πολύ περιορισμένη λειτουργικότητα που μπορεί να μην είναι σε θέση να δικαιολογήσει μια αποκλειστική μονάδα υλικού M2M. Αν και οι επικοινωνίες IoT και M2M έχουν απομακρυσμένη πρόσβαση σε μηχανήματα, ή σε πιο γενικούς όρους «συσκευές», από κοινού, δεν υπάρχουν άλλες σημαντικές ομοιότητες. Για παράδειγμα, οι παραδοσιακές λύσεις M2M βασίζονται συνήθως σε επικοινωνίες από σημείο σε σημείο χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες μονάδες υλικού και ειδικά πρωτόκολλα. Αντίθετα, οι λύσεις IoT εξαρτώνται κατά

κύριο λόγο από δίκτυα που βασίζονται σε IP για τη διασύνδεση δεδομένων συσκευής σε μια πλατφόρμα cloud ή ενδιάμεσου λογισμικού, κυρίως χρησιμοποιώντας κοινά/ανοικτά πρωτόκολλα (προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη διαλειτουργικότητα, με την έννοια μιας απομακρυσμένης συσκευής συνδεδεμένης σε κάποιο κεντρικό κόμβο, όπως καθώς και ιδιαίτερη διαλειτουργικότητα μεταξύ των ίδιων των συσκευών). Μια άλλη διαφορά είναι ότι οι λύσεις M2M προσφέρουν απομακρυσμένη πρόσβαση σε δεδομένα μηχανής που παραδοσιακά στοχεύουν σε λύσεις σημείου σε εφαρμογές διαχείρισης υπηρεσιών. Στο παρελθόν, αυτά τα δεδομένα σπάνια, έως ποτέ, ενσωματώνονταν σε εταιρικές εφαρμογές για να βοηθήσουν στη βελτίωση της συνολικής επιχειρηματικής απόδοσης. Τέλος, η παράδοση δεδομένων που βασίζεται στο IoT περιλαμβάνει όλο και περισσότερο υπηρεσίες cloud που επιτρέπουν την πρόσβαση από οποιαδήποτε εγκεκριμένη εταιρική εφαρμογή, ενώ το M2M συνήθως χρησιμοποιεί άμεση επικοινωνία από σημείο σε σημείο. Η αρχιτεκτονική που βασίζεται σε σύννεφο καθιστά επίσης το IoT εγγενώς πιο επεκτάσιμο, εξαλείφοντας την ανάγκη για σταδιακές ενσύρματες συνδέσεις ή εγκαταστάσεις καρτών SIM. Το M2M αναφέρεται συχνά ως «υδραυλικά», ενώ το IoT θεωρείται ως ένας καθολικός ενεργοποιητής. Θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι τα εννοιολογικά όρια και τα οράματα του IoT και του M2M αλληλεπικαλύπτονται όλο και περισσότερο. Οι ενδείξεις αυτού περιλαμβάνουν ότι πιο πρόσφατες επικοινωνίες M2M έχουν εξελιχθεί σε ένα σύστημα δικτύων που μεταδίδει δεδομένα σε προσωπικές συσκευές. Υπό αυτή την έννοια, η επικοινωνία M2M εκμεταλλεύεται ολοένα και περισσότερο την επέκταση των δικτύων IP παγκοσμίως, μεταβαίνοντας από συνδέσεις ιδιόκτητου στυλ από σημείο σε σημείο σε επικοινωνίες πολλαπλών σημείων που βασίζονται σε IP. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εστίαση των θεμάτων M2M τείνει να είναι περισσότερο στο επίπεδο τεχνικής υποδομής. Αντίθετα, το αναδυόμενο IoT έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος. Το IoT απαιτεί την ενσωμάτωση δεδομένων συσκευών και αισθητήρων με επιχειρηματική ευφυΐα, αναλυτικά στοιχεία και άλλες εταιρικές εφαρμογές προκειμένου να επιτευχθούν πολυάριθμα οφέλη σε όλες τις μεταποιητικές επιχειρήσεις με ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση προϊόντων, διαδικασιών και επιχειρηματικών μοντέλων.

1.4 Πλαίσιο του διαδικτύου των πραγμάτων

Το διαδίκτυο των πραγμάτων περιλαμβάνει μια ευρεία περιοχή θεμάτων οικονομικών, τεχνικών και κοινωνικών όπου καλύπτεται και εφαρμόζεται σε αυτά τα θέματα και επιστήμες. Η περιοχή των θεμάτων αυτών χαρακτηρίζεται ως «Πλαίσιο Διαδικτύου Πραγμάτων» τεσσάρων επιπέδων.



Εικόνα 1.1: Πλαίσιο Internet of Things.

Στον πυρήνα, οι σύγχρονες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών αποτελούν την τεχνική βάση του ΙοΤ (όπως παρουσιάζεται στο επίπεδο Technology).

- (i) Το ΙοΤ δημιουργεί ένα δίκτυο από φυσικά αναγνωρίσιμα αντικείμενα (πράγματα). Η δικτύωση, και συνεπώς η ικανότητα επικοινωνίας, δεν αναφέρεται μόνο στους ανθρώπους που συμμετέχουν αλλά και στα αντικείμενα (ή πράγματα) που εμπλέκονται. Αυτά τα πράγματα είναι εξοπλισμένα με μικροσκοπικούς επεξεργαστές και ενεργοποιητές, (actuators) για παράδειγμα, μηχανικά στοιχεία, ελεγκτές θερμοκρασίας και συσκευές εξόδου ήχου ή βίντεο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των αντικειμένων και του περιβάλλοντος. Αυτό επιτρέπει την προσαρμογή αντικειμένων και περιβαλλόντων στις ανάγκες μας, την αλληλεπίδραση με την κατάσταση και την παροχή πληροφοριών και υπηρεσιών σύμφωνα με συγκεκριμένες απαιτήσεις της κατάστασης, δηλαδή γίνονται «έξυπνα αντικείμενα» και «έξυπνα περιβάλλοντα» (όπως παρουσιάζονται στο επίπεδο Qualities).
- (ii) Η αυτόματη αναγνώριση μέσω RFID θεωρείται συχνά ως η βάση για το ΙοΤ. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές επεκτείνουν τη λειτουργικότητα καταγράφοντας καταστάσεις και την εκτέλεση ενεργειών ή επιδράσεων στην πραγματικότητα. Αυτό οδηγεί σε δυνατότητες για νέες υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων καταναλωτικών προϊόντων,

καθώς και νέων επιχειρηματικών διαδικασιών και επιχειρηματικών μοντέλων (που καλύπτονται στο επίπεδο Potential).

(iii) Τα προϊόντα για τους καταναλωτές, για παράδειγμα, μπορεί να διαθέτουν και να παρέχουν μεγάλο όγκο πληροφοριών και μπορούν επίσης να προσφέρουν στους πελάτες πρόσθετες υπηρεσίες που σχετίζονται με το πλαίσιο κατά τη φάση μετά την πώληση. Το IoT παρέχει επίσης υψηλότερο επίπεδο ποιότητας δεδομένων για τις επιχειρηματικές διαδικασίες, επιτρέποντας στους οργανισμούς να ανταποκρίνονται πιο γρήγορα και σωστά στα γεγονότα και μπορεί να συμβάλει σε βελτιωμένη αποτελεσματικότητα, ακρίβεια και οικονομικά οφέλη.

Αυτές οι δυνατότητες θα οδηγήσουν σε διάφορες καινοτομίες προϊόντων, διαδικασιών και επιχειρηματικών μοντέλων. Καθώς αυτές οι καινοτομίες επηρεάζουν την καθημερινή μας ζωή, έχουν μεγάλο αντίκτυπο στα άτομα, την κοινωνία, τις αγορές και τις εταιρείες (που καλύπτονται στο επίπεδο 4). Από τη μία πλευρά, οι εταιρείες βρίσκονται υπό πίεση να προσαρμοστούν στην αλλαγή της δημιουργίας αξίας και των δομών της αγοράς, καθώς και στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των πελατών. Από την άλλη πλευρά, δίνεται η ευκαιρία στις καινοτόμες εταιρείες να αναπτύξουν νέα προϊόντα, διαδικασίες και επιχειρηματικά μοντέλα που τους επιτρέπουν να ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες των πελατών τους και έτσι να συμμετέχουν στο σχεδιασμό ενός ηλεκτρονικού κόσμου. Τα αποτελέσματα είναι πολλαπλά και όχι πάντα αποκλειστικά θετικά για όλους.

Το IoT θέτει σοβαρές προκλήσεις για τις εταιρείες, τα άτομα και τις κοινωνίες στο σύνολό τους. Οι κύριες προκλήσεις και ζητήματα περιλαμβάνουν

- (i) ασφάλεια, απόρρητο, διαλειτουργικότητα (interoperation) και πρότυπα.
- (ii) νομικά, κανονιστικά (regulations) και δικαιώματα
- (iii) αναδυόμενες οικονομίες και κοινωνικές επιπτώσεις, για παράδειγμα, ορισμένες θέσεις εργασίας θα εξαφανιστούν, νέες θέσεις εργασίας θα προκύψουν, περισσότερη χρήση της τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερη ανθρώπινη και χειρωνακτική αλληλεπίδραση, διαφορετικές μορφές κοινωνικής ζωής μπορεί να εξελιχθούν, και ούτω καθεξής. [1]

1.5 Δίκτυα IoT

1.5.1 Αρχιτεκτονική και Μοντέλα Αναφοράς

Η σύγχρονη βιβλιογραφία παρουσιάζει και καλύπτει ένα πλήθος αρχιτεκτονικών προτάσεων, μοντέλων αναφοράς και τεχνικών περιγραφών της τρέχουσας ή προβλεπόμενης κατάστασης του IoT.

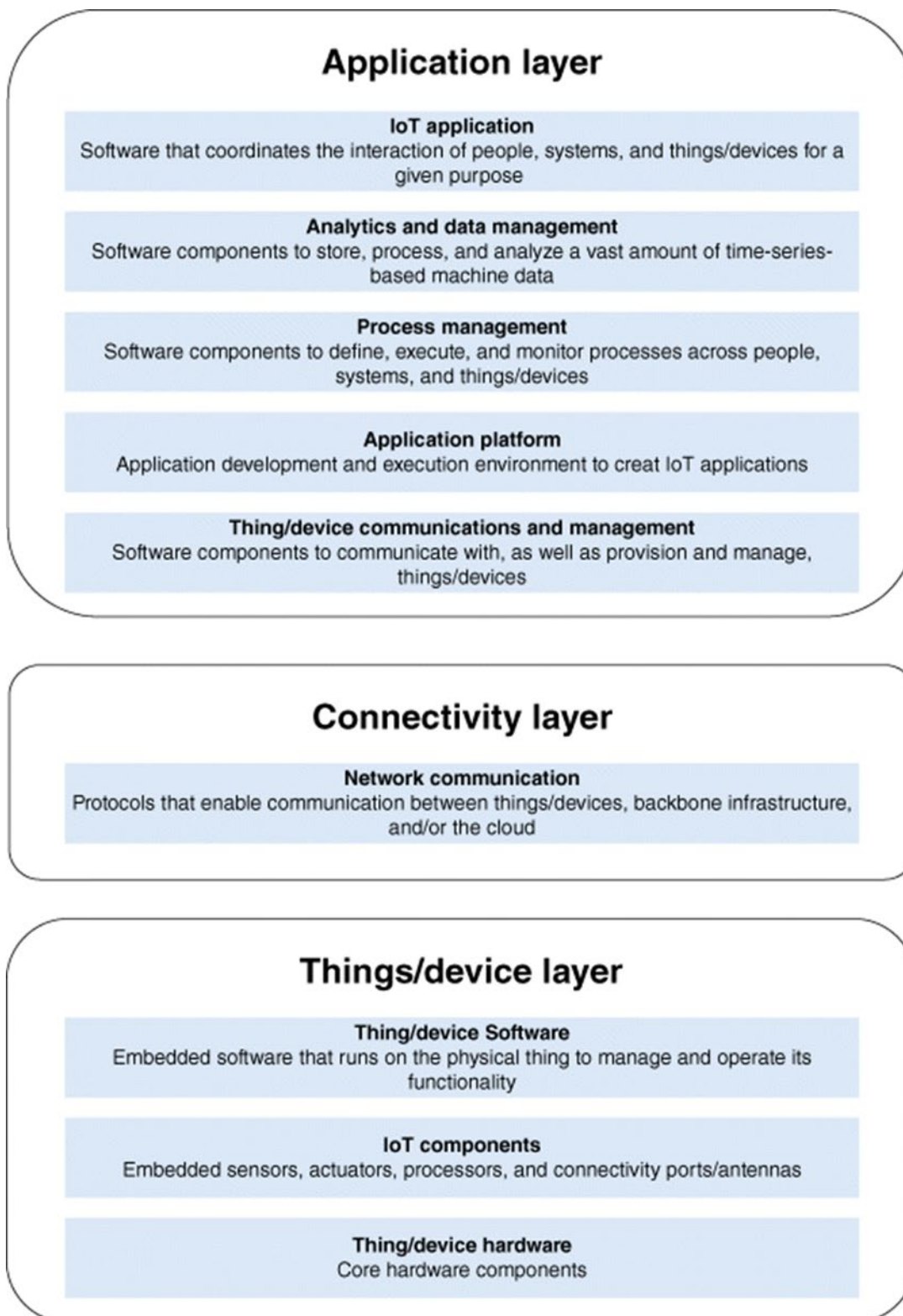
Η εικόνα 2 παρουσιάζει μια άποψη υψηλού επιπέδου από την άποψη μιας στοίβας IoT τριών επιπέδων -σχετικές τεχνολογίες:

- (i) το επίπεδο πράγμα ή συσκευή,
- (ii) το επίπεδο συνδεσιμότητας και
- (iii) το επίπεδο εφαρμογής.

Στο επίπεδο της συσκευής, ειδικό υλικό για το IoT, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές, μνήμη και επεξεργαστές, προστίθενται στα υπάρχοντα βασικά στοιχεία υλικού και το ενσωματωμένο λογισμικό προορίζεται για τη διαχείριση και τη λειτουργία της λειτουργικότητας του συγκεκριμένου φυσικού αντικειμένου.

Στο επίπεδο συνδεσιμότητας, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ πραγμάτων και συνδεδεμένων υποδομών, για παράδειγμα, μέσω υπηρεσιών cloud. Αντίστοιχα, στο επίπεδο εφαρμογής IoT παρέχεται επικοινωνία συσκευής και σχετική λειτουργικότητα, ενώ μια πλατφόρμα εφαρμογών επιτρέπει την ανάπτυξη και εκτέλεση εφαρμογών IoT.

Συνεπώς, το λογισμικό ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων γίνεται όλο και περισσότερο σημαντικό και κρίσιμο για τη διαχείριση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, δηλαδή αποθήκευση, επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που παράγονται από συνδεδεμένα πράγματα. Το λογισμικό διαχείρισης διεργασιών βοηθά στον καθορισμό, την εκτέλεση και την παρακολούθηση διαδικασιών σε άτομα, συστήματα και πράγματα. Μεταξύ των ανώτερων επιπέδων, το λογισμικό εφαρμογής IoT συντονίζει την αλληλεπίδραση ανθρώπων, συστημάτων και πραγμάτων για έναν δεδομένο σκοπό.(02) (Dejan Mijic, 2018)



Εικόνα 1.2: Προβολή υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονικής ΙοΤ

1.5.2 Δίκτυα και συνδεσιμότητα

Οι τεχνολογίες δικτύου συνδέουν αντικείμενα που είναι εξοπλισμένα με τεχνολογία πληροφοριών και μπορούν να βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες. Ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών δικτύου είναι διαθέσιμος για το σκοπό αυτό, ανάλογα με την εφαρμογή. Ένα χαρακτηριστικό διάκρισης που σχετίζεται με την εφαρμογή είναι η κλιμάκωση του εύρους. Κυμαίνεται από παγκόσμια δίκτυα (δορυφόροι) σε περιφερειακά και τοπικά δίκτυα έως τα λεγόμενα προσωπικά δίκτυα. Τα προσωπικά δίκτυα περιοχής (PAN) μπορούν, για παράδειγμα, να δικτυωθούν μέσω συσκευών WLAN, συνήθως σε μια περιοχή έως και 10 m² γύρω από ένα ή δύο άτομα.

Σε αντίθεση με τους υπολογιστές, τα smartphone και παρόμοιες συσκευές, οι συσκευές IoT είναι συνήθως περιορισμένες όσον αφορά τον χώρο μνήμης, την πρόσβαση σε συνεχή παροχή ρεύματος και την ικανότητα επεξεργασίας. Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα (ιδίως η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP) δεν έχουν σχεδιαστεί έχοντας υπόψη αυτές τις απαιτήσεις. Κατά συνέπεια, τα τελευταία χρόνια, πολλά λεγόμενα ελαφριά πρωτόκολλα επικοινωνίας έχουν αναπτυχθεί σχεδόν σε όλα τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων για τη δημιουργία διαλειτουργικότητας μεταξύ συσκευών IoT. Μια προσέγγιση για τη διαλειτουργικότητα του IoT είναι να εξεταστεί η πολυεπίπεδη δομή της στοίβας υλικού/λογισμικού.

Τα κατώτερα επίπεδα (σύμφωνα με το μοντέλο OSI, τα φυσικά επίπεδα και τα επίπεδα σύνδεσης δεδομένων· στο πλαίσιο που δεν είναι OSI, μερικές φορές επισημαίνονται ως το επίπεδο συσκευής) στοχεύουν στην απρόσκοπτη ενσωμάτωση νέων συσκευών στο υπάρχον οικοσύστημα IoT. Το επίπεδο δικτύωσης χειρίζεται την κινητικότητα των αντικειμένων και τη δρομολόγηση πληροφοριών. Το επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού διευκολύνει την απρόσκοπτη ανακάλυψη και διαχείριση υπηρεσιών έξυπνων αντικειμένων. Το επίπεδο εφαρμογής επαναχρησιμοποιεί ετερογενείς υπηρεσίες εφαρμογών από ετερογενείς πλατφόρμες. Το επίπεδο δεδομένων και σημασιολογίας εισάγει κοινές αντιλήψεις δεδομένων και πληροφοριών.

Τα ακόλουθα είναι τα εξέχοντα παραδείγματα τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας που βασίζονται σε IP για συσκευές IoT:

- (i) στο επίπεδο εφαρμογής, IETF Constrained Application Protocol (CoAP)/REST μηχανή/εντζιν και Message Queuing Telemetry Transport (MQTT).
- (ii) στο επίπεδο δικτύωσης, IPv6 και RPL (και ένα παράγωγο για ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης "6LoWPAN").
- (iii) στο φυσικό επίπεδο, IEEE 802.15.4. Παραδείγματα για πρωτόκολλα σημασιολογικού προσανατολισμού περιλαμβάνουν τα OPC UA (OPC Unified Architecture), UPnP (Universal Plug and Play), DPWS (Devices Profile for Web Services), CoAP (Πρωτόκολλο περιορισμένης εφαρμογής) και EXI (Efficient XML Interchange).

Η διαλειτουργικότητα έχει πολλές διαστάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και υψηλός βαθμός τυποποίησης πρωτοκόλλων δεν συνεπάγεται υψηλό βαθμό τυποποίησης των μορφών δεδομένων ή συμβατότητας συσκευών. Στην πραγματικότητα, η διαλειτουργικότητα αυτή τη στιγμή παρεμποδίζεται από αυτή την προϋπόθεση. Σε μια ιδανική κατάσταση, η επικοινωνία πρέπει να είναι ανεξάρτητη από τον δημιουργό ενός δεδομένου τμήματος της υποδομής. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, διάφοροι παίκτες (συμπεριλαμβανομένων των προμηθευτών) έχουν τις δικές τους λύσεις IoT που είναι λίγο πολύ ασυμβίβαστες με άλλες λύσεις, δημιουργώντας έτσι τοπικά «σιλό IoT». Ένα μεγάλο μέρος της πρόσφατης έρευνας στο IoT είναι επομένως αφιερωμένο στη διαλειτουργικότητα. Το έργο Unify-IoT της ΕΕ μπορεί να χρησιμεύσει ως ένδειξη αυτού: Εκτιμούν περισσότερους από 360 διαθέσιμους παρόχους πλατφορμών IoT και προσδιορίζουν ότι περίπου 20 είναι κάπως δημοφιλείς. Αυτό δείχνει ξεκάθαρα ότι οι τεράστιες ερευνητικές προσπάθειες δεν συγκλίνουν απαραίτητα.

Για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εφαρμογών, συσκευών και αντικειμένων, υπάρχουν γνωστά πρότυπα επικοινωνίας, όπως Bluetooth, Wi-Fi, και διάφορα πρότυπα κινητής επικοινωνίας, όπως το GSM. Με βάση τις περιπτώσεις χρήσης των κινητών επικοινωνιών, επιτεύχθηκε σημαντική τεχνολογική πρόοδος όσον αφορά το υψηλότερο εύρος ζώνης (και κατά

συνέπεια, υψηλότερους ρυθμούς bit), τις δυνατότητες ροής πολυμέσων κλπ. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι περισσότερες περιπτώσεις χρήσης IoT αφορούν συσκευές με περιορισμένους πόρους.

Κατά συνέπεια, ο στόχος των «Δίκτυα χαμηλής ισχύος, ευρείας περιοχής» (LPWAN) έχει γίνει βασικό θέμα στο IoT τα τελευταία χρόνια. Το LPWAN είναι ένας ευρύς όρος για μια ποικιλία τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση αισθητήρων και ελεγκτών στο Διαδίκτυο χωρίς τη χρήση παραδοσιακών δικτύων Wi-Fi ή κινητής τηλεφωνίας. Ταυτόχρονα, ωστόσο, μεγάλοι παίκτες στις βιομηχανίες δικτύων κινητής τηλεφωνίας αναπτύσσουν επίσης περαιτέρω πρότυπα δικτύωσης βασισμένα σε κυψέλες, για παράδειγμα, LTE-M και NB-IoT. Το τελευταίο υποστηρίζεται από κορυφαίους κατασκευαστές και από τους 20 μεγαλύτερους παρόχους κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο. Περαιτέρω παραδείγματα δραστηριοτήτων που διαμορφώνουν νέα πρότυπα πιο κατάλληλα για περιπτώσεις χρήσης IoT περιλαμβάνουν το LoRa και το N-Wave και το Sigbox. Τα κυρίαρχα ζητήματα σχεδιασμού είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (έως και περισσότερα από 10 χρόνια αυτονομίας), η ισχυρή διείσδυση σε εσωτερικά περιβάλλοντα και η σύνδεση μεγάλου αριθμού αισθητήρων και συσκευών με απαιτήσεις χαμηλού εύρους ζώνης.

| Όνομα πρωτοκόλλου | Συχνότητα | Εμβέλεια | Παραδείγματα εφαρμογής/χρήσης | Standards/πρότυπα επικοινωνίας |
|-------------------|---|--|--|--|
| Bluetooth BLE | 2.4 GHz | 1–100 m >100 m | Headsets, wearables, αθλήματα και fitness, φροντίδα υγείας, proximity, αυτοκίνηση | IEEE 802.15.1 ^a Bluetooth SIG ^b |
| EnOcean | 315 MHz, 868 MHz, 902 MHz | 300 m εξωτερικοί χώροι, 30 m εσωτερικά | Συστήματα ελέγχου και επίβλεψης, αυτοματοποίηση κτιρίων, μεταφορές, logistics | ISO/IEC 14543-3-10 ^c |
| GSM, LTE, LTE-M | Europe: 900 MHz and 1.8 GHz, USA: 1.9 GHz and 850 MHz | | Κινητή τηλεφωνία, M2M | 3GPP ^d |
| 6LoWPAN | 2.4 GHz | 10–30 m | Αυτοματοποίηση και ψυχαγωγία, εφαρμογές σε περιβάλλοντα οικία, γραφείου και εργοστάσια | Adaption layer for Ipv6 over IEEE802.15.4 ^e |

| Όνομα πρωτοκόλλου | Συχνότητα | Εμβέλεια | Παραδείγματα εφαρμογής/χρήσης | Standards/πρότυπα επικοινωνίας |
|--------------------------|---|---|---|--|
| LoRa | Sub 1 GHz ISM band | 2–5 km αστική περιοχή; 15 km προάστεια; 45 km απομακρυσμένες περιοχές | Smart city, long-range M2M | LoRaWAN |
| NB-IoT (narrow-band-IoT) | 700–900 MHz | 10–15 km rural deep indoor penetration | Smart meters, ελεγκτές γεγονότων, smart cities, smart homes, βιομηχανικό monitoring | 3GPP LTE Release 13 |
| NFC | 13.56 MHz | Under 0.2 m | Smart wallets, smart cards, action tags, access control | ISO/IEC 18092 ^h ISO/IEC 14443-2,-3,-4 ⁱ |
| NWave | Sub 1 GHz ISM band | Up to 10 km | αγροτοκαλιέργια, smart cities, smart meters, logistics, περιβαλλοντικά θέματα | Weightless ^j |
| RFID | 120–150 kHz (LF), 13.56 MHz (HF), 2450–5800 MHz (microwave), 3.1–10 GHz (microwave) | 10 cm to 200 m | διόδια, πρόσβαση σε κτιριακούς χώρους, αναγνώριση και εντοπισμός προϊόντων | ISO 18000 ^k |
| DASH7 | 433 MHz (UHF), 865–868 MHz (Europe), 902–928 MHz (North America) UHF | 0–5 km | Αυτοματοποίηση κτιρίων, smart energy, smart city logistics | |
| SigFox ^l | 900 MHz | 3–10 km urban 30–50 km rural | Smart meters, remote monitoring, security | |
| Weightless | 470–790 MHz | Up to 10 km | Smart meters, έλεγχος κυκλοφορίας, βιομηχανικού χώρου monitoring | Weightless ^m |
| Wi-Fi | 2.4 GHz, 3.6 GHz, 4.9–5 GHz | Up to 100 m | Routers, tablets, smartphones, laptops | IEEE 802.11 ⁿ |
| Z-Wave | ISM band 865–926 MHz | 100 m | Monitoring και έλεγχος για οικίες και σχετικά μικρούς εμπορικούς χώρους | Z-Wave ^o ; recommendation ITU G.9959 ^p |

| Όνομα πρωτοκόλλου | Συχνότητα | Εμβέλεια | Παραδείγματα εφαρμογής/χρήσης | Standards/πρότυπα επικοινωνίας |
|-------------------|---|----------|---|--------------------------------|
| ZigBee | 2.4 GHz; 784 MHz in China, 868 MHz in Europe, and 915 MHz in USA and Australia | 10–20 m | Οικιακός και κτιριακός αυτοματισμός, WSN, έλεγχος στην βιομηχανία | IEEE 802.15.4g |

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές, συχνότητες και εμβέλεια πρωτοκόλλων

1.6 Τα δομικά στοιχεία του διαδικτύου των πραγμάτων.

1.6.1 Ενσωματωμένα συστήματα – Embedded systems

Ωστόσο, με την ιδιαίτερα ταχεία εξέλιξη του διαδικτύου των πραγμάτων και την επικράτηση ενός μηχανογραφημένου κόσμου παγκοσμίως, επέτρεψε στα αντικείμενα να είναι πιο σύνθετα και πολύπλοκα και οι λειτουργίες είναι ενσωματωμένες σε αντικείμενα και χώρους. Για παράδειγμα, τα αγώγιμα υλικά υφαινόνται ή τυπώνονται σε υφάσματα. Στη συνέχεια, τα αντικείμενα μηχανογραφούνται με αυτόν τον τρόπο, επιτρέποντάς μας να λαμβάνουμε αμέσως πληροφορίες σχετικά με αυτά και να τα επεξεργαζόμαστε. Η σμίκρυνση του υλικού είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ενσωμάτωση της πληροφορικής σε αντικείμενα. Σύμφωνα με τον ακόμη ισχύοντα νόμο του Moore, η σμίκρυνση συνοδεύεται από βελτιωμένη απόδοση των επεξεργαστών και αυξημένη χωρητικότητα αποθήκευσης, με το κόστος κατασκευής των εξαρτημάτων να παραμένει το ίδιο ή και να μειώνεται. Αυτές οι εξελίξεις προάγουν τη γενική διάδοση των τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών και επιτρέπουν την ενσωμάτωσή τους σε οποιοδήποτε, ακόμη και μικρό και βραχύβιο, αντικείμενο. Αυτό δεν αφορά πάντα την αυξημένη απόδοση, αλλά μπορεί να περιλαμβάνει άλλους παράγοντες, για παράδειγμα, την ενεργειακή απόδοση των εξαρτημάτων. Κατά την ενσωμάτωση υπολογιστών ή στοιχείων σε φυσικά πράγματα, συχνά προκύπτουν νέες προκλήσεις για τη διεπαφή χρήστη. Για παράδειγμα, πώς επικοινωνεί κάποιος με υπολογιστές που «εξαφανίζονται»; Οι οθόνες, τα πληκτρολόγια και άλλες συσκευές εισόδου και εξόδου που χρησιμοποιούνται συνήθως μπορεί να μην αποτελούν πάντα τη

βέλτιστη λύση. Υπάρχει ανάγκη για νέες μεταφορές και διεπαφές χρήστη, ιδιαίτερα εκείνες που είναι κατάλληλες για διαισθητική αλληλεπίδραση.

1.6.2 Αισθητήρες - Sensors

Οι αισθητήρες είναι τεχνικά στοιχεία για την ποιοτική ή ποσοτική μέτρηση ορισμένων χημικών ή φυσικών μεταβλητών και ιδιοτήτων, για παράδειγμα, θερμοκρασία, φως (ένταση και χρώμα), επιτάχυνση, ηλεκτρισμός κλπ. Οι καταγεγραμμένες μετρούμενες τιμές συνήθως μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά σήματα. Επί του παρόντος, είμαστε ήδη περικυκλωμένοι από αισθητήρες σε πολλά σημεία. Για παράδειγμα, τα σύγχρονα αυτοκίνητα περιέχουν εκατοντάδες αισθητήρες, για παράδειγμα, αισθητήρες βροχής για συστήματα υαλοκαθαριστήρων, αισθητήρες σύγκρουσης για συστήματα απελευθέρωσης αερόσακων και αισθητήρες λωρίδας κυκλοφορίας και υποβοήθησης στάθμευσης. Πράγματι, τα σύγχρονα αυτοκίνητα, μερικά με πολύ περισσότερους από 200 αισθητήρες και μερικές δεκάδες μικροεπεξεργαστές, αποτελούν ένα καλό παράδειγμα αυτού. Στην πραγματικότητα, το συνηθισμένο αυτοκίνητο γίνεται όλο και περισσότερο ένα ενοποιημένο μηχανογραφημένο αντικείμενο. Επιπλέον, όταν ένας αισθητήρας χρησιμοποιείται μαζί με έναν επεξεργαστή (ελεγκτή), ένα τροφοδοτικό και μια μονάδα για τη μετάδοση δεδομένων, αυτό αναφέρεται ως κόμβος αισθητήρα.

Η κύρια λειτουργία ενός κόμβου αισθητήρα είναι να συλλέγει, να προεπεξεργάζεται και να μεταδίδει δεδομένα αισθητήρα από το περιβάλλον του σε άλλους κόμβους αισθητήρων ή σε σταθμό βάσης. Παραδείγματα κατηγοριών αισθητήρων περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- (i) Τοποθεσία: GPS, GLONASS, Galileo
- (ii) Βιομετρικά: δακτυλικό αποτύπωμα, ίριδα, πρόσωπο
- (iii) Ακουστική: μικρόφωνο
- (iv) Περιβαλλοντικά: θερμοκρασία, υγρασία, πίεση
- (v) Κίνηση: επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο

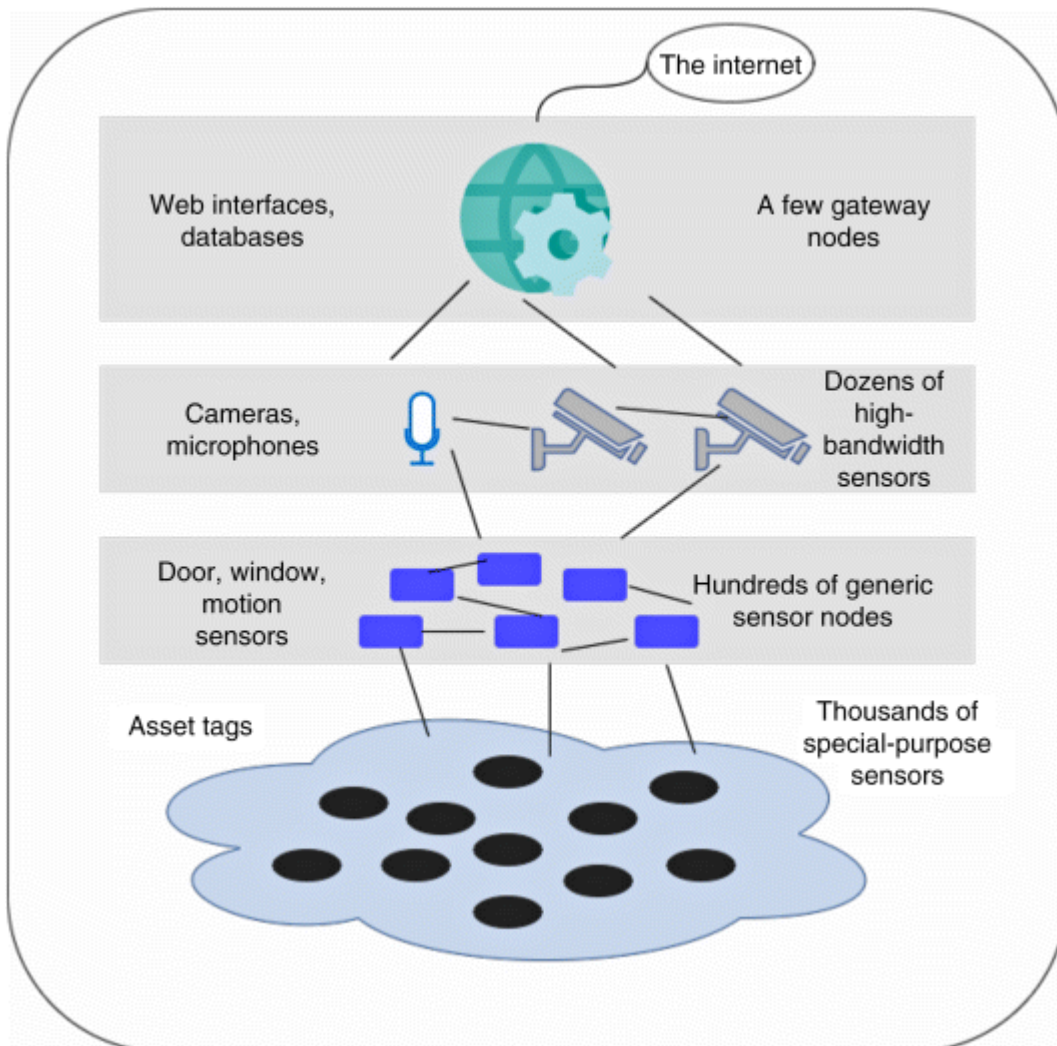
Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να σχηματίσουν ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) μέσω της μονάδας μετάδοσής τους.

Για παράδειγμα, αυτά χρησιμοποιούνται για

- (i) ανίχνευση σεισμών, δασικών πυρκαγιών, χιονοστιβάδων, καθώς και τρομοκρατικών επιθέσεων.
- (ii) παρακολούθηση κυκλοφορίας των οχημάτων, ιδίως σε σήραγγες
- (iii) παρακολούθηση των μετακινήσεων άγριων ζώων.
- (iv) προστασία της περιουσίας.
- (v) αποτελεσματικού χειρισμού και διαχείρισης μηχανημάτων και οχημάτων.
- (vi) δημιουργία χώρων ασφαλείας.
- (vii) Παρακολούθηση και εποπτεία στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.
- (viii) Ανίχνευση χημικού, βιολογικού και ραδιενεργού υλικού.

Για τη λειτουργία των δικτύων αισθητήρων απαιτείται ειδικό λογισμικό, το οποίο διασφαλίζει μια δυναμική και εύρωστη αυτό-οργάνωση του δικτύου αισθητήρων που λειτουργεί με ασφαλή και επεκτάσιμο τρόπο. Αυτό συμβαίνει επειδή οι κόμβοι αισθητήρων μπορεί να αποτύχουν, να αλλάξουν τη θέση τους ή να είναι συνδεδεμένοι μόνο κατά διαστήματα. Το WSN μπορεί να αποτελείται από αρκετές εκατοντάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες κόμβους αισθητήρων, οι οποίοι αναπτύσσονται είτε μέσα στο φαινόμενο είτε πολύ κοντά σε αυτό. Οι κόμβοι αισθητήρων συνδέονται σε ένα ενδιάμεσο δίκτυο που προωθεί τα δεδομένα που συλλέγουν σε έναν υπολογιστή για ανάλυση. Οι κόμβοι αισθητήρων εγκαθίστανται στο χώρο εργασίας τους για να λειτουργούν για χρόνια, κατά προτίμηση χωρίς να απαιτείται καμία συντήρηση ή ανθρώπινη παρέμβαση. Πρέπει επομένως να έχουν χαμηλή απαίτηση ενέργειας και να διαθέτουν μπαταρίες που να λειτουργούν για αρκετά χρόνια. Η κατασκευή ενός τυπικού WSN είναι πολυεπίπεδη. Συγκεκριμένα, ξεκινά με αισθητήρες στο χαμηλότερο επίπεδο και συνεχίζει μέχρι τους κόμβους ανώτατου επιπέδου για συλλογή, ανάλυση και αποθήκευση δεδομένων. Απλά και σύνθετα δεδομένα δρομολογούνται μέσω ενός δικτύου σε

μια αυτοματοποιημένη εγκατάσταση που παρέχει συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο του αποκλειστικού περιβάλλοντος. Τα WSN δεν λειτουργούν απαραίτητα σε όλα τα επίπεδα με την κοινή στοίβα TCP/IP και ενδέχεται να χρησιμοποιούν αποκλειστικά ελαφριά πρωτόκολλα.



Εικόνα 1.3: Ιεραρχική ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Κάθε κλάση πλατφόρμας χειρίζεται διαφορετικούς τύπους ανίχνευσης. Καθώς οι αισθητήρες είναι θεμελιώδεις τόσο για έξυπνα αντικείμενα όσο και για κόμβους αισθητήρων, αποτελούν κρίσιμο συστατικό ενός κόσμου IoT. Στην πραγματικότητα, τα WSN θα διευκολύνουν τον πολλαπλασιασμό πολλών εφαρμογών. Οι μικροί, ανθεκτικοί, φθηνοί και χαμηλής ισχύος αισθητήρες WSN θα φέρουν το IoT ακόμα και στα πιο μικρά αντικείμενα που είναι εγκατεστημένα σε οποιοδήποτε είδος περιβάλλοντος, με λογικό κόστος.

1.6.3 Ενεργοποιητές - Actuators

Οι ενεργοποιητές μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα (π.χ. εντολές που προέρχονται από τον υπολογιστή ελέγχου) σε μηχανική κίνηση ή άλλες φυσικές μεταβλητές (π.χ. πίεση ή θερμοκρασία) και έτσι παρεμβαίνουν ενεργά στο σύστημα ελέγχου και/ή ρυθμίζουν μεταβλητές. Στον τομέα της μηχανικής μέτρησης και ελέγχου, οι ενεργοποιητές είναι οι αντίστοιχοι αισθητήρες που σχετίζονται με το σήμα. Οι τύποι ενεργοποιητών περιλαμβάνουν υδραυλικούς, πνευματικούς, ηλεκτρικούς, μηχανικούς και πιεζοηλεκτρικούς. Μετατρέπουν τα σήματα ή τις προδιαγραφές ρύθμισης και ρύθμισης ενός χειριστηρίου σε (κυρίως) μηχανική εργασία. Ένα απλό παράδειγμα αυτού είναι το άνοιγμα και το κλείσιμο μιας βαλβίδας, για παράδειγμα, σε ένα σύστημα θέρμανσης ή στην περίπτωση των χειριστηρίων του κινητήρα. Η έξοδος οπτικών (μέσω οθονών) ή ακουστικών σημάτων μπορεί επίσης να ενταχθεί στους ενεργοποιητές, καθώς μπορούν να ενεργοποιήσουν ένα εφέ στο πραγματικό περιβάλλον. Στη ρομποτική, ο όρος τελεστής (effectuator) χρησιμοποιείται συχνά ως ισοδύναμος για ενεργοποιητές. Οι τελεστές για παράδειγμα επιτρέπουν σε ένα ρομπότ να πιάνει και να χειρίζεται αντικείμενα και έτσι να παράγει ένα αποτέλεσμα. Σε έναν ηλεκτρονικό κόσμο πραγμάτων, οι ενεργοποιητές διαδραματίζουν έναν ολόένα και πιο σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση των ενεργειών και των αποτελεσμάτων ως αντίστοιχη των (προηγούμενων) αισθητηριακών ανιχνευόμενων αντίστοιχων πλαισίων. Οι ενεργοποιητές αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο στις πιο πρόσφατες αντιλήψεις για την «Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση» στην κατασκευή ως αξίωμα σύλληψης του Industry 4.0. [2]

1.7 Εφαρμογές του διαδικτύου των πραγμάτων στο περιβάλλον, έρευνα, επιστήμη και καθημερινή ζωή των χρηστών.

Όπως αναφέρθηκε ένα αντικείμενο (object/thing) μπορεί να μετατραπεί σε έξυπνο αντικείμενο. Αυτή η ιδέα επέτρεψε την δημιουργία και ανάπτυξη διαφόρων τομέων όπως:

- (i) το έξυπνο περιβάλλον
- (ii) την έξυπνη πόλη,

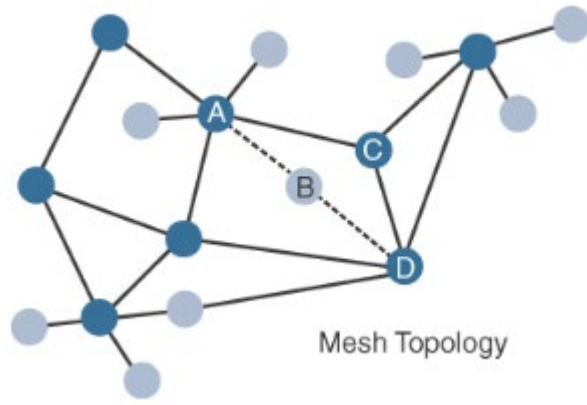
- (iii) την έξυπνη αγροκαλλιέργεια
- (iv) βιομηχανία
- (v) οικία (έξυπνο σπίτι)
- (vi) logistics
- (vii) συστήματα ενέργειας

1.8 Τοπολογίες Δικτύων IoT

Ένας αισθητήρας θα μπορούσε να συνδεθεί ως τερματικό στοιχείο σε οποιοδήποτε σημείο ενός δικτύου εάν χρειαστεί, σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, ενσύρματα ή ασύρματα. Αυτό συνεπάγεται ότι όλες οι γνωστές τοπολογίες δικτύων θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Παρόλα αυτά οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες IoT δικτύων είναι η τοπολογία αστέρα και η mesh τοπολογία.



Εικόνα 1.4: τοπολογία αστέρα



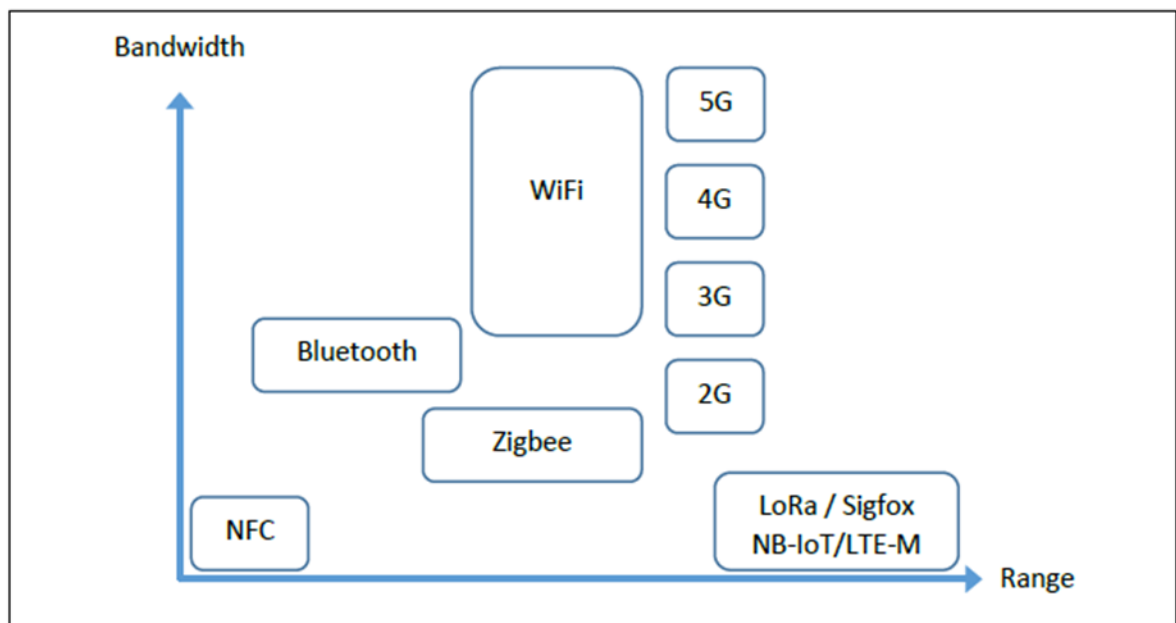
Εικόνα 1.5: τοπολογία mesh

Κεφάλαιο 2

Η τεχνολογία LoRa

2.1 Τα ασύρματα πρωτόκολλα IoT

Στον κόσμο του IoT, μπορούμε να βρούμε πολλά πρωτόκολλα όπως Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi, 2G, 3G, 4G, 5G, NFC, LoRa κι άλλα. Ταξινομούνται ανάλογα με το εύρος ζώνης και από την ακτίνα μετάδοσης δεδομένων. Στόχος των σχεδιαστών είναι η επίτευξη μιας όλο και μεγαλύτερης εμβέλειας αλλά και εύρους ζώνης.



Εικόνα 2.1: Πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο IoT

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο δίκτυα IoT χαρακτηρίζονται ως χαμηλού εύρους ζώνης, μεγάλης εμβέλειας που έχουν απαιτήσεις σε πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αυτά περιλαμβάνουν το NB-IoT και το LTE-M. Τα Sigfox και LoRaWAN είναι μεγάλης εμβέλειας και πρωτόκολλα εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης. Αυτοί οι τύποι δικτύων αναφέρονται όλα ως Χαμηλής Ενέργεια Δίκτυο Ευρείας Περιοχής (LPWAN - Low Power Wide Area Network).

Το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network - Δίκτυο ευρείας περιοχής μεγάλης εμβέλειας) είναι μεγάλης εμβέλειας πρότυπο που χρησιμοποιεί χαμηλό ρυθμό δεδομένων με χαμηλές ανάγκες σε κατανάλωσης ενέργειας.

2.1.1 Ζώνες συχνοτήτων

Στην Ευρώπη, ορισμένες ζώνες συχνοτήτων είναι ελεύθερες στη χρήση.

Αυτό σημαίνει:

- (i) δεν χρειάζεται αδειοδότηση ή εξουσιοδότηση χρήσης, είναι ελεύθερα προς χρήση από ιδιώτες και εταιρείες.
- (ii) είναι δωρεάν.

| Συχνότητα | Πρωτόκολλο |
|------------------|-------------------------------------|
| 13.56 MHz | RFID, NFC |
| 433 MHz | Walkie-talkie, remote control, LoRa |
| 868 MHz | Sigfox, LoRa |
| 2.4 GHz | Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa |
| 5 GHz | Wi-Fi |

| | |
|--|--|
| | |
|--|--|

Πίνακας 2.1: Ζώνες ελεύθερων συχνοτήτων

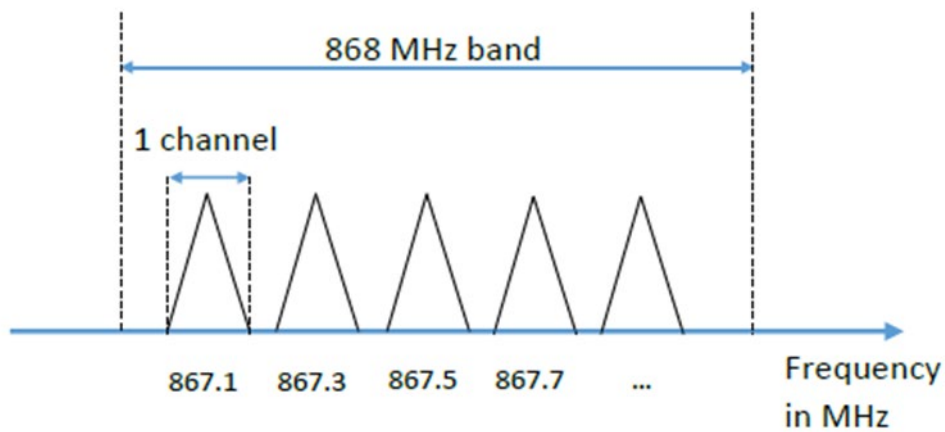
Στην Ευρώπη, η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί τις ζώνες 433 MHz, 868 MHz ή 2,4 GHz. Παρόλα αυτά χρησιμοποιείται για το LoRaWAN κυρίως μόνο η ζώνη των 868 MHz.

2.2 Λειτουργίες κοινής χρήσης πολυμέσων

Ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται, το μέσο για τη μεταφορά πληροφοριών είναι ο αέρας (όλα τα πρωτόκολλα IoT είναι ασύρματα). Το μέσο αυτό να είναι κοινόχρηστο μεταξύ όλων των πομπών με τέτοιο τρόπο ώστε οι ασύρματες τελικές συσκευές (τερματικά) κατά την μετάδοσή τους να μην παρεμβαίνουν στις μεταδόσεις των άλλων συσκευών (διακαναλική παρεμβολή). Για το λόγο αυτό, εφαρμόζεται κατανομή διαφορετικών καναλιών συχνοτήτων για κάθε τερματική συσκευή ανάλογα με την εμβέλεια μετάδοσης δεδομένων. Μέσα στις ζώνες συχνοτήτων τους, οι τελικές συσκευές μπορούν να μοιράζονται το μέσο με διαφορετικούς τρόπους.

2.2.1 FDM (Πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας)

Οι συσκευές χρησιμοποιούν κανάλια συχνότητας για να διαχωρίσουν τις μεταδόσεις τους. Το LoRa χρησιμοποιεί αυτήν τη λειτουργία κοινής χρήσης, δηλ. η ελεύθερη ζώνη των 868 MHz χωρίζεται σε πολλά κανάλια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση πληροφοριών.



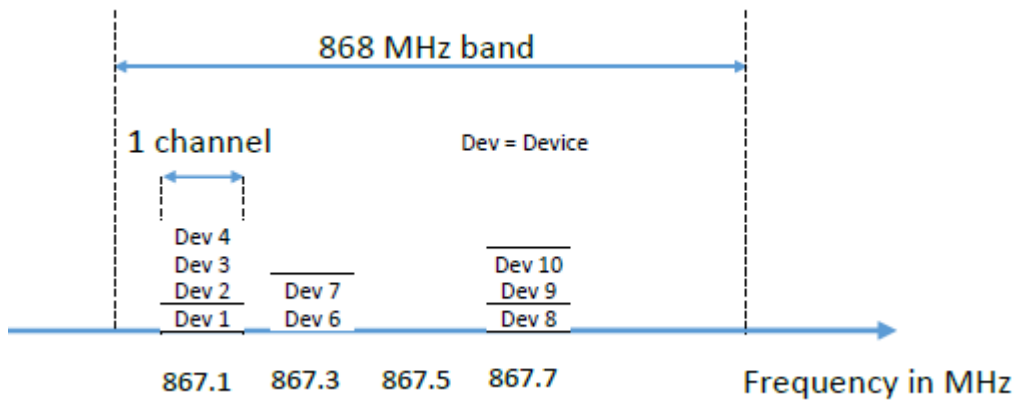
Εικόνα 2.2: Εφαρμογή FDMA στο LoRa

2.2.2 TDM (Πολλαπλή διαίρεση χρόνου)

Σε αυτήν τη λειτουργία μετάδοσης, οι τελικές συσκευές εκπέμπουν κατά διαστήματα για να αφήσουν το κανάλι ελεύθερο για τους άλλους τερματικούς χρήστες/συσκευές. Το LoRa χρησιμοποιεί αυτήν τη λειτουργία κοινής χρήσης και δεν επιτρέπει στις συσκευές να εκπέμπουν συνεχώς. Παρόλα αυτά, επειδή οι τελικές συσκευές δεν είναι συγχρονισμένες, μπορεί να προκύψουν συγκρούσεις (collisions).

2.2.3 Φάσμα διασποράς

Το LoRa χρησιμοποιεί τη λειτουργία κοινής χρήσης όπου κατά την μετάδοση, οι τελικές συσκευές εκπέμπουν ταυτόχρονα, στο ίδιο κανάλι, αλλά με μια συγκεκριμένη δομή σήματος (με κωδικούς ή σύμβολα) που επιτρέπει στον δέκτη να ανακτήσει το αρχικό μήνυμα σε περίπτωση που το σήμα έχει αλλοιωθεί πχ λόγω θορύβου.



Εικόνα 2.3: Χρήση φάσματος διάχυσης στο LoRa

Οι τελικές συσκευές με δυνατότητα LoRa μπορούν να επιλέξουν από πολλά κανάλια για τη μετάδοση δεδομένων. Ένα από τα πλεονεκτήματα της LoRa είναι ότι ακόμα κι αν πολλές τελικές συσκευές χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι, μπορούν όλες να εκπέμπουν την ίδια στιγμή ταυτόχρονα.

2.3 Η διαμόρφωση LoRa (φυσικό στρώμα)

Το LoRa χρησιμοποιεί μια μέθοδο Spread Spectrum και εκπέμπει ταυτόχρονα, στο ίδιο κανάλι. Οι πιο γνωστές μέθοδοι διαμόρφωσης Spread Spectrum χρησιμοποιούν "κώδικες" για να επιτύχουν αυτήν την απόδοση. Κατά την μετάδοση LoRa χρησιμοποιούνται σύμβολα (Chirp), Διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum (CSS). Ο πομποδέκτης LoRa μπορεί να χρησιμοποιήσει οκτώ «κώδικες διάδοσης» που ονομάζονται «Συντελεστές Διάδοσης» [SF5, SF6, SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 και SF12]. Δηλαδή μπορούν να συνυπάρξουν οκτώ ταυτόχρονες μεταδόσεις στο ίδιο κανάλι. Για το πρότυπο LoRaWAN, χρησιμοποιούνται μόνο έξι SF [SF7 έως SF12].

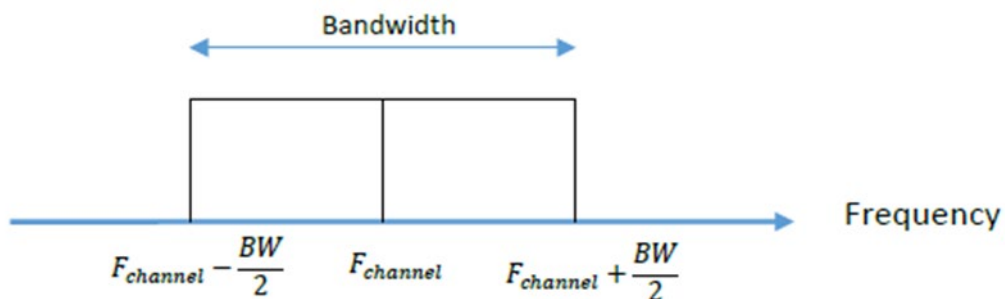
Η διαμόρφωση στο LoRa χρησιμοποιεί το Spread Spectrum για τη μετάδοση των δεδομένων του. Ωστόσο, αντί να χρησιμοποιηθούν "κώδικες", θα χρησιμοποιηθούν "Chirps" και για αυτό ονομάζεται Chirp Spread Spectrum διαμόρφωση. Ο σκοπός παραμένει πάντα ο ίδιος: η επιτευξη πολλών ταυτόχρονων μεταδόσεων στο ίδιο κανάλι. (3)

2.3.1 Το Chirp

Το όνομα "Chirp" προέρχεται από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται στην τεχνολογία ραντάρ (Chirp: Compressed High Intensity Radar Pulse / Συμπιεσμένος Παλμός ραντάρ υψηλής έντασης). Η συχνότητα έναρξης είναι η συχνότητα του καναλιού μείον το εύρος ζώνης διαιρούμενο με δύο. Η τελική συχνότητα είναι η συχνότητα του καναλιού συν το εύρος ζώνης διαιρούμενο με δύο.

Η εικόνα 2.4 παρουσιάζει τη διαμόρφωση LoRa στον τομέα της συχνότητας.

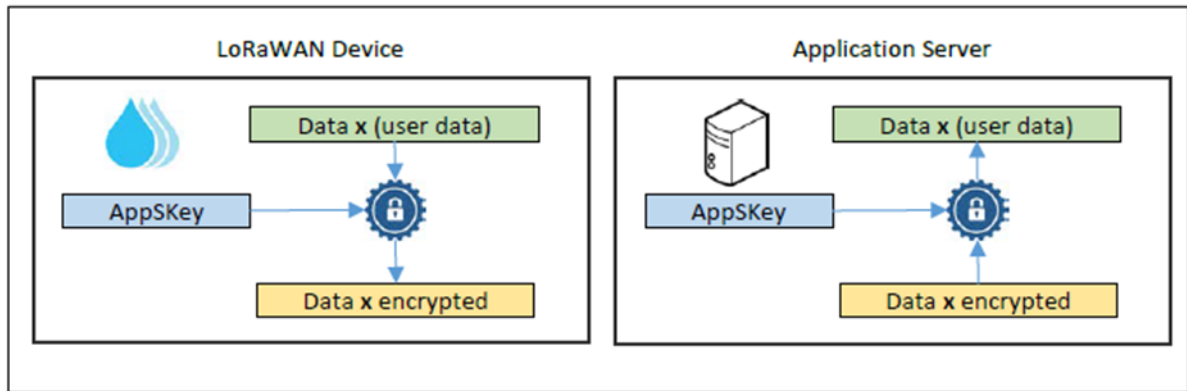
- (i) Το κανάλι ($F_{channel}$) είναι η κεντρική συχνότητα.
- (ii) Το χώρος των συχνοτήτων που περιβάλεται γύρω από το $F_{channel}$ είναι το εύρος ζώνης.



Εικόνα 2.4: Φάσμα μετάδοσης LoRa

2.3.2 Κρυπτογράφηση δεδομένων

Το κλειδί συνεδρίας της εφαρμογής (AppSKey) χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση των δεδομένων χρήστη στην τελική συσκευή LoRaWAN. Τα δεδομένα θα αποκρυπτογραφηθούν στον server εφαρμογών. Αυτή είναι μια συμμετρική κρυπτογράφηση, οπότε το AppSKey πρέπει να είναι το ίδιο στην τερματική συσκευή και στον εξυπηρετητή/ server εφαρμογών.



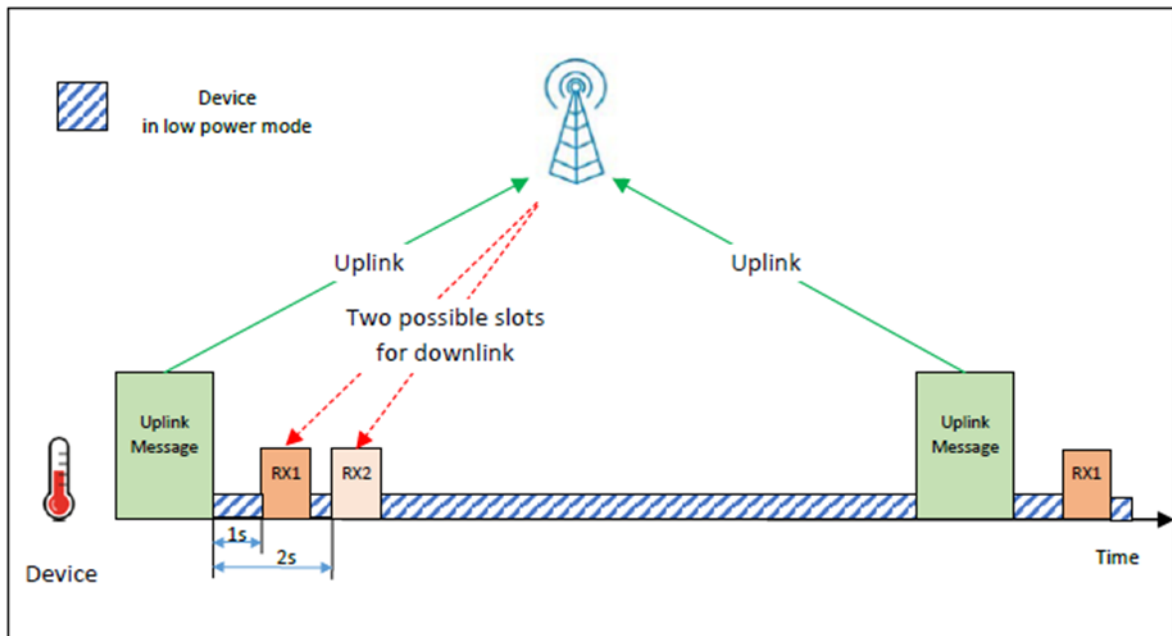
Εικόνα 2.5: Διαδικασία κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης δεδομένων, συνεπώς το κανάλι είναι ασφαλές.

2.4 Κατηγορίες τερματικών συσκευών (end users) LoRaWAN

Οι τερματικές συσκευές LoRaWAN ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (A, B, C) ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας, και την δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (uplink και downlink).

2.4.1 Κατηγορία A (Όλες οι συσκευές): ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας

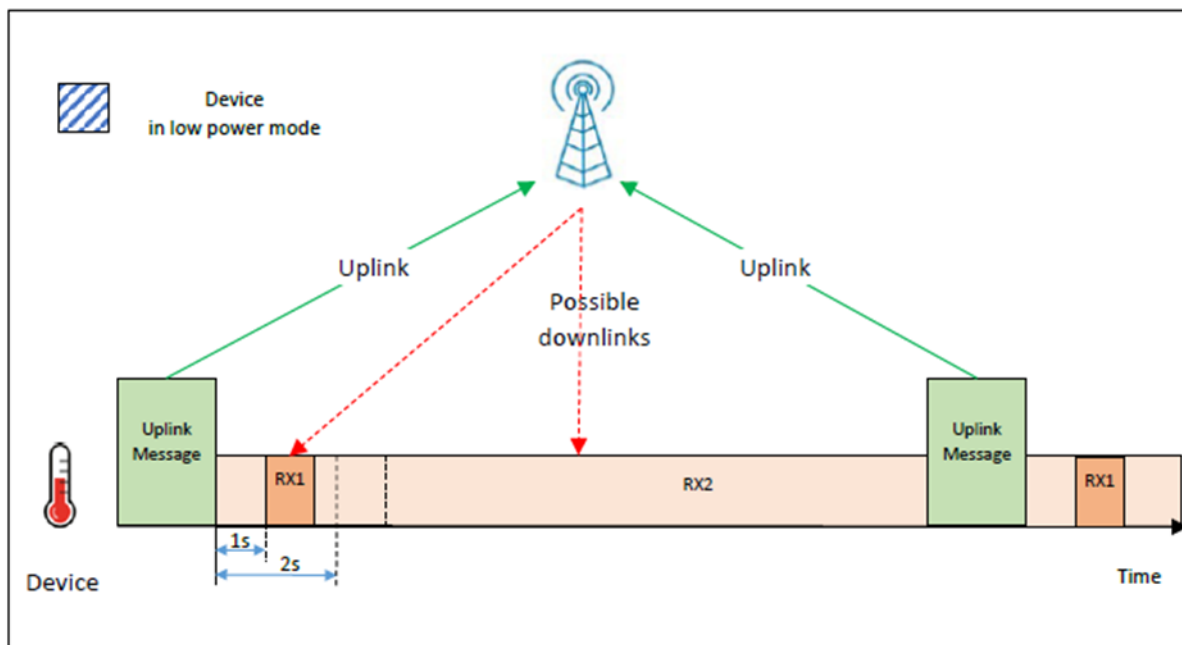
Όλες οι συσκευές LoRaWAN είναι συσκευές κατηγορίας A. Κάθε τελική συσκευή μπορεί να μεταδώσει (uplink) στην πύλη εξόδου /gateway χωρίς να επαληθεύσει τη διαθεσιμότητα της πύλης. Αυτή η μετάδοση ακολουθείται από ένα ή και περισσότερα χρονικά παράθυρα λήψης (slots)



Εικόνα 2.6: Υποδοχές λήψης για μια τελική συσκευή κατηγορίας A.

2.4.2 Κατηγορία B (Beacon): προγραμματισμένη υποδοχή (slot) λήψης

Οι τελικές συσκευές κατηγορίας B συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο όπως οι συσκευές κατηγορίας A, αλλά τα παράθυρα λήψης (slots) είναι προγραμματισμένα για λήψη δεδομένων σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Για τον λόγο αυτό οι πύλες/gateways πρέπει να μεταδίδουν beacons τακτικά.



Εικόνα 2.8: Υποδοχές λήψης για συσκευή κατηγορίας C

Η τελική συσκευή LoRaWAN ακούει συνεχώς μεταξύ δύο μηνυμάτων uplink. Όλες οι υποδοχές RX είναι ρυθμιστε τις ίδιες παραμέτρους (κανάλι, συντελεστής διάδοσης και εύρος ζώνης) με το RX2 εκτός από το RX1 παράθυρα που εξακολουθούν να έχουν την ίδια συμπεριφορά όπως στην κατηγορία A και B.

Μια τελική συσκευή κατηγορίας Γ είναι πάντα προσβάσιμη. Ωστόσο, αυτή η κατηγορία είναι η πιο ενεργοβόρα από τις άλλες δύο.

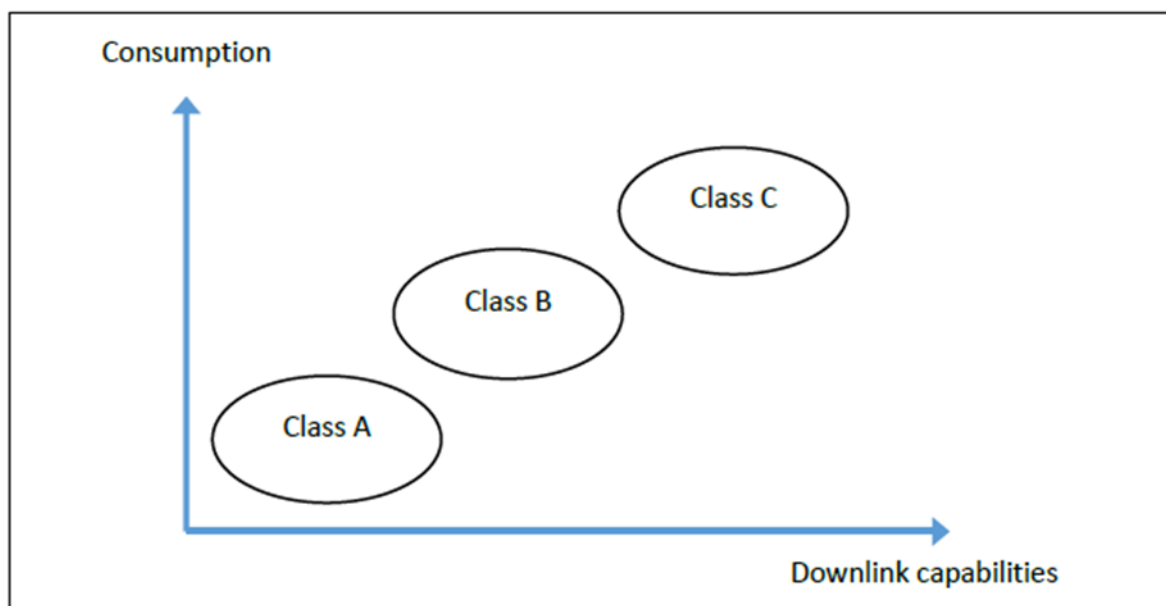
Όλες οι τελικές συσκευές μπορούν να αποφασίσουν να μεταβούν στην κατηγορία C, εάν το υλικολογισμικό τους το υποστηρίζει.

2.4.4 Σύνοψη των κατηγοριών τελικών συσκευών

Από τα παραπάνω αναφερθέντα σημειώνεται:

- (i) Μια τελική συσκευή κατηγορίας B είναι επίσης μια συσκευή κατηγορίας A (οι υποδοχές RX1 και RX2 εξακολουθούν να υπάρχουν).
- (ii) Μια τελική συσκευή κατηγορίας C είναι επίσης μια συσκευή κατηγορίας A (οι υποδοχές RX1 και RX2 εξακολουθούν να υπάρχουν).

Η κλάση B και η κλάση C είναι επομένως μια επέκταση στην κλάση A. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την κατάταξη των κατηγοριών των συσκευών LoRaWAN ανάλογα με την τάξη τους :



Εικόνα 2.9: Κατανάλωση ενέργειας και δυνατότητες κατερχόμενης ζεύξης (downlink)

2.5 Κανάλια

Το LoRa χρησιμοποιεί διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων σε διάφορα μέρη του κόσμου. Στην Ευρώπη, η μπάντα που χρησιμοποιείται είναι 868 MHz [Από 863 MHz έως 870 MHz]. Σε αυτή τη ζώνη, ο διακομιστής LoRaWAN ορίζει ένα σχέδιο με έναν αριθμό των καναλιών και των τιμών δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για uplink και downlink ζεύξη. Μια τελική συσκευή πρέπει να έχει την δυνατότητα να μπορεί να συνδεθεί τουλάχιστον σε ένα από αυτά τα τρία κανάλια: 868,1 MHz, 868,3 MHz και 868,5 MHz από DR0 έως DR5. Τα άλλα κανάλια εξαρτώνται από τον διακομιστή δικτύου.

Ο Πίνακας 2.1 αντιπροσωπεύει τα υποχρεωτικά κανάλια.

| Υποχρεωτικά κανάλια | Κανάλια | Ρυθμός δεδομένων | Κατεύθυνση |
|---------------------|-----------|------------------|-------------------|
| | 868,1 MHz | DR0 σε DR5 | Uplink / Downlink |
| | 868,3 MHz | DR0 σε DR5 | Uplink / Downlink |
| | 868,5 MHz | DR0 σε DR5 | Uplink / Downlink |

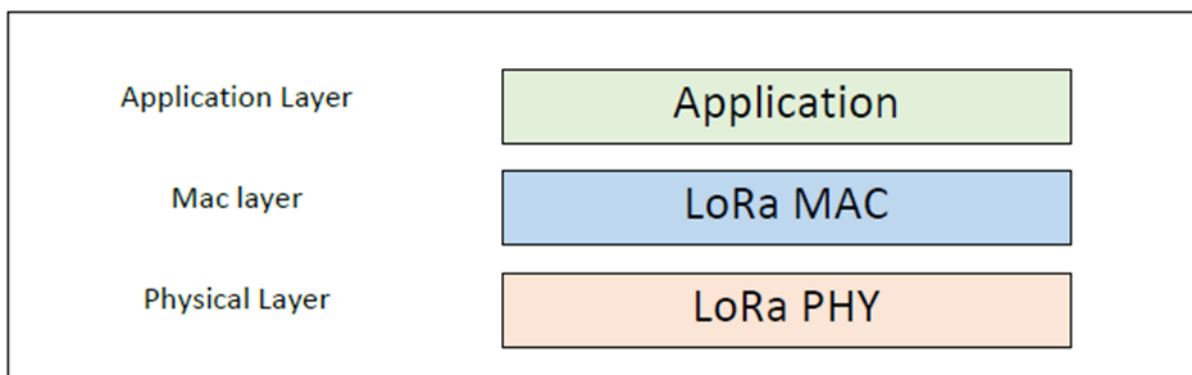
Πίνακας 2.1: Υποχρεωτικό σχέδιο συχνοτήτων LoRaWAN

2.6 Επίπεδα πρωτοκόλλου LoRaWAN

Το LoRa είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης για τη μεταφορά δεδομένων από το ένα σημείο στο άλλο. Αυτό αναφέρεται ως φυσικό επίπεδο (layer) και ονομάζεται LoRa PHY.

Το πρωτόκολλο LoRaWAN προσθέτει τον έλεγχο ταυτότητας της τερματικής συσκευής, την κρυπτογράφηση δεδομένων, την επιβεβαίωση, διαχείριση δικτύου, κλπ. Όλες αυτές οι ιδιότητες του πρωτοκόλλου προστίθενται πάνω από το πρωτόκολλο LoRa, σε ένα επίπεδο (layer) που ονομάζεται LoRa MAC.

Τέλος, το επίπεδο εφαρμογής είναι απλώς τα ακατέργαστα δεδομένα χρήστη, αν και υπάρχουν και άλλες διαθέσιμες υπηρεσίες στις προδιαγραφές LoRaWAN.



Εικόνα 2.10: Επίπεδα πρωτοκόλλου LoRaWAN

2.7 Μετάδοση και διάδοση ραδιοκύματος

Όταν ένα σήμα εξαπλώνεται κατά μήκος της διαδρομής επικοινωνίας του, η αναλογία μεταξύ της λαμβανόμενης ισχύος και της μεταδιδόμενης ισχύος μπορεί να διαφέρει πολύ. Ενώ η αναλογία είναι σχεδόν 1 όταν χρησιμοποιούμε καλώδιο, μπορεί να είναι πολύ υψηλότερο όταν χρησιμοποιούμε ενισχυτή ή εξαιρετικά χαμηλό σε περίπτωση μετάδοσης απωλειών αέρα. Επιπλέον, πολλαπλασιάζοντας το κέρδος κάθε μπλοκ μετάδοσης δεν είναι προτεινόμενο. Το dB είναι μια αναλογία μεταξύ δύο δυνάμεων: της ισχύος του δέκτη P_R και της ισχύος στον πομπό P_T . Ο τύπος για την αναλογία σε dB είναι:

$$\text{Power ratio (dB)} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_R}{P_T} \right)$$

Εικόνα 2.11: η σχέση του dB με την ισχύ που εκπέμπει ο πομπός και την ισχύ που λαμβάνει ο δέκτης

Κατά την μετάδοση το σήμα εξασθενεί στον αέρα. Ο απλοποιημένος τύπος που δίνει την τιμή της απώλειας σήματος κατά την μετάδοση είναι:

$$\text{Απώλεια} = 10 \times \log_{10}(\text{απόσταση}^2 \times \text{συχνότητα}^2 \times 1755)$$

Όπου η απώλεια μετριέται σε dB, η απόσταση σε Km και η συχνότητα σε MHz.

Από τον παραπάνω τύπο είναι φανερό ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση τόσο το σήμα εξασθενεί, δηλαδή θα πρέπει ο πομπός να καταναλώσει περισσότερη ενέργεια έτσι ώστε να φτάσει το σήμα στον δέκτη σε τέτοια κατάσταση που θα του επιτρέψει την λήψη αλλά και την διόρθωση πιθανών σφαλμάτων (ber – bit error rate) που παρουσιάστηκαν κατά την μετάδοση του σήματος. [4-6]

2.8 Απόσταση, εξασθένηση σήματος και συχνότητα στα δίκτυα LoRa

Στα ασύρματα δίκτυα η απόσταση, η συχνότητα και η πιθανή εξασθένηση σήματος είναι αλληλένδετα μεταξύ τους. Συγκεκριμένα αυξάνοντας την απόσταση ενώ η συχνότητα μετάδοσης του σήματος παραμένει σταθερή, ο βαθμός της εξασθένησης σήματος θα αυξηθεί.

$$Distance = \sqrt{\frac{10^{\frac{Loss}{10}}}{1755 \cdot Frequency^2}}$$

$$distance = \sqrt{\frac{10^{\frac{Link Budget}{10}}}{1755 \cdot frequency^2}}$$

Εικόνα 2.11: Η σχέση συχνότητας, απόστασης και εξασθένησης σήματος στα δίκτυα LoRa.

Όπου στους παραπάνω τύπους η απόσταση μετριέται σε km, η συχνότητα σε MHz και η απώλεια σήματος σε dB.

2.9 Τοπολογία Δικτύων LoRa

Ένα δίκτυο LoRa μπορεί να αποτελείτε από πολλές χιλιάδες τερματικές συσκευές (αισθητήρες IoT, ενσωματωμένα συστήματα, κ.α.), από μερικούς ή αρκετούς εξυπηρετητές/servers, κεραιές, πύλες εξόδου (gateways), δρομολογητές/routers, switches και διάφορα άλλα δομικά στοιχεία ενός δικτύου. Παρόλα αυτά η βασική ιδέα των συγκεκριμένων δικτύων είναι μια τερματική συσκευή να μπορεί ασύρματα να επικοινωνήσει και να μεταδώσει ασύρματα κάποιους τύπους πληροφορίας. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί απλά με ένα αισθητήρα συνδεδεμένο με μια πύλη εξόδου (gateway) που θα μεταδώσει ασύρματα την πληροφορία ως πομπός σε έναν δέκτη που μπορεί να είναι μια κεραία συνδεδεμένη με ένα υπολογιστή ή server. Αυτή η περιορισμένη

συνδεσμολογία μπορεί να αποτελέσει το δομικό στοιχείο ενός αρκετά μεγάλου σε γεωγραφική έκταση και αριθμό δικτυακών συσκευών.

2.10 Διόρθωση σφαλμάτων κατά την λήψη

Η προώθηση διόρθωσης σφάλματος είναι μια διαδικασία κατά την οποία σε ένα αριθμό δεδομένων προστίθεται ένας πλεονάζων αριθμός bits με στόχο την διόρθωση σφάλματος. Κατά την μετάδοση της πληροφορίας κάποια bits/ψηφία μπορούν να μετατραπούν από 0 σε 1 και το αντίστροφο, λόγω διακαναλικών παρεμβολών, θορύβου, ή το σήμα φτάνει εξασθενημένο στο δέκτη, κ.α.. Συνεπώς αυτά τα πλεονάζοντα bits χρησιμεύουν στην διόρθωση σφαλμάτων της ληφθείσας πληροφορίας στον δέκτη.

Το πρωτόκολλο LoRaWAN χρησιμοποιεί τους παρακάτω ρυθμούς κώδικα (code rate) για την διόρθωση σφαλμάτων κατά την λήψη της πληροφορίας: **4/5, 4/6, 5/7 και 4/8.**

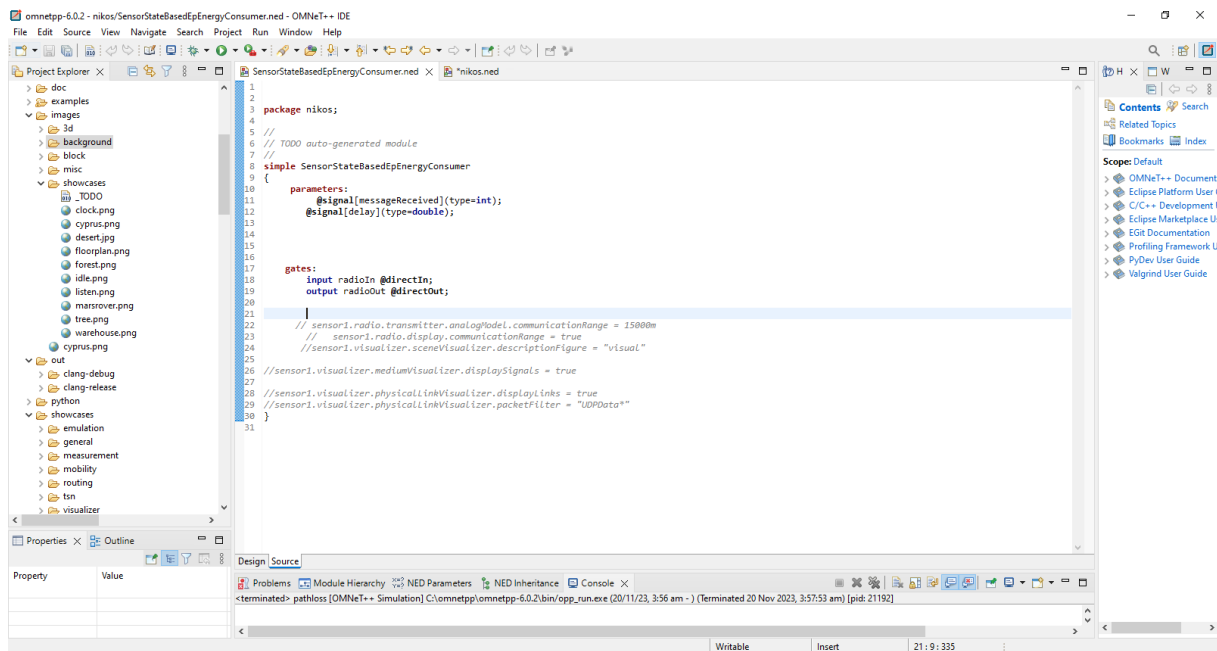
Ως παράδειγμα ο ρυθμός κώδικα **5/7** δηλώνει ότι για κάθε 5 bits πληροφορίας προστίθενται 2 επιπλέον (πλεονάζοντα) bits. Τα δύο αυτά ψηφία έχουν ως σκοπό τον έλεγχο ακεραιότητας των 5 bits πληροφορίας και στην περίπτωση που έχουν αλλοιωθεί, την διόρθωση τους. Ομοίως, στον ρυθμό κώδικα **4/8** για 4 bits πληροφορίας προστίθενται 4 bits για τον έλεγχο και διόρθωση της ληφθείσας πληροφορίας στον δέκτη.

Κεφάλαιο 3

Ο προσομοιωτής Omnet

Ο προσομοιωτής OMNeT ++ είναι ένας προσομοιωτής δικτύου, υποστηρίζει ένα αντικειμενοστραφή πλαίσιο καταγραφής διακριτών συμβάντων. Η δομή του προσομοιωτή του δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλα μοντέλα δικτύων όπως μοντελοποίηση ασύρματων δικτύων, ενσύρματων δικτύων, κ.α . Ένα από τα πλεονεκτήματα του είναι η επαναχρησιμοποίηση δομικών στοιχείων που είχαν δημιουργηθεί στο παρελθόν από χρήστη για παρόμοια ή και διαφορετική μοντελοποίηση. Η εφαρμογή OMNeT ++ είναι γραμμένη σε γλώσσα C++. Το OMNeT++ είναι δωρεάν μόνο για ακαδημαϊκή και μη κερδοσκοπική χρήση.

Ο προσομοιωτής περιλαμβάνει ένα σύνολο βιβλιοθηκών όπως τις inet, flora, κ.α. οι οποίες είναι αρκετά εμπλουτισμένες σε δομικά στοιχεία συμπεριλαμβανομένων συσκευών όπως αισθητήρες, routers, switches, ενσύρματη σύνδεση συσκευών, servers, κ.α. καθώς και γραφικές απεικονίσεις. Ο προσομοιωτής Omnet υποστηρίζει ένα σύνολο βιβλιοθηκών οι οποίες αποτελούνται από μια πληθώρα πακέτων και αρχείων που αναπαριστούν την δομή και λειτουργία ποικίλων συσκευών και καταστάσεων όπως κεραίες, αισθητήρες, εξυπηρετητές, καλωδίωση και συνδεσμολογία μεταξύ συσκευών, καταστάσεων όπως ασύρματη μετάδοση, αποστολή πακέτων, απώλεια ενέργειας κατά την αποστολή (path loss), κ.α. Συγκεκριμένα η βιβλιοθήκη INET Framework καλύπτει πολλά θέματα προσομοίωσης για ενσύρματα και ασύρματα τοπικά και ευρύτερης έκτασης δίκτυα (LAN, WLAN, WAN,) που σχετίζονται με τα πρωτόκολλα IEEE 802.11 , IEEE 802.3, IEEE 802.16 κτλ. Η βιβλιοθήκη FLoRa καλύπτει θέματα που αφορούν κυρίως την προσομοίωση δικτύων LoRa. Ενώ παράλληλα υπάρχουν βιβλιοθήκες για προσομοίωση τηλεπικοινωνιακών δικτύων LTE (simuLTE) και 5G (simu5G)



Εικόνα 3.1: Ο προσομοιωτής OMNeT++

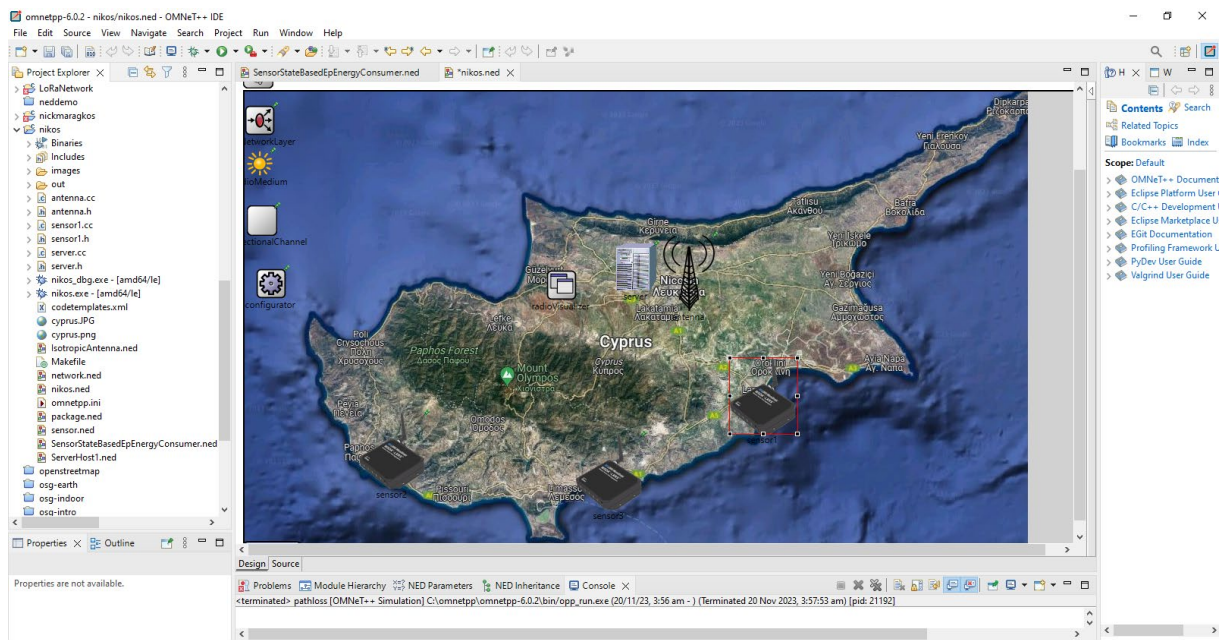
3.1 Προσομοίωση.

Σε ένα δίκτυο LoRa για επιτευχθεί η καλύτερη σύνδεση είναι προτεινόμενο να είναι σε απευθείας ορατή επαφή ο πομπός με τον δέκτη. Πρακτικά αν υπάρχουν εμπόδια (αστική ή ημιαστική περιοχή) η εμβέλεια της μετάδοσης και λήψης μπορεί να περιοριστεί. Ο προσομοιωτής δεν μπορεί να γνωρίζει το περιβάλλον όπου θα εγκατασταθεί ένα δίκτυο LoRa. Μπορεί όμως σχεδόν με ακρίβεια να υπολογίσει και να προσομοιώσει ένα πολύπλοκο ή απλό δίκτυο αρκεί να έχει τις αναγκαίες τιμές παραμέτρων που σχετίζονται με την απόσταση, συχνότητα, τύπο συσκευών, κατανάλωση ενέργειας και εφόσον προγραμματιστεί κατάλληλα με τον κατάλληλο κώδικα.

Συνεπώς, σε ένα χώρο όπως είναι το νότιο τμήμα της Κύπρου, τοποθετώντας μια κεραία λήψης με ένα εξυπηρετητή στην Λευκωσία θα μπορούσαν να τοποθετηθούν τρεις αισθητήρες (θερμοκρασίας, ή υγρασίας, ή ποιότητας αέρα, κτλ.) συνδεδεμένες με την απαραίτητη πύλη εξόδου και φυσικά την απαραίτητη παροχή ενέργειας. Οι τρεις αυτοί αισθητήρες θα μπορούσαν να τοποθετηθούν από ένας στις παρακάτω πόλεις: Πάφο, Λεμεσό, Λάρνακα. Η Λάρνακα είναι σε απευθείας ορατή επαφή με την Λευκωσία, η Λεμεσός μπορεί να έχει κάποια εμπόδια και ανάμεσα από την Πάφο και Λευκωσία μεσολαβούν ορεινοί όγκοι – εμπόδια. Άρα στην περίπτωση της

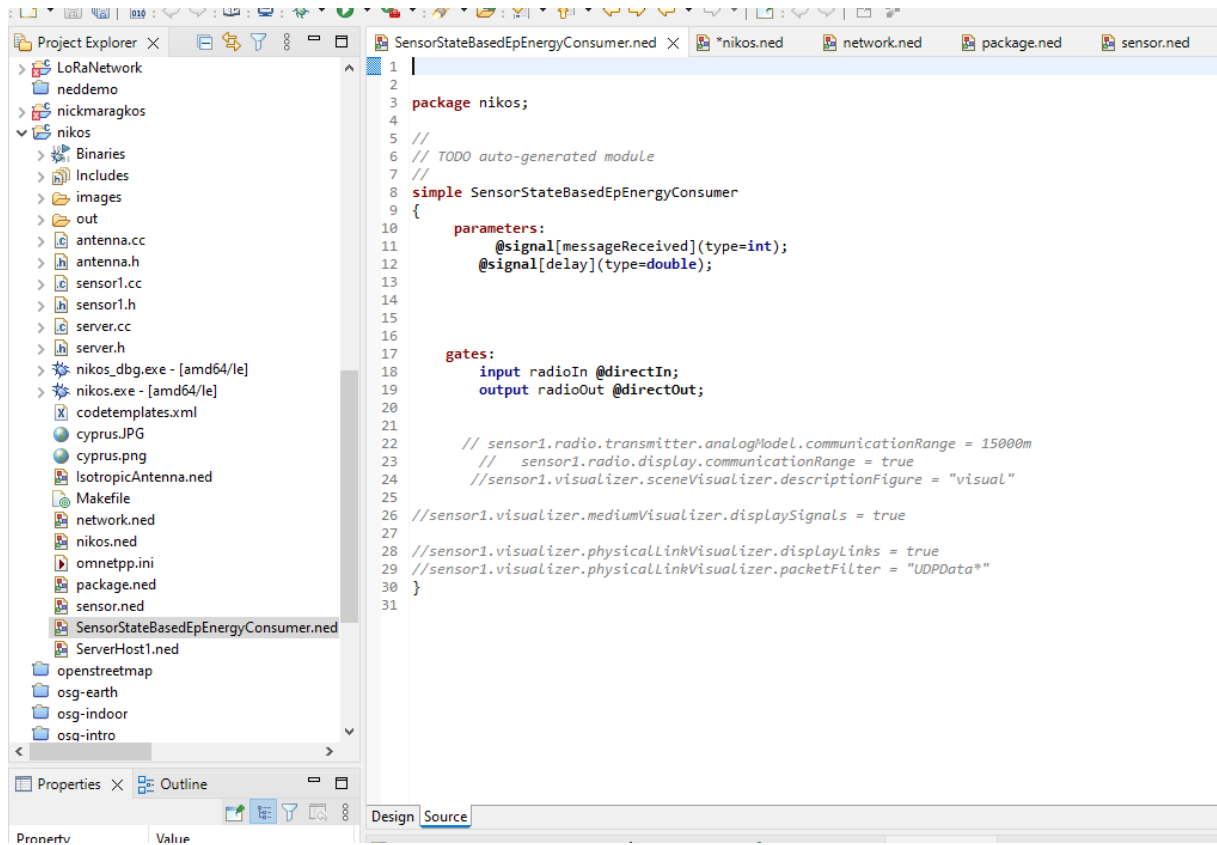
Πάφου θα χρειαζόταν ένας ή και περισσότεροι αναμεταδότες (κεραίες) ώστε να μεταδοθεί ικανοποιητικά το σήμα από την Πάφο στην Λευκωσία.

Η τοπολογία θα μπορούσε να δείχνει όπως στην παρακάτω εικόνα 3.2

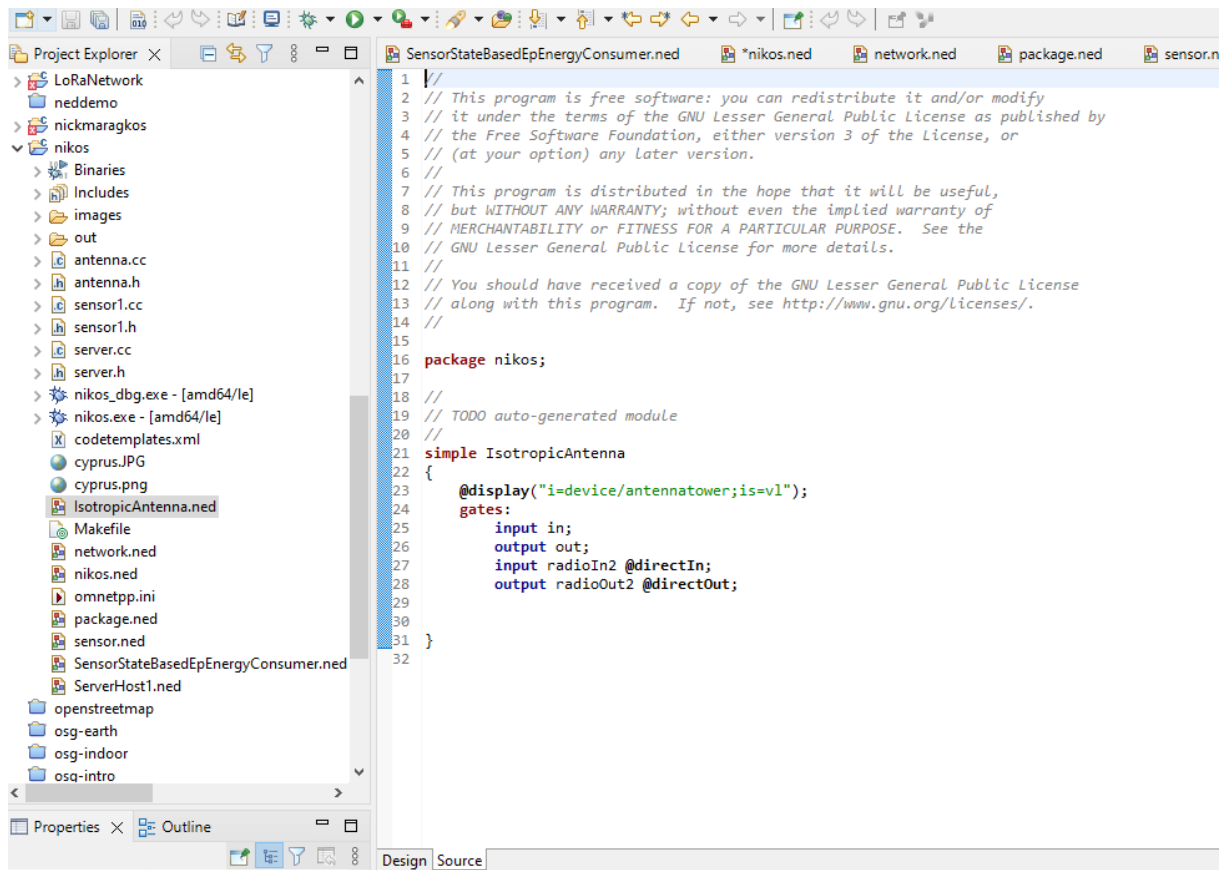


Εικόνα 3.2: Τοπολογία δικτύου LoRa σε μεσογειακό περιβάλλον (Κύπρος)

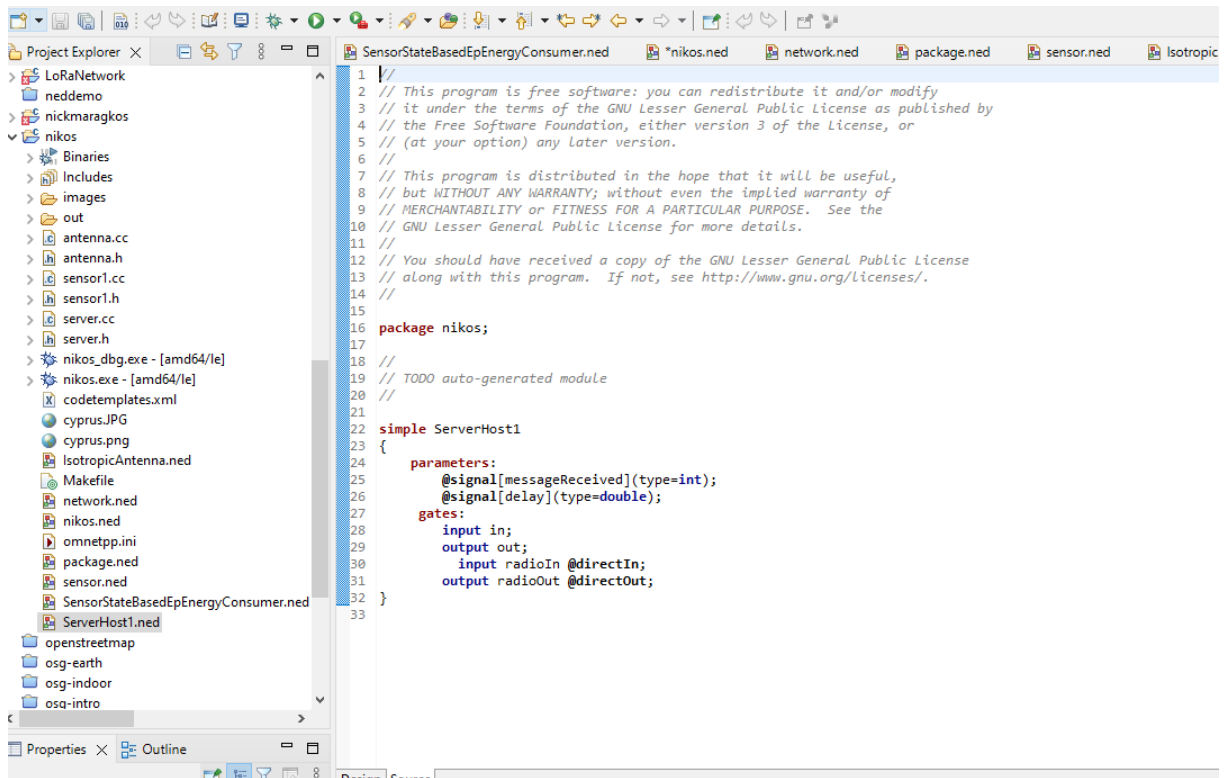
Αρχεία που συνοδεύουν την προσομοίωση:



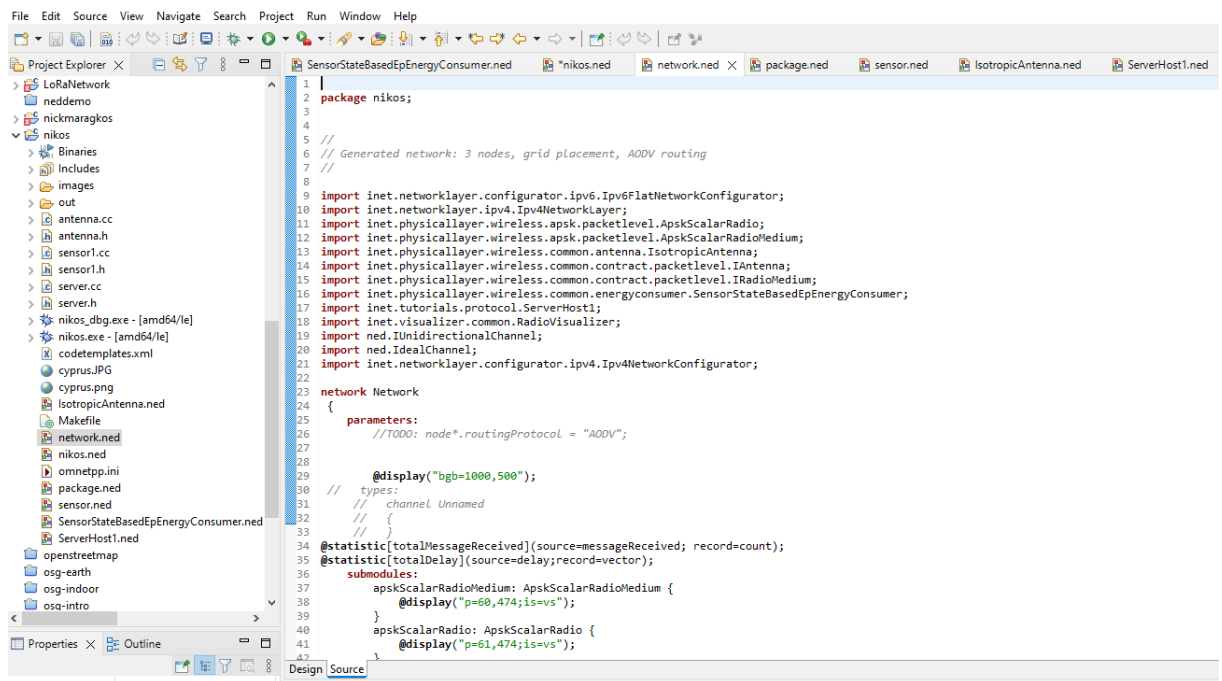
Εικόνα 3.3: το αρχείο για τον αισθητήρα



Εικόνα 3.4: το αρχείο για την κεραία



Εικόνα 3.5: το αρχείο για τον server



Εικόνα 3.6: το αρχείο για το network

Ο κώδικας του αρχείου για το network:

```
package nikos;

//
// Generated network: 3 nodes, grid placement, AODV routing
//

import inet.networklayer.configurator.ipv6.Ipv6FlatNetworkConfigurator;
import inet.networklayer.ipv4.Ipv4NetworkLayer;
import inet.physicallayer.wireless.apsk.packetlevel.ApskScalarRadio;
import inet.physicallayer.wireless.apsk.packetlevel.ApskScalarRadioMedium;
import inet.physicallayer.wireless.common.antenna.IsotropicAntenna;
import inet.physicallayer.wireless.common.contract.packetlevel.IAntenna;
import inet.physicallayer.wireless.common.contract.packetlevel.IRadioMedium;
import
inet.physicallayer.wireless.common.energyconsumer.SensorStateBasedEpEnergyConsumer
;
import inet.tutorials.protocol.ServerHost1;
import inet.visualizer.common.RadioVisualizer;
import ned.IUnidirectionalChannel;
import ned.IdealChannel;
import inet.networklayer.configurator.ipv4.Ipv4NetworkConfigurator;

network Network
{
  parameters:
  //TODO: node*.routingProtocol = "AODV";
  @display("bgb=1000,500");
  // types:
  // channel Unnamed
  // {
  // }
  @statistic[totalMessageReceived](source=messageReceived; record=count);
  @statistic[totalDelay](source=delay; record=vector);
  submodules:
  apskScalarRadioMedium: ApskScalarRadioMedium {
  @display("p=60,474;is=vs");
  }
  apskScalarRadio: ApskScalarRadio {
  @display("p=61,474;is=vs");
  }
  iantenna: <antenna> like IAntenna {
  @display("p=18,474;i=-");
  }

  configurator:Ipv4NetworkConfigurator;
  ipv4NetworkLayer: Ipv4NetworkLayer {
  @display("p=45,474;is=vs");
  }
  iRadioMedium: <"UnitDiskRadioMedium"> like IRadioMedium {
  @display("p=74,97;is=l");
  }
  iUnidirectionalChannel: <paramName> like IUnidirectionalChannel {
  @display("p=61,474;is=s");
  }
  radioVisualizer: RadioVisualizer {
  @display("p=90,26");
  }
  serverHost1: ServerHost1 {
```

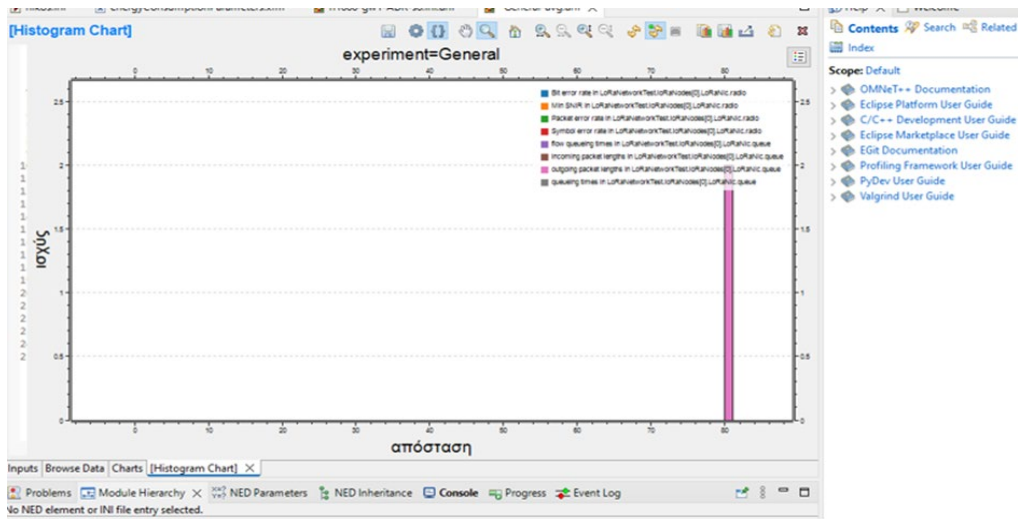


```

@display("p=919,253;i=old/server1;is=1");
}
sensorStateBasedEpEnergyConsumer: SensorStateBasedEpEnergyConsumer {
@display("p=61,474;b=24,5,rect;is=vs");
}
sensorStateBasedEpEnergyConsumer1: SensorStateBasedEpEnergyConsumer {
@display("p=331,72;i=misc/sensorgateway;is=1");
// *.sensorStateBasedEpEnergyConsumer1.radio.displayCommunicationRange=true;
}
sensorStateBasedEpEnergyConsumer2: SensorStateBasedEpEnergyConsumer {
@display("p=193,151;b=,,oval;i=misc/sensorgateway;is=1");
}
sensorStateBasedEpEnergyConsumer3: SensorStateBasedEpEnergyConsumer {
@display("p=233,401;i=misc/sensorgateway;is=1");
}
antenna: IsotropicAntenna {
@display("p=773.07996,336.34;is=v1");}
connections:
sensor1.radioOut --> antenna.radioIn;
sensor2.radioOut --> antenna.radioIn;
sensor3.radioOut --> antenna.radioIn;
antenna.radioOut --> server.in
}

```

Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μετά την ολοκλήρωση εκτέλεσης μιας προσομοίωσης OMNET ο χρήστης μπορεί να έχει γραφικές αναπαραστάσεις από τις ενέργειες και καταστάσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Για παράδειγμα μια γραφική αναπαράσταση της αποστολής πακέτων από τον τερματικό χρήστη (αισθητήρα) προς το εξυπηρετητή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ή μια γραφική αναπαράσταση της ισχύος του σήματος κατά την λήψη από τον δέκτη για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ή μια γραφική αναπαράσταση της απώλειας ενέργειας το σήματος κατά την μετάδοση του, κ.α.



Εικόνα 3.7: γραφική αναπαράσταση της ισχύος του σήματος κατά την μετάδοση (μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης).

Βιβλιογραφία

- [01] Hassan, Q. F. (2018). *Internet of Things (IoT) A to Z*. Wiley-IEEE Press.
- [02] Dejan Mijic, D. D. (2018). *Scalable Architecture for the Internet of Things*. O'Reilly Media, Inc.
- [03] MONTAGNY, S. (2021). *LoRa - LoRaWAN*. Université Savoie Mont Blanc.
- [04] Seneviratne, P. (2019). *Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks*. Apress.
- [05] Waher, P. (2018). *Mastering Internet of Things*. Packt Publishing.
- [06] M Slabicki, «Adaptive Configuration of LoRa Networks for Dense IoT Deployments»
Department of Computer Science, Aalto University, Finland
- [07] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low Power Wide Area Networks: An Overview,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [08] M. Saari, et al “Embedded Linux controlled sensor network,” in 2016 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), no. CTS- Computers in Technical Systems. IEEE, pp. 1185–1189, 2016.

Παράρτημα Α

Τίτλος Παραρτήματος

A.1 συντομογραφίες - Abbreviations and Acronyms

ABP Activation By Personalization

ADR Adaptive Data Rate

AS Application Server

AppKey Application Key

AppSKey Application Session Key

BW Bandwidth

CDMA Code Division Multiple Access

CHIRP Compressed High Intensity Radar Pulse

CR Coding Rate

CRC Check Redundancy Cycle

DevAddr Device Address

FDM Frequency Division Multiplexing

HTTP HyperText Transfer Protocol

IoT Internet of Things

LoRaWAN Long Range Wide Area Network

LPWAN Low Power Wide Area Network.

LTE-M Long Term Evolution Cat M1

MQTT Message Queuing Telemetry Transport

NB-IoT NarrowBand Internet of Things

NS Network Server

NwkSKey Network Session Key

QoS Quality of Service

RSSI Received Signal Strength Indication

SDR Software Digital Radio

SE Secure Element

SF Spreading Factor

SNR Signal over Noise Ratio

TDM Time Division Multiplexing

A.2 Εικόνες

Εικόνα 1.1: Πλαίσιο Internet of Things.

Εικόνα 1.2: Προβολή υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονικής IoT

Εικόνα 1.3: Ιεραρχική ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Εικόνα 1.4: τοπολογία αστέρα

Εικόνα 1.5: τοπολογία mesh

Εικόνα 2.1: Πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο IoT

Εικόνα 2.2: Εφαρμογή FDMA στο LoRa

Εικόνα 2.3: Χρήση φάσματος διάχυσης στο LoRa

Εικόνα 2.4: Φάσμα μετάδοσης LoRa

Εικόνα 2.5: Διαδικασία κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης δεδομένων

Εικόνα 2.6: Υποδοχές λήψης για μια τελική συσκευή κατηγορίας A.

Εικόνα 2.7: Υποδοχές λήψης για συσκευή Κατηγορίας B

Εικόνα 2.8: Υποδοχές λήψης για συσκευή κατηγορίας C

Εικόνα 2.9: Κατανάλωση ενέργειας και δυνατότητες κατερχόμενης ζεύξης (downlink)

Εικόνα 2.10: Επίπεδα πρωτοκόλλου LoRaWAN

Εικόνα 2.11: η σχέση του dB με την ισχύ που εκπέμπει ο πομπός και την ισχύ που λαμβάνει ο δέκτης

Εικόνα 2.11: Η σχέση συχνότητας, απόστασης και εξασθένησης σήματος στα δίκτυα LoRa.

Εικόνα 3.1: Ο προσομοιωτής OMNeT++

Εικόνα 3.2: Τοπολογία δικτύου LoRa σε μεσογειακό περιβάλλον (Κύπρος)

Εικόνα 3.3: το αρχείο για τον αισθητήρα

Εικόνα 3.4: το αρχείο για την κεραία

Εικόνα 3.5: το αρχείο για τον server

Εικόνα 3.6: το αρχείο για το network

Εικόνα 3.7: γραφική αναπαράσταση της ισχύος του σήματος κατά την μετάδοση (μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης).

A.3 Πίνακες

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές, συχνότητες και εμβέλεια πρωτοκόλλων

Πίνακας 2.1: Ζώνες ελεύθερων συχνοτήτων

Πίνακας 2.1: Υποχρεωτικό σχέδιο συχνοτήτων LoRaWAN