

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

**Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

## **Μεταπτυχιακή Διατριβή** **Στα Συστήματα Ασύρματης Επικοινωνίας**



**Μελέτη, Σχεδίαση και Προσομοίωση Ασύρματου Δικτύου**  
**Εσωτερικού Χώρου και Χαμηλής Ενέργειας**

**Θεοφάνης Γιαγμουρίδης**

**Επιβλέπων Καθηγητής**  
**Δημοσθένης Βουγιούκας**

**Μάιος 2023**

# **Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου**

## **Σχολή Θετικών και Εφαρμοσμένων Επιστημών**

**Μελέτη, Σχεδίαση και Προσομοίωση Ασύρματου Δικτύου  
Εσωτερικού Χώρου και Χαμηλής Ενέργειας**

**Θεοφάνης Γιαγμουρίδης**

**Επιβλέπων Καθηγητής  
Δημοσθένης Βουγιούκας**

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

**Μάιος 2023**

## Περίληψη

Το Industrial Internet of Things (IIoT), ή αλλιώς η Έξυπνη Βιομηχανική Ολοκλήρωση, αναφέρεται στην ένταξη των δικτύων και των συσκευών μεταξύ τους στον βιομηχανικό τομέα. Το IIoT αξιοποιεί τη συνδεσιμότητα, την ανάλυση δεδομένων, την τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση για να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες και την απόδοση των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Από την αισθητήρια παρακολούθηση και τον έλεγχο των μηχανών έως την αναλυτική πρόβλεψη συντήρησης και την αυτοματοποίηση της παραγωγής, το IIoT έχει μεταμορφώσει τον τρόπο λειτουργίας των βιομηχανικών κλάδων.

Παράλληλα με το IIoT η έννοια των Δικτύων Έξυπνων Οικιακών Συσκευών (Smart Home Area Networks) έχει επίσης εμφανίσει μια νέα εποχή στον κόσμο της οικιακής αυτοματισμένης τεχνολογίας. Οι έξυπνες οικίες τώρα μπορούν να συνδέσουν και να ελέγχουν ένα ευρύ φάσμα συσκευών, όπως φωτισμός, θερμοστάτες, κάμερες ασφαλείας, ηλεκτρικές συσκευές και ακόμα και συστήματα ασφαλείας, μέσω μιας κεντρικής πλατφόρμας διαχείρισης. Αυτό δίνει στους κατοίκους πλήρη έλεγχο και πρόσβαση στο σπίτι τους από απόσταση, επιτρέποντάς τους να προσαρμόσουν και να διαμορφώσουν το περιβάλλον τους κατάλληλα προς τις προτιμήσεις τους. Τα Smart Home Area Networks επιτρέπουν επίσης τη δημιουργία έξυπνων ενεργειακών συστημάτων, με την ολοκλήρωση των ηλεκτρικών συσκευών, των φωτοβολταϊκών πάνελ και των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό επιτρέπει την αυτόματη παρακολούθηση και διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης, με στόχο τη μείωση των ενεργειακών απωλειών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας.

Στη διατριβή αυτή, εξετάζουμε τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που μπορούν να υποστηρίξουν την υλοποίηση ενός έξυπνου οικιακού δικτύου. Περιγράφουμε το Bluetooth Low Energy, τα χαρακτηριστικά του, τις δυνατότητες διαμόρφωσής του και κατά πόσο μπορεί να προσφέρει στις λειτουργίες έξυπνης διαχείρισης φωτισμού. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις οπτικές επικοινωνίες – VLC και στα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου IEEE-802.15.7 Το Li-Fi χρησιμοποιεί ως κόμβους τις φωτιστικές πηγές του Smart Lighting System και παρέχει υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων σε downlink συνδέσεις. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των διαφόρων σεναρίων είναι το OMNeT++ στην έκδοση 6.0.1 στο οποίο έχει εγκατασταθεί το πακέτο INET. Το τελευταίο είναι αυτό που μας έδωσε τη δυνατότητα σχετικά γρήγορα και χωρίς να γράψουμε καινούριο κώδικα να υλοποιήσουμε το MAC επίπεδο του 802.15.7 τροποποιώντας το πρωτόκολλο 802.15.4 που βρίσκεται ενσωματωμένο σε αυτό.

Τέλος, γίνεται αναφορά στο BLE Mesh και εξετάζονται σενάρια υλοποίησης του στο OMNeT++ αφού αυτό θα αποτελέσει τον κορμό μιας smart lighting υποδομής.

## Summary

The Industrial Internet of Things (IIoT), or Smart Industrial Integration, refers to the integration of networks and devices within the industrial sector. The IIoT leverages connectivity, data analysis, artificial intelligence, and machine learning to optimize processes and performance in industrial facilities. From sensor monitoring and machine control to predictive maintenance analytics and production automation, the IIoT has transformed the way industrial sectors operate.

Alongside the IIoT, the concept of Smart Home Area Networks has also ushered in a new era in the world of home automation technology. Smart homes can now connect and control a wide range of devices such as lighting, thermostats, security cameras, electrical appliances, and even security systems through a central management platform. This gives residents complete control and remote access to their homes, allowing them to customize and configure their environment according to their preferences. Smart Home Area Networks also enable the creation of smart energy systems by integrating electrical devices, photovoltaic panels, and energy storage systems. This enables automatic monitoring and management of energy consumption, aiming to reduce energy losses and improve efficiency.

In this thesis, we examine the communication protocols that can support the implementation of a smart home network. We describe Bluetooth Low Energy, its characteristics, configurability, and its potential in smart lighting management functions. Next, we refer to Visible Light Communications (VLC) and the characteristics of the IEEE 802.15.7 protocol. Li-Fi utilizes the luminaires of the Smart Lighting System as nodes and provides high-speed data transmission in downlink connections. The tool used for simulating various scenarios is OMNeT++ version 6.0.1 with the INET package installed. The latter allowed us to quickly implement the MAC layer of 802.15.7 by modifying the embedded 802.15.4 protocol without the need for writing new code.

Finally, we mention BLE Mesh and explore implementation scenarios in OMNeT++ as it will form the core of a smart lighting infrastructure.

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να πάρω λίγο χρόνο για να ευχαριστήσω τα άτομα χωρίς τα οποία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βουγιούκα Δημοσθένη για την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής, καθώς και για την άψογη επικοινωνία και συνεργασία που είχαμε όλον αυτό τον καιρό. Δε θα μπορούσα να αμελήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αγγελή Νικόλαο για τη διαρκή υποστήριξη. Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και στους φίλους μου που μου συμπαραστάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια.

# CONTENTS

Περίληψη.....	2
Summary .....	4
Ευχαριστίες.....	5
Κεφάλαιο 1 .....	8
Εισαγωγή: Η Ανθρώπινη Εξέλιξη και η Σημασία των Έξυπνων Οικιακών Δικτύων .....	8
1.1. Η έννοια της «έξυπνης κατοικίας».....	9
1.2. Αρχιτεκτονική των SHANs.....	10
1.3. Πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας.....	12
1.4. IIoT - Industrial Internet of Things .....	14
Κεφάλαιο 2 .....	16
BLE - Bluetooth Low Energy .....	16
2.1. Εισαγωγή.....	16
2.2. Ιστορική αναδρομή.....	18
2.3. Αρχιτεκτονική.....	19
2.4. Εφαρμογές.....	21
2.5. BLE Mesh.....	22
Κεφάλαιο 3 .....	24
VLC - Visible Light Communication.....	24
3.1. Εισαγωγή.....	24
3.2. Βασικά μέρη του VLC συστήματος.....	25
3.2.1. Πομπός.....	26
3.2.2. Κανάλι Επικοινωνίας .....	27
3.2.3. Δέκτης.....	28
3.2.4. Κύκλωμα Αποδιαμόρφωσης.....	32
3.2.5. Front-end Ενίσχυση και φιλτράρισμα.....	34
3.2.6. Συγχρονισμός και ανάκτηση συγχρονισμού.....	35
3.3. Επιπρόσθετα στοιχεία του VLC συστήματος.....	36
3.3.1. Beamforming και Optical Tracking .....	36
3.3.2. Διαχείριση Ενέργειας.....	38
3.4. Network και Protocol Design.....	40
Κεφάλαιο 4 .....	44
OMNeT++ Discrete Event Simulator.....	44
4.1. Εισαγωγή.....	44
4.2. Περιβάλλον εργασίας.....	45

4.2.1. Modules - Δομικές μονάδες του OMNeT++ .....	46
4.2.2. Κανάλια - Channels.....	47
4.2.3. Network Description Language (NED) - Γλώσσα Περιγραφής Δικτύου.....	49
4.2.4. Αρχεία Παραμετροποίησης .INI .....	50
4.2.5. Μηνύματα στο OMNeT++ .....	51
4.2.6. Παραμετροποίηση μια προσομοίωσης.....	52
4.3. Προσομοίωση με το OMNeT++ του VLC δικτύου .....	54
4.3.1.1. Το οπτικό μέσο.....	55
4.3.1.2. Κόμβοι.....	56
4.3.1.3. Δομή του μοντέλου.....	58
4.3.1.4. Κινητικότητα.....	60
4.3.1.5. Μηχανισμός ειδοποιήσεων .....	60
4.3.1.6. Κατανάλωση μπαταρίας .....	60
4.3.2. Τα ανώτερα στρώματα.....	61
4.3.2.1. Το επίπεδο εφαρμογής.....	61
4.3.2.2. Το επίπεδο δικτύου.....	61
4.3.2.3. Interface Network Queue.....	62
4.3.2.4. Το MAC επίπεδο.....	62
4.3.2.5. Το PHY επίπεδο .....	63
4.3.2.6. Το οπτικό μέσο.....	64
4.3.3. Υλοποίηση και προσομοίωση του δικτύου VLC .....	64
4.3.4. Συμπεράσματα.....	69
4.4. Προσομοίωση με το OMNeT++ του BLE δικτύου .....	69
4.4.1. Το φυσικό επίπεδο.....	70
4.4.2. MAC πρωτόκολλα στο MIXIM.....	72
4.4.3. Θεωρητικός υπολογισμός της ρυθμαπόδοσης.....	74
4.4.4. Υλοποίηση του BLE στο OMNeT++ .....	76
4.5. Προσομοίωση με το OMNeT++ BLE Mesh τοπολογίας.....	79
4.5.1. Επίπεδα Bluetooth Mesh.....	82
4.5.2. Provisioning .....	87
4.5.3. Αξιολόγηση BLE Mesh δικτύου στο OmNET++.....	88
4.5.3.1. Btmesh Relay (BTM-R) – Flooding.....	89
4.5.3.2 Προσομοίωση.....	90
Επίλογος .....	93



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή: Η Ανθρώπινη Εξέλιξη και η Σημασία των Έξυπνων Οικιακών Δικτύων

Η ανθρώπινη εξέλιξη σε μεγάλο βαθμό στηρίζεται στην ανάπτυξη νέων και καινοτόμων τεχνολογιών, καθώς και στην ενσωμάτωσή τους στους τρόπους με τους οποίους ο άνθρωπος αλληλεπιδρά με το περιβάλλον. Στο πλαίσιο της κτηριακής αυτοματοποίησης, μία από τις πιο σημαντικές και ταχύτατα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες είναι η έξυπνη δικτύωση και ραδιοκάλυψη, που στοχεύουν στην υλοποίηση των Έξυπνων Οικιακών Δικτύων (Smart Home Area Networks – SHANs) [1].

Ενώ αρχικά τα SHANs επικεντρώνονταν στον έλεγχο του φωτισμού και του κλιματισμού, πλέον έχουν εξελιχθεί τόσο ώστε σχεδόν κάθε ηλεκτρική συσκευή να περιλαμβάνεται σε ένα σύστημα «έξυπνης δικτύωσης». Πέρα από την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των συσκευών, αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και έλεγχο των συνθηκών του εσωτερικού

περιβάλλοντος, του αριθμού των διαμενόντων και των δραστηριοτήτων τους, καθώς και για την ανεξάρτητη λειτουργική διαχείριση των χώρων βάσει προεπιλεγμένων παραμέτρων που αφορούν κάθε χρήστη ξεχωριστά. Επιπρόσθετα, κάθε συσκευή μπορεί να είναι φορέας του τηλεπικοινωνιακού σήματος, δημιουργώντας ένα πλέγμα διασυνδεδεμένων κόμβων που στα πλαίσια της αμφίδρομης επικοινωνίας χρήστη-συσκευή, συσκευή-συσκευή, μπορούν να εφαρμόζουν τεχνολογίες υπολογιστικής νέφους, big data analytics, κυβερνοασφάλειας, μηχανικής εκμάθησης, τεχνητής νοημοσύνης και να υλοποιούν το Industrial Internet of Things (IIoT) [2].

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εστιάζει στην εξέταση των δυναμικών και των προκλήσεων που συνδέονται με την ανάπτυξη και εφαρμογή των Έξυπνων Οικιακών Δικτύων, καθώς και στην αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων τους στην κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον. Εξετάζονται οι τεχνολογίες που υποστηρίζουν την υλοποίηση των SHANs, καθώς και οι πρακτικές που συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης, της ασφάλειας και της ευελιξίας των συστημάτων. Προσεγγίζονται οι τεχνολογίες Bluetooth Low Energy και Visible Light Communication και εξετάζεται η απόδοσή τους σε κόμβους που συνδυάζουν αυτές τις τεχνολογίες. Αφού παρουσιαστούν οι βασικές αρχές των δύο τεχνολογιών, αναλύεται η δυνατότητα συνεργασίας τους και η απόδοσή τους στην πράξη. Επίσης, εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί αυτής της συνδυαστικής προσέγγισης και παρουσιάζονται οι εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς, όπως στον εντοπισμό τοποθεσίας και στην ασφάλεια των ασύρματων δικτύων. Τέλος, προτείνονται πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτόν.

## ο **Η έννοια της «έξυπνης κατοικίας»**

Η έννοια της «έξυπνης κατοικίας» αναφέρεται στη χρήση τεχνολογικών λύσεων για τη βελτίωση της ζωής στο σπίτι. Με τη χρήση της τεχνολογίας, οι κατοικίες μπορούν να είναι πιο ασφαλείς, πιο άνετες και πιο αποδοτικές από άποψη ενέργειας. Η έξυπνη κατοικία συνδέει τους κατοίκους με την τεχνολογία, παρέχοντας τους δυνατότητες για ελέγχους και παρακολούθηση των διάφορων συστημάτων του σπιτιού, όπως τον φωτισμό, τη θέρμανση και την ασφάλεια.

Η έξυπνη κατοικία είναι ένα πολυδιάστατο θέμα που απαιτεί μια σειρά από γνώσεις σε διάφορους τομείς, όπως η ηλεκτρολογία, η ηλεκτρονική, η μηχανική, η επιστήμη των υλικών και η πληροφορική. Επίσης, η έξυπνη κατοικία απαιτεί την ενσωμάτωση της τεχνολογίας στην αρχιτεκτονική και τον σχεδιασμό του σπιτιού. Η έξυπνη κατοικία μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για τους κατοίκους της. Με τη χρήση αισθητήρων και συστημάτων

αυτοματισμού, οι κάτοικοι μπορούν να ελέγχουν τη θερμοκρασία, το φωτισμό, τα συστήματα ασφαλείας και τα συστήματα κλιματισμού από το κινητό τους τηλέφωνο ή τον υπολογιστή τους. Επιπλέον, η έξυπνη κατοικία μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια και να μειώσει το κόστος των λογαριασμών του ηλεκτρικού και του νερού.

Η έξυπνη κατοικία έχει ήδη αρχίσει να επικρατεί σε διάφορες περιοχές του κόσμου, και οι εταιρείες κατασκευής σπιτιών αναπτύσσουν συνεχώς νέες τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις λειτουργίες της έξυπνης κατοικίας. Η έξυπνη κατοικία έχει επίσης θετική επίδραση στο περιβάλλον, καθώς μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Ωστόσο, υπάρχουν και ανησυχίες σχετικά με την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια των δεδομένων στην έξυπνη κατοικία. Καθώς οι κάτοικοι μοιράζονται προσωπικές πληροφορίες και δεδομένα με τα συστήματα αυτόματου ελέγχου της κατοικίας, υπάρχει η πιθανότητα αυτά τα δεδομένα να παραβιαστούν από κακόβουλους χρήστες ή επιθέσεις κυβερνοεγκληματικών οργανώσεων. Επιπλέον, η έξυπνη κατοικία εξαρτάται από τη σύνδεσή της στο διαδίκτυο, και η διακοπή αυτής της σύνδεσης μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ασφάλεια και τη λειτουργία των συστημάτων.

## ○ Αρχιτεκτονική των SHANs

Οι Έξυπνες Δικτυακές Περιοχές Σπιτιού (Smart Home Area Networks - SHANs) είναι μια μορφή αρχιτεκτονικής δικτύου σχεδιασμένη ειδικά για εφαρμογές έξυπνου σπιτιού. Βασίζονται στον συνδυασμό πολλών συσκευών και υπηρεσιών εντός ενός σπιτιού, όπως συστήματα φωτισμού, θέρμανσης και ψύξης, ασφαλείας και ψυχαγωγίας, σε ένα συστηματικά δικτυωμένο σύστημα που μπορεί να ελέγχεται από μια κεντρική συσκευή ή μια εφαρμογή κινητού τηλεφώνου.

Η αρχιτεκτονική των SHANs αποτελείται συνήθως από τρεις στρώσεις: τη φυσική στρώση, τη δικτυακή στρώση και την εφαρμογική στρώση.

Φυσική Στρώση - Physical Layer: Η φυσική στρώση αποτελεί τη χαμηλότερη στρώση της αρχιτεκτονικής SHAN και είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των συσκευών. Περιλαμβάνει τα φυσικά εξαρτήματα του δικτύου, όπως τα καλώδια, οι δρομολογητές, οι διακόπτες και άλλες συσκευές υλικού. Η φυσική στρώση μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορες

τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi, το ZigBee, το Bluetooth Low Energy ή το Z-Wave για τη σύνδεση των συσκευών.

**Δικτυακή Στρώση - Network Layer:** Η δικτυακή στρώση είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών στο δίκτυο SHAN. Αναλαμβάνει τον δρομολόγηση και τη μεταφορά των πακέτων δεδομένων από μια συσκευή σε μια άλλη. Η δικτυακή στρώση χρησιμοποιεί πρωτόκολλα όπως το Internet Protocol (IP), το User Datagram Protocol (UDP) ή το Transmission Control Protocol (TCP) για να διασφαλίζει αξιόπιστη και αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συσκευών.

**Εφαρμογική Στρώση - Application Layer:** Η εφαρμογική στρώση είναι η υψηλότερη στρώση της αρχιτεκτονικής SHAN και είναι υπεύθυνη για την παροχή υπηρεσιών και εφαρμογών στους χρήστες. Περιλαμβάνει τα διασυνδετήρια χρήστη, τα APIs και τις εφαρμογές λογισμικού που επιτρέπουν στους χρήστες να ελέγχουν και να παρακολουθούν τις συσκευές στο δίκτυο. Η εφαρμογική στρώση μπορεί επίσης να ενσωματώσει υπηρεσίες βασισμένες στο cloud που μπορούν να παρέχουν επιπλέον λειτουργικότητα, όπως η απομακρυσμένη πρόσβαση και η ανάλυση δεδομένων.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής SHAN είναι η ευελιξία και η επεκτασιμότητά της. Μπορεί να υποστηρίξει μια μεγάλη ποικιλία συσκευών και υπηρεσιών και μπορεί να επεκταθεί ή να αναδιαμορφωθεί εύκολα για να ανταποκριθεί στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των χρηστών. Επιπλέον, οι SHANs μπορούν να ενσωματωθούν με άλλα έξυπνα συστήματα στο σπίτι, όπως συστήματα διαχείρισης ενέργειας ή αυτοματισμού σπιτιού, για να παρέχουν μια πλήρη και ενσωματωμένη λύση έξυπνου σπιτιού.

Παραδείγματα εφαρμογών των SHANs είναι η αυτοματοποίηση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, η απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχος της ασφάλειας του σπιτιού, η αυτόματη αλλαγή των φώτων ανάλογα με την ώρα της ημέρας και η αυτόματη ανοικοδόμηση του συστήματος από καταστροφές, όπως πλημμύρες και πυρκαγιές.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση των SHANs. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν το Wi-Fi, το ZigBee, το Bluetooth Low Energy, το Z-Wave και άλλες τεχνολογίες όπως το Power Line Communication (PLC) και το Infrared (IR). Η επιλογή της τεχνολογίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η απόσταση μεταξύ των συσκευών, η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και η αξιοπιστία του δικτύου.

Σε γενικές γραμμές, η αρχιτεκτονική των SHANs παρέχει μια λύση για τη σύνδεση και τον έλεγχο των συσκευών στο σπίτι, δημιουργώντας ένα έξυπνο σπίτι που μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες και τις προτιμήσεις των κατοίκων του. Η χρήση της αρχιτεκτονικής SHAN επιτρέπει τη δημιουργία μιας πλήρως ενσωματωμένης και αυτοματοποιημένης εμπειρίας σπιτιού, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση του κόστους ενέργειας.

## ○ Πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας

Η ασύρματη επικοινωνία αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα της τεχνολογίας επικοινωνίας, καθώς προσφέρει ευελιξία και ευρεία κάλυψη. Τα ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι οι κανόνες που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Οι βασικοί τύποι ασύρματων πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται ευρέως περιλαμβάνουν:

IEEE 802.11 (Wi-Fi) [3]: Το Wi-Fi αποτελεί το πιο δημοφιλές ασύρματο πρωτόκολλο για τη δημιουργία τοπικών ασύρματων δικτύων (WLAN). Οι στάνταρ IEEE 802.11 περιλαμβάνουν πολλές εκδοχές, όπως το 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac και 802.11ax, κάθε μία από τις οποίες προσφέρει διαφορετικές ικανότητες σε ό,τι αφορά τη ζώνη συχνοτήτων, την ταχύτητα δεδομένων και την κάλυψη.

Bluetooth [4]: Το Bluetooth είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Χρησιμοποιείται ευρέως για τη σύνδεση ακουστικών, ποντικών, πληκτρολογίων και άλλων περιφερειακών συσκευών με τους υπολογιστές ή τα κινητά τηλέφωνα. Υπάρχουν πολλές εκδοχές του πρωτοκόλλου Bluetooth, με την πιο πρόσφατη είναι το Bluetooth 5.2, που προσφέρει βελτιωμένη ταχύτητα, εμβέλεια και ασφάλεια.

ZigBee [5] και Thread [6]: Αυτά τα πρωτόκολλα είναι κατάλληλα για τη χρήση σε συστήματα οικιακής αυτοματοποίησης και Internet of Things (IoT) συσκευές, καθώς προσφέρουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, εμβέλεια, και τη δυνατότητα δημιουργίας mesh δικτύων. Το ZigBee βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως οι αισθητήρες και οι συσκευές ελέγχου φωτισμού. Το Thread είναι μια ανοιχτή προδιαγραφή που υποστηρίζεται από πολλές εταιρείες, όπως τη Google και την Apple, και σχεδιάστηκε για να παρέχει ασφαλή και αξιόπιστη επικοινωνία για τις οικιακές συσκευές.

Κυψελωτή Επικοινωνία (GSM, CDMA, LTE, 5G): Η κυψελωτή επικοινωνία χρησιμοποιείται για την παροχή φωνητικών και δεδομένων υπηρεσιών σε κινητά τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές. Οι κυριότεροι τύποι κυψελωτών πρωτοκόλλων περιλαμβάνουν:

GSM [7] (Global System for Mobile Communications): Είναι ένα πρότυπο 2G που βασίζεται στην τεχνολογία TDMA (Time Division Multiple Access). Το GSM είναι το πιο διαδεδομένο πρότυπο κυψελωτής επικοινωνίας παγκοσμίως.

CDMA [8] (Code Division Multiple Access): Είναι ένα άλλο πρότυπο 2G που χρησιμοποιεί την τεχνολογία CDMA για την πολλαπλή πρόσβαση. Το CDMA είναι λιγότερο διαδεδομένο από το GSM, αλλά παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε ορισμένες περιπτώσεις.

LTE [9] (Long-Term Evolution): Το LTE είναι ένα πρότυπο 4G που προσφέρει σημαντικά αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με τα προηγούμενα πρότυπα 2G και 3G. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) για να επιτρέψει την παράλληλη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε πολλαπλές συσκευές.

5G [10] (Fifth Generation): Το 5G είναι το πιο πρόσφατο πρότυπο κυψελωτής επικοινωνίας, το οποίο προσφέρει εκθετικά αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, χαμηλότερη καθυστέρηση και βελτιωμένη χωρητικότητα συσκευών σε σχέση με το 4G. Το 5G χρησιμοποιεί μια ποικιλία τεχνολογιών, όπως το Massive MIMO (Multiple Input, Multiple Output), beamforming και πολυδιασπορά συχνοτήτων, για να επιτύχει αυτά τα πλεονεκτήματα. Επιπλέον, το 5G έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίξει το Internet of Things (IoT), προσφέροντας αυξημένη ευελιξία και αξιοπιστία για τη σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών.

Εκτός από αυτά τα κύρια πρωτόκολλα, υπάρχουν πολλά άλλα ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για εξειδικευμένες εφαρμογές ή επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, όπως το LoRa (Long Range), το Sigfox και τα δορυφορικά πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Η επιλογή του κατάλληλου ασύρματου πρωτοκόλλου επικοινωνίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, η εμβέλεια, η κατανάλωση ενέργειας και η συμβατότητα με τις υπάρχουσες υποδομές. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η ασφάλεια, η ιδιωτικότητα, η προστασία από παρεμβολές και η δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου.

Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα των ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας συνεχίζεται, καθώς οι επιστήμονες και οι μηχανικοί αναζητούν νέους τρόπους για να βελτιώσουν την απόδοση, την ασφάλεια και την ευελιξία των ασύρματων δικτύων. Μερικά από τα τρέχοντα ερευνητικά ενδιαφέροντα περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, την ανάπτυξη κοινών πρωτοκόλλων για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και την προσαρμοστικότητα των ασύρματων δικτύων σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Στην πορεία της εργασίας θα γίνει αναφορά στα πρωτόκολλα επικοινωνίας BLE – Bluetooth Low Energy και VLC – Visible Light Communication ενώ θα εξεταστεί κατά πόσο είναι δυνατή η ταυτόχρονη ενσωμάτωση αυτών των πρωτόκολλων επικοινωνίας στη δικτύωση ενός «έξυπνου σπιτιού».

## ○ **IIoT – Industrial Internet of Things**

Το IIoT αναφέρεται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT) στο πλαίσιο της Βιομηχανίας (Industrial Internet of Things), που εφαρμόζεται για την παρακολούθηση και έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών. Αποτελεί μια εξέλιξη της βιομηχανικής αυτοματοποίησης και επιτρέπει στις βιομηχανίες να συλλέγουν δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως αισθητήρες, εργαλεία και συσκευές, και να τα αξιοποιήσουν για τη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας της παραγωγής.

Η χρήση του IIoT επιτρέπει στις επιχειρήσεις να αυξήσουν την απόδοση των μηχανημάτων και των διεργασιών, να μειώσουν το κόστος της συντήρησης και των επισκευών, και να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων που παράγουν. Επιπλέον, μπορεί να συνδέσει διαφορετικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας, όπως η παραγωγή, η διαχείριση αλυσίδων εφοδιασμού και η ασφάλεια.

Συνολικά, το IIoT αναμένεται να έχει μια σημαντική επίδραση στον τομέα της βιομηχανίας και να επιταχύνει την ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση των διεργασιών. Με τη βοήθεια του IIoT, οι επιχειρήσεις μπορούν να αυξήσουν την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα, να βελτιώσουν την ασφάλεια και την ποιότητα των προϊόντων, και να ενισχύσουν την ανταγωνιστικότητά τους στην παγκόσμια αγορά.

Οι εφαρμογές του IIoT είναι πολλές και ποικίλες, και περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της απόδοσης των μηχανημάτων, την αντιμετώπιση προβλημάτων στο σύστημα παραγωγής, την

παρακολούθηση της ασφάλειας του προσωπικού, τη διαχείριση του εφοδιαστικού αλυσίδας, την ανάλυση των δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Στην ουσία, το IIoT επιτρέπει στις βιομηχανίες να επωφεληθούν από τη δύναμη της συνδεδεμένης τεχνολογίας για να βελτιώσουν την παραγωγή και την απόδοση, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος και τις ανθρώπινες επεμβάσεις. Αυτό επιτρέπει στις βιομηχανίες να είναι πιο ευέλικτες και προσαρμόσιμες στις ανάγκες της αγοράς και να ανταποκριθούν στις αλλαγές της καταναλωτικής συμπεριφοράς και της παραγωγής.

Ωστόσο, η εφαρμογή του IIoT δεν είναι χωρίς προκλήσεις και αντιμετωπίζει ορισμένα εμπόδια, όπως η ασφάλεια των δεδομένων, η προστασία της ιδιωτικότητας και η ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων για την ανάλυση των μεγάλων όγκων δεδομένων. Επιπλέον, η εφαρμογή του IIoT απαιτεί σημαντική επένδυση σε τεχνολογία και υποδομές, καθώς και σε κατάρτιση και εκπαίδευση του προσωπικού.

Συνολικά, το IIoT αναμένεται να αλλάξει ριζικά την προσέγγιση της βιομηχανίας στην παραγωγή και τη διαχείριση, καθώς θα επιτρέψει στις επιχειρήσεις να είναι πιο ευέλικτες, πιο αποδοτικές και πιο ανταγωνιστικές στην παγκόσμια αγορά. Μερικά από τα συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογών του IIoT περιλαμβάνουν:

**Παραγωγή:** Η χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων και των εξοπλισμών, οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύσουν προβλήματα στην παραγωγική διαδικασία και να προτείνουν λύσεις.

**Διαχείριση αλυσίδας εφοδιασμού:** Η χρήση της τεχνολογίας RFID για την παρακολούθηση της κίνησης των προϊόντων στην αλυσίδα εφοδιασμού, καθώς και η χρήση της ανάλυσης δεδομένων για τη βελτίωση της προγνωστικής στρατηγικής και της διαχείρισης των αποθεμάτων.

**Ασφάλεια:** Η χρήση αισθητήρων και καμερών για την παρακολούθηση της ασφάλειας του προσωπικού στην παραγωγική διαδικασία και η ανάλυση των δεδομένων για τη βελτίωση των μέτρων ασφαλείας.

**Ενέργεια:** Η χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και η βελτιστοποίηση των ενεργειακών καταναλωτών, όπως οι φώτα και ο κλιματισμός, για τη μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας.



Μεταφορές: Η χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση των μεταφορικών μέσων, όπως τα φορτηγά, και η ανάλυση των δεδομένων για τη βελτίωση της διαχείρισης της κίνησης και της ασφάλειας των οδηγών.

Υγεία και ασφάλεια: Η χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων και η ανάλυση των δεδομένων για τη βελτίωση των μέτρων ασφαλείας και της υγειονομικής περίθαλψης.

Το ΙοΤ έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται και να εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την αύξηση της χωρητικότητας του Διαδικτύου, οι εφαρμογές του ΙοΤ αναμένεται να είναι πιο ευέλικτες, πιο αποδοτικές και πιο ακριβείς από ποτέ.

# Κεφάλαιο 2

## BLE – Bluetooth Low Energy

### 2.1. Εισαγωγή

Το Bluetooth Low Energy (BLE) [11], γνωστό και ως Bluetooth Smart είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας που αναπτύχθηκε από την Ομάδα Ειδικού Ενδιαφέροντος Bluetooth (SIG). Το BLE έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει σε συσκευές χαμηλής κατανάλωσης να

ανταλλάσσουν πληροφορίες σε μικρές αποστάσεις διατηρώντας παράλληλα σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με την κλασική τεχνολογία Bluetooth. Στις επόμενες παραγράφους, θα δοθεί μια εις βάθος επίσημη εξήγηση της τεχνολογίας BLE.

Το BLE λειτουργεί στη ζώνη ISM (Βιομηχανική, Επιστημονική και Ιατρική) των 2,4 GHz, χρησιμοποιώντας 40 κανάλια συχνότητας σε απόσταση 2 MHz μεταξύ τους, η οποία περιλαμβάνει 37 κανάλια δεδομένων και 3 κανάλια advertising (διαφήμισης). Χρησιμοποιεί ένα σχήμα μεταπήδησης συχνότητας που ονομάζεται Adaptive Frequency Hopping (AFH) για να μετριάσει τις παρεμβολές από άλλες ασύρματες συσκευές που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στο BLE είναι το Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK), με ρυθμό συμβόλων 1 MS/s. Το πρωτόκολλο BLE είναι χτισμένο στο Generic Attribute Profile (GATT) και στο Attribute Protocol (ATT). Η GATT παρέχει ένα πλαίσιο για την οργάνωση και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών σε τυποποιημένη μορφή, ενώ η ATT διευκολύνει την επικοινωνία χαρακτηριστικών, που αντιπροσωπεύουν δομές δεδομένων, μεταξύ συσκευών. Οι δομές δεδομένων είναι οργανωμένες με ιεραρχικό τρόπο, αποτελούμενοι από υπηρεσίες, χαρακτηριστικά και περιγραφείς.

Το BLE χρησιμοποιεί ένα μοντέλο επικοινωνίας προσανατολισμένο στη σύνδεση, το οποίο περιλαμβάνει δύο συσκευές που δημιουργούν μια σύνδεση και ανταλλάσσουν δεδομένα. Υπάρχουν δύο ρόλοι που μπορεί να αναλάβει μια συσκευή σε αυτό το μοντέλο: τον κεντρικό και τον περιφερειακό. Η κεντρική συσκευή, συνήθως ένα smartphone ή ένα tablet, σαρώνει για advertising πακέτα από περιφερειακές συσκευές, που είναι συνήθως αισθητήρες, φορητές συσκευές ή άλλες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Μόλις δημιουργηθεί μια σύνδεση, η Κεντρική συσκευή μπορεί να διαβάσει και να γράφει δεδομένα στην περιφερειακή συσκευή. Το κύριο πλεονέκτημα του BLE έναντι του κλασικού Bluetooth είναι η σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων σχεδιαστικών επιλογών, όπως ο μειωμένος κύκλος λειτουργίας όπου οι συσκευές BLE περνούν τον περισσότερο χρόνο τους σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, ξυπνώντας μόνο όταν χρειάζεται να μεταδώσουν ή να λάβουν δεδομένα. Αυτό ελαχιστοποιεί τον χρόνο που δαπανάται ενεργά για τη μετάδοση ή τη λήψη δεδομένων, οι οποίες είναι οι λειτουργίες με τη μεγαλύτερη ένταση ισχύος. Ένας ακόμη τρόπος εξοικονόμησης επιτυγχάνεται με τα μικρά διαστήματα σύνδεσης. Οι συνδέσεις BLE διατηρούνται μέσω περιοδικών ανταλλαγών δεδομένων με διάρκεια που μπορεί να φτάσει τα 7,5 ms. Αυτός ο σύντομος χρόνος σύνδεσης επιτρέπει στις συσκευές να επιστρέψουν γρήγορα σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, εξοικονομώντας ενέργεια. Τέλος, τα βελτιστοποιημένα πακέτα δεδομένων ευνοούν την εξοικονόμηση αφού είναι μικρότερα σε σύγκριση με αυτά του κλασικού

Bluetooth, με μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου 27 byte και αυτό επιτρέπει ταχύτερη μετάδοση και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Συνοπτικά, το Bluetooth Low Energy είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας σχεδιασμένο για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, προσφέροντας ενεργειακά αποδοτική ανταλλαγή δεδομένων σε μικρές αποστάσεις. Λειτουργεί στη ζώνη ISM 2,4 GHz και χρησιμοποιεί GATT και ATT για να διευκολύνει την τυποποιημένη επικοινωνία δεδομένων. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων σχεδιαστικών επιλογών, όπως μειωμένος κύκλος λειτουργίας, μικρά διαστήματα σύνδεσης και βελτιστοποιημένα πακέτα δεδομένων.

## 2.2. Ιστορική αναδρομή

Το BLE αναπτύχθηκε από την εταιρεία της Καλιφόρνιας, την Bluetooth Special Interest Group (SIG), και κατανεμήθηκε στην αγορά το 2010. Η πρώτη έκδοση του BLE ονομαζόταν Bluetooth 4.0 και είχε στόχο να προσφέρει μια αποδοτική λύση για τις επικοινωνίες μικρής εμβέλειας μεταξύ δύο συσκευών. Από τότε, έχει αναβαθμιστεί σε πιο πρόσφατες εκδόσεις, όπως το Bluetooth 4.1, το Bluetooth 4.2 και το Bluetooth 5. BLE Standard Evolution.

Οι επόμενες εκδόσεις της προδιαγραφής Bluetooth έχουν εισαγάγει βελτιώσεις και νέες δυνατότητες, όπως:

Bluetooth 4.1: Βελτιωμένη συνύπαρξη με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, καλύτερος έλεγχος ροής δεδομένων και βελτιωμένες δυνατότητες επανασύνδεσης.

Bluetooth 4.2: Βελτιωμένη ασφάλεια με τη δυνατότητα LE Secure Connections (LESC), μεγαλύτερη χωρητικότητα πακέτων δεδομένων και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.

Bluetooth 5.0: Αυξημένος ρυθμός δεδομένων (2 Mbps PHY), εκτεταμένη εμβέλεια (Κωδικοποιημένο PHY) και βελτιωμένες δυνατότητες διαφήμισης με εκτεταμένα διαφημιστικά πακέτα.

Bluetooth 5.1: Λειτουργία εύρεσης κατεύθυνσης, η οποία επιτρέπει στις συσκευές να προσδιορίζουν την κατεύθυνση ενός λαμβανόμενου σήματος, βελτιώνοντας τις υπηρεσίες τοποθεσίας και εντοπισμού θέσης.

Bluetooth 5.2: LE Audio, το οποίο εισάγει έναν νέο υψηλής ποιότητας, χαμηλής κατανάλωσης κωδικοποιητή ήχου (LC3), βελτιωμένο συγχρονισμό ήχου και υποστήριξη για πολλαπλές ροές ήχου.

## 2.3. Αρχιτεκτονική

Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση: Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το BLE χρησιμοποιεί Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) ως σχήμα διαμόρφωσης. Το GFSK είναι μια μορφή μετατόπισης συχνότητας συνεχούς φάσης (FSK) που χρησιμοποιεί ένα φίλτρο Gaussian για να διαμορφώσει το σήμα της ζώνης βάσης, μειώνοντας το φασματικό πλάτος και τις παρεμβολές μεταξύ συμβόλων. Στο BLE, ένα δυαδικό ένα αντιπροσωπεύεται από μια θετική απόκλιση συχνότητας, ενώ ένα δυαδικό μηδέν αντιπροσωπεύεται από μια αρνητική απόκλιση συχνότητας. Η απόκλιση συχνότητας ( $\Delta f$ ) για το BLE είναι περίπου 185 kHz.

Επίπεδο συνδέσμου: Το Link Layer είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία και τη διατήρηση συνδέσεων, τη διαχείριση advertising και scanning και τη διασφάλιση της ακεραιότητας και του απορρήτου των δεδομένων. Η κατάσταση σύνδεσης διατηρείται μέσω ενός συμβάντος σύνδεσης, κατά το οποίο οι Κεντρικές και Περιφερειακές συσκευές ανταλλάσσουν πακέτα δεδομένων. Το διάστημα σύνδεσης, που είναι ο χρόνος μεταξύ της έναρξης δύο διαδοχικών γεγονότων σύνδεσης, μπορεί να κυμαίνεται από 7,5 ms έως 4 δευτερόλεπτα.

Δομή πακέτου: Τα πακέτα BLE έχουν μια καλά καθορισμένη δομή που αποτελείται από ένα Preamble, τη διεύθυνση πρόσβασης, τη μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU) και τον κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (CRC). Το Preamble (1 byte) επιτρέπει το συγχρονισμό του δέκτη, η Access Address (4 byte) προσδιορίζει τη συγκεκριμένη σύνδεση, το PDU περιέχει τα πραγματικά δεδομένα ωφέλιμου φορτίου μαζί με μια κεφαλίδα (2-39 byte) και το CRC (3 byte) χρησιμοποιείται για εντοπισμό σφαλμάτων.

Εντοπισμός και διόρθωση σφαλμάτων: Το πρωτόκολλο BLE χρησιμοποιεί ένα CRC 24-bit για τον εντοπισμό σφαλμάτων. Το CRC υπολογίζεται από τον πομπό και προσαρτάται στο πακέτο. Ο δέκτης, κατά τη λήψη του πακέτου, υπολογίζει το δικό του CRC και το συγκρίνει με το λαμβανόμενο CRC. Εάν ταιριάζουν, το πακέτο θεωρείται χωρίς σφάλματα. Ωστόσο, η BLE δεν εφαρμόζει μηχανισμούς διόρθωσης σφαλμάτων. Σε περίπτωση αναντιστοιχίας CRC, το πακέτο απορρίπτεται και η αναμετάδοση εξαρτάται από τα πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου.

Ασφάλεια: Η BLE εφαρμόζει διάφορα χαρακτηριστικά ασφαλείας για να εξασφαλίσει την ασφαλή επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Χρησιμοποιεί κρυπτογραφία AES-CCM για κρυπτογράφηση δεδομένων και ακεραιότητα μηνυμάτων. Τα χαρακτηριστικά ασφαλείας βασίζονται σε ένα κλειδί 128-bit, το οποίο δημιουργείται κατά τη διαδικασία σύζευξης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Ασφαλούς Απλής Ζεύξης (SSP) ή Ασφαλείς συνδέσεις χαμηλής ενέργειας (LESC). Το BLE παρέχει επίσης λειτουργίες απορρήτου, όπως ανάλυση διευθύνσεων και τυχαιοποίηση – randomization διευθύνσεων συσκευής, για να αποτρέψει την παρακολούθηση συσκευών.

Επίπεδο PHY: Το επίπεδο PHY είναι υπεύθυνο για το κομμάτι RF της επικοινωνίας BLE. Περιλαμβάνει τον πομποδέκτη RF, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη μετάδοση και λήψη σημάτων, και την επεξεργασία της ζώνης βάσης, η οποία περιλαμβάνει τη διαμόρφωση και την αποδιαμόρφωση. Η ισχύς εξόδου του πομποδέκτη RF μπορεί να κυμαίνεται από -20 dBm έως +10 dBm, με την υψηλότερη ισχύ εξόδου να παρέχει μεγαλύτερο εύρος επικοινωνίας σε βάρος της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας. Η ευαισθησία του δέκτη στο BLE κυμαίνεται από -70 dBm έως -100 dBm, με καλύτερη ευαισθησία που παρέχει μεγαλύτερη εμβέλεια επικοινωνίας.

Διαφήμιση και σάρωση: Το advertising είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται από τις περιφερειακές συσκευές BLE για τη μετάδοση της παρουσίας και των υπηρεσιών τους. Τα διαφημιστικά πακέτα περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τη συσκευή, όπως τη διεύθυνση της συσκευής, τον τύπο της συσκευής και τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες. Υπάρχουν τρία διαφημιστικά κανάλια (37, 38 και 39) για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών με άλλες ασύρματες τεχνολογίες. Οι κεντρικές συσκευές πραγματοποιούν σάρωση για αυτά τα διαφημιστικά πακέτα για να ανακαλύψουν κοντινές περιφερειακές συσκευές. Μόλις μια Κεντρική συσκευή λάβει ένα διαφημιστικό πακέτο, μπορεί να ξεκινήσει ένα αίτημα σύνδεσης για την πραγματοποίηση επικοινωνίας με την περιφερειακή συσκευή.

Ρυθμός και εύρος δεδομένων: Το BLE έχει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 1 Mbps για εκδόσεις Bluetooth 4.x, ενώ το Bluetooth 5.0 εισήγαγε δύο επιπλέον PHY: 2 Mbps και το Long Range (Κωδικοποιημένο PHY) με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 500 kbps ή 125 kbps. Το εύρος της επικοινωνίας BLE μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η ισχύς εξόδου RF, η ευαισθησία του δέκτη και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Γενικά, οι συσκευές BLE μπορούν να επικοινωνούν σε αποστάσεις έως και 100 μέτρα. Ωστόσο, το Bluetooth 5.0 Long Range (Κωδικοποιημένο PHY) μπορεί ενδεχομένως να επεκτείνει το εύρος έως και 4 φορές σε σύγκριση με το PHY 1 Mbps.

Αφάνεια - Latency: Το BLE έχει σχεδιαστεί για επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης. Το διάστημα σύνδεσης, που είναι ο χρόνος μεταξύ της έναρξης δύο διαδοχικών γεγονότων σύνδεσης, μπορεί να είναι τόσο μικρό όσο 7,5 ms, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Η καθυστέρηση μιας σύνδεσης BLE εξαρτάται από το διάστημα σύνδεσης, τον αριθμό των πακέτων που ανταλλάσσονται ανά συμβάν σύνδεσης και τα σχήματα επιβεβαίωσης και αναμετάδοσης που χρησιμοποιούνται.

Συνύπαρξη με άλλες ασύρματες τεχνολογίες: Το BLE λειτουργεί στη ζώνη ISM 2,4 GHz, η οποία χρησιμοποιείται επίσης από άλλες ασύρματες τεχνολογίες όπως το Wi-Fi και το κλασικό Bluetooth. Το BLE χρησιμοποιεί Adaptive Frequency Hopping (AFH) για να μετριάσει τις παρεμβολές από άλλες συσκευές που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Επιπλέον, η χρήση τριών διαφημιστικών καναλιών (37, 38 και 39) σε απόσταση 2 MHz βοηθά στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών από κανάλια Wi-Fi.

Αυτές οι πρόσθετες επιστημονικές λεπτομέρειες καλύπτουν διάφορες πτυχές του Bluetooth Low Energy, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης και της αποδιαμόρφωσης, του επιπέδου σύνδεσης, της δομής του πακέτου, της ανίχνευσης σφαλμάτων, των χαρακτηριστικών ασφαλείας και του επιπέδου PHY. Αυτά τα εξαρτήματα συνεργάζονται για να παρέχουν ένα ενεργειακά αποδοτικό και αξιόπιστο πρωτόκολλο επικοινωνίας για συσκευές μικρής εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης.

## 2.4. Εφαρμογές

Το BLE έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία χαμηλής ισχύος, χαμηλής καθυστέρησης και σύντομα πακέτα ανταλλαγής δεδομένων. Μερικές συνήθεις περιπτώσεις χρήσης περιλαμβάνουν τα Wearables. Ιχνηλάτες φυσικής κατάστασης, τα έξυπνα ρολόγια και οι οθόνες καρδιακών παλμών χρησιμοποιούν το BLE για σύνδεση με smartphone και ανταλλαγή δεδομένων. Οικιακός αυτοματισμός, οι έξυπνοι θερμοστάτες, τα συστήματα φωτισμού και οι συσκευές χρησιμοποιούν το BLE για έλεγχο και παρακολούθηση. Στην Υγειονομική περίθαλψη οι ιατρικές συσκευές όπως συσκευές παρακολούθησης γλυκόζης και μετρητές αρτηριακής πίεσης χρησιμοποιούν BLE για τη μετάδοση δεδομένων σε παρόχους υγειονομικής περίθαλψης ή φροντιστές. Βιομηχανικό IoT - Οι αισθητήρες BLE μπορούν να αναπτυχθούν σε βιομηχανικές ρυθμίσεις για παρακολούθηση και έλεγχο εξοπλισμού, περιβαλλοντικές συνθήκες.

## 2.5. BLE Mesh

Το Bluetooth Low Energy (BLE) Mesh [12] είναι μια τοπολογία δικτύωσης σχεδιασμένη για πολλαπλή επικοινωνία συσκευών. Επεκτείνει το εύρος, την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία των δικτύων BLE και είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπως έξυπνα κτίρια, βιομηχανικό IoT και οικιακό αυτοματισμό. Σε αυτήν την τοπολογία, οι συσκευές (κόμβοι) μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω πολλαπλών αναπηδήσεων, επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων πέρα από την εμβέλειά τους. Σε ένα δίκτυο BLE mesh, οι συσκευές αναφέρονται ως κόμβοι. Κάθε κόμβος μπορεί να έχει πολλούς ρόλους, ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου:

1. Κόμβοι αναμετάδοσης - Relay Nodes: Είναι υπεύθυνοι για τη λήψη και την αναμετάδοση μηνυμάτων, επεκτείνοντας την εμβέλεια του δικτύου.
2. Κόμβοι μεσολάβησης - Proxy Nodes: Λειτουργούν ως ενδιάμεσοι μεταξύ κόμβων πλέγματος και συσκευών που δεν ανήκουν στο πλέγμα, όπως smartphone και έτσι επιτρέπουν την επικοινωνία.
3. Friend Nodes: Αποθηκεύουν μηνύματα για κόμβους χαμηλής ισχύος, επιτρέποντάς τους να παραμείνουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.
4. Κόμβοι χαμηλής ισχύος - Low Power Nodes: Σχεδιασμένοι για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, αυτοί οι κόμβοι βασίζονται στους friend κόμβους για την αποθήκευση και προώθηση των μηνυμάτων τους.

Σε ένα δίκτυο BLE mesh, στους κόμβους εκχωρούνται διευθύνσεις που μπορούν να είναι διευθύνσεις unicast, multicast ή εκπομπής - broadcast. Οι διευθύνσεις Unicast είναι μοναδικές για κάθε κόμβο, οι διευθύνσεις multicast αντιπροσωπεύουν μια ομάδα κόμβων και οι διευθύνσεις εκπομπής στοχεύουν όλους τους κόμβους του δικτύου. Τα δίκτυα BLE mesh χρησιμοποιούν τέσσερις τύπους μηνυμάτων. *Publish*. Ένας κόμβος στέλνει ένα μήνυμα σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, στοχεύοντας έναν ή περισσότερους κόμβους. *Subscribe*. Ένας κόμβος εγγράφεται σε μια διεύθυνση για να λαμβάνει μηνύματα που αποστέλλονται σε αυτήν τη διεύθυνση. *Acknowledgment*. Όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα που απαιτεί απάντηση, στέλνει μια επιβεβαίωση - acknowledgement για να επιβεβαιώσει την παραλαβή. *Control*. Χρησιμοποιείται για

σκοπούς διαχείρισης δικτύου, όπως η διαμόρφωση κόμβων ή η ενημέρωση της τοπολογίας του δικτύου.

Τα δίκτυα BLE mesh εφαρμόζουν διάφορους μηχανισμούς ασφαλείας για να διασφαλίσουν την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των μηνυμάτων. Τα μηνύματα κρυπτογραφούνται χρησιμοποιώντας το Advanced Encryption Standard (AES) με κλειδιά 128-bit και το δίκτυο υποστηρίζει μοναδικά κλειδιά για κάθε κόμβο, εφαρμογή και επίπεδο δικτύου. Επιπλέον, τα δίκτυα πλέγματος BLE χρησιμοποιούν προστασία επανάλιψης, συσκότιση μηνυμάτων και ασφαλή παροχή για προστασία από επιθέσεις.

Η παροχή – provisioning είναι η διαδικασία προσθήκης μιας νέας συσκευής (κόμβου) στο δίκτυο πλέγματος. Περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας ασφαλούς σύνδεσης μεταξύ του νέου κόμβου και ενός καθορισμένου προμηθευτή - συσκευής, συνήθως smartphone ή tablet, για την ανταλλαγή πληροφοριών διαμόρφωσης δικτύου και ασφάλειας. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία παροχής, ο νέος κόμβος γίνεται ενεργό μέλος του δικτύου mesh.

Τα δίκτυα πλέγματος BLE χρησιμοποιούν μοντέλα για να καθορίσουν τη συμπεριφορά και τη λειτουργικότητα των κόμβων. Τα θεμελιώδη μοντέλα, όπως το μοντέλο διακομιστή διαμόρφωσης και το μοντέλο διακομιστή υγείας - Health Server Model, ορίζουν τη βασική λειτουργικότητα που απαιτείται για τη διαμόρφωση και τη διαχείριση του δικτύου πλέγματος. Τα μοντέλα εφαρμογής, από την άλλη πλευρά, καθορίζουν τη συμπεριφορά και την ανταλλαγή δεδομένων για διάφορες εφαρμογές, όπως ο έλεγχος φωτισμού ή η παρακολούθηση δεδομένων αισθητήρων.

Συνοπτικά, το BLE mesh είναι μια ισχυρή και ευέλικτη τοπολογία δικτύωσης σχεδιασμένη για μεγάλης κλίμακας δίκτυα συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Υποστηρίζει διάφορους ρόλους κόμβων, σχήματα διευθύνσεων, τύπους μηνυμάτων και μηχανισμούς ασφαλείας, επιτρέποντάς του να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών.



# Κεφάλαιο 3

## VLC – Visible Light Communication

### 3.1. Εισαγωγή

Το Visible Light Communication (VLC) [13] είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το φάσμα του ορατού φωτός, που τυπικά κυμαίνεται από 400 έως 700 νανόμετρα (nm), για τη μετάδοση δεδομένων. Λειτουργεί με βάση την αρχή της διαμόρφωσης της έντασης του ορατού φωτός που εκπέμπεται από διόδους εκπομπής φωτός (LED) ή διόδους λέιζερ (LDs) για τη μετάδοση πληροφοριών σε υψηλές ταχύτητες. Αυτή η αναδυόμενη τεχνολογία προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων (RF), όπως υψηλότερο εύρος ζώνης, ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και βελτιωμένη ασφάλεια.

Το VLC βασίζεται στη διαμόρφωση της έντασης του φωτός, η οποία επιτυγχάνεται με την ταχεία ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της πηγής φωτός με τρόπο που είναι ανεπαίσθητος στο ανθρώπινο μάτι. Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα VLC περιλαμβάνουν amplitude shift keying (ASK), frequency shift keying (FSK) και phase shift keying (PSK), μεταξύ άλλων. Αυτές οι τεχνικές διαμόρφωσης επιτρέπουν την κωδικοποίηση ψηφιακών δεδομένων στο φέρον φωτός, τα οποία μπορούν να μεταδοθούν σε μικρές αποστάσεις σε έναν φωτοανιχνευτή ή έναν αισθητήρα απεικόνισης, όπως CCD ή CMOS αισθητήρα. Το λαμβανόμενο σήμα στη συνέχεια αποδιαμορφώνεται για να ανακτήσει τις μεταδιδόμενες πληροφορίες.

Τα συστήματα VLC μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: συστήματα οπτικής επαφής (LOS) και συστήματα μη οπτικής επαφής (NLOS). Τα συστήματα LOS βασίζονται σε άμεσες οπτικές διαδρομές μεταξύ του πομπού και του δέκτη και συνήθως προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και χαμηλότερο latency. Τα συστήματα NLOS, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν την ανάκλαση και τη σκέδαση του φωτός για να διατηρήσουν την

επικοινωνία, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένους ρυθμούς δεδομένων και αυξημένο latency λόγω της πολύοδης διάδοσης.

Μία από τις βασικές προκλήσεις στο σχεδιασμό του συστήματος VLC είναι να ξεπεραστεί το περιορισμένο δυναμικό εύρος της πηγής φωτός και του φωτοανιχνευτή, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της απόδοσης κατά τη διάρκεια της ημέρας ή σε συνθήκες σκίασης. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, όπως η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) [14] και τα σχήματα πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) [15], τα οποία μπορούν να βελτιώσουν την ευρωστία της ζεύξης επικοινωνίας.

Μια άλλη πρόκληση στα συστήματα VLC είναι η ανάγκη για ακριβή και γρήγορη παρακολούθηση της πηγής φωτός από τον δέκτη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κινητές εφαρμογές VLC, όπου οι σχετικές θέσεις του πομπού και του δέκτη μπορούν να αλλάξουν γρήγορα. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, οι ερευνητές έχουν προτείνει τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης δέσμης και αλγόριθμους οπτικής παρακολούθησης για τη διατήρηση της σύνδεσης επικοινωνίας σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Η τεχνολογία VLC έχει πολλές πιθανές εφαρμογές, όπως εντοπισμό θέσης και πλοήγηση σε εσωτερικούς χώρους, επικοινωνία οχημάτων μεταξύ τους (V2V) και με δίκτυα υποδομής (V2I), υποβρύχια επικοινωνία και ασφαλή επικοινωνία σε ευαίσθητα περιβάλλοντα, όπως νοσοκομεία και αεροπλάνα. Επιπλέον, το VLC μπορεί να ενσωματωθεί με υπάρχοντα συστήματα επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων για να παρέχει απρόσκοπτη συνδεσιμότητα σε ετερογενή δίκτυα, προσφέροντας βελτιωμένους ρυθμούς δεδομένων και χωρητικότητα δικτύου.

Συμπερασματικά, το VLC είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το φάσμα του ορατού φωτός για τη μετάδοση δεδομένων. Προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα επικοινωνίας ραδιοσυχνοτήτων, όπως υψηλότερο εύρος ζώνης, ανοσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και ενισχυμένη ασφάλεια.

## **3.2. Βασικά μέρη του VLC συστήματος**

Σε ένα σύστημα VLC, τα βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν τον πομπό, το κανάλι επικοινωνίας και τον δέκτη. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική απόδοση του συστήματος.

### 3.2.1. Πομπός

Τον πομπό αποτελεί η πηγή φωτός. Η πηγή φωτός είναι ένα κρίσιμο στοιχείο σε ένα σύστημα VLC. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) και οι δίοδοι λέιζερ (LD) είναι δημοφιλείς επιλογές για συστήματα VLC λόγω της ενεργειακής τους απόδοσης, της γρήγορης απόκρισης διαμόρφωσης και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους. Η επιλογή της πηγής φωτός εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τις απαιτήσεις. Υπάρχουν τα παρακάτω είδη πηγών.

1. LED: Τα LED είναι κατάλληλα για τις περισσότερες εφαρμογές VLC σε εσωτερικούς χώρους, καθώς προσφέρουν σχετικά υψηλό εύρος ζώνης διαμόρφωσης (έως αρκετές εκατοντάδες MHz), καλή ενεργειακή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, τα LED χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στον γενικό φωτισμό, καθιστώντας τα μια ελκυστική επιλογή για συστήματα VLC που μπορούν να ενσωματωθούν με την υπάρχουσα υποδομή φωτισμού.
2. LD: Οι δίοδοι λέιζερ παρέχουν υψηλότερο εύρος ζώνης διαμόρφωσης (έως αρκετά GHz) σε σύγκριση με τις LED, καθιστώντας τις κατάλληλες για εφαρμογές VLC υψηλής ταχύτητας. Τα LD εμφανίζουν επίσης καλύτερη κατευθυντικότητα και μικρότερη απόκλιση, γεγονός που επιτρέπει μεγαλύτερη εμβέλεια επικοινωνίας και υψηλότερη χωρική ανάλυση. Ωστόσο, τα LD έχουν συνήθως υψηλότερο κόστος και απαιτούν πιο πολύπλοκα κυκλώματα κίνησης σε σύγκριση με τα LED.
3. Οργανικά LED (OLED) [16]: Τα OLED είναι ένας τύπος LED που χρησιμοποιούν οργανικά υλικά για την εκπομπή φωτός. Έχουν πιθανές εφαρμογές σε συστήματα VLC λόγω της ευελιξίας, της λεπτής κατασκευής τους και της δυνατότητας εκπομπής φωτός σε μεγάλη επιφάνεια. Ωστόσο, το εύρος ζώνης διαμόρφωσης των OLED είναι προς το παρόν χαμηλότερο από αυτό των ανόργανων LED, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε εφαρμογές VLC υψηλής ταχύτητας.

### 3.2.2. Κανάλι Επικοινωνίας

Το κανάλι επικοινωνίας στα συστήματα VLC είναι το οπτικό μέσο μέσω του οποίου τα εκπεμπόμενα φωτεινά σήματα διαδίδονται από τον πομπό στον δέκτη. Τα χαρακτηριστικά του καναλιού VLC επηρεάζουν άμεσα την απόδοση, την αξιοπιστία και τους επιτεύξιμους ρυθμούς δεδομένων του συστήματος. Η κατανόηση των ιδιοτήτων του καναλιού VLC και η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό αποτελεσματικών τεχνικών επικοινωνίας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Σε ένα τυπικό κανάλι VLC, τα εκπεμπόμενα φωτεινά σήματα μπορούν να φτάσουν στον δέκτη τόσο μέσω διαδρομών άμεσης οπτικής επαφής (LOS) όσο και μέσω μη άμεσης οπτικής επαφής (NLOS), τα οποία περιλαμβάνουν αντανάκλασεις από επιφάνειες, όπως τοίχους, οροφές ή αντικείμενα στο περιβάλλον. Η σχετική ισχύς και καθυστερήσεις των στοιχείων LOS και NLOS μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την παλμική απόκριση του καναλιού, η οποία καθορίζει την απόδοση του συστήματος όσον αφορά τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), τη σκέδαση και την αλληλοπαρεμβολή (ISI). Τα εκπεμπόμενα φωτεινά σήματα καθώς διαδίδονται μέσω του καναλιού προκαλείται εξασθενούν κυρίως από την απώλεια διαδρομής στα συστήματα VLC η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη, τη γωνία πρόσπτωσης και ακτινοβολίας και τις οπτικές ιδιότητες του μέσου.

Μια ιδιότητα του καναλιού είναι το κέρδος που στα συστήματα VLC αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος και της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος. Το κέρδος καναλιού εξαρτάται από παράγοντες όπως οι γεωμετρικές διαμορφώσεις του πομπού και του δέκτη, το μοτίβο ακτινοβολίας της πηγής φωτός, το οπτικό πεδίο του φωτοανιχνευτή (FOV) και τα χαρακτηριστικά απώλειας διαδρομής και ανάκλασης του καναλιού.

Ο θόρυβος φωτός περιβάλλοντος στα συστήματα VLC αναφέρεται στα φωτεινά σήματα που παράγονται από φυσικές ή τεχνητές πηγές φωτός, όπως το ηλιακό φως ή ο εσωτερικός φωτισμός, που μπορεί να επηρεάσει τα μεταδιδόμενα οπτικά σήματα και να υποβαθμίσει την απόδοση του συστήματος. Η επίδραση του θορύβου φωτός στο κανάλι VLC εξαρτάται από το μήκος κύματος και την ένταση των φωτεινών πηγών, τις δυνατότητες φασματικού και χωρικού φιλτραρίσματος του δέκτη και τις τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται.

Η ακριβής μοντελοποίηση καναλιών είναι απαραίτητη για την κατανόηση της συμπεριφοράς του καναλιού VLC και τον σχεδιασμό αποτελεσματικών τεχνικών επικοινωνίας. Διάφορα μοντέλα

καναλιών έχουν προταθεί για συστήματα VLC, που κυμαίνονται από απλά γεωμετρικά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη μόνο το στοιχείο LOS και την απώλεια διαδρομής, έως πιο πολύπλοκα μοντέλα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις ανακλάσεις NLOS, τον θόρυβο φωτός περιβάλλοντος και την παρεμβολή καναλιού. Η επιλογή του μοντέλου καναλιού εξαρτάται από παράγοντες όπως οι απαιτήσεις του συστήματος, το περιβάλλον επικοινωνίας και οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι.

### 3.2.3. Δέκτης

Οι τύπος του δέκτη που χρησιμοποιείται κυρίως σε ένα σύστημα VLC είναι ο φωτοανιχνευτής, ένα κρίσιμο στοιχείο του δέκτη VLC, καθώς μετατρέπει το προσπίπτον φως σε ηλεκτρικό σήμα. Οι κοινοί φωτοανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σε συστήματα VLC περιλαμβάνουν:

- Φωτοдиодους PIN: Οι φωτοдиодοι PIN χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα VLC λόγω του γρήγορου χρόνου απόκρισης και του χαμηλού θορύβου τους. Έχουν ευρεία φασματική απόκριση, ενώ είναι κατάλληλες για διάφορες πηγές φωτός, όπως LED και LD.

Οι φωτοдиодοι PIN είναι ένα βασικό συστατικό σε πολλά συστήματα VLC, που χρησιμεύουν ως ο κύριος φωτοανιχνευτής που είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή του προσπίπτοντος διαμορφωμένου φωτός σε ηλεκτρικό σήμα. Ο όρος "PIN" αναφέρεται στη δομή ημιαγωγού της διόδου, η οποία αποτελείται από ένα εγγενές στρώμα (I) που εντάσσεται μεταξύ ενός στρώματος τύπου P (P) και ενός στρώματος τύπου N (N). Αυτή η μοναδική δομή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τις φωτοдиодους PIN κατάλληλες για εφαρμογές VLC.

Η απόκριση είναι ένα μέτρο της ικανότητας μιας φωτοδιόδου να μετατρέπει το προσπίπτον φως σε ηλεκτρικό ρεύμα. Οι φωτοдиодοι PIN παρουσιάζουν υψηλή απόκριση λόγω της ευρείας εγγενούς περιοχής τους, η οποία αυξάνει την πιθανότητα απορρόφησης φωτονίων και δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο φωτορεύμα για μια δεδομένη προσπίπτουσα οπτική ισχύ, που οδηγεί σε βελτιωμένη ισχύ σήματος και συνολική απόδοση του συστήματος.

Οι φωτοдиодοι PIN έχουν ευρεία φασματική απόκριση, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος εντός του φάσματος του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου (NIR). Αυτό το χαρακτηριστικό τους επιτρέπει να είναι συμβατά με διάφορες πηγές φωτός, όπως LED και LD, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα VLC.

Ο χρόνος απόκρισης μιας φωτοδιόδου είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να ανταποκριθεί η συσκευή σε μια αλλαγή στην ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Οι φωτοδιόδοι PIN εμφανίζουν γρήγορους χρόνους απόκρισης λόγω της χαμηλής Junction χωρητικότητας, η οποία προκύπτει από την ευρεία εγγενή περιοχή. Αυτό επιτρέπει συστήματα VLC υψηλής ταχύτητας με χαμηλή καθυστέρηση, καθώς η φωτοδιόδος μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα σε αλλαγές στο διαμορφωμένο φωτεινό σήμα.

Οι φωτοδιόδοι PIN εμφανίζουν σχετικά χαμηλά επίπεδα θορύβου σε σύγκριση με άλλους τύπους φωτοανιχνευτών, όπως οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (APD). Η κύρια πηγή θορύβου στις φωτοδιόδοι PIN είναι ο θερμικός θόρυβος, γνωστός και ως θόρυβος Johnson-Nyquist, ο οποίος είναι μια θεμελιώδης πηγή θορύβου που προκύπτει από τη θερμική ανάδευση των φορέων φόρτισης μέσα στη συσκευή. Διατηρώντας τη χωρητικότητα και την αντίσταση της συσκευής σε χαμηλά επίπεδα, η συνολική απόδοση θορύβου μπορεί να βελτιστοποιηθεί.

Οι φωτοδιόδοι PIN εμφανίζουν γραμμική απόκριση, που σημαίνει ότι το ρεύμα εξόδου είναι ευθέως ανάλογο με την ισχύ του προσπίπτοντος φωτός. Αυτό το χαρακτηριστικό απλοποιεί τη σχεδίαση και την υλοποίηση του μπροστινού κυκλώματος του δέκτη, καθώς το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να σχετίζεται άμεσα με το προσπίπτον οπτικό σήμα.

Οι φωτοδιόδοι PIN μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας συμπληρωματική τεχνολογία μεταλλικού οξειδίου-ημιαγωγού (CMOS), η οποία επιτρέπει την ενσωμάτωσή τους με άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε ένα μόνο τσιπ. Αυτή η συμβατότητα διευκολύνει την ανάπτυξη συμπαγών και χαμηλού κόστους συστημάτων VLC με ενσωματωμένους φωτοανιχνευτές και κυκλώματα επεξεργασίας.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι φωτοδιόδοι PIN έχουν επίσης ορισμένους περιορισμούς στα συστήματα VLC. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι το χαμηλότερο εσωτερικό κέρδος σε σύγκριση με τις φωτοδιόδους χιονοστιβάδας (APD). Σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ευαισθησία, όπως συστήματα VLC μεγάλης εμβέλειας ή συστήματα που λειτουργούν σε περιβάλλοντα χαμηλού φωτισμού, τα APD μπορεί να είναι πιο κατάλληλη επιλογή λόγω του υψηλότερου εσωτερικού μηχανισμού κέρδους τους. Ωστόσο, για πολλές εφαρμογές VLC, ο συνδυασμός υψηλής απόκρισης, γρήγορου χρόνου απόκρισης, χαμηλού θορύβου και ευρείας φασματικής απόκρισης καθιστούν τις φωτοδιόδους PIN μια δημοφιλή επιλογή για φωτοανίχνευση.

- Φωτοδιόδους χιονοστιβάδας (APD) [17]: Οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (APD) είναι ένας τύπος φωτοανιχνευτών που χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα VLC, ειδικά όταν απαιτείται υψηλή ευαισθησία. Τα APD έχουν πλεονεκτήματα σε ορισμένες εφαρμογές λόγω του εσωτερικού μηχανισμού απολαβής τους, που τους επιτρέπει να παράγουν μεγαλύτερο ρεύμα εξόδου για μια δεδομένη προσπίπτουσα οπτική ισχύ σε σύγκριση με άλλους τύπους φωτοδίοδων, όπως οι φωτοδιόδοι PIN.

Το κύριο διακριτικό χαρακτηριστικό των APD σε σύγκριση με άλλες φωτοδιόδους είναι ο εσωτερικός μηχανισμός απολαβής τους. Όταν ένα φωτόνιο απορροφάται από το APD, δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Αυτοί οι φορείς φορτίου στη συνέχεια επιταχύνονται από ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο εντός της περιοχής απογύμνωσης του APD, οδηγώντας σε μια διαδικασία που ονομάζεται ιονισμός προσκρούσης. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί δευτερεύοντα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να δημιουργήσουν ακόμη περισσότερα ζεύγη μέσω διαδοχικών ιοντισμών κρούσης. Το αποτέλεσμα είναι ένα φαινόμενο πολλαπλασιασμού χιονοστιβάδας, όπου ένα μόνο προσπίπτον φωτόνιο μπορεί να παράγει μεγάλο αριθμό φορέων φορτίου, ενισχύοντας έτσι σημαντικά το ρεύμα εξόδου.

Το εσωτερικό κέρδος που παρέχεται από το φαινόμενο πολλαπλασιασμού της χιονοστιβάδας επιτρέπει στα APD να επιτύχουν υψηλή ευαισθησία, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές VLC που απαιτούν μεγάλο εύρος επικοινωνίας ή λειτουργία σε περιβάλλοντα χαμηλού φωτισμού. Η αυξημένη ευαισθησία μπορεί να βοηθήσει να ξεπεραστούν οι επιπτώσεις της απώλειας διαδρομής, της σκίασης και του θορύβου φωτός περιβάλλοντος σε δύσκολα σενάρια VLC.

Τα APD μπορούν να εμφανίσουν γρήγορους χρόνους απόκρισης, καθιστώντας τα κατάλληλα για συστήματα VLC υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, ο χρόνος απόκρισης μιας APD είναι γενικά πιο αργός από εκείνον μιας φωτοδιόδου PIN λόγω του πρόσθετου χρόνου που απαιτείται για να συμβεί η διαδικασία πολλαπλασιασμού της χιονοστιβάδας. Αυτή η αντιστάθμιση μεταξύ ευαισθησίας και χρόνου απόκρισης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλου φωτοανιχνευτή για μια δεδομένη εφαρμογή VLC.

Τα χαρακτηριστικά απολαβής και θορύβου των APD εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή τους σε συστήματα VLC. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το ρεύμα σκότους και τα επίπεδα θορύβου στα APD αυξάνονται

επίσης, υποβαθμίζοντας τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Για τον μετριασμό των επιπτώσεων της θερμοκρασίας, τα APD μπορούν να λειτουργήσουν με τεχνικές αντιστάθμισης θερμοκρασίας ή συστήματα ενεργού ψύξης.

Τα APD απαιτούν υψηλή τάση πόλωσης για τη δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου που είναι απαραίτητο για τη διαδικασία πολλαπλασιασμού της χιονοστιβάδας. Αυτή η απαίτηση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και πολυπλοκότητα στη σχεδίαση του κυκλώματος τροφοδοσίας και πόλωσης του δέκτη. Ωστόσο, η αυξημένη ευαισθησία που παρέχεται από τα APD μπορεί να αντισταθμίσει αυτά τα μειονεκτήματα σε εφαρμογές όπου η υψηλή ευαισθησία είναι κρίσιμη.

Ενώ οι APD εμφανίζουν υψηλότερη ευαισθησία από τις φωτοдиодους PIN, παράγουν επίσης υψηλότερα επίπεδα θορύβου, κυρίως λόγω της διαδικασίας πολλαπλασιασμού της χιονοστιβάδας. Οι πιο σημαντικές πηγές θορύβου στα APD είναι ο θερμικός θόρυβος, ο θόρυβος βολής και ο υπερβολικός θόρυβος. Ο συντελεστής υπερβολικού θορύβου – Excess Noise Factor (ENF) είναι μοναδικός για τα APD και είναι αποτέλεσμα της στοχαστικής φύσης της διαδικασίας πολλαπλασιασμού της χιονοστιβάδας. Το ENF μπορεί να υποβαθμίσει το SNR του λαμβανόμενου σήματος, το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος VLC με APD.

- Φωτοдиодοι που βασίζονται σε CMOS [18]: Οι φωτοдиодοι που βασίζονται σε CMOS είναι μια επιλογή για φωτοανίχνευση σε συστήματα VLC, που προσφέρει πλεονεκτήματα λόγω της ενσωμάτωσης φωτοανιχνευτών με άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε ένα μόνο τσιπ, οδηγώντας σε συμπαγή, χαμηλού κόστους και ευέλικτα συστήματα VLC. Το κύριο πλεονέκτημα των φωτοдиодων που βασίζονται σε CMOS είναι η συμβατότητά τους με την τεχνολογία CMOS, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη διαδικασία για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Αυτή η συμβατότητα επιτρέπει στους φωτοανιχνευτές να ενσωματωθούν με άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, όπως τρανζίστορ, ενισχυτές και ψηφιακά κυκλώματα επεξεργασίας, σε ένα μόνο τσιπ. Αυτή η ενοποίηση μπορεί να μειώσει σημαντικά το συνολικό μέγεθος, το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας των συστημάτων VLC.

Η τεχνολογία CMOS είναι καθιερωμένη και εξαιρετικά επεκτάσιμη, επιτρέποντας τη μαζική παραγωγή φωτοдиодων που βασίζονται σε CMOS με χαμηλό κόστος ανά μονάδα. Αυτή η επεκτασιμότητα καθιστά τις φωτοдиодους που βασίζονται σε CMOS μια



ελκυστική επιλογή για μεγάλης κλίμακας αναπτύξεις VLC, όπως έξυπνα συστήματα φωτισμού και δίκτυα IoT.

Τα κυκλώματα CMOS είναι γνωστά για τη χαμηλή τους κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τις φωτοдиодους που βασίζονται σε CMOS κατάλληλες για εφαρμογές VLC που τροφοδοτούνται από μπαταρία ή με περιορισμένη ενέργεια. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή στατική απαγωγή ισχύος και στα μικρά χαρακτηριστικά μεγέθη των τρανζίστορ CMOS.

Η ενσωμάτωση φωτοδιόδων που βασίζονται σε CMOS με άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα σε ένα μόνο τσιπ επιτρέπει την υλοποίηση προηγμένων αρχιτεκτονικών δέκτη. Για παράδειγμα, οι δέκτες πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) και απεικόνισης μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας φωτοдиодους που βασίζονται σε CMOS, ενισχύοντας ενδεχομένως την απόδοση και τις δυνατότητες των συστημάτων VLC. Οι φωτοдиодοι που βασίζονται σε CMOS μπορούν να κατασκευαστούν σε εύκαμπτα υποστρώματα, επιτρέποντας την ανάπτυξη συστημάτων VLC με λεπτά form factors. Αυτή η ευελιξία μπορεί να είναι επωφελής σε διάφορες εφαρμογές, όπως φορητές συσκευές, εύκαμπτες οθόνες και καμπύλες επιφάνειες.

Οι φωτοдиодοι CMOS παρουσιάζουν συνήθως χαμηλότερη απόκριση σε σύγκριση με τις φωτοдиодους PIN και τις φωτοдиодους χιονοστιβάδας (APD). Αυτή η χαμηλότερη απόκριση οφείλεται στους συμβιβασμούς που σχετίζονται με την ενσωμάτωση φωτοδιόδων σε μια διαδικασία CMOS, όπως η μειωμένη απορρόφηση φωτός και η αυξημένη παρασιτική χωρητικότητα. Επιπλέον, οι φωτοдиодοι που βασίζονται σε CMOS ενδέχεται να παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα θορύβου λόγω της παρουσίας πρόσθετων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στο ίδιο τσιπ. Ωστόσο, η πρόοδος στην τεχνολογία CMOS και στο σχεδιασμό φωτοανιχνευτών βελτιώνουν συνεχώς την απόδοση των φωτοδιόδων που βασίζονται σε CMOS όσον αφορά την απόκριση και τα χαρακτηριστικά θορύβου.

#### **3.2.4. Κύκλωμα Αποδιαμόρφωσης**

Το κύκλωμα αποδιαμόρφωσης παίζει κρίσιμο ρόλο στα συστήματα VLC, καθώς είναι υπεύθυνο για την ανάκτηση των μεταδιδόμενων δεδομένων από το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από τον φωτοανιχνευτή. Η επιλογή του κυκλώματος αποδιαμόρφωσης εξαρτάται από το σχήμα

διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στο σύστημα VLC, καθώς και από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως ο ρυθμός δεδομένων, η κατανάλωση ενέργειας και η θόρυβος.

Οι μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα VLC για τη μετατροπή του αναλογικού ηλεκτρικού σήματος συνεχούς χρόνου που παράγεται από τον φωτοανιχνευτή σε ψηφιακό σήμα διακριτού χρόνου που μπορεί να υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία από ψηφιακό κύκλωμα. Η ανάλυση, ο ρυθμός δειγματοληψίας και η κατανάλωση ισχύος του ADC παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της συνολικής απόδοσης και αποδοτικότητας της διαδικασίας αποδιαμόρφωσης. Για τη μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) στην έξοδο του κυκλώματος αποδιαμόρφωσης χρησιμοποιούνται *matched filters*. Ένα *matched* φίλτρο έχει σχεδιαστεί για να έχει μια παλμική απόκριση. Συσχετίζοντας το λαμβανόμενο σήμα με το αντίστοιχο φίλτρο, τα στοιχεία του επιθυμητού σήματος ενισχύονται ενώ ο θόρυβος και οι παρεμβολές καταστέλλονται.

Τα PLL είναι συστήματα ελέγχου ανάδρασης που χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα αποδιαμόρφωσης VLC για συγχρονισμό συχνότητας και φάσης. Τα PLL μπορούν να παρακολουθούν τη φάση και τη συχνότητα του εισερχόμενου διαμορφωμένου σήματος, επιτρέποντας την ανάκτηση των μεταδιδόμενων δεδομένων σε σχήματα διαμόρφωσης όπως η FSK και η PSK.

Η σύμφωνη ανίχνευση – *coherent detection* είναι μια τεχνική αποδιαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε συστήματα VLC για την ανάκτηση των μεταδιδόμενων δεδομένων συγκρίνοντας τη φάση και το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος με ένα τοπικά παραγόμενο σήμα αναφοράς. Αυτή η τεχνική μπορεί να προσφέρει βελτίωση στο θόρυβο και ευαισθησία σε σύγκριση με μη σύμφωνες μεθόδους ανίχνευσης. Η ανίχνευση αυτού του τύπου χρησιμοποιείται συχνά σε προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης, όπως η διαμόρφωση τετραγωνικού πλάτους (QAM) και η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM).

Τεχνικές ισοστάθμισης χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα αποδιαμόρφωσης VLC για τον μετριασμό των επιπτώσεων της παρεμβολής μεταξύ συμβόλων (ISI) και άλλων βλαβών καναλιών. Οι αλγόριθμοι ισοστάθμισης μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας γραμμικές τεχνικές, όπως φίλτρα πεπερασμένης απόκρισης παλμού (FIR) ή άπειρης απόκρισης (IIR), ή μη γραμμικές τεχνικές, όπως *decision feedback equalizers* (DFE) και ακολουθίες εκτίμησης μέγιστης πιθανότητας (MLSE). Τεχνικές *diversity*, όπως χωρική, συχνότητας και πόλωσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα κυκλώματα αποδιαμόρφωσης συστημάτων VLC για τη βελτίωση της

ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος και την αύξηση της ευρωστίας του συστήματος σε φαινόμενα εξασθένησης και πολλαπλών διαδρομών. Με την επεξεργασία πολλαπλών αντιγράφων του ληφθέντος σήματος που λαμβάνεται μέσω διαφορετικών μονοπατιών ή τομέων, οι τεχνικές diversity μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Τέλος, τεχνικές κωδικοποίησης ελέγχου σφαλμάτων, όπως η διόρθωση σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC) και η αυτόματη επανάληψη αίτησης - automatic repeat request (ARQ), μπορούν να εφαρμοστούν στα κυκλώματα αποδιαμόρφωσης συστημάτων VLC για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος και της ατρωσίας στο θόρυβο. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την προσθήκη πλεονασμού στα μεταδιδόμενα δεδομένα για να καταστεί δυνατή η ανίχνευση και η διόρθωση σφαλμάτων στον δέκτη.

### **3.2.5. Front-end Ενίσχυση και φιλτράρισμα**

Η ενίσχυση και το φιλτράρισμα Front-end [19] είναι βασικά στοιχεία του κυκλώματος δέκτη στα συστήματα VLC, καθώς συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του σήματος και βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Ο κύριος στόχος αυτών των διαδικασιών είναι να ενισχύσουν το ασθενές ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από τον φωτοανιχνευτή και να φιλτράρουν τον ανεπιθύμητο θόρυβο και παρεμβολές πριν από περαιτέρω επεξεργασία και αποδιαμόρφωση.

Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από τον φωτοανιχνευτή είναι συνήθως ένα μικρό ρεύμα, το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε σήμα τάσης για περαιτέρω επεξεργασία. Ένας ενισχυτής transimpedance (TIA) χρησιμοποιείται συνήθως για το σκοπό αυτό, μετατρέποντας το φωτορεύμα εισόδου σε τάση εξόδου ενώ παρέχει ένα αρχικό στάδιο ενίσχυσης. Η απόδοση ενός TIA χαρακτηρίζεται από τα χαρακτηριστικά κέρδους, εύρους ζώνης, σύνθετης αντίστασης εισόδου και θορύβου. Μετά την αρχική μετατροπή ρεύματος σε τάση από το TIA, ενδέχεται να απαιτείται πρόσθετη ενίσχυση τάσης για περαιτέρω ενίσχυση της ισχύος του σήματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ενισχυτές (op-amps) ή άλλους τύπους ενισχυτών, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του συστήματος VLC. Η επιλογή του ενισχυτή θα εξαρτηθεί από παράγοντες όπως το κέρδος, το εύρος ζώνης, η απόδοση θορύβου και η κατανάλωση ενέργειας. Το διαμορφωμένο οπτικό σήμα μολύνεται από θόρυβο υψηλής συχνότητας που προέρχεται από πηγές φωτός περιβάλλοντος, όπως το ηλιακό φως ή ο τεχνητός φωτισμός. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλοπερατά φίλτρα στο μπροστινό μέρος του δέκτη για την εξασθένηση αυτών των στοιχείων θορύβου υψηλής συχνότητας, βελτιώνοντας την αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR) και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος. Η συχνότητα αποκοπής

του φίλτρου θα πρέπει να επιλέγεται με βάση το επιθυμητό εύρος ζώνης του συστήματος και τα χαρακτηριστικά θορύβου του περιβάλλοντος. Σε ορισμένα συστήματα VLC, το διαμορφωμένο οπτικό σήμα μπορεί να υπόκειται σε παρεμβολές από άλλα κοντινά συστήματα VLC ή τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Τα ζωνοπερατά φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλεκτική διέλευση του επιθυμητού σήματος, ενώ ταυτόχρονα μετριάζουν τις ανεπιθύμητες παρεμβολές. Η κεντρική συχνότητα και το εύρος ζώνης του ζωνοπερατού φίλτρου θα πρέπει να επιλέγονται με βάση το σχήμα διαμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά συχνότητας των πηγών παρεμβολών. Προσαρμοστικό φιλτράρισμα: Σε δυναμικά περιβάλλοντα VLC, τα χαρακτηριστικά θορύβου και παρεμβολών ενδέχεται να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου λόγω παραγόντων όπως η κίνηση των αντικειμένων ή οι αλλαγές στις συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές προσαρμοστικού φιλτραρίσματος για τη συνεχή ενημέρωση των συντελεστών φίλτρου με βάση τα τρέχοντα χαρακτηριστικά θορύβου και παρεμβολών, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση φιλτραρίσματος.

### **3.2.6. Συγχρονισμός και ανάκτηση συγχρονισμού**

Ο συγχρονισμός και η ανάκτηση χρονισμού είναι κρίσιμα στοιχεία των συστημάτων VLC, καθώς διασφαλίζουν ότι ο δέκτης ευθυγραμμίζει σωστά την επεξεργασία του με τη δομή του μεταδιδόμενου σήματος. Ο συγχρονισμός συμβόλων, γνωστός και ως ανάκτηση χρονισμού συμβόλων, αναφέρεται στη διαδικασία ευθυγράμμισης του ρολογιού συμβόλων του δέκτη με το ρολόι συμβόλων του πομπού. Ο ακριβής συγχρονισμός είναι απαραίτητος ώστε ο δέκτης να προσδιορίζει σωστά τα όρια μεταξύ διαδοχικών συμβόλων και να αποτρέπει την διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Οι κοινές τεχνικές συγχρονισμού συμβόλων στο VLC περιλαμβάνουν συγχρονιστές early-late gate, εκτιμητές μέγιστης πιθανότητας (MLSE) και αλγόριθμους ανάκτησης χρονισμού προς τα εμπρός.

Ο συγχρονισμός πλαισίων είναι η διαδικασία ανίχνευσης της αρχής και του τέλους των μεταδιδόμενων πλαισίων δεδομένων, τα οποία συνήθως αποτελούνται από πολλά σύμβολα. Ο ακριβής συγχρονισμός πλαισίων επιτρέπει στον δέκτη να αναγνωρίζει σωστά τη δομή των μεταδιδόμενων δεδομένων, όπως πληροφορίες κεφαλίδας, καθαρά δεδομένα και κωδικούς διόρθωσης σφαλμάτων. Οι τεχνικές συγχρονισμού πλαισίων στο VLC βασίζονται συχνά στην ανίχνευση συγκεκριμένων μοτίβων συγχρονισμού πλαισίων ή πιλοτικών συμβόλων που είναι ενσωματωμένα στα μεταδιδόμενα δεδομένα. Σε ορισμένα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στο VLC, όπως η (PSK) ή η (QAM), η φάση και η συχνότητα του φορέα του

μεταδιδόμενου σήματος πρέπει να παρακολουθούνται με ακρίβεια στον δέκτη. Ο συγχρονισμός φορέα, επίσης γνωστός ως ανάκτηση φάσης και συχνότητας φορέα, επιτρέπει στον δέκτη να αποδιαμορφώσει σωστά τις πληροφορίες φάσης και πλάτους των μεταδιδόμενων συμβόλων. Οι κοινές τεχνικές συγχρονισμού φορέων στο VLC περιλαμβάνουν βρόχους κλειδώματος φάσης (PLL), βρόχους Costas και αλγόριθμους οδηγούμενους από απόφαση.

Η ανάκτηση ρολογιού αναφέρεται στη διαδικασία εξαγωγής του σήματος ρολογιού του πομπού από το λαμβανόμενο σήμα. Στο VLC, αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω της παρουσίας θορύβου, παρεμβολών και βλαβών στο κανάλι που μπορεί να παραμορφώσουν τις πληροφορίες χρονισμού. Οι τεχνικές ανάκτησης ρολογιού στο VLC συχνά βασίζονται σε μεθόδους επεξεργασίας σήματος, όπως το φιλτράρισμα, η παρεμβολή και οι βρόχοι κλειδώματος φάσης, για την εκτίμηση και την παρακολούθηση του σήματος ρολογιού του πομπού. Σε προηγμένα συστήματα VLC που χρησιμοποιούν τεχνικές πολλαπλής εξόδου πολλαπλής εισόδου (MIMO) ή ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM), ο συγχρονισμός γίνεται πιο περίπλοκος λόγω της ανάγκης ευθυγράμμισης πολλαπλών παράλληλων ροών δεδομένων ή υποφέροντων. Οι τεχνικές συγχρονισμού για συστήματα MIMO και OFDM συχνά περιλαμβάνουν τη χρήση πιλοτικών συμβόλων, training ακολουθιών ή αλγορίθμων εκτίμησης καναλιών για να επιτρέψουν την ακριβή ανάκτηση χρονισμού σε πολλαπλούς χωρικούς τομείς ή τομείς συχνότητων.

Σε δυναμικά περιβάλλοντα VLC, όπου τα χαρακτηριστικά του καναλιού και οι πηγές παρεμβολών ενδέχεται να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές προσαρμοστικού συγχρονισμού για τη συνεχή ενημέρωση των παραμέτρων συγχρονισμού του δέκτη. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται συχνά σε προσαρμοστικούς αλγόριθμους, όπως οι μέθοδοι των ελαχίστων μέσων τετραγώνων (LMS) ή των αναδρομικών ελαχίστων τετραγώνων (RLS), για να προσαρμόσουν τις εκτιμήσεις χρονισμού του δέκτη με βάση τα τρέχοντα χαρακτηριστικά σήματος.

### **3.3. Επιπρόσθετα στοιχεία του VLC συστήματος**

#### **3.3.1. Beamforming και Optical Tracking**

Η διαμόρφωση δέσμης και η οπτική παρακολούθηση είναι προηγμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε συστήματα VLC για τη βελτίωση της απόδοσης της επικοινωνίας, τη βελτίωση της αξιοπιστίας της σύνδεσης και την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Επιτρέπουν τη χωρική διαχείριση και κατεύθυνση των μεταδιδόμενων ή λαμβανόμενων οπτικών

σημάτων, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη χρήση των διαθέσιμων οπτικών πόρων και την καλύτερη προσαρμογή στο περιβάλλον επικοινωνίας.

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει και να κατευθύνει τα μεταδιδόμενα ή λαμβανόμενα οπτικά σήματα σε μια επιθυμητή κατεύθυνση ή χωρική περιοχή είναι το Beamforming. Στα συστήματα VLC, η διαμόρφωση δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SNR), τον μετριασμό των παρεμβολών και την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος υποστηρίζοντας πολλαπλές ταυτόχρονες ζεύξεις μέσω χωρικής επαναχρησιμοποίησης. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης στο VLC:

- Ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης: Η ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης εκτελείται στον ψηφιακό τομέα, όπου τα μεμονωμένα σήματα από μια σειρά πηγών φωτός ή φωτοανιχνευτών ζυγίζονται και συνδυάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSP). Τα βάρη μπορούν να προσαρμοστούν με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις επικοινωνίας, όπως η μεγιστοποίηση του SNR ή η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών.
- Αναλογική διαμόρφωση δέσμης: Η αναλογική διαμόρφωση δέσμης εκτελείται στον αναλογικό τομέα, όπου τα οπτικά σήματα χειρίζονται χρησιμοποιώντας αναλογικά στοιχεία, όπως φακούς, ανακλαστήρες ή μετατοπιστές φάσης. Οι τεχνικές αναλογικής διαμόρφωσης δέσμης μπορεί να είναι απλούστερες και πιο ενεργειακά αποδοτικές από την ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης, αλλά μπορεί να προσφέρουν περιορισμένη προσαρμοστικότητα και έλεγχο στο σχέδιο δέσμης.

Η οπτική παρακολούθηση – Optical Tracking είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε συστήματα VLC για τη διατήρηση μιας αξιόπιστης σύνδεσης επικοινωνίας μεταξύ του πομπού και του δέκτη, ειδικά σε κινητά ή δυναμικά περιβάλλοντα όπου οι σχετικές θέσεις ή προσανατολισμοί των συσκευών ενδέχεται να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου. Η οπτική παρακολούθηση μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους, όπως:

- Οπτική παρακολούθηση με μηχανική διεύθυνση: Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί μηχανικές συσκευές, όπως αντίζυγα ή καθρέφτες, για να προσαρμόσουν την κατεύθυνση των μεταδιδόμενων ή λαμβανόμενων οπτικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι μηχανικές συσκευές μπορούν να ελέγχονται με βάση την ανάδραση από αισθητήρες, όπως

επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια ή οπτικούς ανιχνευτές, για τη διατήρηση της ευθυγράμμισης της ζεύξης επικοινωνίας.

- Ηλεκτρονικά κατευθυνόμενη οπτική παρακολούθηση: Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ελεγχόμενα οπτικά εξαρτήματα, όπως μετατοπιστές φάσης, χωρικούς διαμορφωτές φωτός υγρών κρυστάλλων (SLM) ή μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), για να κατευθύνει τα μεταδιδόμενα ή λαμβανόμενα οπτικά σήματα χωρίς καμία μηχανική κίνηση. Η οπτική παρακολούθηση με ηλεκτρονική διεύθυνση μπορεί να προσφέρει ταχύτερη και ακριβέστερη απόδοση παρακολούθησης σε σύγκριση με μεθόδους μηχανικής διεύθυνσης, αλλά μπορεί να έχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κατανάλωση ενέργειας.
- Οπτική παρακολούθηση βάσει όρασης: Αυτή η προσέγγιση βασίζεται σε αισθητήρες εικόνας, όπως κάμερες ή συστοιχίες φωτοδιόδων, για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος επικοινωνίας και την ανίχνευση των σχετικών θέσεων ή προσανατολισμών του πομπού και του δέκτη. Οι αλγόριθμοι οπτικής παρακολούθησης που βασίζονται στην όραση μπορούν να χρησιμοποιήσουν τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, όπως εξαγωγή χαρακτηριστικών, αναγνώριση προτύπων ή μηχανική εκμάθηση, για να εκτιμήσουν τις θέσεις των συσκευών και να ελέγξουν αναλόγως τους μηχανισμούς διαμόρφωσης δέσμης ή παρακολούθησης.

### 3.3.2. Διαχείριση Ενέργειας

Η διαχείριση ενέργειας άμεσα την ενεργειακή απόδοση, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τη συνολική βιωσιμότητα του συστήματος. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των διαφόρων στοιχείων που εμπλέκονται στο VLC, όπως οι πηγές φωτός, οι φωτοανιχνευτές και τα κυκλώματα επεξεργασίας σήματος, διατηρώντας παράλληλα την απαιτούμενη απόδοση και ποιότητα υπηρεσιών. Η κατανάλωση ενέργειας των πηγών φωτός, όπως τα LED ή οι δίοδοι λέιζερ, είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στη συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος VLC. Οι τεχνικές διαχείρισης ενέργειας για πηγές φωτός περιλαμβάνουν.

- Επιλογή σχήματος διαμόρφωσης [20]: Η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση των πηγών φωτός. Για παράδειγμα, η διαμόρφωση on-off (OOK) και η διαμόρφωση θέσης παλμού (PPM) θεωρούνται

ενεργειακά αποδοτικές διαμορφώσεις, καθώς περιλαμβάνουν την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των πηγών φωτός αντί για τη μεταβολή των επιπέδων έντασης τους.

- **Adaptive Dimming:** Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές προσαρμοζόμενης φωτεινότητας για τη ρύθμιση της φωτεινότητας των πηγών φωτός με βάση τις συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος ή τις προτιμήσεις του χρήστη, διασφαλίζοντας ότι διατηρείται η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση φωτός μειώνοντας παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας.
- **Έλεγχος κύκλου λειτουργίας:** Ο κύκλος λειτουργίας των πηγών φωτός, ο οποίος αναφέρεται στην αναλογία του χρόνου που τίθενται σε λειτουργία, μπορεί να ελεγχθεί για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι χαμηλότεροι κύκλοι λειτουργίας μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά μπορεί επίσης να επηρεάσουν την απόδοση της επικοινωνίας και την ποιότητα της σύνδεσης.
- **Διαχείριση ισχύος φωτοανιχνευτών:** Η κατανάλωση ενέργειας των φωτοανιχνευτών, όπως οι φωτοδιόδοι PIN ή οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (APD), μπορεί επίσης να βελτιστοποιηθεί μέσω διαφόρων τεχνικών, όπως:
  - **Dynamic Bias Control:** Η τάση πόλωσης που εφαρμόζεται στους φωτοανιχνευτές μπορεί να ρυθμιστεί δυναμικά με βάση την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, τις συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος ή άλλους παράγοντες, διασφαλίζοντας ότι οι φωτοανιχνευτές λειτουργούν στα βέλτιστα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας.
  - **Power Gating:** Οι τεχνικές Power Gating μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απενεργοποίηση των φωτοανιχνευτών ή των σχετικών κυκλωμάτων τους όταν δεν χρησιμοποιούνται ή σε περιόδους χαμηλής δραστηριότητας, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.
- **Διαχείριση ισχύος επεξεργασίας σήματος:** Η κατανάλωση ενέργειας των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος, όπως οι μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC), οι μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (DAC) και οι επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (DSP), μπορεί να βελτιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως:



- Προσαρμοστικοί ρυθμοί δειγματοληψίας: Οι ρυθμοί δειγματοληψίας των ADC και DAC μπορούν να προσαρμοστούν με βάση τις απαιτήσεις επικοινωνίας, τις συνθήκες καναλιού ή άλλους παράγοντες, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος.
- Δυναμική κλιμάκωση τάσης και συχνότητας (DVFS): Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές DVFS για τη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος με βάση τις τρέχουσες απαιτήσεις επεξεργασίας, διασφαλίζοντας ότι τα κυκλώματα λειτουργούν στα βέλτιστα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας.
- Σχεδιασμός κυκλώματος χαμηλής κατανάλωσης: Τεχνικές σχεδιασμού κυκλωμάτων χαμηλής κατανάλωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος.
- Energy Harvesting: Σε ορισμένες εφαρμογές VLC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον, όπως το ηλιακό φως, τα σήματα ραδιοσυχνοτήτων (RF) ή τους κραδασμούς, και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία του συστήματος VLC. Η συγκομιδή ενέργειας μπορεί να συμβάλει στην παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των συσκευών ή να επιτρέψει την αυτοτροφοδοτούμενη λειτουργία, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος.

### 3.4. Network και Protocol Design

Ο σχεδιασμός δικτύου και πρωτοκόλλου παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση και την αποδοτικότητα των συστημάτων VLC. Περιλαμβάνει τον καθορισμό κανόνων επικοινωνίας, δομών δεδομένων και αλγορίθμων που διέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Ο σωστός σχεδιασμός δικτύου και το εφαρμοζόμενο πρωτόκολλο μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση της επικοινωνίας, να βελτιώσει την επεκτασιμότητα του συστήματος και να εξασφαλίσει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών VLC.

Τα συστήματα Visible Light Communication (VLC) βασίζονται σε μια στοίβα πρωτοκόλλου που ορίζει τους κανόνες και τις διαδικασίες που διέπουν την επικοινωνία μεταξύ συσκευών. Αυτή η στοίβα πρωτοκόλλου αποτελείται από διάφορα επίπεδα, καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για συγκεκριμένες λειτουργίες και εργασίες.

- Physical Layer (PHY) [21]: Το φυσικό επίπεδο είναι το χαμηλότερο επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλου και είναι υπεύθυνο για την πραγματική μετάδοση και λήψη οπτικών σημάτων. Οι βασικές λειτουργίες και ζητήματα στο επίπεδο PHY περιλαμβάνουν:
  - Σχέδια διαμόρφωσης: Η επιλογή του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στον ρυθμό δεδομένων, την ενεργειακή απόδοση και την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Τα κοινά σχήματα στο VLC περιλαμβάνουν το On-Off Keying (OOK), τη διαμόρφωση θέσης παλμού (PPM) και την ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (OFDM).
  - Κωδικοποίηση καναλιού: Οι τεχνικές κωδικοποίησης καναλιών, όπως η διόρθωση σφαλμάτων Front Error (FEC) ή η συνελκτική κωδικοποίηση, βοηθούν στην προστασία των μεταδιδόμενων δεδομένων από βλάβες, θόρυβο και παρεμβολές καναλιών, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και την απόδοση της επικοινωνίας.
  - Συγχρονισμός και ανάκτηση χρονισμού: Η ακριβής ανίχνευση συμβόλων, η ευθυγράμμιση πλαισίου και η ανάκτηση φορέα σε συστήματα VLC απαιτούν συγχρονισμό και ανάκτηση χρονισμού.
- Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) [22]: Το επίπεδο MAC συντονίζει την πρόσβαση στο κοινό μέσο επικοινωνίας και διαχειρίζεται τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων μεταξύ πολλαπλών συσκευών VLC. Οι βασικές λειτουργίες και ζητήματα στο επίπεδο MAC περιλαμβάνουν:
  - Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης: Για να επιτραπεί σε πολλές συσκευές να μοιράζονται διαθέσιμους οπτικούς πόρους και να επικοινωνούν ταυτόχρονα, τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης όπως η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA), η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA) ή η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA) βρίσκουν εφαρμογή.

- Προγραμματισμός και κατανομή πόρων: Οι αλγόριθμοι για τον προγραμματισμό και την κατανομή πόρων βελτιστοποιούν τη διανομή των διαθέσιμων οπτικών πόρων (π.χ. χρονοθυρίδες, ζώνες συχνοτήτων ή χωρικές περιοχές) μεταξύ συσκευών VLC με βάση τις απαιτήσεις επικοινωνίας και τις συνθήκες καναλιού.
- Ανίχνευση και ανάλυση σύγκρουσης: Τεχνικές όπως η πολλαπλή πρόσβαση με ανίχνευση σύγκρουσης (CSMA/CD) ή η πολλαπλή πρόσβαση με αποφυγή σύγκρουσης (CSMA/CA) ελαχιστοποιούν τον αντίκτυπο των συγκρούσεων όταν πολλές συσκευές VLC ανταγωνίζονται για το κοινό μέσο επικοινωνίας, βελτιώνοντας συνολικά απόδοση του συστήματος.
- Επίπεδο δικτύου: Το επίπεδο δικτύου χειρίζεται τη δρομολόγηση και την προώθηση δεδομένων μεταξύ πολλαπλών συσκευών VLC εντός ενός δικτύου. Οι βασικές λειτουργίες και ζητήματα στο επίπεδο δικτύου περιλαμβάνουν:
  - Αλγόριθμοι δρομολόγησης: Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης (π.χ. αλγόριθμοι συντομότερης διαδρομής, κατάστασης σύνδεσης ή διανύσματος απόστασης) καθορίζουν τις βέλτιστες διαδρομές για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών VLC με βάση παράγοντες όπως η ποιότητα σύνδεσης, ο αριθμός αναπήδησης ή η κατανάλωση ενέργειας.
  - Έλεγχος Τοπολογίας: Οι τεχνικές για τον έλεγχο της τοπολογίας βελτιστοποιούν τη δομή και τη συνδεσιμότητα του δικτύου με βάση τις θέσεις της συσκευής, τα πρότυπα κινητικότητας ή τις απαιτήσεις επικοινωνίας, βελτιώνοντας την απόδοση και την επεκτασιμότητα του συστήματος.
- Επίπεδο μεταφοράς: Το επίπεδο μεταφοράς εξασφαλίζει αξιοπιστία επικοινωνίας από άκρο σε άκρο, έλεγχο ροής και ανάκτηση σφαλμάτων μεταξύ συσκευών VLC. Οι βασικές λειτουργίες και ζητήματα στο επίπεδο μεταφοράς περιλαμβάνουν:
  - Έλεγχος συμφόρησης: Οι τεχνικές ελέγχου συμφόρησης (π.χ. αλγόριθμοι που βασίζονται σε παράθυρο ή αλγόριθμοι) προσαρμόζουν τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με βάση τις τρέχουσες συνθήκες δικτύου, ελαχιστοποιώντας τη συμφόρηση και διασφαλίζοντας αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων οπτικών πόρων.

- Ανάκτηση σφαλμάτων: Οι τεχνικές ανάκτησης σφαλμάτων, όπως οι αλγόριθμοι επιλεκτικής επανάληψης ή επιστροφής-N Automatic Repeat Request (ARQ), εντοπίζουν και διορθώνουν σφάλματα στα ληφθέντα δεδομένα, διασφαλίζοντας αξιοπιστία επικοινωνίας από άκρο σε άκρο.
- Επίπεδο εφαρμογής: Το επίπεδο εφαρμογής, το υψηλότερο επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλων, παρέχει υπηρεσίες και λειτουργίες ειδικές για τον χρήστη με βάση τις υποκείμενες δυνατότητες επικοινωνίας VLC. Οι βασικές λειτουργίες και ζητήματα στο επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνουν:
  - Ποιότητα υπηρεσίας (QoS): Οι τεχνικές QoS δίνουν προτεραιότητα και διαχειρίζονται τη μετάδοση διαφορετικών τύπων δεδομένων (π.χ. φωνή, βίντεο ή κείμενο) με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως καθυστέρηση, εύρος ζώνης ή αξιοπιστία διασφαλίζοντας ότι το σύστημα VLC πληροί τα επιθυμητά επίπεδα απόδοσης και εμπειρίας χρήστη. Για την επίτευξη αυτών των στόχων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανισμοί QoS, όπως η διαμόρφωση επισκεψιμότητας, η κράτηση πόρων ή ο προγραμματισμός βάσει προτεραιότητας.
  - Διαλειτουργικότητα και Τυποποίηση: Η διασφάλιση της διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών συσκευών και συστημάτων VLC είναι απαραίτητη για την ευρεία υιοθέτηση και ανάπτυξη της τεχνολογίας VLC. Οι προσπάθειες τυποποίησης, όπως αυτές καθορίζονται από την ομάδα εργασίας IEEE 802.15.7 στοχεύουν στον καθορισμό κοινών πρωτοκόλλων, διεπαφών και προδιαγραφών για συστήματα VLC, επιτρέποντας την απρόσκοπτη επικοινωνία και την ενοποίηση με άλλες τεχνολογίες δικτύωσης, όπως το Wi-Fi ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.
  - Ασφάλεια και απόρρητο: Η ασφάλεια και το απόρρητο αποτελούν σημαντικές ανησυχίες στα συστήματα VLC, καθώς τα μεταδιδόμενα οπτικά σήματα μπορούν εύκολα να υποκλαπούν. Τεχνικές ασφαλείας, όπως κρυπτογράφηση, έλεγχος ταυτότητας ή έλεγχος πρόσβασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο επίπεδο εφαρμογής ή σε άλλα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου για την προστασία της εμπιστευτικότητας, της ακεραιότητας και της διαθεσιμότητας της επικοινωνίας VLC.

Συμπερασματικά, τα επίπεδα πρωτοκόλλου στα συστήματα VLC ορίζουν τους κανόνες και τις διαδικασίες που διέπουν την επικοινωνία μεταξύ συσκευών, με κάθε επίπεδο υπεύθυνο για συγκεκριμένες λειτουργίες και εργασίες. Τα βασικά επίπεδα πρωτοκόλλου στα συστήματα VLC περιλαμβάνουν το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο εφαρμογής. Με την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών και των αλληλεπιδράσεων κάθε επιπέδου, είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη αποτελεσματικών και αξιόπιστων συστημάτων VLC που πληρούν διάφορες απαιτήσεις απόδοσης και εμπειρίας χρήστη.

# Κεφάλαιο 4

## OMNeT++ Discrete Event Simulator

### 4.1. Εισαγωγή

Το OMNeT++ [23] είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης διακριτών συμβάντων ανοιχτού κώδικα, βασισμένο σε C++, αρθρωτό, βασισμένο σε στοιχεία, σχεδιασμένο για την προσομοίωση δικτύων. Αυτό το ευέλικτο πλαίσιο μπορεί να μοντελοποιήσει διάφορους τύπους δικτύων και πρωτόκολλα, καθιστώντας το ιδανική επιλογή για ερευνητές και προγραμματιστές που εργάζονται στον τομέα

των δικτύων υπολογιστών, των ασύρματων δικτύων, των δικτύων αισθητήρων, του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT), των δικτύων ουράς και της αξιολόγησης απόδοσης.

## 4.2. Περιβάλλον εργασίας

Το OMNeT++ είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης διακριτών συμβάντων. Παρέχει ένα σύνολο εργαλείων και στοιχείων προγραμματισμένα σε C++ και του οποίου το γραφικό περιβάλλον βασίζεται στην πλατφόρμα Eclipse. Επιπλέον, τα τμήματα που έχουν προγραμματιστεί σε C++ ομαδοποιούνται ως αντικείμενα υψηλού επιπέδου χρησιμοποιώντας μια γλώσσα περιγραφής που ονομάζεται NED, της οποίας η μορφή είναι πολύ απλή και ενισχύει τη modular φύση του περιβάλλοντος. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή σε προσαρμοσμένες εφαρμογές.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του OMNeT++ που το καθιστούν ένα δυνατό εργαλείο προσομοίωσης είναι ότι επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν ιεραρχικά μοντέλα χρησιμοποιώντας σύνθετες μονάδες, οι οποίες ομαδοποιούν πολλαπλές απλές ή σύνθετες ενότητες μαζί. Αυτό ενθαρρύνει την αρθρωτή και επαναχρησιμοποίηση των στοιχείων, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν πολύπλοκες προσομοιώσεις με ευκολία. Επιπλέον, αυτή η ιεραρχική δομή βοηθά στην οργάνωση του μοντέλου προσομοίωσης, καθιστώντας το πιο διαχειρίσιμο και πιο κατανοητό. Επιπλέον υποστηρίζει μια ποικιλία μοντέλων επικοινωνίας μέσω καναλιών, τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες των συνδέσμων επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων. Το OMNeT++ παρέχει ενσωματωμένα κανάλια με διαμορφώσιμες παραμέτρους όπως καθυστέρηση, ρυθμός δεδομένων και ποσοστό σφάλματος. Οι χρήστες μπορούν επίσης να δημιουργήσουν προσαρμοσμένα κανάλια για να μοντελοποιήσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά επικοινωνίας, επιτρέποντας την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων δικτύου.

Το OMNeT++ διαθέτει πολυάριθμες ενσωματωμένες βιβλιοθήκες που παρέχουν πληθώρα έτοιμα προς χρήση εξαρτήματα για διαφορετικούς τύπους προσομοιώσεων. Αυτές οι βιβλιοθήκες καλύπτουν διάφορους τομείς, όπως πρωτόκολλα Διαδικτύου, ασύρματα δίκτυα και δίκτυα οχημάτων, επιτρέποντας στους χρήστες να αξιοποιήσουν την υπάρχουσα εργασία και να μειώσουν τον χρόνο ανάπτυξης. Οι χρήστες μπορούν επίσης να δημιουργήσουν τις δικές τους βιβλιοθήκες για να τις μοιραστούν με την κοινότητα.

Τα αρχεία διαμόρφωσης INI προσφέρουν έναν εκφραστικό τρόπο ελέγχου των προσομοιώσεων. Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν πολλαπλές διαμορφώσεις, να παραμετροποιήσουν σενάρια, ακόμη και να χρησιμοποιήσουν εκφράσεις για να δημιουργήσουν σύνθετες αναθέσεις παραμέτρων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα πειραμάτων και σεναρίων χωρίς να τροποποιούν τον υποκείμενο κώδικα. Το OMNeT++ παρέχει ενσωματωμένα εργαλεία για την ανάλυση και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Το Εργαλείο Ανάλυσης Αποτελεσμάτων (RAT) επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν και να επεξεργάζονται δεδομένα προσομοίωσης, ενώ το Εργαλείο Διαγράμματος Ακολουθίας (SCT) βοηθά στην οπτικοποίηση των ανταλλαγών μηνυμάτων και της επεξεργασίας συμβάντων. Το IDE υποστηρίζει επίσης τη δημιουργία προσαρμοσμένων 2D και 3D απεικονίσεων, διευκολύνοντας την κατανόηση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Το OMNeT++ IDE, που βασίζεται στην πλατφόρμα Eclipse, προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης για το σχεδιασμό, την υλοποίηση και τον εντοπισμό σφαλμάτων προσομοιώσεων. Λειτουργίες όπως η συμπλήρωση κώδικα, η επισήμανση σύνταξης και ο ενσωματωμένος εντοπισμός σφαλμάτων το καθιστούν αποτελεσματικό εργαλείο για προγραμματιστές, ενώ η υποστήριξη για συστήματα ελέγχου εκδόσεων βελτιστοποιεί τη συνεργασία.

Το OMNeT++ επωφελείται από μια ενεργή κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών που συμβάλλουν στην ανάπτυξή του, μοιράζονται γνώσεις και παρέχουν υποστήριξη. Η κοινότητα διατηρεί ένα πλούσιο οικοσύστημα επεκτάσεων και μοντέλων, επιτρέποντας στους χρήστες να αξιοποιήσουν την υπάρχουσα εργασία και τους πόρους. Οι τακτικές ενημερώσεις, οι διορθώσεις σφαλμάτων και οι νέες δυνατότητες διασφαλίζουν ότι το OMNeT++ παραμένει σχετικό και ενημερωμένο.

#### **4.2.1. Modules - Δομικές μονάδες του OMNeT++**

Το πλαίσιο αξιοποιεί την έννοια των μονάδων ως θεμελιωδών δομικών στοιχείων για τη δημιουργία μιας ιεραρχικής δομής που προάγει την αρθρωτή δομή και την επαναχρησιμοποίηση. Τα modules στο OMNeT++ χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: απλές και σύνθετες. Οι απλές μονάδες αντιπροσωπεύουν τα ατομικά στοιχεία σε μια προσομοίωση, υπεύθυνα για την υλοποίηση της κύριας συμπεριφοράς του συστήματος. Αυτές οι μονάδες έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας C++ σε συνδυασμό με το OMNeT++ API, παρέχοντας ένα ισχυρό μοντέλο προγραμματισμού που μπορεί να προσομοιώσει αποτελεσματικά τη σύνθετη συμπεριφορά του

δικτύου. Οι απλές μονάδες είναι ικανές να επεξεργάζονται μηνύματα, να αλληλοεπιδρούν με άλλες μονάδες και να ανταποκρίνονται σε διάφορα συμβάντα της προσομοίωσης. Στην πράξη, οι απλές μονάδες ενσωματώνουν μεμονωμένες οντότητες δικτύου όπως δρομολογητές, μεταγωγείς ή τελικές συσκευές. Αυτή η ενθουλάκωση επιτρέπει την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων δικτύου, από ενσύρματη έως ασύρματη επικοινωνία και από δίκτυα μικρής έως μεγάλης κλίμακας.

Οι σύνθετες μονάδες, από την άλλη πλευρά, ομαδοποιούν πολλαπλές απλές ή σύνθετες για να δημιουργήσουν μια ιεραρχική δομή. Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει ένα πιο οργανωμένο και διαχειρίσιμο μοντέλο προσομοίωσης, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλης κλίμακας και περίπλοκα δίκτυα. Οι σύνθετες μονάδες υποστηρίζουν επίσης την επαναχρησιμοποίηση στοιχείων, επιτρέποντας στους χρήστες να δημιουργούν σύνθετες προσομοιώσεις συνδυάζοντας προϋπάρχουσες μονάδες.

Οι συνδέσεις μεταξύ των μονάδων εντός μιας σύνθετης μονάδας δημιουργούνται μέσω πυλών, οι οποίες χρησιμεύουν ως η κύρια διεπαφή για την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των μονάδων. Οι πύλες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της δομής επικοινωνίας μιας προσομοίωσης, διευκολύνοντας την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των μονάδων. Αυτές οι πύλες μπορούν να είναι εισόδου, εξόδου ή διπλής κατεύθυνσης και μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας είτε μέσω καναλιών. Τα κανάλια καθορίζουν τις ιδιότητες των συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων, όπως καθυστέρηση, ρυθμός δεδομένων και ρυθμός σφαλμάτων, και μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τα επιθυμητά χαρακτηριστικά δικτύου.

Οι παράμετροι είναι μια άλλη βασική πτυχή των μονάδων στο OMNeT++, παρέχοντας έναν μηχανισμό για την προσαρμογή της συμπεριφοράς των μονάδων κατά την προσομοίωση. Στις παραμέτρους μπορούν να ειχλωρηθούν προεπιλεγμένες τιμές, να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας εκφράσεις ή να οριστούν κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης χρησιμοποιώντας αρχεία INI. Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα πειραμάτων και σεναρίων χωρίς να χρειάζεται να τροποποιήσουν τον υποκείμενο πηγαίο κώδικα.

#### **4.2.2. Κανάλια – Channels**

Τα κανάλια στο OMNeT++ είναι αναπόσπαστα στοιχεία της υποδομής επικοινωνίας, που καθορίζουν τις ιδιότητες των συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων σε μια προσομοίωση. Διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ακριβή αναπαράσταση των χαρακτηριστικών των συνδέσεων δικτύου, όπως η καθυστέρηση, ο ρυθμός δεδομένων και το ποσοστό σφαλμάτων.



Παρέχοντας ένα μέσο για τη μοντελοποίηση αυτών των ιδιοτήτων, τα κανάλια επιτρέπουν στους χρήστες να δημιουργούν ρεαλιστικές και περίπλοκες προσομοιώσεις δικτύου που αντικατοπτρίζουν στενά σενάρια πραγματικού κόσμου.

Το OMNeT++ προσφέρει μια ποικιλία ενσωματωμένων καναλιών, τα οποία καλύπτουν διαφορετικές απαιτήσεις επικοινωνίας δικτύου. Ένα τέτοιο κανάλι είναι το DatarateChannel, το οποίο μοντελοποιεί μια σύνδεση σταθερού ρυθμού δεδομένων με ρυθμιζόμενη καθυστέρηση μετάδοσης και ρυθμό σφάλματος bit. Αυτό το κανάλι είναι κατάλληλο για σενάρια ενσύρματης επικοινωνίας, όπου ο ρυθμός δεδομένων παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Ένα άλλο ενσωματωμένο κανάλι είναι το DelayChannel, το οποίο μοντελοποιεί έναν απλό σύνδεσμο σταθερής καθυστέρησης χωρίς ρυθμό δεδομένων ή ποσοστό σφάλματος. Αυτό το κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια όπου η εστίαση είναι στην κατανόηση του αντίκτυπου της καθυστέρησης στην απόδοση του δικτύου, χωρίς να χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις του ρυθμού δεδομένων ή του ποσοστού σφάλματος.

Για την προσομοίωση ασύρματης επικοινωνίας, το OMNeT++ παρέχει το WirelessChannel, το οποίο διαμορφώνει μια ασύρματη σύνδεση με διαμορφώσιμες ιδιότητες όπως απώλεια διαδρομής, εξασθένιση και παρεμβολές. Αυτό το κανάλι επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν πολύπλοκα ασύρματα σενάρια, συμπεριλαμβανομένων διαφόρων μοντέλων διάδοσης ραδιοφώνου και μοτίβων παρεμβολών. Αυτή η ευελιξία είναι απαραίτητη για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων, όπου το περιβάλλον επικοινωνίας μπορεί να είναι εξαιρετικά δυναμικό και να επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες.

Εκτός από τα ενσωματωμένα κανάλια, το OMNeT++ επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν προσαρμοσμένα κανάλια επεκτείνοντας υπάρχουσες κατηγορίες καναλιών και εφαρμόζοντας τη δική τους συμπεριφορά καναλιού. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει στους χρήστες να μοντελοποιούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά επικοινωνίας προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις προσομοίωσής τους. Για παράδειγμα, οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν κανάλια που αντιπροσωπεύουν δυναμικές αλλαγές στον ρυθμό δεδομένων, να ενσωματώνουν εξελιγμένα μοντέλα σφαλμάτων ή να προσομοιώνουν προηγμένα χαρακτηριστικά ασύρματων καναλιών, όπως η διάδοση πολλαπλών διαδρομών και η διαμόρφωση δέσμης.

### 4.2.3. Network Description Language (NED) – Γλώσσα Περιγραφής Δικτύου

Στον τομέα της προσομοίωσης δικτύου, το OMNeT++ έχει καθιερωθεί ως ένα ευέλικτο, αρθρωτό και επεκτάσιμο πλαίσιο που επιτρέπει σε ερευνητές και προγραμματιστές να σχεδιάζουν, να υλοποιούν και να εκτελούν πολύπλοκες προσομοιώσεις δικτύου. Ένα κρίσιμο στοιχείο αυτού του πλαισίου είναι η γλώσσα Περιγραφή Δικτύου (NED), η οποία επιτρέπει στους χρήστες να ορίσουν τη δομή, την οργάνωση και την τοπολογία του προσομοιωμένου δικτύου με δηλωτικό τρόπο. Η γλώσσα NED είναι ειδικά προσαρμοσμένη για την περιγραφή της ιεραρχικής οργάνωσης των ενοτήτων και των συνδέσεων μεταξύ τους. Προσφέρει μια εκφραστική και συνοπτική σύνταξη που διευκολύνει το σχεδιασμό πολύπλοκων τοπολογιών δικτύου, διαχωρίζοντας τελικά τη δομή του δικτύου από την υλοποίηση συμπεριφοράς στην C++. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει στους χρήστες να επικεντρωθούν στον σχεδιασμό και την οργάνωση του δικτύου, διατηρώντας παράλληλα μια σαφή διάκριση από την υποκείμενη συμπεριφορά των μεμονωμένων στοιχείων.

Τα κύρια στοιχεία της γλώσσας NED είναι τύποι λειτουργιών, οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε απλές και σύνθετες ενότητες. Οι απλές μονάδες αντιπροσωπεύουν τις ατομικές μονάδες συμπεριφοράς εντός της προσομοίωσης, ενώ οι σύνθετες μονάδες ενθυλακώνουν ομάδες απλών ή σύνθετων μονάδων, σχηματίζοντας μια ιεραρχική δομή. Με αυτόν τον τρόπο, η γλώσσα NED επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων δικτύου υψηλής αρθρωτής και επαναχρησιμοποίησης. Για τη δημιουργία επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων, η γλώσσα NED εισάγει την έννοια των πυλών. Τα κανάλια, όπως συζητήθηκε προηγουμένως, ορίζουν τις ιδιότητες των συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων, όπως η καθυστέρηση, ο ρυθμός δεδομένων και ο ρυθμός σφαλμάτων. Με την ενσωμάτωση πυλών και καναλιών στην περιγραφή του δικτύου, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν περίπλοκες δομές επικοινωνίας που αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τα σενάρια δικτύου του πραγματικού κόσμου.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό της γλώσσας NED είναι η δυνατότητα καθορισμού παραμέτρων για τύπους λειτουργικών μονάδων. Οι παράμετροι επιτρέπουν στους χρήστες να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά της μονάδας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, επιτρέποντας υψηλό βαθμό ευελιξίας όταν πειραματίζονται με διαφορετικές ρυθμίσεις και σενάρια. Στις παραμέτρους μπορούν να εκχωρηθούν προεπιλεγμένες τιμές, να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας εκφράσεις ή να οριστούν κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης χρησιμοποιώντας αρχεία INI. Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα πειραμάτων και σεναρίων χωρίς να χρειάζεται να τροποποιήσουν τον υποκείμενο πηγαίο κώδικα. Η γλώσσα

NED υποστηρίζει τη χρήση πακέτων και εισαγωγών, επιτρέποντας στους χρήστες να οργανώνουν και να μοιράζονται ορισμούς λειτουργικών μονάδων μεταξύ έργων.

#### **4.2.4. Αρχεία Παραμετροποίησης .INI**

Ένα βασικό στοιχείο του OMNeT++ είναι το αρχείο διαμόρφωσης INI, το οποίο εξουσιοδοτεί τους χρήστες να διαμορφώνουν και να προσαρμόζουν τις παραμέτρους προσομοίωσης, τις αρχικές τιμές για τις παραμέτρους της μονάδας και να καθορίζουν σενάρια προσομοίωσης. Τα αρχεία διαμόρφωσης INI παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παροχή ευελιξίας και προσαρμοστικότητας στη διαδικασία προσομοίωσης, επιτρέποντας στους χρήστες να πειραματιστούν με ένα ευρύ φάσμα ρυθμίσεων και σεναρίων χωρίς να τροποποιήσουν τον πηγαίο κώδικα. Τα αρχεία INI υιοθετούν τη γνωστή μορφή αρχείου INI, η οποία αποτελείται από τμήματα, κλειδιά και τιμές. Στο πλαίσιο του OMNeT++, κάθε ενότητα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση, με τα ζεύγη κλειδιών-τιμών να αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους και τις αντίστοιχες τιμές τους. Αυτή η μορφή επιτρέπει στους χρήστες να ορίζουν πολλαπλές διαμορφώσεις σε ένα μόνο αρχείο, επιτρέποντάς τους να εκτελούν διάφορα πειράματα και σενάρια με ευκολία. Επιπλέον, η αντιστοίχιση προτύπων στα ονόματα κλειδιών επιτρέπει την εκχώρηση τιμών παραμέτρων σε πολλαπλές μονάδες ταυτόχρονα, απλοποιώντας περαιτέρω τη διαδικασία διαμόρφωσης.

Τα αρχεία διαμόρφωσης INI εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς στη ροή εργασιών προσομοίωσης. Πρώτον, δίνουν τη δυνατότητα στους χρήστες να ορίσουν αρχικές τιμές για τις παραμέτρους της μονάδας, είτε απευθείας είτε χρησιμοποιώντας εκφράσεις. Προσαρμόζοντας αυτές τις τιμές, οι χρήστες μπορούν να προσαρμόσουν τη συμπεριφορά της προσομοίωσής τους ώστε να ταιριάζει με τους συγκεκριμένους στόχους έρευνας ή ανάπτυξης. Δεύτερον, τα αρχεία INI διευκολύνουν τη διαμόρφωση ρυθμίσεων προσομοίωσης, όπως χρονικά όρια προσομοίωσης, δημιουργίας τυχαίων αριθμών και θέσεις αρχείων εξόδου. Αυτές οι ρυθμίσεις έχουν άμεσο αντίκτυπο στην εκτέλεση και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, καθιστώντας τη σωστή διαμόρφωσή τους καθοριστική για την απόκτηση ακριβών και ουσιαστικών αποτελεσμάτων.

Μια άλλη βασική πτυχή των αρχείων INI είναι η ικανότητά τους να ορίζουν σενάρια προσομοίωσης. Καθορίζοντας διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών παραμέτρων και ρυθμίσεων, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν πολλαπλά σενάρια που αντικατοπτρίζουν διάφορες συνθήκες ή διαμορφώσεις δικτύου του πραγματικού κόσμου. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη κατά την αξιολόγηση της απόδοσης, της επεκτασιμότητας και της ευρωστίας των πρωτοκόλλων και των αλγορίθμων δικτύου υπό διαφορετικές συνθήκες. Το OMNeT++

υποστηρίζει επίσης τη χρήση "εναλλακτικών" διαμορφώσεων, οι οποίες παρέχουν προεπιλεγμένες τιμές για παραμέτρους που δεν ορίζονται ρητά σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν μια ιεραρχία διαμορφώσεων, όπου πιο συγκεκριμένες διαμορφώσεις κληρονομούν τιμές από πιο γενικές, διασφαλίζοντας ότι όλες οι απαιτούμενες παράμετροι έχουν μια έγκυρη τιμή κατά την προσομοίωση.

#### **4.2.5. Μηνύματα στο OMNeT++**

Στον πυρήνα του OMNeT++ βρίσκεται η έννοια των μηνυμάτων, τα οποία χρησιμεύουν ως το κύριο μέσο επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων σε μια προσομοίωση. Τα μηνύματα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μοντελοποίηση της ροής πληροφοριών εντός των δικτύων, αντιπροσωπεύοντας με ακρίβεια την επικοινωνία που βασίζεται σε πακέτα που βρίσκεται σε σενάρια δικτύων πραγματικού κόσμου.

Τα μηνύματα στο OMNeT++ είναι περιπτώσεις της κλάσης `cMessage`, η οποία αποτελεί μέρος του API OMNeT++. Η κλάση `cMessage` περιλαμβάνει ένα σύνολο ιδιοτήτων και μεθόδων που επιτρέπουν στους χρήστες να χειρίζονται και να προσαρμόζουν τα μηνύματα ώστε να ταιριάζουν στις συγκεκριμένες απαιτήσεις προσομοίωσης. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ένα όνομα, ένα μοναδικό αναγνωριστικό, μια χρονική σήμανση και ένα επίπεδο προτεραιότητας. Επιπλέον, η κλάση `cMessage` υποστηρίζει τη δημιουργία υποκλάσεων μηνυμάτων, επιτρέποντας στους χρήστες να ορίζουν προσαρμοσμένους τύπους μηνυμάτων με πρόσθετα χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στις ανάγκες τους.

Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης, τα μηνύματα ανταλλάσσονται μεταξύ των μονάδων μέσω πυλών. Η ανταλλαγή μηνυμάτων συνήθως ενεργοποιεί συμβάντα στη μονάδα λήψης, προτρέποντας την εκτέλεση των αντίστοιχων συμπεριφορών που υλοποιούνται στη C++. Αυτές οι συμπεριφορές συχνά περιλαμβάνουν την επεξεργασία του ληφθέντος μηνύματος, τη δημιουργία νέων μηνυμάτων ή την ενημέρωση της εσωτερικής κατάστασης της μονάδας. Το OMNeT++ παρέχει αρκετούς ενσωματωμένους μηχανισμούς ανταλλαγής μηνυμάτων που διευκολύνουν τη μοντελοποίηση διαφόρων προτύπων επικοινωνίας. Ένας τέτοιος μηχανισμός είναι η απευθείας αποστολή μηνυμάτων, κατά την οποία ένα μήνυμα μεταφέρεται αμέσως από τον αποστολέα στον παραλήπτη χωρίς καμία καθυστέρηση. Αυτός ο μηχανισμός είναι χρήσιμος για τη μοντελοποίηση της στιγμιαίας επικοινωνίας εντός μιας μονάδας ή μεταξύ στενά συνδεδεμένων μονάδων. Ένας άλλος βασικός μηχανισμός είναι η προγραμματισμένη αποστολή μηνυμάτων, που επιτρέπει στους χρήστες να μοντελοποιούν την επικοινωνία με χρονικές

καθυστερήσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, το μήνυμα δεν παραδίδεται αμέσως στον παραλήπτη, αλλά έχει προγραμματιστεί για παράδοση σε μεταγενέστερο χρόνο προσομοίωσης. Αυτός ο μηχανισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη μοντελοποίηση επικοινωνίας που βασίζεται σε πακέτα σε δίκτυα, όπου οι καθυστερήσεις μετάδοσης και οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι κοινές.

Επιπλέον, το OMNeT++ υποστηρίζει τη χρήση αυτο-μηνυμάτων, τα οποία είναι μηνύματα που αποστέλλονται από μια ενότητα στον εαυτό της. Τα αυτο-μηνύματα χρησιμοποιούνται συχνά για τη μοντελοποίηση χρονομέτρων ή περιοδικών συμβάντων μέσα σε μια ενότητα, ενεργοποιώντας συγκεκριμένες συμπεριφορές σε προκαθορισμένα διαστήματα ή κατά τη λήξη ενός χρονοδιακόπτη.

#### **4.2.6. Παραμετροποίηση μια προσομοίωσης**

Κατά τη ρύθμιση μιας προσομοίωσης OMNeT++ και της εξόδου δεδομένων, είναι αναγκαίο να γίνουν προδιαγραφές σχετικά με τρία βασικά στοιχεία: τις στατιστικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται, τους τύπους και το χρόνο προσομοίωσης, καθώς και την καταγραφή των αποτελεσμάτων εξόδου.

Το OMNeT++ περιλαμβάνει πολλές συναρτήσεις που επιτρέπουν την εργασία με διαφορετικούς τύπους κατανομών τυχαίων μεταβλητών. Χρησιμοποιούνται στα αρχεία .ned και .ini επίσης, για να εκμεταλλευτούν το εργαλείο προσομοίωσης και να συλλέξουν αποτελέσματα βάσει των συμπεριφορών δικτύου που καθορίζονται κάτω από διαφορετικά σενάρια. Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι, οι συνεχείς και οι διακριτές, και καλύπτουν ομοιόμορφες, εκθετικές, κανονικές κλπ. κατανομές.

Στις εφαρμογές του OMNeT++ πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ πραγματικού χρόνου και χρόνου προσομοίωσης:

1. Πραγματικός χρόνος ή χρόνος CPU, είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένας υπολογιστής για να εκτελέσει την εφαρμογή.
2. Ο χρόνος προσομοίωσης αναφέρεται στο χρόνο που προσομοιώνεται κατά τη διάρκεια μιας εκτέλεσης.

3. Για να θέσουμε ένα όριο στην προσομοίωση, εισάγουμε και τις δύο τιμές στο αρχείο ρυθμίσεων.

Όταν σκοπεύουμε να θέσουμε γεγονότα σε συγκεκριμένες στιγμές, η πορεία είναι να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο `simtime_t`. Αυτός ο τύπος, δηλωμένος ως ένας τύπος `double` στη βιβλιοθήκη, χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της τιμής του χρόνου προσομοίωσης. Όταν δημιουργούμε μια μεταβλητή αυτού του τύπου, μπορούμε να καλέσουμε τη συνάρτηση `simTime()` που επιστρέφει την τρέχουσα τιμή του χρόνου προσομοίωσης σε έναν τύπο `simtime_t`.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να καταγραφούν για να αναλυθούν εκ των υστέρων. Τα δεδομένα εξόδου μπορούν κυρίως να είναι δύο τύπων, βαθμωτά και διανυσματικά. Στην πρώτη περίπτωση, καταγράφεται η τιμή, αλλά όχι ο χρόνος καταγραφής, οπότε εμφανίζεται μόνο το δεδομένο. Στην περίπτωση των διανυσματικών δεδομένων, καταγράφεται η τιμή και η σήμανση χρόνου. Τα βαθμωτά δεδομένα είναι πολύ χρήσιμα για την εμφάνιση συνολικών τιμών ή ποσοστών. Τα διανυσματικά δεδομένα είναι πιο χρήσιμα για την προβολή γραφημάτων της εξέλιξης της προσομοίωσης στο χρόνο.

Και για τους δύο τύπους δεδομένων παράγονται αρχεία εξόδου με κατάληξη `.sca` και `.vec`, αντίστοιχα για την περίπτωση βαθμωτών και διανυσματικών δεδομένων, και με όνομα που καθορίζεται στη ρύθμιση. Τα βαθμωτά δεδομένα καταγράφονται συνήθως στο τέλος της προσομοίωσης, αν και υπάρχει η δυνατότητα να τα καταγράψουμε ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια αυτής. Το συνηθισμένο είναι να καταγράφονται από τη συνάρτηση `finish()` κάθε μονάδας (`module`). Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να κληθεί η συνάρτηση `recordScalar.recordScalar(<Όνομα>, <τιμή>)`. Στην περίπτωση των διανυσματικών δεδομένων, για την καταγραφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης χρησιμοποιείται η κλάση `cOutVector`, η οποία αποθηκεύει δεδομένα τύπου διάνυσμα. Κάθε αντικείμενο αυτής της κλάσης μπορεί να είναι ένα χαρακτηριστικό ενός `module` ή ένα ανεξάρτητο αντικείμενο.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αν δημιουργήσουμε ένα τοπικό αντικείμενο, αυτό θα καταστραφεί όταν βγει από τη συνάρτηση. Δηλαδή, αν δημιουργήσουμε ένα αντικείμενο τύπου `cOutVector` στη συνάρτηση χειρισμού μηνυμάτων, όταν η συνάρτηση ολοκληρωθεί, θα καταστραφεί και το αντικείμενο, και έτσι θα χαθούν τα δεδομένα.

Αν η πρόθεση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα αντικείμενο `cOutVector` για να αποθηκεύσουμε δεδομένα από ένα μοναδικό `module`, το καλύτερο είναι να το προσθέσουμε στη δήλωση αυτού

του module και να το αρχικοποιήσουμε στη συνάρτηση initialize(). Για να του δώσουμε ένα όνομα, πρέπει να καλέσουμε τη μέθοδο setName της κλάσης cOutVector και να της περάσουμε μια συμβολοσειρά χαρακτήρων. Αυτό είναι το όνομα με το οποίο θα συσχετιστεί στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων cOutVector <όνομαΔιανύσματος>. Για να γράψουμε τις τιμές, αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να καλέσουμε τη συνάρτηση record της κλάσης cOutVector με τον ακόλουθο τρόπο: vectorName.record(<τιμή>). Η κλάση αποθηκεύει αυτόματα τη σήμανση χρόνου, ώστε δεν είναι απαραίτητο να την εισάγει ο χρήστης.

Συνοψίζοντας, κατά τη ρύθμιση μιας προσομοίωσης OMNeT++, είναι σημαντικό να οριστούν οι στατιστικές λειτουργίες που θα χρησιμοποιηθούν, οι τύποι και ο χρόνος προσομοίωσης, καθώς και η καταγραφή των αποτελεσμάτων εξόδου. Η OMNeT++ παρέχει εργαλεία και κλάσεις για την καταγραφή των δεδομένων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, επιτρέποντάς να αναπτυχθούν και να αξιολογηθούν περίπλοκα σενάρια και διαφορετικές καταστάσεις. Κατανοώντας και χρησιμοποιώντας σωστά τις δυνατότητες του OMNeT++, μπορούν να δημιουργηθούν προσομοιώσεις που θα βοηθήσουν να βελτιωθεί η σχεδίαση και η απόδοση των δικτύων και των συστημάτων.

### **4.3. Προσομοίωση με το OMNeT++ του VLC δικτύου**

Η διαδικασία εργασίας [24] που ακολουθήθηκε συνίσταται λαμβάνοντας ως σημείο εκκίνησης του μοντέλου προσομοίωσης το προτύπου IEEE-802.15.4 για OMNeT++, που περιλαμβάνονται στο πακέτο προσομοιώσεων INETMANET, και σε αυτό θα γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις προκειμένου να επιτευχθεί η ανάπτυξη του. Οι τροποποιήσεις μπορούν να συμβούν σε δύο τομείς: στην αρθρωτή δομή του μοντέλου, μέσω των αρχείων NED, ή στην συμπεριφορά των μονάδων, χρησιμοποιώντας κλάσεις και κώδικα C++. Τα αρχεία .msg μεταφράζονται σε κώδικα C++ χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα opp\_msgc, ενώ τα αρχεία .ned πρέπει να μετατραπούν σε C++ με τον μεταγλωττιστή NED. Τα αρχεία NED φορτώνονται δυναμικά ως κείμενο στην αρχική τους μορφή όταν ξεκινά το πρόγραμμα προσομοίωσης. Έπειτα, όλα τα αρχεία πηγαίου κώδικα C++ μεταγλωττίζονται και συνδέονται με τον πυρήνα προσομοίωσης και μια βιβλιοθήκη διασύνδεσης χρήστη για τη δημιουργία ενός εκτελέσιμου προγράμματος προσομοίωσης ή μιας κοινόχρηστης βιβλιοθήκης. Η μεταγλώττιση παράγει τα αρχεία αντικειμένου .obj, τα οποία συνδέονται με τα αρχεία στατικών βιβλιοθηκών. Αυτά τα βήματα οδηγούν στη δημιουργία του προγράμματος προσομοίωσης και ολοκληρώνουν τη διαδικασία κατασκευής.

Το επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας αρχεία INI, τα οποία ορίζουν παραμέτρους προσομοίωσης, ορίζουν αρχικές τιμές για τις παραμέτρους της μονάδας και καθορίζουν σενάρια προσομοίωσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές διαμορφώσεις εντός του αρχείου INI για την εκτέλεση διαφορετικών πειραμάτων χωρίς τροποποίηση του πηγαίου κώδικα. Η αντιστοίχιση τιμών στις παραμέτρους της μονάδας, είτε απευθείας είτε χρησιμοποιώντας εκφράσεις, επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά της προσομοίωσης, παρέχοντας υψηλό βαθμό ευελιξίας όταν πειραματίζονται με διαφορετικές ρυθμίσεις και σενάρια. Οι χρήστες μπορούν να φορτώσουν το έργο προσομοίωσης στο IDE, το οποίο παρέχει μια γραφική διεπαφή για την εκτέλεση, τον εντοπισμό σφαλμάτων και την ανάλυση προσομοιώσεων. Ο ενσωματωμένος επεξεργαστής NED επιτρέπει στους χρήστες να κάνουν προσαρμογές στη δομή του δικτύου, ενώ ο επεξεργαστής INI διευκολύνει τις τροποποιήσεις στις διαμορφώσεις προσομοίωσης ανάλογα με τις ανάγκες. Το IDE θα εμφανίσει την πρόοδο της προσομοίωσης, επιτρέποντας στους χρήστες να παρακολουθούν την προσομοίωση καθώς εκτελείται. Οι δυνατότητες εντοπισμού σφαλμάτων του IDE μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό προβλημάτων στον κώδικα προσομοίωσης και την επίλυσή τους ορίζοντας σημεία διακοπής και επιθεωρώντας τιμές μεταβλητών.

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας τα ενσωματωμένα εργαλεία ανάλυσης που παρέχονται από το OMNeT++. Το Εργαλείο Ανάλυσης Αποτελεσμάτων (RAT) επιτρέπει στους χρήστες να σχεδιάζουν και να επεξεργάζονται δεδομένα προσομοίωσης, ενώ το Εργαλείο Διαγράμματος Ακολουθίας (SCT) επιτρέπει την οπτικοποίηση των ανταλλαγών μηνυμάτων και την επεξεργασία συμβάντων. Μπορούν να δημιουργηθούν προσαρμοσμένες δισδιάστατες και τρισδιάστατες απεικονίσεις για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της προσομοίωσης και τον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης ή προβλημάτων. Με βάση τις γνώσεις που αποκτήθηκαν από την ανάλυση, το μοντέλο προσομοίωσης μπορεί να βελτιωθεί κάνοντας προσαρμογές στη δομή του δικτύου, στη συμπεριφορά της μονάδας ή στις ρυθμίσεις διαμόρφωσης. Οι χρήστες μπορούν να επαναλάβουν αυτή τη ροή εργασίας έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια και απόδοση, διασφαλίζοντας ότι το μοντέλο προσομοίωσης πληροί τις απαιτήσεις της μελέτης ή του πειράματος. Συνοπτικά, ακολουθώντας αυτήν την ολοκληρωμένη ροή εργασιών προσομοίωσης, οι χρήστες μπορούν να αναπτύξουν, να εκτελέσουν και να αναλύσουν αποτελεσματικά σύνθετες προσομοιώσεις δικτύου χρησιμοποιώντας το OMNeT++.

#### **4.3.1.1. Το οπτικό μέσο**



Αυτή η λειτουργική οντότητα είναι υπεύθυνη για τη μοντελοποίηση του οπτικού μέσου μετάδοσης και της συμπεριφοράς του. Οι κύριες λειτουργίες που εκτελεί είναι να διαχειρίζεται τα οπτικά σήματα (με τη μορφή πλαισίων επιπέδου PHY) που υπάρχουν στο μέσο σε κάθε στιγμή, μοντελοποιώντας τη διάδοσή τους και παραδίδοντάς τα σε ενεργές συσκευές που βρίσκονται εντός του εύρους κάλυψης της συσκευής εκπομπής, λαμβάνοντας υπόψη την καθυστέρηση διάδοσης. Να αφουγκράζεται την κατάσταση των κόμβων όπως η θέση, ο προσανατολισμός, η κατάσταση πομποδέκτη, η μέγιστη απόσταση παρεμβολής, κόμβοι εντός του εύρους κάλυψης. Να προσομοιώνει τα οπτικά κανάλια που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες VLC.

#### **4.3.1.2. Κόμβοι**

Κάθε κόμβος που υπάρχει στο δίκτυο αποτελείται από μια σειρά λειτουργικών μονάδων ή ενότητες, απλές ή σύνθετες οι οποίες μοντελοποιούν τα διαφορετικά επίπεδα μιας στοίβας πρωτοκόλλων επικοινωνιών με βάση το IEEE-802.15.7. Επιπλέον, οι κόμβοι περιλαμβάνουν πρόσθετες μονάδες για τη μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργεια και της κινητικότητα του κόμβου.

1. Το IEEE-802.15.7 PHY το στρώμα PHY αποτελεί τον πυρήνα του μοντέλου προσομοίωσης ακολουθώντας αυστηρά τις προδιαγραφές του προτύπου. Εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:
  1. Επιλογή του οπτικού καναλιού.
  2. Μετάδοση και λήψη πλαισίων (PHY-PDU).
  3. Μοντελοποίηση της συσκευής οπτικού πομπού και δέκτη προσδιορίζοντας τις χαρακτηριστικές τους παραμέτρους και τις μέγιστες ταχύτητες
  4. Επιλογή του τρόπου λειτουργίας PHY και του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης μέσω του αναγνωριστικού MCS-Id.
  5. Έλεγχος ελεύθερων καναλιών (CCA).
  6. Υπολογισμός της λαμβανόμενης ισχύος ανά πλαίσιο με βάση το μοντέλο διάδοσης.

7. Έλεγχος της κατάστασης του φυσικού στρώματος και του οπτικού πομποδέκτη. Εφαρμόζει από κοινού και τις τρεις πιθανές καταστάσεις για το φυσικό επίπεδο (μετάδοση, λήψη ή απενεργοποίηση), και τις τέσσερις πιθανές καταστάσεις για τον πομπό και δέκτη (εκπομπή, λήψη, ελεύθερο ή απενεργοποιημένο).
8. Μοντελοποίηση εκπομπών σε ιδανικό κανάλι, χωρίς την παρουσία σφαλμάτων λήψης.
9. Υπολογισμός ποιότητας σήματος για κάθε πλαίσιο που λαμβάνεται (WQI)
10. Διαχείριση σταθερών, χαρακτηριστικών και άλλων τιμών που χρησιμοποιεί κατά τη λειτουργία του το φυσικό στρώμα.
11. Το IEEE-802.15.7 MAC μοντελοποιεί το επίπεδο MAC σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου. Υλοποιεί τις ακόλουθες λειτουργίες:
  1. Έλεγχος πρόσβασης στο οπτικό μέσο σε δίκτυα με ενεργοποιημένα beacons χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο πρόσβασης στο μέσο με ανίχνευση φέροντος και αποφυγή σύγκρουσης (CSMA-CA).
  2. Μετάδοση και λήψη πλαισίων beacons για οριοθέτηση του υπερπλαισίου.
  3. Υπηρεσία μετάδοσης πακέτων δεδομένων.
  4. Δυνατότητα μεταδόσεων που επιβεβαιώνονται με πλαίσια επιβεβαίωσης (ACK).
  5. Απλοποιημένη κατανομή και διαχείριση των δεσμευμένων χρονοθυρίδων GTS.
  6. Καθυστέρηση ή απόσταση μεταξύ της μετάδοσης διαδοχικών πλαισίων MAC (IFS).
  7. Φιλτράρισμα πλαισίων και ανίχνευση διπλών πλαισίων στη λήψη.
  8. Απλοποιημένη διαδικασία συσχέτισης, στην οποία μια συσκευή συσχετίζεται με τον συντονιστή όταν λάβει τον πρώτο beacon από εκείνον.
  9. Queue: Αυτή η μονάδα λειτουργεί ως buffer για το επίπεδο MAC όπου αποθηκεύονται τα πακέτα από τα ανώτερα στρώματα μέχρι να μπορέσουν να υποστούν επεξεργασία.

10. NETWORK LAYER: Αυτή η ενότητα εκτελεί τις λειτουργίες ενός πολύ απλού επιπέδου δικτύου. Δεν περιλαμβάνει λειτουργίες διασύνδεσης του δικτύου, περιορίζεται στη δρομολόγηση πακέτων εντός του δικτύου.
11. ΣΤΡΩΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ: Αυτή η μονάδα εκτελεί τις λειτουργίες για την προσομοίωση του traffic.
12. ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ: Αυτή η ενότητα αποσκοπεί στον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του κόμβου σε κάθε στιγμή της. Οι κόμβοι μπορεί να είναι στατικοί ή κινητοί και στην τελευταία περίπτωση μπορούν να ακολουθήσουν διαφορετικά μοτίβα κίνησης: γραμμική, αρμονική, κυκλική, τυχαία κ.λπ.
13. ΜΠΑΤΑΡΙΑ: Αυτή η λειτουργική μονάδα επιτρέπει τον υπολογισμό της ενέργειας που καταναλώνεται από το κόμβο κατά τη λειτουργία του.

#### **4.3.1.3. Δομή του μοντέλου**

Οι λειτουργικές μονάδες είναι οργανωμένες ακολουθώντας μια ιεραρχική αρθρωτή δομή, η οποία ορίζεται από τον κώδικα NED, βασικά στα τρία αρχεία .ned που υπάρχουν στο μοντέλο:

1. Ieee802157StarNet: μονάδα δικτύου ή μοντέλο προσομοίωσης. Μοντελοποιεί το δίκτυο VLC σε τοπολογία αστέρα.
2. Ieee802157Node: Σύνθετος τύπος μονάδας που αντιπροσωπεύει έναν κόμβο. Αποτελείται από πολλές υποενότητες για διαφορετικές λειτουργίες:
  1. Τρεις πρόσθετες μονάδες για μοντελοποίηση της κινητικότητας κόμβου, την κατανάλωση μπαταρίας και τις ειδοποιήσεις.
  2. Δύο ενότητες που υλοποιούν τα επίπεδα εφαρμογής και δικτύου.
  3. Μια σύνθετη μονάδα που μοντελοποιεί μια διεπαφή δικτύου IEEE-802.15.7 (εσωτερικά θα περιλαμβάνει τα επίπεδα MAC και PHY).

3. Ieee802157Nic: Σύνθετος τύπος μονάδας που αντιπροσωπεύει τη διεπαφή δικτύου. Αυτή η σύνθετη μονάδα μοντελοποιεί μια κάρτα δικτύου ή μια διεπαφή που επιτρέπει τη σύνδεση μιας συσκευής στο δίκτυο κάτω από το πρότυπο IEEE 802.15.7. Αποτελείται:
  1. Μια απλή ενότητα που υλοποιεί το επίπεδο MAC του προτύπου IEEE-802.15.7.
  2. Μια απλή ενότητα που υλοποιεί το επίπεδο PHY του προτύπου IEEE-802.15.7.
  3. Μια απλή βοηθητική μονάδα που περιλαμβάνει το Queue για την αποθήκευση των πακέτων που θα μεταδοθούν.

Η αρθρωτή δομή του μοντέλου δικτύου ολοκληρώνεται με τους τύπους απλών μονάδων που χρησιμοποιούνται στα κατώτερα επίπεδα της ιεραρχικής αρθρωτής δομής και με τους ορισμούς των μηνυμάτων. Τα είδη των μηνυμάτων ορίζονται παρακάτω:

1. Ieee802157AppPkt: Χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση ενός πακέτου σε επίπεδο εφαρμογής. Προσθέτει τρία πεδία Το όνομα του κόμβου προέλευσης, το όνομα του κόμβου προορισμού και ένα πεδίο που αποθηκεύει το χρόνο δημιουργίας του πακέτου στην πηγή. Το μέγεθος του πακέτου, σε byte, αποθηκεύεται στο πεδίο packetLength.
2. Ieee802157NetworkCtrlInfo: Μορφή μηνύματος που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση πληροφοριών δικτύου.
3. Ieee802157Frame: Μορφή πακέτου που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του πλαισίου MAC και μέσω inheritance τεσσάρων παράγωγων μορφών πακέτων που αντιστοιχούν στους τέσσερις τύπους πλαισίων MAC. Ieee802157BeconFrame, Ieee802157DataFrame, Ieee802157AckFrame και Ieee802157CmdFrame.
4. Ieee802157PhyICI: Μορφή μηνύματος που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των πληροφοριών ελέγχου της φυσικής διεπαφής
5. Ieee802157MacPhyPrimitives: Μορφή μηνύματος που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των primitives.
6. Ieee802157AirFrame: Μορφή πακέτου που μοντελοποιεί το φυσικό πλαίσιο, δηλαδή ένα PPDU.

#### **4.3.1.4. Κινητικότητα**

Οι κόμβοι περιλαμβάνουν μια λειτουργική μονάδα που είναι υπεύθυνη για την προσομοίωση της κινητικότητας. Το απλό module που υλοποιεί την κινητικότητα ενός κόμβου δεν καθορίζεται εκ των προτέρων, αλλά επιλέγεται ανάμεσα σε ένα σύνολο εφαρμοσμένων μοντέλων κινητικότητας μέσω του ορισμού της παραμέτρου NED mobilityType. Το πακέτο προσομοίωσης INETMANET περιλαμβάνει αρκετά μοντέλα κινητικότητας, ήταν όμως απαραίτητο να εφαρμοστούν νέα μοντέλα διότι τα υπάρχοντα ήταν περιορισμένα στο δισδιάστατο επίπεδο και έχοντας σχεδιαστεί για ασύρματα δίκτυα έλειπε η έννοια του προσανατολισμού της πηγής και του δέκτη.

#### **4.3.1.5. Μηχανισμός ειδοποιήσεων**

Οι ειδοποιήσεις είναι ένα βοηθητικό εργαλείο σε προσομοιώσεις που επιτρέπουν υπομονάδες εντός ενός κόμβου που δεν διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω πυλών και διαδρομών σύνδεσης να μπορούν να αναφερθούν. Αυτό το εργαλείο υλοποιεί μια διεπαφή που επιτρέπει τη λήψη ειδοποιήσεων μεταξύ υπομονάδων που δεν επικοινωνούν με άλλο τρόπο (ανταλλαγή μηνυμάτων ή σημάτων), επιτρέποντας τις υπομονάδες να εκτελούν οι ίδιες τις ενέργειες που απαιτούνται πριν από ένα κοινοποιημένο συμβάν. Ορίζονται πολλές κατηγορίες ειδοποιήσεων ανάλογα με το συμβάν.

Υπάρχουν δύο είδη ειδοποιήσεων σε ένα δίκτυο VLC. 1) Αλλαγή της κατάστασης του οπτικού πομποδέκτη όπου η υπομονάδα που σχετίζεται με το επίπεδο PHY ενημερώνει την υπομονάδα που σχετίζεται με την κατανάλωση της μπαταρίας. (Η κατανάλωση εξαρτάται από την κατάσταση του οπτικού πομποδέκτη). 2) Αλλαγή του λειτουργικού MCS\_ID του οπτικού πομποδέκτη. Η υποενότητα που σχετίζεται με το επίπεδο PHY θα ενημερώσει την υπομονάδα που σχετίζεται με το επίπεδο MAC, επιτρέποντας τον συγχρονισμό του ρολογιού.

#### **4.3.1.6. Κατανάλωση μπαταρίας**

Η υπομονάδα μπαταρίας του κόμβου (μπαταρία) μοντελοποιεί την κατανάλωση ενέργειας σε αυτόν. Είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο που εκτελεί γραμμική κατανάλωση με βάση την κατάσταση της συσκευής πομπού ή δέκτη, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλες πιθανές πηγές κατανάλωσης στον κόμβο. Οι συσκευές που υπάρχουν στα ασύρματα δίκτυα VLC μικρής εμβέλειας, είναι συνήθως κινητές συσκευές (τροφοδοτούνται από μπαταρία), αν και το ο συντονιστής είναι συνήθως μια συσκευή υποδομής (συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο).

Η υπομονάδα μπαταρίας κόμβου εκτελεί την κύρια λειτουργία του υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Καθιερώνει ένα πολύ απλό γραμμικό μοντέλο κατανάλωσης που εξαρτάται αποκλειστικά από την τρέχουσα κατάσταση της συσκευής οπτικού πομποδέκτη. Η υπομονάδα μπαταρίας επιτρέπει δύο διαφορετικούς τρόπους εργασίας ανάλογα με τον τύπο της συσκευής VLC. Έτσι, στις φορητές συσκευές η κατανάλωση αφαιρείται από τη συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας, ενώ στις συσκευές υποδομής η κατανάλωση συσσωρεύεται σε ένα μητρώο κατανάλωσης. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να παρέχει πληροφορίες για την εξέλιξη της κατανάλωσης ή το επίπεδο της μπαταρία που παραμένει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που προστίθεται στη λειτουργικότητα της υπομονάδας είναι η δυνατότητα των συσκευών που τροφοδοτούνται από μπαταρία να απενεργοποιούν τη λειτουργία του κόμβου στην προσομοίωση όταν η μπαταρία του εξαντληθεί.

### **4.3.2. Τα ανώτερα στρώματα**

#### **4.3.2.1. Το επίπεδο εφαρμογής**

Το επίπεδο εφαρμογής που αποτελεί μέρος της αρθρωτής δομής ενός κόμβου υλοποιεί λειτουργίες της δημιουργία και της λήψης κίνησης από και προς ορισμένους προορισμούς (κόμβους). Η ύπαρξη αυτής της κίνησης καθιστά δυνατή τη διενέργεια δοκιμών στο δίκτυο VLC. Υποστηρίζονται δύο τύποι, η παθητική λειτουργία όπου το επίπεδο περιορίζεται στη λήψη πακέτων μέσω της θύρας σύνδεσής του στο κατώτερο επίπεδο. Δεν πραγματοποιείται μετάδοση κατά τη λειτουργία αυτή και η ενεργητική λειτουργία όπου η λειτουργική μονάδα είναι ικανή να παράγει και να δέχεται κίνηση ταυτόχρονα. Λειτουργώντας ως πηγή, δημιουργεί πακέτα εφαρμογών καθορισμένου μήκους που μεταδίδει με διάφορες και σε ορισμένες προορισμούς. Λειτουργώντας ως δέκτης, περιορίζεται στη λήψη των πακέτων εφαρμογών και στην αφαίρεσή τους. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης στατιστικών στοιχείων των πακέτων που μεταδίδονται και λαμβάνονται.

#### **4.3.2.2. Το επίπεδο δικτύου**

Η υπομονάδα δικτύου υλοποιεί λειτουργίες που επιτρέπουν τη δρομολόγηση και διευθυνσιοδότηση πακέτων στο μοντελοποιημένο δίκτυο VLC. Αυτή η οντότητα δεν εφαρμόζει κανένα γνωστό πρωτόκολλο δικτύου, όπως IP, αντίθετα, είναι μια πολύ απλουστευμένη

υλοποίηση προσανατολισμένη στο να επιτρέπει την δρομολόγηση και διευθυνσιοδότηση σε δίκτυο VLC με τοπολογία αστέρα χωρίς να υποστηρίζει καμία άλλη τοπολογία ούτε τη διασύνδεση μεταξύ των δικτύων. Οι διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού των πακέτων είναι συμβολοσειρές που αντιστοιχούν στα ονόματα των σύνθετων μονάδων που αντιπροσωπεύουν τους διαφορετικούς κόμβους του δικτύου. Υποστηρίζοντας μόνο τη δρομολόγηση σε τοπολογία αστέρα, η δρομολόγηση που θα πραγματοποιηθεί είναι μόνο μεταξύ του κόμβου που ενεργεί ως συντονιστής δικτύου και αυτών που λειτουργούν ως συσκευές.

#### **4.3.2.3. Interface Network Queue**

Αυτή η οντότητα αντιστοιχεί στην υπομονάδα IFQ κάθε κόμβου. Η ύπαρξή του είναι απαραίτητη επειδή το μοντέλο επιπέδου MAC που υλοποιήθηκε είναι ικανό να επεξεργαστεί μόνο ένα πακέτο κάθε φορά, για μετάδοση. Η ουρά λαμβάνει, από τα ανώτερα στρώματα, τα πακέτα που θα μεταδοθούν μέσω του δικτύου, τα αποθηκεύει προσωρινά, εάν είναι απαραίτητο και τα παραδίδει στο επίπεδο MAC κατόπιν αιτήματός του με σειρά FIFO. Εάν ένα πακέτο ληφθεί όταν η ουρά είναι γεμάτη, απλώς απορρίπτεται. Επίσης, ως πρόσθετο χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα συλλογής στατιστικών στοιχείων που σχετίζονται με τη λειτουργία της ουράς. Η κλάση DropTailQueue προγραμματίζει τη λειτουργία της μονάδας που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για να δημιουργηθεί η δομή δεδομένων που βρίσκεται στην ουρά χρησιμοποιείται ο τύπος cQueue. Το αντικείμενο cQueue είναι ένας ενσωματωμένος πόρος του περιβάλλοντος προσομοίωσης OMNET++ που υλοποιεί ένα Queue FIFO, μαζί με τις μεθόδους που απαιτούνται για την εισαγωγή και αφαίρεση στοιχείων από αυτό.

#### **4.3.2.4. Το MAC επίπεδο**

Η υπομονάδα mac της αρθρωτής δομής είναι υπεύθυνη για τη μοντελοποίηση του επιπέδου MAC ενός κόμβου που χρησιμοποιεί μια διεπαφή δικτύου VLC. Εκτελεί την υπηρεσία μετάδοσης πακέτων μεταξύ ομότιμων οντοτήτων MAC μέσω του κοινού οπτικού μέσου μετάδοσης, με βάση τον ορισμό μιας δομής δεδομένων χρονικού συγχρονισμού (υπερπλαίσιο) και στη χρήση αλγορίθμου τυχαίας πρόσβασης CSMA-CA. Αυτή η υπομονάδα mac, μαζί με την υπομονάδα phy που μοντελοποιεί το φυσικό επίπεδο, αποτελεί τον πυρήνα του μοντέλου προσομοίωσης. Μαζί υλοποιούν τη διεπαφή δίκτυο για επικοινωνίες ορατού φωτός που χρησιμοποιούνται από τους κόμβους που υπάρχουν στο δίκτυο VLC. Η μεγάλη ομοιότητα των προδιαγραφών του IEEE-802.15.4 και IEEE-802.15.7 εξαιρώντας το γεγονός ότι το πρώτο αναφέρεται σε ραδιοδιάδοση

ενώ το δεύτερο σε οπτική μετάδοση, καθιστούν δυνατή την τροποποίηση της υπάρχουσας υλοποίησης MAC στο IEEE-802.15.4 ώστε να συμφωνεί με το μοντέλο VLC. Ο κώδικας της κλάσης που σχετίζεται με το επίπεδο MAC υπέστη μόνο ελάχιστες απαραίτητες τροποποιήσεις για τη διατήρηση της συνολικής λειτουργικότητας του προσομοιωτή. Οι εργασίες σχετίζονται κυρίως με τον ορισμό νέων ταχυτήτων ρολογιού και τύπου δεδομένων από το πρότυπο IEEE-802.15.7.

#### **4.3.2.5. Το PHY επίπεδο**

Η υπομονάδα phy στη δομή του προσομοιωτή είναι υπεύθυνη για τη μοντελοποίηση του επιπέδου PHY ενός κόμβου που χρησιμοποιεί μια διεπαφή δικτύου VLC σύμφωνα με το πρότυπο IEEE-802.15.7. Η υπομονάδα phy αποτελεί το πιο σημαντικό μέρος στην τρέχουσα υλοποίηση του προσομοιωτή.

Η υπομονάδα phy του κόμβου έχει την κύρια λειτουργία της μοντελοποίησης της πρόσβασης στο φυσικό μέσο. Υλοποιεί την υπηρεσία δεδομένων που καθιστά δυνατή τη μετάδοση οποιουδήποτε τύπου πλαισίου MAC μέσω του φυσικού μέσου, καθώς και τις υπηρεσίες διαχείρισης του επιπέδου PHY που επιτρέπουν τη διαχείριση των καταστάσεων, τους ελέγχους του καναλιού την πρόσβαση και διαμόρφωση των χαρακτηριστικών PHY-PIB. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν:

1. Επιλογή του οπτικού καναλιού εργασίας.
2. Μετάδοση και λήψη πλαισίων φυσικού επιπέδου (PHY-PDU)
3. Μοντελοποίηση της συσκευής οπτικού πομποδέκτη, που περιλαμβάνει πομπό και δέκτη οπτικοί.
4. Επιλογή της λειτουργίας PHY μέσω του αναγνωριστικού MCS\_ID.
5. Υπολογισμός της ισχύος με την οποία λαμβάνεται κάθε πλαίσιο με βάση το μοντέλο διάδοσης LOS.
6. Έλεγχος των καταστάσεων του φυσικού στρώματος και του οπτικού πομποδέκτη καθ' όλη τη διάρκεια.
7. Μοντελοποίηση εκπομπών σε ιδανικό κανάλι, χωρίς την παρουσία σφαλμάτων.



8. Υπολογισμός ποιότητας σήματος για κάθε πλαίσιο που λαμβάνεται (WQI).
9. Διαχείριση σταθερών, χαρακτηριστικών και άλλων τιμών που χρησιμοποιούνται στη λειτουργία του φυσικού επιπέδου.
10. Υλοποίηση όλων των αρχικών υπηρεσιών του φυσικού επιπέδου, τόσο της υπηρεσίας δεδομένων δεδομένα όπως η διαχείριση υπηρεσιών.

#### **4.3.2.6. Το οπτικό μέσο**

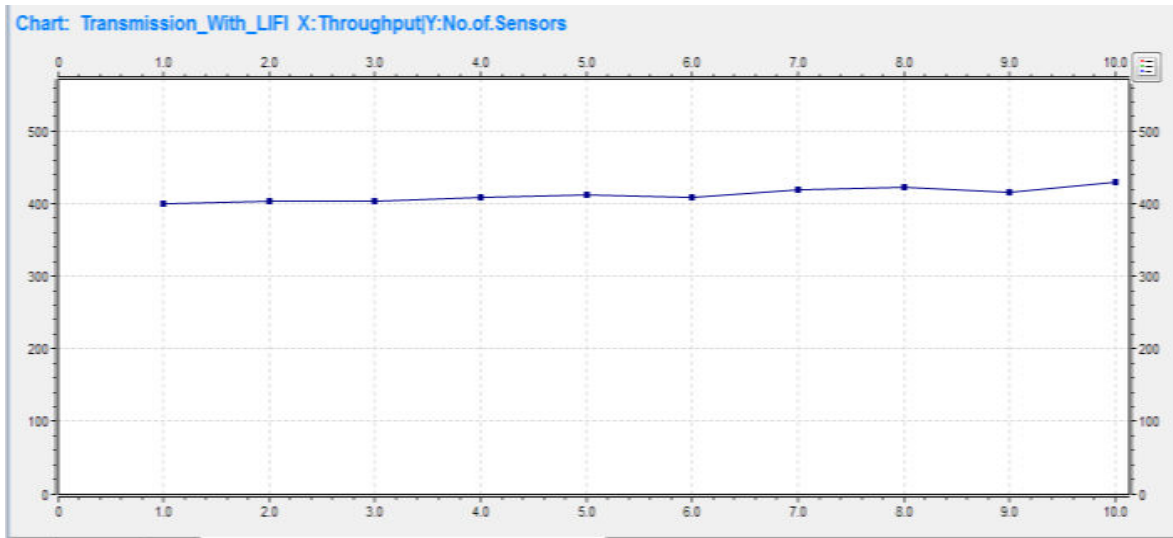
Το μοντέλο δικτύου VLC ενσωματώνει μια οντότητα που είναι υπεύθυνη για τη μοντελοποίηση του οπτικού μέσου μετάδοσης και τη συμπεριφορά του. Η παρουσία αυτής της μονάδας εξασφαλίζει την προσομοίωση της συμπεριφοράς των οπτικών σημάτων (πλαίσια PHY) κατά τη διέλευση του μέσου, προσδιορίζοντας ποιοι κόμβοι δικτύου λαμβάνουν τα σήματα και με ποια καθυστέρηση διάδοσης. Η υλοποίηση της υπομονάδας βασίστηκε στο υπάρχον μοντέλο IEEE-80215.4. Οι περισσότερες από τις λειτουργίες για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του μέσου ήταν ήδη παρούσες και προσαρμόστηκαν στο VLC.

Η υπομονάδα channelControl είναι υπεύθυνη για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του μέσου επικοινωνίας. Για να εκτελέσει την αποστολή της, η υπομονάδα ελέγχου καναλιού πρέπει να παρακολουθεί όλους τους κόμβους που υπάρχουν στο δίκτυο, κρατώντας αρχείο για τον καθένα από αυτούς. Για να διαμορφώσει τη λίστα γειτονικών κόμβων, δηλαδή, το εύρος κάλυψης, η υπομονάδα πρέπει να μπορεί να εκτιμήσει τη μέγιστη απόσταση παρεμβολής μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων στο δίκτυο. Εντοπίζει τους κόμβους που βρίσκονται στο εύρος κάλυψης έτσι ώστε το οπτικό σήμα να τους φτάνει, και αν έχουν ενεργό τον δέκτη τους και λαμβάνουν στο κανάλι μετάδοσης, τους στέλνει το PHY πλαίσιο μέσω της ασύρματης πύλης λαμβάνοντας υπόψη και τη καθυστέρηση μετάδοσης.

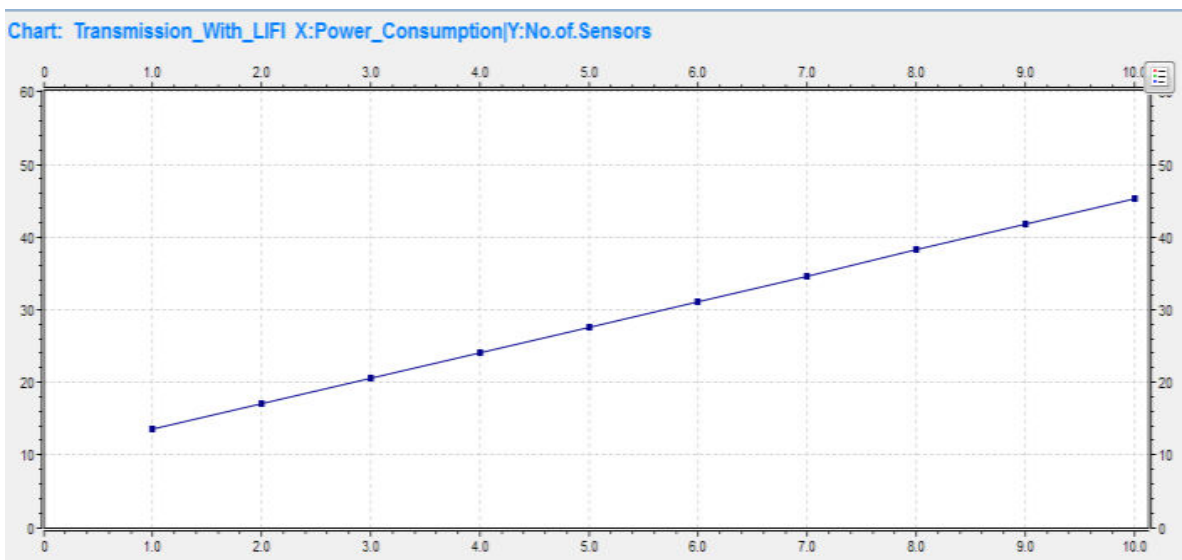
#### **4.3.3. Υλοποίηση και προσομοίωση του δικτύου VLC**

Για να αξιολογηθεί η απόδοση του δικτύου Li-Fi είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν οι ακόλουθες μετρήσεις: αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR), bit ποσοστό σφάλματος (PER) και καλή απόδοση – Goodput κάτω από διαφορετικούς αριθμούς κόμβων. Το δίκτυο Li-Fi, αποτελείται από 10 Actuators Κόμβους, 10 Κόμβοι αισθητήρα, 2 Σημείο πρόσβασης Li-Fi (AP) και διακομιστή παρακολούθησης. Όλα τα εξαρτήματα βρίσκονται σε ένα όροφο κτηρίου μεγέθους

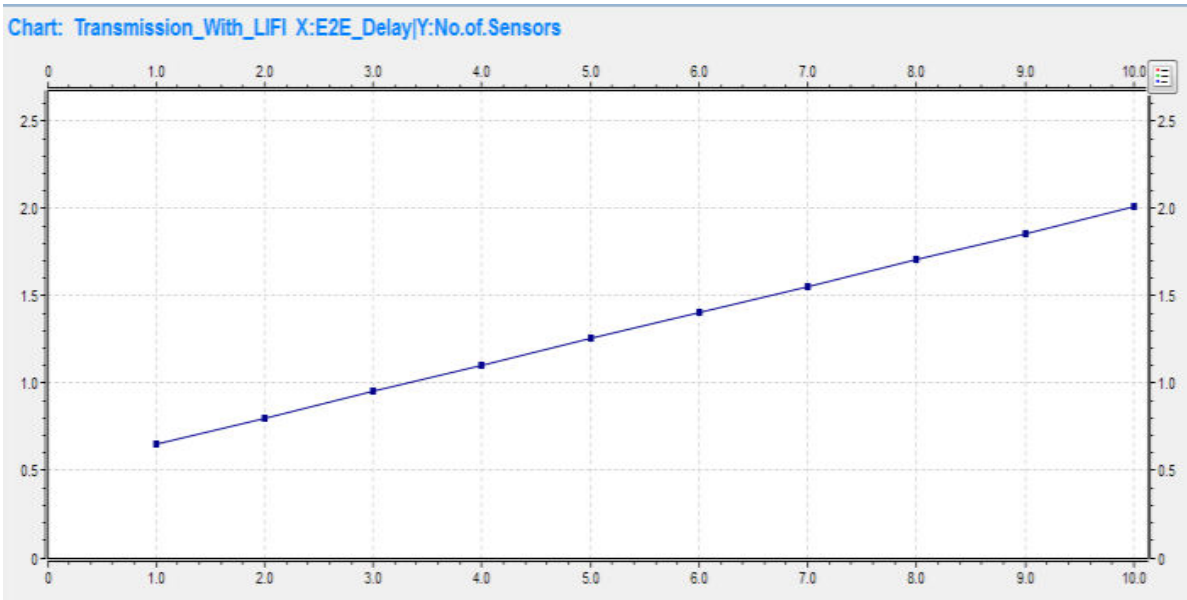
10m×10m×3m (Π×Π×Υ). Στο σχήμα ΣΧ.4.3.3.6 φαίνεται η τοπολογία του δικτύου. Όλοι οι κόμβοι βρίσκονται στην φωτεινή κάλυψη του AP. Η σύνδεση μεταξύ των κόμβων και του AP βασίζεται στην άμεση οπτική επαφή (LOS). Επιτρέπεται έτσι η μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ισχύος και ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης πολλαπλών διαδρομών. Παρακάτω παρατιθενται τα σχετικά γραφήματα.



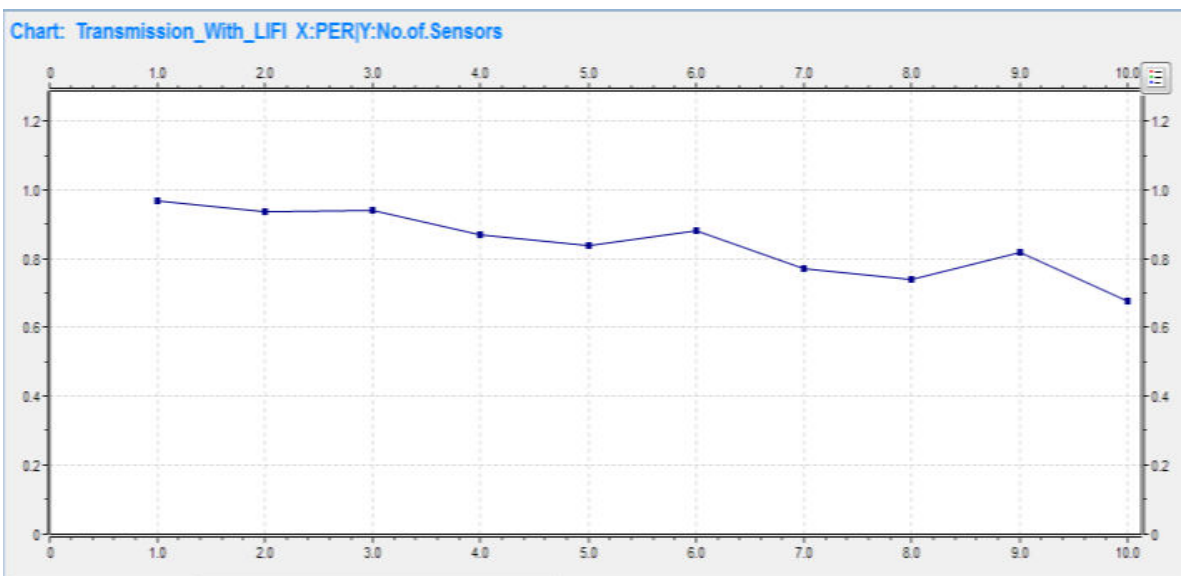
ΣΧ. 4.3.3.1 ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ (Mbps) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



ΣΧ. 4.3.3.2 ΚΑΤΑΝΑΩΣΗ ΙΣΧΥΟΣ (mW) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



ΣΧ. 4.3.3.3 ΑΠΟ ΑΚΡΟ ΣΕ ΑΚΡΟ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ (mS) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

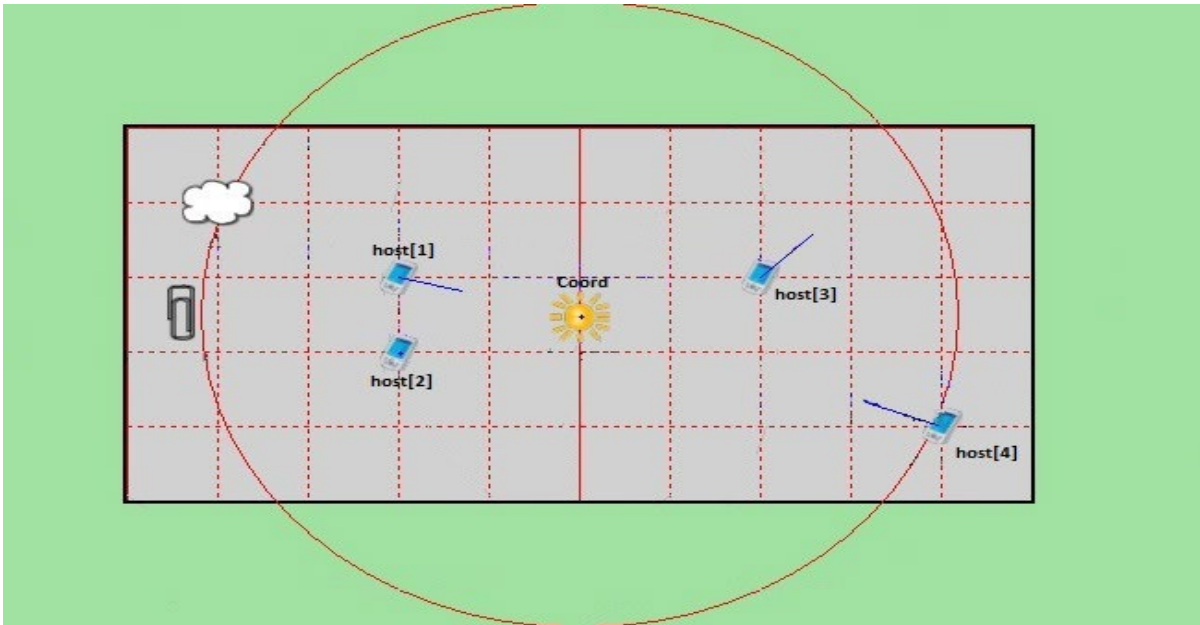


ΣΧ. 4.3.3.4 ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ (%)ΒΙΤ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Παρακάτω δύο σενάρια δικτύου προσομοιώνονται VLC. Αυτές οι προσομοιώσεις έχουν αξία για τον εντοπισμό σφαλμάτων και για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της επικοινωνίας στο VLC. Τα προσομοιωμένα σενάρια επικεντρώνονται στη μελέτη σημαντικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών στο επίπεδο PHY του προτύπου IEEE-802.15.7. Αξιολογείται το μοντέλο οπτικής διάδοσης και οι παράμετροι που την επηρεάζουν, οι ταχύτητες ρολογιού και οι ρυθμοί δεδομένων των διαφορετικών λειτουργιών PHY.

Το πρώτο σενάριο έχει σκοπό να αξιολογήσει την επίδραση της απόστασης στην ισχύ του σήματος. Σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης LOS, η λαμβανόμενη ισχύς πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης. Το διαμορφωμένο σενάριο αποτελείται από δύο κόμβους: έναν σταθερό και μια κινητή συσκευή. Ο συντονιστής βρίσκεται στο κέντρο στο δωμάτιο και η κινητή συσκευή έχει ρυθμιστεί να ακολουθεί σχέδιο γραμμικής κίνησης, εμπρός και πίσω, σε ένα δεδομένο τμήμα και με σταθερή ταχύτητα. Η απόσταση των δύο κόμβων μεταβάλλεται από 1,5 ως τα 4,5 μέτρα. Το σενάριο αυτό προσομοιώνει το χρήστη που συνδέεται σε ένα έξυπνο φωτιστικό που παρέχει VLC επικοινωνία. Οι κόμβοι είναι τέλεια ευθυγραμμισμένοι μεταξύ τους για λόγους απλότητας. Επίσης μόνο ο συντονιστής δημιουργεί traffic από το επίπεδο εφαρμογής και το κινητό δέκτη. Επιπλέον, ο συντονιστής μεταδίδει μόνο κατά το CAP διάστημα χωρίς GTS. Παρατηρείται πώς η ισχύς που λαμβάνεται με την πάροδο του χρόνου είτε αυξάνεται είτε μειώνεται συναρτήσει του αντιστρόφου του τετραγώνου της απόστασης, όπως δηλαδή είχε προβλεφθεί.

Στο επόμενο σενάριο αξιολογείται ο προσανατολισμός του οπτικού σήματος. Στο σενάριο υπάρχουν πέντε ακίνητοι κόμβοι. Ένας είναι συντονιστής του δικτύου τοποθετημένος στην οροφή ενώ οι κόμβοι που λειτουργούν ως δέκτες είναι κατανεμημένοι στο χώρο. Από τους υπόλοιπους κόμβους οι τρεις βρίσκονται σε ίση απόσταση ενώ ο τέταρτος εκτός εμβέλειας παρεμβολής οπότε και θα αποδειχθεί ότι δε λαμβάνει κανένα σήμα. Οι τρεις συσκευές στην περιοχή κάλυψης παρουσιάζουν τρεις πιθανές διαμορφώσεις στους προσανατολισμούς. Ο πρώτος είναι τέλεια προσανατολισμένος προς τον συντονιστή. Ο δεύτερος στραμμένος προς την οροφή χωρίς να είναι τέλεια η ευθυγράμμιση αλλά μέσα στο οπτικό πεδίο και ο τρίτος έξω από το FOV. Έτσι θα εκτιμηθεί η διακύμανση της λαμβανόμενης ισχύος με βάση τη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα του προσανατολισμού του οπτικού δέκτη ως προς τη ευθεία που ενώνει πομπό και δέκτη. Αυτό το δεύτερο σενάριο αποσκοπεί στην αξιολόγηση της επίδρασης του προσανατολισμού στην ισχύ του σήματος. Σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης LOS όσο καλύτερα ευθυγραμμισμένοι είναι ο οπτικός πομπός και ο δέκτης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του έλαβε οπτικό σήμα.



ΣΧ. 4.3.3.5 ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΚΤΥΟΥ VLC ΜΕ ΠΕΝΤΕ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥΣ.

Το σενάριο είναι ρυθμισμένο με τέτοιο τρόπο ώστε ο μόνος κόμβος που δημιουργεί κίνηση στο δίκτυο είναι ο συντονιστής. Με αυτή τη διαμόρφωση επιτυγχάνεται ότι το μόνο traffic που υπάρχει στην προσομοίωση είναι από τον συντονιστή στις συσκευές στην εμβέλεια του. Εάν ήταν ενεργοποιημένες οι επιβεβαιώσεις - GTS, η ισχύς των πλαισίων θα ποικίλλει, καθώς θα μπορούσαν να προέρχονται από διαφορετικές πηγές (διαφορετική απόσταση και προσανατολισμός). Το Σχήμα 4.3.3.3 δείχνει τα λαμβανόμενα επίπεδα ισχύος. Παρατηρείται ότι για τους κόμβους με τις ίδιες παραμέτρους και με την ίδια απόσταση, η λαμβανόμενη ισχύ μειώνεται καθώς επιδεινώνονται οι συνθήκες προσανατολισμού.



ΣΧ.4.3.3.3.6 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ VLC ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΧΩΡΟ.

#### 4.3.4. Συμπεράσματα

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος μετρείται σύμφωνα με ορισμένους παράμετρους. Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι η end to end καθυστέρηση. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν καθυστέρηση 2.05 s για Li-Fi δίκτυο 10 κόμβων που τυπικά είναι ταχύτερο από ένα ZigBee με ίδιο αριθμό κόμβων. Η ισχύς κατανάλωσης στο μοντέλο Li-Fi είναι χαμηλότερη οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το Li-Fi πρωτόκολλο είναι πιο αποτελεσματικό από ένα πρωτόκολλο ZigBee. Έτσι εκτιμάται ότι η τεχνολογία Li-Fi μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό επικοινωνιακό εργαλείο.

### 4.4. Προσομοίωση με το OMNeT++ του BLE δικτύου

Το OMNeT++ παρέχει ένα καθαρό και ισχυρό πλαίσιο προσομοίωσης. Ωστόσο, δεν υπάρχουν στον πυρήνα όλα τα μοντέλα ασύρματης επικοινωνίας. Ο προσομοιωτής (MiXiM) [25] συνδυάζει και επεκτείνει διάφορα υπάρχοντα πλαίσια προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί για προσομοιώσεις ασύρματων πρωτοκόλλων στο OMNeT++. Το MiXiM παρέχει λεπτομερή μοντέλα ενός ασύρματου καναλιού όπως εξασθένιση, ασύρματη συνδεσιμότητα, μοντέλα κινητικότητας, μοντέλα για εμπόδια, πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας στο επίπεδο πρόσβασης μέσου MAC. Αυτό

το πλαίσιο παρέχει μια φιλική προς το χρήστη γραφική αναπαράσταση ασύρματων και κινητών δικτύων και υποστηρίζει την αποσφαλμάτωση στο OMNeT++.

Σε σύγκριση με τις ενσύρματες προσομοιώσεις, η μοντελοποίηση της σύνδεσης είναι μια περίπλοκη εργασία στην ασύρματη προσομοίωση. Μπορεί να οριστεί σε δύο μέρη, το ασύρματο κανάλι και η εξασθένησή του είναι το πρώτο μέρος και η συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων το δεύτερο. Τα μοντέλα καναλιών MiXiM επιτρέπουν πολλαπλά παράλληλα κανάλια σε συχνότητα και στο χώρο. Η διάδοση σε κάθε ένα από αυτά τα κανάλια εκφράζεται ως συνάρτηση του στιγμιαίου λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) του λαμβανόμενου σήματος στο χρόνο. Το MiXiM περιλαμβάνει ευρέως αποδεκτά μοντέλα καναλιών για απώλεια διαδρομής, σκίαση, εξασθένηση μεγάλης και μικρής κλίμακας.

Θεωρητικά, ένα σήμα που αποστέλλεται από έναν κόμβο θα επηρεαστεί από οποιονδήποτε άλλο κόμβο στην προσομοίωση (αν λειτουργεί στην ίδια περιοχή συχνοτήτων). Ως αποτέλεσμα της εξασθένησης του σήματος, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος σε κόμβους που βρίσκονται πολύ μακριά από τον κόμβο αποστολής θα είναι χαμηλή. Στο MiXiM, οι κόμβοι συνδέονται μόνο όταν βρίσκονται εντός της μέγιστης απόστασης παρεμβολής προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα. Η μέγιστη απόσταση παρεμβολής είναι ένα συντηρητικό όριο στη μέγιστη απόσταση στην οποία ένας κόμβος μπορεί ακόμα να διαταράξει την επικοινωνία του γειτονικού. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η μέγιστη απόσταση παρεμβολής δεν καθορίζει τη μέγιστη απόσταση στην οποία μπορούν να ληφθούν μηνύματα. Οι κόμβοι που θέλουν να λάβουν ένα μήνυμα από έναν ομότιμο επικοινωνίας λαμβάνουν επίσης όλα τα σήματα παρεμβολών και έτσι μπορούν να αποφασίσουν για το επίπεδο παρεμβολής και τα προκύπτοντα σφάλματα bit. Η ύπαρξη αντικειμένων στο περιβάλλον διάδοσης επηρεάζει επίσης τη μέγιστη απόσταση παρεμβολής.

#### **4.4.1. Το φυσικό επίπεδο**

Το φυσικό επίπεδο είναι το βασικό μέρος ενός ασύρματου κόμβου στο MiXiM. Είναι υπεύθυνο για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων, τον υπολογισμό σφαλμάτων bit και τον εντοπισμό σύγκρουσης. Επιπλέον, είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή μοντέλων καναλιών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Το φυσικό επίπεδο MiXiM χωρίζεται σε τρία μέρη, τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς στις ακόλουθες υποενότητες. Το βασικό φυσικό επίπεδο παρέχει τις διεπαφές στο επίπεδο MAC και τα φυσικά στρώματα άλλων κόμβων. Τα αναλογικά μοντέλα είναι υπεύθυνα για την προσομοίωση της εξασθένησης (όπως εξασθένηση, σκίαση και

απώλεια διαδρομής) ενός λαμβανόμενου σήματος. Ο decider (αναλύεται παρακάτω) βοηθά στην αξιολόγηση και στην αποδιαμόρφωση (υπολογισμός σφαλμάτων bit) των ληφθέντων μηνυμάτων. Στο φυσικό επίπεδο, η διαμόρφωση που έχει χρησιμοποιηθεί, οι συναρτήσεις κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης διόρθωσης σφαλμάτων προς τα εμπρός (FEC) καθορίζουν τον ρυθμό σφάλματος bit και την απόδοση ενός συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτών των λειτουργιών στα ασύρματα κανάλια μπορούν να μοντελοποιηθούν σε επίπεδο SNR.

Η ισχύς του σήματος ενός μηνύματος που αποστέλλεται από τον έναν κόμβο στον άλλο μπορεί να μοντελοποιηθεί με παράγοντες εξασθένησης ως αποτέλεσμα απώλειας διαδρομής, σκίασης και εξασθένησης. Επιπλέον, ένα μήνυμα μπορεί να σταλεί χρησιμοποιώντας πολλαπλές συχνότητες (π.χ. OFDM) και χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες (MIMO). Ως αποτέλεσμα όλων αυτών των φαινομένων, ένα μήνυμα μπορεί να έχει διαφορετική ισχύ αποστολής, ρυθμό bit και εξασθένηση. Στο MiXiM αυτή η πολύπλοκη διαδικασία μοντελοποιείται. Κατά τη διαδικασία αποστολής ενός μηνύματος, ένας κόμβος πρέπει να καθορίσει την ισχύ αποστολής και τον ρυθμό μετάδοσης bit στις κατάλληλες διαστάσεις. Στη συνέχεια, ο κόμβος λήψης προσθέτει την εξασθένηση και μπορούν να υπολογιστούν τα σφάλματα bit.

Εκτός από την αποστολή και λήψη μηνυμάτων, το BasePhylayer λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ μηνυμάτων φυσικού επιπέδου (Airframes) του αναλογικού μοντέλου και του Decider. Ο Decider έχει τρία κύρια καθήκοντα. Πρώτο πρέπει να ταξινομήσει τα εισερχόμενα μηνύματα σε εισερχόμενα μηνύματα ή θόρυβο. Δεύτερον να υπολογίσει τα σφάλματα bit για το μήνυμα στο τέλος της λήψης εισερχόμενων μηνυμάτων. Τέλος, πρέπει να παραδώσει τις πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού. Το MiXiM έχει πολλά μοντέλα που καθορίζουν πώς και πότε ένα μήνυμα μπορεί να ληφθεί ή είναι απλώς θόρυβος. Ο Decider θα υπολογίσει τα σφάλματα bit για το μήνυμα και θα υπολογίσει το SNR. Μετά θα αποφασίσει αν το μήνυμα πρέπει να ληφθεί ή όχι. Η κατάσταση του καναλιού άπτεται του επιπέδου MAC. Ο Decider θα ανιχνεύσει το κανάλι για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια επιστρέφει εάν το κανάλι είναι αυτήν τη στιγμή αδρανές ή απασχολημένο.

Η μονάδα του φυσικού επιπέδου στο OMNeT ++ έχει ως στόχο την προετοιμασία των σχετικών αναλογικών μοντέλων και Deciders. Υπάρχουν διάφορα αναλογικά μοντέλα και Deciders διαθέσιμα στο MiXiM Ευρετήριο. Τα αναλογικά μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη είναι

## 1. SimplePathlossModel



2. LogNormal Shadowing
3. JakesFading
4. BreakpointPathlossModel
5. BERModel

Ομοίως, οι Deciders που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη είναι

1. Decider80211
2. SNRThresholdDecider
3. Decider802154Narrow

Για την υλοποίηση του BLE, χρησιμοποιείται το SimplePathlossModel. Αυτό το μοντέλο αντιπροσωπεύει απώλεια διαδρομής. Με τη βοήθεια ενός config.XML, επιλέγουμε τις παραμέτρους και τις τιμές του χάρτη σε αυτούς. Η συχνότητα φορέα του σήματος δίνεται σε Hz και για το BLE είναι 2,412GHz. Για την υλοποίηση του BLE, χρησιμοποιείται το SNRThresholdDecider\_Multichannel. Αυτή είναι μια επέκταση του τυπικού SNRThresholdDecider για να του επιτρέψει να λειτουργεί με πολλά κανάλια. Το SNRThresholdDecider αποφασίζει την κατάσταση του καναλιού (αδράνεια/απασχολημένο) από το επίπεδο ισχύος (ανεξάρτητο από σήμα ή θόρυβο). Εάν είναι πάνω από το όριο που ορίζεται από την παράμετρο "busyThreshold", θεωρεί ότι το κανάλι είναι απασχολημένο. Με τη βοήθεια του ίδιου αρχείου config.XML, αντιστοιχίζεται το όριο SNR στην τιμή 1,12589254. Η παράμετρος "busyThreshold" αντιστοιχίζεται σε μια τιμή 3,9810E-9. Το SNR σήματος ελέγχεται έναντι του ορίου SNR Deciders. Ανάλογα με αυτό το AirFrame είτε αποστέλλεται στο MAC επίπεδο είτε απορρίπτεται.

#### **4.4.2. MAC πρωτόκολλα στο MIXIM**

Το πρωτόκολλο Medium Access Control (MAC) είναι υπεύθυνο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την κοινή χρήση ενός μέσου για επικοινωνία μεταξύ κόμβων ενός συστήματος. Στην περίπτωση των ασύρματων συστημάτων, το κοινό μέσο είναι ο αέρας. Ο κύριος ρόλος ενός πρωτοκόλλου MAC είναι να αποφασίζει πότε ένας κόμβος θα πρέπει να στέλνει μηνύματα έτσι ώστε τα

μηνύματα να μη συγκρούονται με τα μηνύματα άλλων κόμβων. Επιπλέον, για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης (συσκευές BLE) – το πρωτόκολλο MAC είναι υπεύθυνο να καθορίσει σε ποιες ώρες μπορεί να απενεργοποιηθεί η ραδιοδιάδοση για να αποφευχθεί η ακρόαση του μέσου όταν δεν αποστέλλονται μηνύματα. Στο MiXiM υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες για τη δημιουργία πρωτοκόλλων MAC ειδικά για το δίκτυο αισθητήρων.

1. BaseMACLayer: βασική επίπεδο του MiXiM, που παρέχει en/decapsulation πακέτων.
2. EyesMACLayer: παρέχει έναν αριθμό λειτουργιών υποστήριξης για δίκτυα αισθητήρων, περιλαμβάνει λειτουργίες υποστήριξης για ακρόαση χαμηλής ισχύος, και περιέχει στατιστικές πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του πρωτοκόλλου MAC.

Το MiXiM διαθέτει μια βιβλιοθήκη μονάδων κινητικότητας. Έχει έναν απλοποιημένο τρόπο δημιουργίας νέων μονάδων κινητικότητας από τη βασική κλάση BaseMobility. Η κλάση BaseMobility προσφέρει όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται για το χειρισμό κινητικότητας στο MiXiM.

Σε αντίθεση με τη μονάδα Physical layer, η μονάδα επιπέδου MAC μπορεί να κληρονομήσει πολύ λίγες ιδιότητες από το υπάρχον επίπεδο βάσης. Το BLEMacLayer είναι μια επέκταση του BaseMacLayer. Η λειτουργική μονάδα BaseMacLayer παρέχει λειτουργίες όπως encapsulation/decapsulation μηνυμάτων χρησιμοποιώντας. Παρέχει επίσης βασικό χειρισμό μηνυμάτων χαμηλότερου επιπέδου. Το BaseMacLayer είναι μια επέκταση του BaseLayer στη βιβλιοθήκη MiXiM. Αυτή η ενότητα BaseLayer διευκολύνει την ανάπτυξη ενός επιπέδου δικτύου ή Mac. Το BLEMac.ned δηλώνει παραμέτρους όπως το bitrate, το μήκος της κεφαλίδας, την ισχύ μετάδοσης και την κατάσταση του κόμβου (αναμονή, διαφήμιση, εκκίνηση και σύνδεση). Δηλώνει επίσης ορισμένες από τις παραμέτρους του επιπέδου σύνδεσης BLE, όπως το μήκος της κεφαλίδας για το πακέτο δεδομένων και το διαφημιστικό πακέτο, την απόσταση μεταξύ των πλαισίων, τη μέγιστη διάρκεια PDU διαφήμισης, τη μέγιστη διάρκεια PDU δεδομένων, την ελάχιστη διάρκεια PDU δεδομένων και τα μέγιστο PDU payload. Δηλώνονται επίσης παράμετροι που περιλαμβάνουν τους χρονισμούς εναλλαγής υλικού, όπως ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση από την κατάσταση αναμονής στη λειτουργία μετάδοσης, από τη λειτουργία αναμονής στη λειτουργία λήψης, από τη λειτουργία μετάδοσης στη λειτουργία λήψης και από τη λειτουργία λήψης στη λειτουργία μετάδοσης. Όλες αυτές οι παράμετροι μπορούν να αντιστοιχιστούν σε μια τιμή που ορίζεται στην προδιαγραφή πυρήνα. Οι παράμετροι για τον εντοπισμό σφραγμάτων και τη δοκιμή αρχικοποιήθηκαν επίσης στο αρχείο BLEMac.ned. Η πηγή C++ του επιπέδου BLE Mac έχει τις

απαραίτητες κλάσεις για την υλοποίηση της σχετικής λειτουργικότητας στο επίπεδο σύνδεσης και στο L2CAP. Η αρχικοποίηση θα εκτελεστεί μόλις ο έλεγχος του κόμβου εισέλθει στο επίπεδο MAC. Υπάρχουν δύο στάδια αρχικοποίησης. Κατά τη διάρκεια του σταδίου 0 αρχικοποιούνται όλα τα σχετικά χρονόμετρα και αντικείμενα. Αυτό συμβαίνει μόνο μία φορά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο στάδιο 1, ανάλογα με το initState πραγματοποιούνται διαφορετικές κλήσεις συναρτήσεων. Για παράδειγμα, όταν ο κόμβος ενεργεί ως διαφημιστής, η τιμή initState θα είναι ίση με 1, στη συνέχεια η κατάσταση MAC αλλάζει σε Διαφήμιση και θα ενεργοποιηθεί ένα χρονόμετρο για την έναρξη της διαφήμισης. Κατά τη διάρκεια της κατάστασης σύνδεσης, δημιουργείται ένα νέο πακέτο δεδομένων με την κλήση της συνάρτησης NewDataPkt. Κατά τη διάρκεια της κατάστασης σύνδεσης, οι πληροφορίες σύνδεσης παίζουν ρόλο στην απόφαση για το πότε θα κλείσει το συμβάν σύνδεσης.

Τα επίπεδα πρωτοκόλλου BLE επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τα πακέτα μηνυμάτων. Το επίπεδο BLE MAC χειρίζεται τα μηνύματα τόσο από το ανώτερο όσο και από το κατώτερο επίπεδο. Με βάση διαφορετικά μηνύματα, θα εκτελεστεί διαφορετικό συμβάν. Αυτό το μήνυμα μπορεί να είναι ένα χρονόμετρο ή ένα μήνυμα ολοκλήρωσης συμβάντος ή συμβάν μετάβασης κατάστασης. Οποιοσδήποτε κόμβος BLE με βάση τον ρόλο του (διαφημιστής, εκκινητής, master, slave), εκτελεί συγκεκριμένες εργασίες που ορίζονται στο επίπεδο MAC. Η κλήση της συνάρτησης updateStatusAdvertising εκτελεί όλα τα συμβάντα που σχετίζονται με έναν διαφημιζόμενο. Η κλήση της συνάρτησης updateStatusInitiating εκτελεί όλα τα συμβάντα που σχετίζονται με έναν εκκινητή. Η κλήση της συνάρτησης updateStatusconnected εκτελεί όλα τα συμβάντα που σχετίζονται με το master και το slave. Το MAC πηγαίο αρχείο έχει επίσης ορισμούς συναρτήσεων για την προετοιμασία νέου πακέτου δεδομένων, πακέτο τερματισμού σύνδεσης, πακέτο ενημέρωσης χάρτη καναλιού, πακέτο ενημέρωσης παραμέτρων σύνδεσης και κενό πακέτο επιβεβαίωσης όπως επίσης για τη δημιουργία πακέτου απόκρισης σάρωσης, αίτημα σάρωσης πακέτο και το πακέτο αιτήματος σύνδεσης. Αυτά τα πακέτα μηνυμάτων χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ακριβή απεικόνιση του επιπέδου BLE MAC στο OMNeT++.

#### **4.4.3. Θεωρητικός υπολογισμός της ρυθμαπόδοσης**

Ο υπολογισμός θα γίνει με την παραδοχή ότι ο master με τον slave είναι μέσα σε εμβέλεια μετάδοσης. Σε μια BLE σύνδεση ο χρόνος στον οποίο μεταφέρονται πακέτα δεδομένων μεταξύ master και slave ονομάζεται ConnEvent. Το χρονικό διάστημα που το κανάλι είναι ανενεργό

ονομάζεται Radio Idle. Time Interface Space  $T_{IFS}$  είναι το διάστημα προστασίας μεταξύ των πακέτων. Το διάστημα σύνδεσης (ConnInterval ) είναι ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ConnEvents . Αυτό το χρονικό διάστημα που είναι το άθροισμα του ConnEvent και του Idle Time είναι πολλαπλάσιο του 1,25 ms στην περιοχή 7,5 - 4000 ms. Στο BLE το συνολικό μέγεθος του πακέτου είναι Preamble + Access Address + PDU + CRC. Τα Advertising και τα Data πακέτα έχουν την ίδια δομή και διαφοροποιούνται στο πεδίο PDU μόνο. Οι χρόνοι μετάδοσης για το master και slave αντίστοιχα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$T_S = T_{Pr} + T_{llh} + T_{CRC} + T_{PDU} + T_{op} + T_{ATTTh} + T_{L2CAPh}$$

$$T_M = T_{Pr} + T_{CRC} + T_{llh} + T_{aa}$$

όπου

$T_{aa}$  Access Address time

$T_{Pr}$  Preamble time

$T_{llh}$  Link layer header time

$T_{CRC}$  CRC time

$T_{PDU}$  PDU time

$T_{op}$  ATT opcode time

$T_{ATTTh}$  ATT handle time

$T_{L2CAPh}$  L2CAP header time

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ρυθμός δεδομένων BLE είναι 1 Mbit/sec, ο χρόνος για την αποστολή πληροφοριών ελέγχου στον slave είναι μικρός και μπορεί να παραληφθεί. Μπορεί να υπολογιστεί ότι  $T_M = 80\mu s, T_S = 616\mu s$  . Ο συνολικός χρόνος για την ανταλλαγή των πακέτα μεταξύ του master και του slave  $T_{MS} ( T_{MS} = T_{IFS} * 2 + T_M + T_S )$  είναι ίσος με 996 μs με το διάστημα ασφαλείας μεταξύ των πακέτων  $T_{IFS} = 150 \mu s$ . Επίσης με βάση την υπόθεση ότι ο master στέλνει στο slave πακέτα με payload 60 byte υπολογίζεται ότι σε συνεχή μετάδοση οι συσκευές BLE εκπέμπουν με μέγιστη ρυθμαπόδοση 481,9 kbps σε κάθε κατεύθυνση.

Για την περίπτωση που ο master στέλνει δεδομένα σε ένα μόνο slave η θεωρητική ρυθμαπόδοση προκύπτει από τη σχέση

$$TH_{M-S} = \frac{N_p \times L_{data} \times 8bits}{T_{CI}}$$

όπου

$N_p$  ο αριθμός των πακέτων σε κάθε σύνδεση

$L_{data}$  το μήκος του payload

$T_{CI}$  ο χρόνος σύνδεσης

Όταν υπάρχουν περισσότεροι slaves η θεωρητική ρυθμαπόδοση δίνεται από τη σχέση

$$TH_{multislaves} = \frac{N_p \times L_{data} \times 8}{N_S \times N_{roundtrip} \times T_{MS}}$$

όπου

$$N_{roundtrip} = T_{data} + 2 \times T_{IFS} + T_{ACK}$$

$N_S$  ο αριθμός των slaves

#### 4.4.4. Υλοποίηση του BLE στο OMNeT++

Σε πρώτη φάση θα γίνει η μοντελοποίηση των παραμέτρων του περιβάλλοντος BLE για ένα περιβάλλον πολλαπλών συσκευών. Κατόπιν, το δίκτυο αισθητήρων BLE προσομοιώνεται στο OMNeT++. Το σύστημα θα αποτελείται από πολλές βοηθητικές συσκευές ή περιφερειακές συσκευές BLE, στόχος των οποίων είναι η επικοινωνία των δεδομένων με μια κύρια ή κεντρική συσκευή BLE. Αρχικά, όλες οι περιφερειακές συσκευές θα είναι σε λειτουργία advertising και η κεντρική συσκευή θα είναι σε λειτουργία scanning. Μόλις γίνει η σύνδεση, η κεντρική συσκευή θα γίνει master και οι περιφερειακές συσκευές θα γίνουν slave. Οι slaves θα στείλουν τα δεδομένα στην κύρια συσκευή μέσω ενός ασφαλούς καναλιού δεδομένων. Στο BLE, κατά τη λειτουργία advertising, όλοι οι advertisers χρησιμοποιούν μόνο 3 κανάλια τα 37, 38 και 39. Ο scanner θα ακούει αυτά τα κανάλια μόνο. Μόλις ο advertiser αποδεχτεί το αίτημα σύνδεσης, στέλνει μια απάντηση στον initiator. Κατά τη φάση της σύνδεσης, τόσο το slave όσο και το master επικοινωνούν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας το 37 κανάλι δεδομένων. Ο μηχανισμός αναπήδησης συχνότητας χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η παρεμβολή και το fading με άλλη εκπομπή στο ίδιο κανάλι. Υπάρχουν διαφορετικές παράμετροι στον πυρήνα του BLE για τον έλεγχο αυτών των 2 φάσεων. Κατά τη φάση της διαφήμισης και της ανακάλυψης συσκευής, οι παράμετροι, όπως το διάστημα διαφήμισης, το scanInterval και το scanWindow παίζουν σημαντικό ρόλο. Κατά τη φάση της σύνδεσης, οι παράμετροι όπως το διάστημα σύνδεσης, το χρονικό όριο επίβλεψης, και η

καθυστέρηση σύνδεσης παίζουν σημαντικό ρόλο. Αυτές οι παράμετροι θα έχουν τη δική τους βαρύτητα στην απόδοση του συστήματος BLE.

Η προετοιμασία του OMNeT++ διαφέρει από την περίπτωση του VLC γιατί ενώ στο VLC τροποποιήθηκε το πρωτόκολλο 802.15.4, στο BLE θα εγκατασταθεί από την αρχή το project MIXIM που περιλαμβάνει το BLE μοντέλο. Έτσι τα βήματα είναι τα εξής:

1. Επιλογή "Αρχείο->Εισαγωγή" από το μενού.
2. Επιλογή "General->Existing Projects into Workspace" από το επερχόμενο παράθυρο διαλόγου και συνέχεια με το "Next".
3. Επιλογή «Select archive file» και Επιλογή το αρχείο αρχειοθέτησης MiXiM.
4. Το "MiXiM" πρέπει να εμφανίζεται στη λίστα "Projects" παρακάτω. Κλικ στο "Finish".
5. Για τη δημιουργία του MiXiM, δεξί κλικ στο project και Επιλογή «Build Project».

Το βασικό δίκτυο BLE (Single-Slave piconet) αποτελείται από έναν master και έναν slave. Αν και κάθε συσκευή έχει τη δυνατότητα να εναλλάσσεται τους ρόλους, ο master δεν μπορεί να επικοινωνήσει με περισσότερους από έναν slave ταυτόχρονα. Στην περίπτωση των πολλαπλών slaves στο επίπεδο MAC, το Link Layer επεκτείνεται και το Data Length Extension - DLE ενεργοποιείται για να αυξηθεί η ρυθμαπόδοση και να επιτευχθεί η επικοινωνία πολλαπλών καναλιών. Η μοντελοποίηση ακολουθεί τις εξής παραδοχές:

1. Η μοντελοποιημένη περιοχή προσομοίωσης είναι 10 m × 10 m. περίπου δηλαδή ένας όροφος γραφείων ή ένα διαμέρισμα.
2. Όλοι οι κόμβοι βρίσκονται εντός του εύρους μετάδοσης μεταξύ τους.
3. Η δυνατότητα DLE είναι ενεργοποιημένη.
4. Οι slaves έχουν ίσες αποστάσεις και όλοι είναι ένα hop από τον κύριο.
5. Το slave latency της σύνδεσης είναι ίσο με μηδέν.

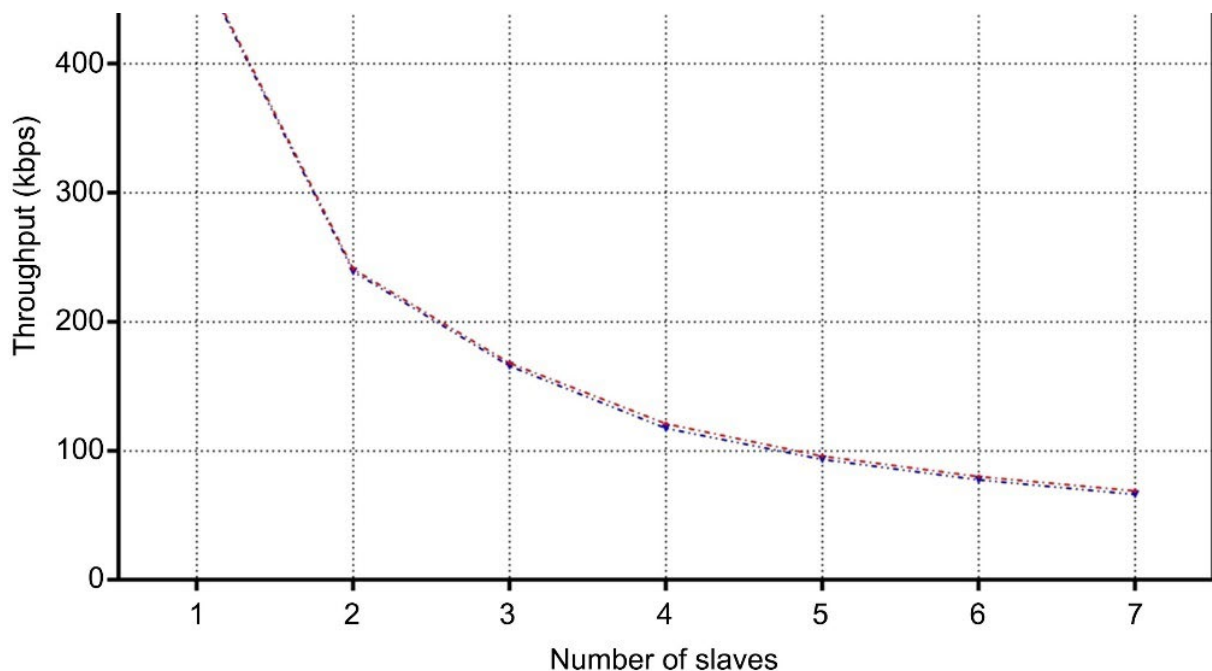
6. Το μέγεθος του payload είναι 60 byte.
7. Δεν υπάρχει πολυδιαδρομική διάδοση.

Οι παράμετροι της προσομοίωσης είναι:

1. Εσωτερικός χώρος διαστάσεις: 10m×10m×3m
2. Διαμόρφωση: BPSK
3. Αριθμός κόμβων: μέχρι 7
4. Συχνότητα: 2,4 GHz
5. Μοντέλο διάδοσης: LOS
6. Payload: 60 Bytes

Η προσομοίωση για τα δίκτυα με ένα slave ή περισσότερους έγινε με σκοπό τη μέγιστη απόδοση επεμβαίνοντας στις παραμέτρους όπως διάστημα σύνδεσης, αριθμός slaves και αριθμός συνδέσεων. Για την περίπτωση ένας slave ένας master έγινε διερεύνηση για διαφορετικά payloads (αριθμός πακετων x 60 Bytes). Για 7.2 Kbytes payload η μέγιστη τιμή ρυθμαπόδοσης ήταν 767,8 kbps για διάστημα σύνδεσης 7,5 ms και και 1.5 kbps για 4s.

Στα δίκτυα με περισσότερους slaves τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η απόδοση μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του αριθμού τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το τα δεδομένα στο master θα διανεμηθούν σε όλους τους slaves του δικτύου. Στην περίπτωση με 7 slaves η απόδοση ήταν 66,2 Kbps.



ΣΧ. 4.4.4.1 ΡΥΘΜΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

Συμπερασματικά, η απόδοση του BLE σε τοπολογίες piconet με payload 7.2 Kbytes και σε διάστημα σύνδεσης 7.5 ms εμφανίζουν μέγιστη τιμή απόδοσης 755,8 kbps που είναι πολύ κοντά στη θεωρητική 767,8 kbps. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των slaves μειώνει την απόδοση στα 66,2 kbps. Η συνέπεια στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη θεωρητική προσέγγιση και σε αυτά της προσομοίωσης οφείλεται στο μικρό SlaveLatency.

## 4.5. Προσομοίωση με το OMNeT++ BLE Mesh τοπολογίας

Το BLE Mesh επιτρέπει την επικοινωνία πολλών προς πολλές (m:m) συσκευές και είναι ιδανικό για τη δημιουργία δικτύων μεγάλης κλίμακας. Ανάλογα με τη διάταξη των συσκευών (κόμβων), μπορούν να διαμορφωθούν αρκετοί τύποι τοπολογιών στο BLE Mesh.

1. **Star Topology:** Σε μια τοπολογία αστέρα, ένας κεντρικός κόμβος συνδέεται με όλους τους άλλους κόμβους του δικτύου. Αυτός ο κεντρικός κόμβος συχνά χρησιμεύει ως πύλη, η οποία επικοινωνεί με άλλες συσκευές του δικτύου. Αυτή η τοπολογία είναι απλή και εύκολη στη διαχείριση, αλλά έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: εάν ο κεντρικός κόμβος αποτύχει, ολόκληρο το δίκτυο πέφτει.
2. **Tree Topology:** Σε μια τοπολογία δέντρου, οι κόμβοι είναι διατεταγμένοι σε μια ιεραρχία, παρόμοια με ένα δέντρο με κλαδιά. Υπάρχει ένας ριζικός κόμβος και κάθε θυγατρικός κόμβος συνδέεται με έναν γονικό κόμβο. Η τοπολογία δέντρου μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό συσκευών και είναι εύκολο να προστεθούν ή να αφαιρεθούν κόμβοι. Ωστόσο, εάν ένας γονικός κόμβος αποτύχει, όλοι οι θυγατρικοί κόμβοι κάτω από αυτόν χάνουν επίσης τις συνδέσεις τους.
3. **Full Mesh Topology:** Σε μια τοπολογία πλήρους πλέγματος, κάθε συσκευή είναι συνδεδεμένη με κάθε άλλη συσκευή στο δίκτυο. Αυτό παρέχει πολλαπλές διαδρομές για τη μεταφορά δεδομένων, διασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία και πλεονασμό. Ωστόσο, καθιστά επίσης το δίκτυο πιο περίπλοκο και απαιτεί περισσότερη ισχύ και πόρους για τη διατήρηση των πολυάριθμων συνδέσεων.
4. **Partial Mesh Topology:** Η μερική τοπολογία πλέγματος είναι ένα υβρίδιο μεταξύ ενός πλήρους πλέγματος και άλλων τοπολογιών. Σε ένα μερικό πλέγμα, δεν συνδέονται άμεσα



όλοι οι κόμβοι. Μερικοί κόμβοι μπορεί να συνδέονται με όλους τους άλλους (όπως σε ένα πλήρες πλέγμα), ενώ άλλοι συνδέονται μόνο με μερικούς κόμβους. Αυτό παρέχει μια ισορροπία μεταξύ πλεονασμού και χρήσης πόρων.

5. Flood Topology: Σε μια τοπολογία πλημμύρας, η οποία είναι ουσιαστικά μια παραλλαγή της τοπολογίας πλέγματος, οι πληροφορίες μεταβιβάζονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συντομότερη διαδρομή ή συγκεκριμένες διαδρομές. Αυτό χρησιμοποιείται συχνά στο BLE Mesh κατά τη μετάδοση σημάτων.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι προδιαγραφές BLE Mesh δεν υπαγορεύουν αυστηρά την τοπολογία του δικτύου. Οι κόμβοι σε ένα δίκτυο BLE Mesh μπορούν να τακτοποιηθούν με οποιονδήποτε τρόπο και το δίκτυο μπορεί να προσαρμόσει δυναμικά την τοπολογία του καθώς προστίθενται ή αφαιρούνται κόμβοι ή καθώς αλλάζουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτή η ευελιξία είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του BLE Mesh, καθιστώντας το κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τον οικιακό αυτοματισμό έως το βιομηχανικό IoT. Σε αντίθεση με το Bluetooth Classic (BTC) και τις προηγούμενες εκδόσεις του Bluetooth Low Energy (BLE), το νεότερο BLE 5 παρέχει τη δυνατότητα πλεγματοειδούς δικτύωσης και την υλοποίηση Bluetooth Mesh Networks - BMN.

Στο BMN μαζί με τον πυρήνα του BLE εισάγεται ο πυρήνας του BLE Mesh. Στο BLE Mesh τα μηνύματα δεν δρομολογούνται αλλά μεταδίδονται σε όλες τις συσκευές που είναι στο Line-of-Site (LoS). Σε ένα BMN όμως υπάρχουν κόμβοι που λειτουργούν ως αναμεταδότες προς τους άλλους κόμβους στην εμβέλειά τους. Επομένως, οι συσκευές NLoS μπορούν επίσης να λάβουν μηνύματα από τον αρχικό αποστολέα. Ο μηχανισμός αυτό χρησιμοποιεί έναν publish – subscribe αλγόριθμο μηνυμάτων, που σημαίνει ότι ο αποστολέας μπορεί να στείλει ένα μήνυμα σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, αλλά και συσκευές που έχουν συνδεθεί ως subscribers σε εκείνη τη συγκεκριμένη διεύθυνση μπορούν να λάβουν αντίγραφο του αρχικού μηνύματος.

Επειδή αυτή η προσέγγιση δεν είναι ενεργειακά αποδοτική προστέθηκε ένας δείκτης χρόνου ζωής (TTL) στα πακέτα, ο οποίος περιορίζει τον αριθμό των αναπηδήσεων που απαιτούνται για να δρομολογηθεί ένα μήνυμα. Επιπλέον heartbeat μηνύματα παρέχουν στο δίκτυο πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία του και τον αριθμό των αναπηδήσεων. Αυτά τα μηνύματα επιτρέπουν στις συσκευές να ρυθμίσουν το TTL σε μια βέλτιστη τιμή που αποφεύγει τον περιττό αριθμό αναπηδήσεων. Επιπλέον, κάθε συσκευή αποθηκεύει τα μηνύματα σε μια cache μνήμη ώστε να

παρέχει πληροφορίες για τα μηνύματα που έχουν επεξεργαστεί, αποφεύγοντας έτσι την πολλαπλή επεξεργασία των ίδιων μηνυμάτων.

Κάποιοι κόμβοι εκτελούν πιο σύνθετες διεργασίες και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια. Ένας κόμβος σε ένα Bluetooth Low Energy (BLE) Mesh δίκτυο μπορεί να έχει διάφορους ρόλους, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και την κατανομή των συσκευών. Οι βασικοί ρόλοι είναι οι εξής:

1. Relay node (Κόμβος αναμετάδοσης): Ένας κόμβος που λειτουργεί ως relay είναι υπεύθυνος για την αναμετάδοση μηνυμάτων στο δίκτυο. Αυτό βοηθά στην επέκταση της εμβέλειας του δικτύου και τη βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων.
2. Low power node (Κόμβος χαμηλής ισχύος): Ένας κόμβος χαμηλής ισχύος είναι μια συσκευή που λειτουργεί με περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας. Συνήθως αυτός ο τύπος κόμβου συνδέεται με έναν "φίλο" (Friend node) για να αποθηκεύσει μηνύματα και να επικοινωνήσει με το δίκτυο.
3. Friend node (Κόμβος φίλος): Ο κόμβος φίλος είναι υπεύθυνος για την υποστήριξη των κόμβων χαμηλής ισχύος. Αποθηκεύει τα μηνύματα που προορίζονται για τους κόμβους χαμηλής ισχύος και τα προωθεί όταν οι κόμβοι χαμηλής ισχύος είναι έτοιμοι να τα λάβουν. Αυτό επιτρέπει στους κόμβους χαμηλής ισχύος να παραμένουν σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, καθώς δεν χρειάζεται να είναι συνεχώς ενεργοί για να λαμβάνουν μηνύματα.
4. Proxy node (Κόμβος διαμεσολάβησης): Ο κόμβος διαμεσολάβησης δρα ως διαμεσολαβητής μεταξύ ενός κόμβου BLE Mesh και μιας συσκευής που δεν υποστηρίζει το πρωτόκολλο BLE Mesh. Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπει σε μη-Mesh συσκευές, όπως έξυπνα τηλέφωνα ή υπολογιστές, να επικοινωνούν με το δίκτυο BLE Mesh.
5. Configurator node (Κόμβος διαμόρφωσης): Ο κόμβος διαμόρφωσης χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των κόμβων ενός δικτύου BLE Mesh. Αυτό περιλαμβάνει τη διαμόρφωση κόμβων, την προσθήκη και αφαίρεση κόμβων από το δίκτυο, την ενημέρωση των κλειδιών ασφαλείας και τη ρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου.

Στα BMN υπάρχει η δυνατότητα της ενσωμάτωσης νέων κόμβων χωρίς να υπάρχει ανθρώπινη παρέμβαση. Σε ένα δίκτυο BLE Mesh, ο provisioner είναι μια συσκευή που είναι υπεύθυνη για την προσθήκη και τη διαχείριση κόμβων εντός του δικτύου. Η διαδικασία προσθήκης ενός νέου κόμβου στο δίκτυο πλέγματος ονομάζεται "provisioning". Ο provisioner εκχωρεί μια μοναδική διεύθυνση στον νέο κόμβο, διανέμει τα απαραίτητα κλειδιά δικτύου και ασφαλείας και διαμορφώνει τις ρυθμίσεις του κόμβου για να διασφαλίσει ότι μπορεί να επικοινωνεί με άλλες συσκευές στο δίκτυο. Ο provisioner μπορεί να είναι μια αποκλειστική συσκευή, όπως πύλη ή hub, ή μπορεί να υλοποιηθεί σε smartphone ή υπολογιστή χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή με δυνατότητα Mesh. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο provisioner ενεργεί επίσης ως κόμβος διαμόρφωσης, επιτρέποντάς του να διαχειρίζεται τις ρυθμίσεις και τις παραμέτρους των κόμβων στο δίκτυο μετά την παροχή τους. Το provisioning είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη δημιουργία ενός δικτύου BLE Mesh, καθώς δημιουργεί μια ασφαλή σύνδεση μεταξύ του νέου κόμβου και του υπάρχοντος δικτύου πλέγματος, επιτρέποντας στον κόμβο να συμμετέχει στην επικοινωνία και την ανταλλαγή μηνυμάτων με άλλους κόμβους.

#### **4.5.1. Επίπεδα Bluetooth Mesh**

Η στοίβα Bluetooth mesh αποτελείται από επτά στρώματα που συμπληρώνουν το πρωτόκολλο BLE. Σε αυτή τη στοίβα, το κατώτερο επίπεδο αντιπροσωπεύει το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης του BLE. Το δεύτερο επίπεδο, το επίπεδο bearer, είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των μηνυμάτων επιπέδου δικτύου μεταξύ των κόμβων. Το επίπεδο δικτύου καθορίζει τη διευθυνσιοδότηση της διαδικασίας μεταφοράς μηνυμάτων του επιπέδου μεταφοράς. Το κατώτερο επίπεδο μεταφοράς περιγράφει την ανάλυση των μηνυμάτων του ανώτερου επιπέδου μεταφοράς και τη συναρμολόγηση των κάτω επιπέδων Package Data Units (PDUs). Το ανώτερο επίπεδο μεταφοράς είναι υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση και την αυθεντικοποίηση των δεδομένων εφαρμογής. Το επίπεδο πρόσβασης περιγράφει τη μορφή των δεδομένων εφαρμογής. Το επίπεδο μοντέλου βάσης καθορίζει τα καταστάσεις, τα μηνύματα και τα μοντέλα που είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση του δικτύου mesh. Τελικά, το ανώτερο στρώμα ορίζει τα μοντέλα και τη λειτουργικότητά τους.

Το φυσικό στρώμα στο BLE Mesh αναφέρεται στο χαμηλότερο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλου, υπεύθυνο για τη μετάδοση και λήψη ραδιοφωνικών σημάτων μέσω του αέρα. Το φυσικό επίπεδο ορίζει τη ραδιοσυχνότητα, την απόσταση καναλιών, το σχήμα διαμόρφωσης και άλλα φυσικά χαρακτηριστικά της ζεύξης επικοινωνίας. Στο BLE Mesh, το φυσικό επίπεδο

Βασίζεται στην ίδια προδιαγραφή Bluetooth Low Energy (BLE) που χρησιμοποιείται σε άλλες συσκευές Bluetooth. Το φυσικό στρώμα BLE λειτουργεί στη ζώνη ISM των 2,4 GHz και χρησιμοποιεί το φάσμα διασποράς συχνότητας (FHSS) για τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτίωση της αξιοπιστίας. Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι η ψηφιακή μετατόπιση συχνότητας Gauss (GFSK), η οποία παρέχει μια καλή ισορροπία μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της απόδοσης δεδομένων. Το BLE Mesh υποστηρίζει επίσης διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι υποστηριζόμενες ταχύτητες δεδομένων είναι 125 kbps, 500 kbps και 1 Mbps. Οι πιο αργοί ρυθμοί δεδομένων είναι πιο κατάλληλοι για εφαρμογές όπου η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι προτεραιότητα, ενώ ο ταχύτερος ρυθμός δεδομένων προτιμάται για εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη απόδοση. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου στο BLE Mesh είναι η χρήση διαφήμισης και σάρωσης για τη δημιουργία και τη διατήρηση συνδέσεων μεταξύ κόμβων στο δίκτυο. Τα διαφημιστικά πακέτα αποστέλλονται από κόμβους για να ανακοινώσουν την παρουσία και τη διαθεσιμότητά τους, ενώ η σάρωση χρησιμοποιείται από τους κόμβους για τον εντοπισμό και τη δημιουργία συνδέσεων με άλλους κόμβους.

Το επίπεδο φορέα – bearer layer είναι ένα στρώμα στη στοίβα πρωτοκόλλου που είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ κόμβων στο δίκτυο πλέγματος. Βρίσκεται πάνω από το φυσικό επίπεδο και κάτω από το επίπεδο δικτύου και παρέχει ένα μέσο για το επίπεδο δικτύου να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα μέσω του φυσικού επιπέδου. Το επίπεδο φορέα ορίζει διαφορετικούς τύπους κομιστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά μηνυμάτων, συμπεριλαμβανομένου του φορέα διαφήμισης και του φορέα GATT. Ο φορέας διαφήμισης χρησιμοποιείται για επικοινωνία μετάδοσης και συνήθως χρησιμοποιείται για το αρχικό provisioning σε λειτουργία νέων κόμβων. Ο φορέας GATT, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται για επικοινωνία από σημείο σε σημείο και συνήθως χρησιμοποιείται για συνεχή επικοινωνία μεταξύ κόμβων. Το επίπεδο φορέα υποστηρίζει επίσης διαφορετικούς τύπους μορφών μηνυμάτων, συμπεριλαμβανομένων μη τμηματοποιημένων και τμηματοποιημένων μηνυμάτων. Τα μη τμηματοποιημένα μηνύματα μπορούν να σταλούν σε ένα μόνο πακέτο, ενώ τα τμηματοποιημένα μηνύματα χωρίζονται σε πολλαπλά πακέτα και επανασυναρμολογούνται στο άκρο λήψης. Για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη επικοινωνία, το στρώμα φέροντος περιλαμβάνει επίσης μηχανισμούς για ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων, καθώς και έλεγχο ροής για την αποφυγή συμφόρησης και απώλειας μηνυμάτων. Επιπλέον, το επίπεδο φορέα υποστηρίζει διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (QoS), επιτρέποντας στο επίπεδο δικτύου να

καθορίσει το επίπεδο αξιοπιστίας και καθυστέρησης που απαιτείται για διαφορετικούς τύπους μηνυμάτων.

Το επίπεδο δικτύου στο BLE Mesh είναι ένα επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλου που είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της δρομολόγησης των μηνυμάτων μεταξύ κόμβων στο δίκτυο πλέγματος. Βρίσκεται πάνω από το bearer στρώμα και κάτω από το στρώμα μεταφοράς και παρέχει ένα μέσο για τους κόμβους να επικοινωνούν μεταξύ τους με αποκεντρωμένο και αυτο-οργανωτικό τρόπο. Το επίπεδο δικτύου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα μηνύματα διευθύνονται και δρομολογούνται εντός του δικτύου πλέγματος. Σε κάθε κόμβο στο δίκτυο εκχωρείται μια μοναδική διεύθυνση 16-bit και τα μηνύματα διευθυνσιοδοτούνται χρησιμοποιώντας αυτές τις διευθύνσεις. Το επίπεδο δικτύου ορίζει επίσης πώς προωθούνται τα μηνύματα από κόμβο σε κόμβο στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο δρομολόγησης hop-by-hop. Για να διευκολυνθεί η δρομολόγηση, το επίπεδο δικτύου διατηρεί μια τοπολογία δικτύου, η οποία είναι ένας χάρτης των κόμβων και των διαδρομών μεταξύ τους. Η τοπολογία ενημερώνεται συνεχώς καθώς οι κόμβοι ενώνονται και εξέρχονται από το δίκτυο και καθώς ανακαλύπτονται νέες διαδρομές ή οι υπάρχουσες διαδρομές γίνονται μη διαθέσιμες. Το επίπεδο δικτύου υποστηρίζει επίσης πολλαπλές διαδρομές μεταξύ κόμβων, παρέχοντας πλεονασμό και βελτιώνοντας την αξιοπιστία. Το επίπεδο δικτύου παρέχει επίσης χαρακτηριστικά ασφαλείας για τη διασφάλιση της εμπιστευτικότητας, της ακεραιότητας και της αυθεντικότητας των μηνυμάτων που μεταδίδονται μέσω του δικτύου. Χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό συμμετρικής και ασύμμετρης κρυπτογραφίας για την προστασία των μηνυμάτων και την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή παραβίασης. Επιπλέον, το επίπεδο δικτύου υποστηρίζει διάφορες δυνατότητες, όπως προσωρινή αποθήκευση μηνυμάτων, πολλαπλή διανομή μηνυμάτων και κόμβους φίλων, που επιτρέπουν τη βελτιστοποιημένη και αποτελεσματική παράδοση μηνυμάτων σε διαφορετικά σενάρια.

Το επίπεδο πρόσβασης – Access Layer στη στοίβα πρωτοκόλλου είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό της μορφής δεδομένων και των μηχανισμών πρόσβασης που χρησιμοποιούνται από κόμβους στο δίκτυο πλέγματος. Βρίσκεται πάνω από το επίπεδο μεταφοράς και είναι το υψηλότερο επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλου BLE Mesh. Το επίπεδο πρόσβασης καθορίζει τον τρόπο οργάνωσης και πρόσβασης των δεδομένων εντός του δικτύου πλέγματος. Περιλαμβάνει πολλά διαφορετικά μοντέλα, καθένα από τα οποία καθορίζει έναν συγκεκριμένο τύπο λειτουργικότητας ή περίπτωσης χρήσης. Για παράδειγμα, υπάρχουν μοντέλα για τον έλεγχο των φώτων, των αισθητήρων και των διακοπών, καθώς και μοντέλα για τη διαμόρφωση κόμβων και τη διαχείριση της ασφάλειας του δικτύου. Κάθε μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύνολο μηνυμάτων, καταστάσεων και συμπεριφορών που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι στο δίκτυο

αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους για να ολοκληρώσουν μια συγκεκριμένη εργασία. Τα μηνύματα χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ κόμβων, ενώ οι καταστάσεις αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα κατάσταση ή κατάσταση μιας συγκεκριμένης συσκευής ή συστήματος. Οι συμπεριφορές καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι ανταποκρίνονται σε διαφορετικά μηνύματα και συμβάντα μέσα στο δίκτυο. Για την υποστήριξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών συσκευών και κατασκευαστών, το επίπεδο πρόσβασης χρησιμοποιεί μια τυποποιημένη μορφή και πρωτόκολλο δεδομένων που ονομάζεται Generic Attribute Profile (GATT). Η GATT ορίζει ένα σύνολο υπηρεσιών και χαρακτηριστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών και επιτρέπει στις συσκευές να ανακαλύπτουν και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τυποποιημένο τρόπο. Το επίπεδο πρόσβασης περιλαμβάνει επίσης χαρακτηριστικά ασφαλείας για την προστασία των δεδομένων που μεταδίδονται μεταξύ των κόμβων. Χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό συμμετρικής και ασύμμετρης κρυπτογραφίας για να εξασφαλίσει την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των μηνυμάτων και των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω του δικτύου.

Το μοντέλο Publish-Subscribe (Pub/Sub) είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό του Access Layer στο BLE Mesh. Επιτρέπει στους κόμβους να εγγραφούν σε συγκεκριμένα μηνύματα ή συμβάντα και να λαμβάνουν ειδοποιήσεις όταν συμβαίνουν αυτά τα μηνύματα ή συμβάντα. Αυτό επιτρέπει την αποτελεσματική και στοχευμένη επικοινωνία εντός του δικτύου πλέγματος και βοηθά στη διατήρηση του εύρους ζώνης και στη μείωση της συμφόρησης των μηνυμάτων. Στο μοντέλο Pub/Sub, σε κάθε κόμβο στο δίκτυο mesh εκχωρείται μία ή περισσότερες διευθύνσεις στοιχείων, οι οποίες είναι μοναδικά αναγνωριστικά που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων στοιχείων ή ομάδων στοιχείων εντός του κόμβου. Τα στοιχεία είναι οι λειτουργικές μονάδες μέσα σε έναν κόμβο, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές ή άλλες συσκευές, που μπορούν να στέλνουν ή να λαμβάνουν μηνύματα. Για να ενεργοποιήσετε το Pub/Sub, τα στοιχεία μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να δημοσιεύουν ή να εγγράφονται σε συγκεκριμένα μηνύματα ή συμβάντα. Οι εκδότες – publishers είναι στοιχεία που δημιουργούν μηνύματα, ενώ οι συνδρομητές είναι στοιχεία που λαμβάνουν αυτά τα μηνύματα. Οι εκδότες και οι συνδρομητές αναγνωρίζονται χρησιμοποιώντας διευθύνσεις δημοσίευσης και εγγραφής, οι οποίες είναι επίσης μοναδικά αναγνωριστικά εντός του δικτύου πλέγματος. Όταν ένας εκδότης στέλνει ένα μήνυμα, περιλαμβάνει τη διεύθυνση δημοσίευσης στην κεφαλίδα του μηνύματος, υποδεικνύοντας ποιους συνδρομητές πρέπει να λάβουν το μήνυμα. Το επίπεδο δικτύου χρησιμοποιεί τη διεύθυνση δημοσίευσης για να προσδιορίσει το σύνολο των κόμβων που πρέπει να λάβουν το μήνυμα και το επίπεδο μεταφοράς διασφαλίζει ότι το μήνυμα παραδίδεται αξιόπιστα σε αυτούς τους κόμβους.

Ομοίως, όταν ένας συνδρομητής θέλει να λαμβάνει μηνύματα, στέλνει ένα αίτημα συνδρομής στο επίπεδο δικτύου, υποδεικνύοντας τον τύπο του μηνύματος ή του συμβάντος που τον ενδιαφέρει. Το επίπεδο δικτύου χρησιμοποιεί τη διεύθυνση εγγραφής για να καθορίσει ποιοι κόμβοι θα λαμβάνουν αιτήματα συνδρομής και το επίπεδο μεταφοράς διασφαλίζει ότι το αίτημα συνδρομής παραδίδεται αξιόπιστα σε αυτούς τους κόμβους.

Στο BLE Mesh, τα Access PDUs (Protocol Data Units) είναι οι βασικές μονάδες δεδομένων που μεταδίδονται και λαμβάνονται εντός του δικτύου mesh. Ο χειρισμός των PDU περιλαμβάνει την επεξεργασία και τη δρομολόγηση αυτών των μονάδων για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Ακολουθεί μια επισκόπηση του τρόπου χειρισμού των PDU της Access στο BLE Mesh:

1. **Δημιουργία:** Τα PDU πρόσβασης δημιουργούνται από τον κόμβο ή το στοιχείο πηγής ως απόκριση σε συμβάντα ή συγκεκριμένες ενέργειες. Για παράδειγμα, ένα στοιχείο αισθητήρα μπορεί να δημιουργήσει μια Access PDU που περιέχει δεδομένα αισθητήρα.
2. **Ενθυλάκωση:** Το παραγόμενο Access PDU ενθυλακώνεται σε ένα πακέτο πρωτοκόλλου στρώματος δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει τις απαραίτητες κεφαλίδες και άλλες πληροφορίες που απαιτούνται για τη δρομολόγηση και την επεξεργασία. Αυτή η ενθυλάκωση γίνεται από το στρώμα μεταφοράς.
3. **Δρομολόγηση:** Το επίπεδο δικτύου λαμβάνει το ενθυλακωμένο Access PDU και καθορίζει την κατάλληλη διαδρομή ή διαδρομές για την προώθηση στον κόμβο ή τους κόμβους προορισμού. Το επίπεδο δικτύου χρησιμοποιεί την τοπολογία του δικτύου και τους αλγόριθμους δρομολόγησης για τη λήψη αποφάσεων δρομολόγησης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει προώθηση hop-by-hop μέσω ενδιάμεσων κόμβων ή χρήση multicast ή ομαδικής διεύθυνσης για αποτελεσματική διανομή.
4. **Αποθυλακοποίηση:** Μόλις το ενθυλακωμένο Access PDU φτάσει στον κόμβο προορισμού, το επίπεδο μεταφοράς σε αυτόν τον κόμβο αποθυλακοποιεί το πακέτο, εξάγοντας το Access PDU από το πακέτο πρωτοκόλλου του επιπέδου δικτύου mesh.
5. **Επεξεργασία:** Το στοιχείο ή τα στοιχεία του κόμβου προορισμού επεξεργάζονται το λαμβανόμενο PDU της Access, εκτελώντας τις απαιτούμενες ενέργειες ή εξάγοντας τα

σχετικά δεδομένα. Για παράδειγμα, ένα στοιχείο ενεργοποιητή μπορεί να επεξεργαστεί μια εντολή που έλαβε στο Access PDU και να ενεργοποιήσει μια συγκεκριμένη ενέργεια.

6. Απάντηση ή Δημοσίευση: Ανάλογα με το σενάριο, ο κόμβος προορισμού μπορεί να δημιουργήσει μια απάντηση Access PDU, να την ενθυλακώσει και να την στείλει πίσω στον κόμβο προέλευσης. Εναλλακτικά, ο κόμβος προορισμού μπορεί να δημοσιεύσει ένα νέο Access PDU που περιέχει σχετικές πληροφορίες ή συμβάντα, τα οποία μπορούν να ληφθούν από εγγεγραμμένους κόμβους. Ο χειρισμός των PDU της Access στο BLE Mesh βασίζεται στο μοντέλο δημοσίευσης-εγγραφής, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Οι συνδρομητές λαμβάνουν σχετικά PDU της Access με βάση τις συνδρομές τους, επιτρέποντας την αποτελεσματική και στοχευμένη επικοινωνία.

#### 4.5.2. Provisioning

Το provisioning στο BLE Mesh αναφέρεται στη διαδικασία προσθήκης και διαμόρφωσης μιας νέας συσκευής (κόμβου) στο δίκτυο πλέγματος. Περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας ασφαλούς σύνδεσης μεταξύ του νέου κόμβου και του υπάρχοντος δικτύου, την εκχώρηση μοναδικών διευθύνσεων δικτύου και κλειδιών ασφαλείας και τη διαμόρφωση των απαραίτητων παραμέτρων για τη συμμετοχή του κόμβου στο δίκτυο πλέγματος. Κατά τη διαδικασία provisioning, ένας πάροχος, ο οποίος μπορεί να είναι μια αποκλειστική συσκευή ή μια εφαρμογή με δυνατότητα πλέγματος, αλληλεπιδρά με τον νέο κόμβο για την ανταλλαγή πληροφοριών και τη ρύθμιση των απαραίτητων διαμορφώσεων. Ακολουθούν τα γενικά βήματα που περιλαμβάνονται στη διαδικασία provisioning:

1. Αναγνώριση: Ο πάροχος αναγνωρίζει τον νέο κόμβο, συνήθως μέσω μιας φυσικής αλληλεπίδρασης ή διαδικασίας σάρωσης.
2. Έλεγχος ταυτότητας: Ο πάροχος και ο νέος κόμβος ελέγχουν ο ένας τον άλλον για να δημιουργήσουν μια ασφαλή σύνδεση. Αυτός ο έλεγχος ταυτότητας διασφαλίζει ότι μόνο εξουσιοδοτημένες συσκευές μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο.
3. Provisioning ανταλλαγής δεδομένων: Ο πάροχος μεταφέρει δεδομένα παροχής στον νέο κόμβο, ο οποίος περιλαμβάνει διευθύνσεις δικτύου, κλειδιά δικτύου και ασφαλείας και άλλες απαραίτητες παραμέτρους. Αυτά τα δεδομένα κοινοποιούνται με ασφάλεια μεταξύ του παρόχου και του νέου κόμβου.



4. Διαμόρφωση: Ο νέος κόμβος λαμβάνει τα δεδομένα παροχής και διαμορφώνεται με βάση τις παρεχόμενες πληροφορίες. Αυτό περιλαμβάνει την εκχώρηση μιας μοναδικής διεύθυνσης, τη ρύθμιση των παραμέτρων δικτύου και τον καθορισμό παραμέτρων επικοινωνίας.
5. Ολοκλήρωση provisioning: Μόλις ο νέος κόμβος λάβει και εφαρμόσει με επιτυχία τα δεδομένα, η διαδικασία θεωρείται ολοκληρωμένη. Ο νέος κόμβος είναι πλέον ενεργός στο δίκτυο πλέγματος. Το provisioning είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη δημιουργία ενός δικτύου BLE Mesh, καθώς εξασφαλίζει ασφαλή και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων. Επιτρέπει τη δυναμική επέκταση του δικτύου mesh προσθέτοντας νέες συσκευές και τους δίνει τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν μηνύματα και να συμμετέχουν στις διαδικασίες δρομολόγησης και ελέγχου του δικτύου.

#### **4.5.3. Αξιολόγηση BLE Mesh δικτύου στο OmNET++**

Αυτή η ενότητα περιγράφει την εφαρμογή του BTMesh για τη συλλογή δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα κινητό κέντρο (Mobile-Hub). Η προσέγγιση χρησιμοποιεί την τυπική υλοποίηση BTM-R [26] μέσω απευθείας μηνυμάτων προς το Mobile-Hub. Στο περιγραφόμενο σενάριο υπάρχουν δύο τύποι πακέτων: Πακέτα Ανακάλυψης (Discovery Packets), που χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη διαδρομής, και Πακέτα Δεδομένων (Data Packets), που αποστέλλονται από τους κόμβους του δικτύου Mesh και περιέχουν δεδομένα από τους αισθητήρες που πρέπει να αναμεταδοθούν στο Mobile-Hub. Για τη συλλογή δεδομένων από το δίκτυο, το Mobile-Hub αποστέλλει περιοδικά πακέτα Ανακάλυψης (κάθε 1 δευτερόλεπτο). Τα πακέτα Δεδομένων δημιουργούνται μόνο από το διέρχον Mobile-Hub και ενδέχεται να αναμεταδοθούν από κόμβους αναμετάδοσης περαιτέρω στο δίκτυο. Το πακέτο Ανακάλυψης χρησιμοποιείται για να ειδοποιήσει τους κόμβους ότι υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προς λήψη, και αυτά τα πακέτα φτάνουν τελικά σε θέσεις του δικτύου. Αν φτάσουν, λαμβάνονται από έναν από τους κόμβους αναμετάδοσης του δικτύου, με τους περιορισμούς του αλγορίθμου προώθησης (π.χ. το BTM-R επιβάλλει ένα μέγιστο όριο μετάδοσης). Μόλις οποιοσδήποτε κόμβος λάβει ένα πακέτο ανακάλυψης, θα πρέπει να στείλει τα δεδομένα αισθητήρα του καθώς και τυχόν αποθηκευμένα δεδομένα αισθητήρα προς το Mobile-Hub. Το BTM-R καθορίζει ότι οι κόμβοι αναμετάδοσης λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό των άλματων που έχουν γίνει μέχρι τώρα και εάν το μήνυμα έχει ήδη αναμεταδοθεί, κατά την αξιολόγηση εάν πρέπει να γίνει επαναμετάδοση του μηνύματος.

#### 4.5.3.1. Btmesh Relay (BTM-R) — Flooding

Ο αλγόριθμος αναμετάδοσης του BTMesh (BTM-R) ακολουθεί μια ελεγχόμενη προσέγγιση πλημμύρας - flooding. Ο αλγόριθμος συνδυάζει δύο στρατηγικές για τη διαχείριση του flooding στο δίκτυο:

1. Περιορισμός του αριθμού των μεταπηδήσεων πακέτων σε 127. Αυτός ο περιορισμός αντιστοιχεί σε μία οκτάδα opcode, όπως ορίζεται από την προδιαγραφή του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται ο αριθμός των φορών που ένα πακέτο μπορεί να μεταδοθεί στο δίκτυο.
2. Αποφυγή της πολλαπλής αναμετάδοσης ενός πακέτου από τον ίδιο κόμβο. Με αυτήν τη στρατηγική, αποτρέπεται ο ίδιος κόμβος να μεταδώσει ξανά ένα πακέτο που έχει ήδη αναμεταδοθεί.

Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται οι περιττές αναμεταδόσεις και περιορίζεται η υπερβολική κυκλοφορία των πακέτων στο δίκτυο. Για την τελευταία στρατηγική, οι υλοποιήσεις υπολογίζουν τις υπογραφές των εισερχόμενων πακέτων και τις ελέγχουν σε μια κρυφή μνήμη με αλγόριθμο LRU (Least Recently Used). Αν η υπογραφή του πακέτου είναι ήδη παρούσα στη μνήμη, τότε το πακέτο δεν θα αναμεταδοθεί ξανά. Αν η υπογραφή δεν είναι παρούσα, τότε το πακέτο θα αναμεταδοθεί και η υπογραφή του θα αποθηκευτεί προσωρινά στη μνήμη. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα πακέτα που έχουν ήδη αναμεταδοθεί δεν θα μεταδοθούν ξανά, εξοικονομώντας πόρους και μειώνοντας την κυκλοφορία των πακέτων στο δίκτυο.

Δύο αξιοσημείωτα προβλήματα με αυτήν την προσέγγιση είναι:

1. Λόγω BTM-R, τα μηνύματα μπορεί να αναμεταδοθούν και να παραδοθούν πολλές φορές αφού αποστέλλονται σε κάθε δυνατή διαδρομή. Εάν προέρχονται πολλά δεδομένα από αισθητήρες, μπορεί να υπάρχει ανταγωνισμός πολλαπλές διαδρομές για την παράδοση.
2. Το όριο των 127 hop θα μπορούσε να είναι πρόβλημα ανάλογα με τη διάταξη/κατανομή της τοπολογίας των κόμβων, πιθανώς ορισμένοι κόμβοι να είναι απρόσιτοι σε άλλους.

### 4.5.3.2 Προσομοίωση

Οι προσομοιώσεις βασίζονται στο OMNET++ v6.0.1 και στο πλαίσιο INET. Το μοντέλο προσομοίωσης αυτής της εργασίας [27] έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. μέγιστη εμβέλεια μετάδοσης έχει διαμορφωθεί για 100 m
2. ρυθμός μετάδοσης 1 Mbps όπως ορίζεται στην προδιαγραφή BTMesh
3. οι κόμβοι μπορούν να διαμορφωθούν ως κόμβοι αναμετάδοσης, οι οποίοι χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο (που μπορεί να παρακαμφθεί)
4. οι κόμβοι μπορούν να διαμορφωθούν ως κόμβοι χαμηλής ισχύος
5. οι κόμβοι μπορούν να διαμορφωθούν ως Κόμβοι Φίλων – Friend Nodes οι οποίοι λαμβάνουν και αποθηκεύουν προσωρινά μηνύματα για τους καταχωρημένους κόμβους χαμηλής κατανάλωσης.
6. Ο αριθμός των κόμβων ανάλογα με το σενάριο ορίζεται σε 50, 100, 200.

Το radio module έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. sensitivity = -70dBm
2. energyDetection = -30 dBm
3. carrierFrequency = 2.4GHz
4. bandwidth = 2MHz
5. modulation = "BPSK"

Η κινητικότητα των κόμβων στο INET ορίζεται η CircleMobility [28] κυκλική ομαλή με εφαπτομενική ταχύτητα 2, 6, 14 m/s.

Τα μηνύματα BTMesh μπορούν να κατακερματιστούν χρησιμοποιώντας την Τμηματοποίηση του Bluetooth και μηχανισμός επανασυναρμολόγησης (SAR) και περιέχουν έως και 384 byte. Κάθε

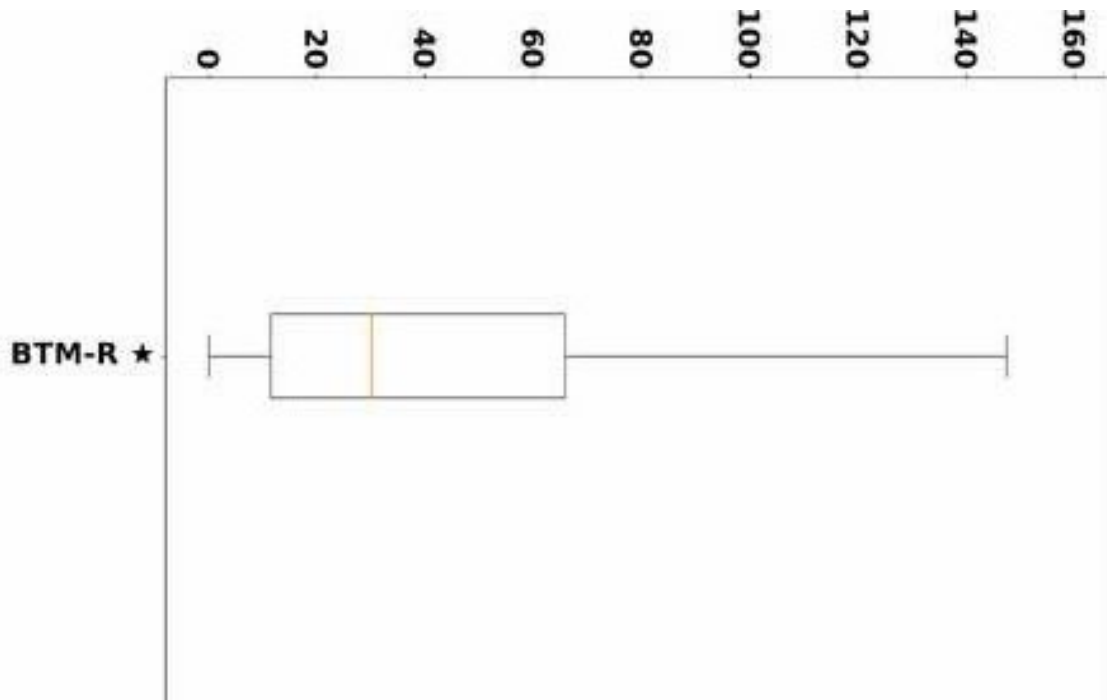
τιμήμα μπορεί να έχει μήκος 11 byte, όπου ως και 3 από τα αρχικά byte δεσμεύονται για τον κωδικό λειτουργίας. Οι λειτουργίες ασφάλειας και provisioning BTMesh δεν εφαρμόστηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης. Συλλέχθηκαν οι ακόλουθες μετρήσεις:

1. Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (ms): ο χρόνος που έχει παρέλθει σε χιλιοστά του δευτερολέπτου από το τη στιγμή που αποστέλλεται ένα πακέτο από την πηγή (κόμβος αισθητήρα) μέχρι τότε παραλαμβάνεται από το Mobile-Hub.
2. Ποσοστό παράδοσης (%): το ποσοστό παράδοσης όλων των δεδομένων που δημιουργούνται στο Mobile-Hub, δηλαδή τον αριθμό των με επιτυχία παραδοτέων πακέτα σε ένα Mobile-Hub ( $u$ ) διαιρούμενο με τον συνολικό αριθμό των απεσταλμένων πακέτων δεδομένων, πολλαπλασιαζόμενα επί 100
3. Mobile-Hub ληφθέντα πακέτα (bytes): η ποσότητα σε byte των πακέτων που συλλέγονται από το Mobile-Hub ( $a$ )
4. Κατανάλωση ενέργειας (Joules): η ποσότητα ενέργειας που αντλήθηκε από όλους τους κόμβους του δικτύου

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα πακέτα BLE που αναμεταδίδονται από κόμβους BTMesh μπορεί να χάνονται. Αυτό μπορεί να συμβεί κατά μήκος των εσωτερικών διαδρομών Mesh λόγω των πολλαπλών συσκευών που εκπέμπουν ταυτόχρονα, προκαλώντας συγκρούσεις πακέτων, όπως επίσης και λόγω των παρεμβολών που προκαλούνται από οποιεσδήποτε πηγές. Η απώλεια πακέτων μπορεί επίσης να συμβεί στο τελευταίο βήμα προς το Mobile-Hub, το οποίο μπορεί να απομακρύνεται από τον κόμβο Mesh από τον οποίο λάμβανε πακέτα αναμετάδοσης.

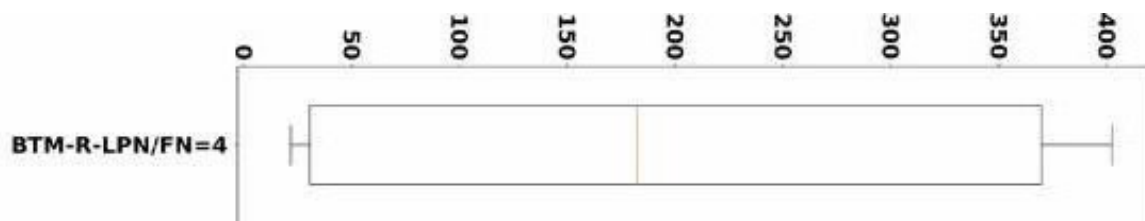
Τα advertising πακέτα BLE, ο τύπος πακέτου που χρησιμοποιεί η BTMesh, εφαρμόζει έναν απλό μηχανισμό αποφυγής σύγκρουσης. Αλλάζει τα advertising κανάλια διαδοχικά και έχει επίσης μια τυχαία καθυστέρηση μεταξύ 0 και 10 ms για διαδοχικές αποστολές στο ίδιο κανάλι, σύμφωνα με τις προδιαγραφές Bluetooth Core v5.0. Στο Bluetooth Core v5.1 η αποφυγή σύγκρουσης βελτιώνεται ελαφρώς επιτρέποντας τα κανάλια διαφήμισης να επιλέγονται τυχαία αντί διαδοχικά.

Η μέση καθυστέρηση end-to-end (από τη στιγμή που τα πακέτα δεδομένων στέλνονται από τον κόμβο πηγής μέχρι να φτάσουν στον Mobile-Hub) σε χιλιοστά του δευτερολέπτου ήταν 46 ms με το εύρος να φαίνεται στο παρακάτω γράφημα γραμμής.



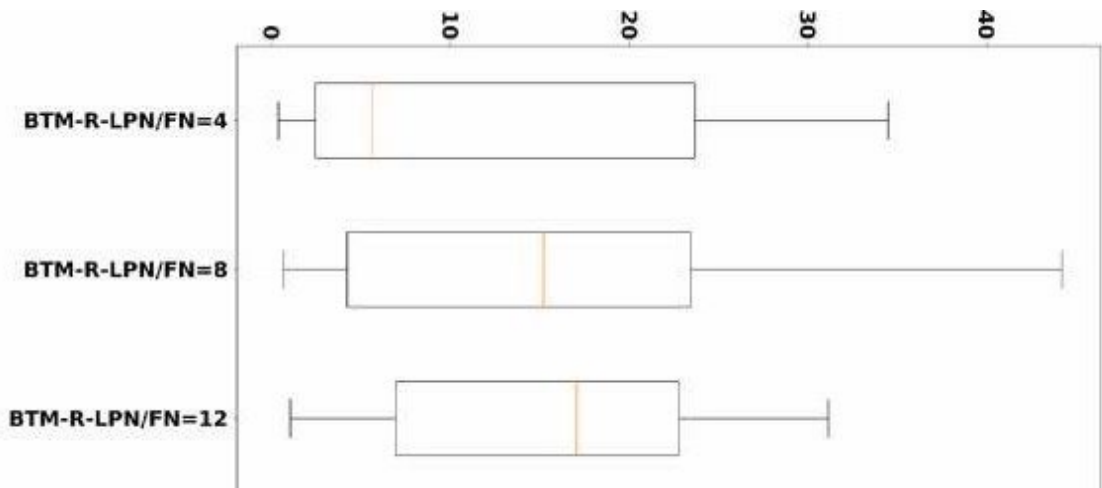
**ΣΧ. 4.5.3.1 END TO END DELAY** ΠΗΓΗ: "EXPLORING DATA COLLECTION ON BLUETOOTH MESH NETWORKS" MARCELO PAULON J.V., BRUNO JOSÉ OLIVIERI DE SOUZA, MARKUS ENDLER, AD HOC NETWORKS, VOLUME 130, 2022, 102809, ISSN 1570-8705

Όσον αφορά την καταναλισκόμενη ενέργεια με λόγο κόμβων χαμηλής ισχύος προς τον αριθμό των friend nodes να ισουται με 4 προέκυψε ότι η κατανάλωση ενέργειας για αυτή τη διαμόρφωση ήταν 182,31 J.



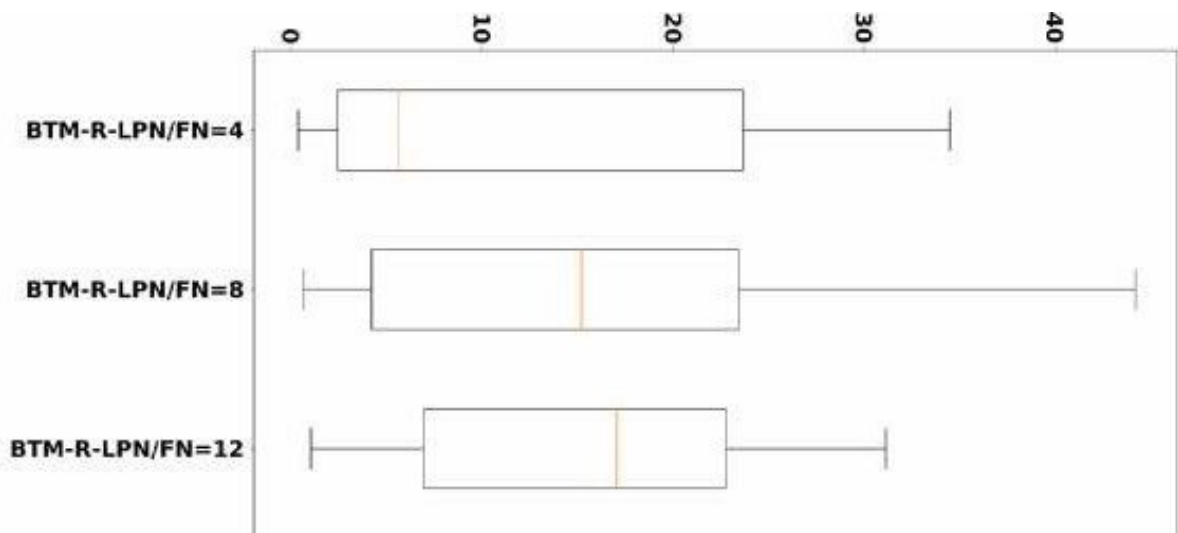
**ΣΧ. 4.5.3.2 ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ** ΠΗΓΗ: "EXPLORING DATA COLLECTION ON BLUETOOTH MESH NETWORKS" MARCELO PAULON J.V., BRUNO JOSÉ OLIVIERI DE SOUZA, MARKUS ENDLER, AD HOC NETWORKS, VOLUME 130, 2022, 102809, ISSN 1570-8705

Το BTM-R παρουσίασε μια μέση ποσοστιαία παράδοση της τάξης του 5,63% για LPN/FN αναλογία = 4, 15,20% για LPN/FN αναλογία = 8 και 17,06% για LPN/FN αναλογία = 12.



**ΣΧ. 4.5.3.3 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗ** ΠΗΓΗ: "EXPLORING DATA COLLECTION ON BLUETOOTH MESH NETWORKS" MARCELO PAULON J.V., BRUNO JOSÉ OLIVIERI DE SOUZA, MARKUS ENDLER, AD HOC NETWORKS, VOLUME 130, 2022, 102809, ISSN 1570-8705

Η Ενεργειακή Αποδοτικότητα σε Bytes ανά Joule (B/J), προκύπτει από τη διαίρεση των δεδομένων που λήφθηκαν (σε Bytes) με την Ενεργειακή Κατανάλωση (σε Joules). Η μέση ενεργειακή αποδοτικότητα του BTM-R ήταν 181,74 B/J για LPN/FN αναλογία = 4, 213,66 B/J για LPN/FN αναλογία = 8 και 253,18 B/J για LPN/FN αναλογία = 12.



**ΣΧ. 4.5.3.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ** ΠΗΓΗ: "EXPLORING DATA COLLECTION ON BLUETOOTH MESH NETWORKS" MARCELO PAULON J.V., BRUNO JOSÉ OLIVIERI DE SOUZA, MARKUS ENDLER, AD HOC NETWORKS, VOLUME 130, 2022, 102809, ISSN 1570-8705

## Επίλογος

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο OMNET++ παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση ενός δικτύου Bluetooth χαμηλής ενέργειας (BLE). Επιτρέπει την εξέταση διαφόρων μετρήσεων όπως η απόδοση, η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων και η κατανάλωση ενέργειας, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου. Με το χειρισμό διαφορετικών παραμέτρων δικτύου, όπως η ισχύς μετάδοσης, το μέγεθος του πακέτου και ο ρυθμός δεδομένων, είναι δυνατό να διερευνηθεί ο αντίκτυπός τους στη συνολική απόδοση του δικτύου BLE. Η ανάλυση αποκαλύπτει τη σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων και της απόδοσης του δικτύου, παρέχοντας κατευθυντήριες γραμμές για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της διαμόρφωσης του δικτύου. Η ανάλυση του δικτύου BLE στο OMNET++ επιτρέπει την αξιολόγηση της επεκτασιμότητας και της αποτελεσματικότητας των τεχνικών διαχείρισης συμφόρησης. Με την προσομοίωση σεναρίων με ποικίλους αριθμούς συσκευών και φορτίων κυκλοφορίας, η μελέτη μπορεί να εντοπίσει σημεία συμφόρησης και πιθανές λύσεις για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου ακόμη και σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Αναλύοντας τις αλληλεπιδράσεις πρωτοκόλλου και τις ανταλλαγές μηνυμάτων, η μελέτη ρίχνει φως σε πιθανές ευκαιρίες βελτιστοποίησης για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του δικτύου.

Αναφορικά με τα VLC, με την αξιολόγηση μετρήσεων όπως η απόδοση, η καθυστέρηση, η ποιότητα του σήματος και η κατανάλωση ενέργειας, η μελέτη επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της απόδοσης του δικτύου και της καταλληλότητάς του για διάφορες εφαρμογές. Εξετάστηκε η επίδραση των παραμέτρων δικτύου όπως η ισχύς πομπού, η ευαισθησία του δέκτη, τα σχήματα διαμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά καναλιού, και ο αντίκτυπός τους στη συνολική απόδοση του δικτύου Li-Fi. Αξιολογήθηκε η ικανότητα του δικτύου να διατηρεί συνδεσιμότητα και να παρέχει απρόσκοπτη μεταφορά όταν οι χρήστες μετακινούνται εντός της περιοχής κάλυψης ή μεταβαίνουν μεταξύ διαφορετικών σημείων πρόσβασης. Η ανάλυση στο OMNET++ μπορεί να διερευνήσει τη συνύπαρξη του Li-Fi με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, όπως το BLE Mesh ή τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αξιολογώντας σενάρια παρεμβολών, στρατηγικές κατανομής φάσματος και απόδοση δικτύου υπό συνύπαρξη, η μελέτη μπορεί να παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για την ανάπτυξη του Li-Fi στο υβριδικό ασύρματο περιβάλλον του BLE.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] G. R. R. E. M. J. C. J. Mendes TDP, "Smart Home Communication Technologies and Applications: Wireless Protocol Assessment for Home Area Network Resources," *Energies*, no. <https://doi.org/10.3390/en8077279>, pp. 7279-7311, 2015.
- [2] S. Schneider, *THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS (IIoT)*, WILEY, 2017.
- [3] D. D. L. S. Y. Z. X. P. C. a. B. W. G. R. Hiertz, "The IEEE 802.11 universe," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, pp. 62-70, 2010.
- [4] A. C. Davies, "An overview of Bluetooth Wireless Technology/sup TM/ and some competing LAN standards," *1st IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. Proceedings*, pp. 206-211, 2002.
- [5] S. S. a. K. Malaric, "ZigBee wireless standard," *Proceedings ELMAR 2006*, pp. 259-262, 2006.
- [6] Z. T. a. J. L. I. Unwala, "Thread: An IoT Protocol," *2018 IEEE Green Technologies Conference*, pp. 161-167, 2018.
- [7] M. Rahnema, "Overview of the GSM system and protocol architecture," *IEEE Communications Magazine*, vol. 31, pp. 92-100, *IEEE Communications Magazine*.
- [8] W. C. Y. Lee, "Overview of cellular CDMA," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, pp. 291-302, 1991.
- [9] E. D. A. F. Y. J. M. L. a. S. P. D. Astely, "LTE: the evolution of mobile broadband," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 44-51, 2009.
- [10] B. A. K. F. S. S. Q. a. M. M. K. Shafique, "Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022-23040, 2020.
- [11] M. L. a. T. M. W. E. Mackensen, "Bluetooth Low Energy (BLE) based wireless sensors," *SENSORS, 2012 IEEE*, pp. 1-4, 2012.
- [12] G. C. Darroudi SM, "Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey," *Sensors*, 2017.



- [13] N. S. D. T. S. V. a. H. H. H. Burchardt, "VLC: Beyond point-to-point communication," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, pp. 98-105, 2014.
- [14] J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, pp. 189-204, 2009.
- [15] M. S. D.-s. S. P. J. S. a. A. N. D. Gesbert, "From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, pp. 281-302, 2003.
- [16] H. a. K. J. Sasabe, "Development of high performance OLEDs for general lighting," *J. Mater. Chem. C*, vol. 1, no. 9, pp. 1699-1707, 2013.
- [17] J. C. C. e. al., "Recent advances in avalanche photodiodes," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, pp. 777-787, 2004.
- [18] O. T. .. -C. C. L.-K. D. P.-K. W. K.-H. H. a. F.-. W. J. Wei-Jean Liu, "A CMOS photodiode model," *Proceedings of the Fifth IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation*, Vols. 102-105, pp. 102-105, 2001 .
- [19] A. T. a. M. Boukadoum, "Comparison of Two CMOS Front-End Transimpedance Amplifiers for Optical Biosensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 657-663.
- [20] A. S. a. H. Haas, "Performance evaluation of space modulation techniques in VLC systems," *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop*, pp. 1356-1361, 2015.
- [21] N. A. T. A. W. A. C. a. Y. -H. C. A. Pradana, "VLC physical layer design based on Pulse Position Modulation (PPM) for stable illumination," *2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, pp. 368-373, 2015.
- [22] P. Shams, "MAC layer performance of the IEEE 802.15.7 visible light communication standard," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 27, no. 2016, pp. 2161-3915, 2016.
- [23] A. V. e. al, "The OMNeT++ discrete event simulation system," *Proceedings of the European simulation multiconference*, vol. 9, p. 65, 2001.
- [24] K. H. a. H. B. D. Pfefferkorn, "Performance estimation of indoor optical wireless communication systems using

OMNeT++," *2017 IEEE 22nd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks*, pp. 1-5, 2017.

- [25] M. S. K. H. L. S. V. A. Köpke, "Simulating Wireless and Mobile Networks in OMNeT++," *Proc. Intl. Workshop on OMNeT++ (co-located with SIMUTools '08)*, 2008.
- [26] B. J. O. d. S. M. E. Marcelo Paulon J.V., "Exploring data collection on Bluetooth Mesh networks," *Ad Hoc Networks*, 2022.
- [27] A. D. a. J. K. L. Kajdocsi, "Development of Bluetooth Mesh Core Stack using OmNET++," *2019 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, pp. 23-28, 2019.
- [28] A. Varga, "CircleMobility - INET framework," 2020. [Online]. Available: <https://doc.omnetpp.org/inet/api-current/neddoc/inet.mobility.single.CircleMobility.html>.
- [29] L. De Silva, C. Morikawa and I. Petra, "State of the art of smart homes," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, p. 1313-1321, 2012.
- [30] V. S. L. K. J. S. S. S. P. P. L. F. D. Q. G. N. C. O. C. A. A. A. C. E. S. W. B. Q. R. C.-M. S. Aleksandr Ometov, "A Survey on Wearable Technology: History, State-of-the-Art and Current Challenges," *Computer Networks*, vol. 193, 2021.
- [31] Y. S. a. C. S. J. Lee, "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 46-51, 2007.
- [32] S. S. a. T. Bacchillone, "Network architecture, security issues, and hardware implementation of a home area network for smart grid," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2012, pp. 1-19, 2012.
- [33] S. J. A. P. I. G. B. S. a. A. K. S. P. Godha, "Architecture, an Efficient Routing," in *International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS)*, 2019.
- [34] J. D. T. K. a. G. B. G. Coulouris, *Distributed Systems: Concepts and Design*, Addison Wesley, 2011.

