



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών Ασφάλειας Φυσικού Στρώματος (Physical Layer Security) με Μηχανική και Βαθιά Μάθηση (Machine/Deep Learning – ML/DL) σε ad-hoc Δίκτυα Επόμενης Γενιάς (Beyond 5G)

Μαρία-Λαμπρινή Α. Μπαρτσιώκα

Επιβλέπουσα: Δήμητρα-Θεοδώρα Ι. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών Ασφάλειας Φυσικού Στρώματος (Physical Layer Security) με Μηχανική και Βαθιά Μάθηση (Machine/Deep Learning – ML/DL) σε ad-hoc Δίκτυα Επόμενης Γενιάς (Beyond 5G)

Μαρία-Λαμπρινή Α. Μπαρτσιώκα

Επιβλέπουσα: Δήμητρα-Θεοδώρα Ι. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Σεπτεμβρίου 2024

Κακλαμάνη Ι. Δήμητρα-Θεοδώρα
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Βενιέρης Στ. Ιάκωβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βαρβαρίγος Εμμανουήλ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

.....
Μαρία-Λαμπρινή Α. Μπαρτσιώκα
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρία-Λαμπρινή Α. Μπαρτσιώκα, 2024.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη και ανάπτυξη τεχνικών ασφάλειας φυσικού στρώματος (Physical Layer Security - PLS) σε δίκτυα Beyond 5G, αξιοποιώντας μεθόδους μηχανικής και βαθιάς μάθησης. Ο πρωταρχικός στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς όσον αφορά την ασφάλεια, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα ad-hoc, και η προσομοίωση προηγμένων τεχνικών PLS με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής και βαθιάς μάθησης.

Το θεωρητικό υπόβαθρο περιλαμβάνει την εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών, την ανάλυση των ασύρματων καναλιών και των τεχνικών διαμόρφωσης και πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης και τις τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών. Στη συνέχεια, γίνεται μια εκτενής αναφορά στις αρχές λειτουργίας των κυψελωτών συστημάτων εν γένει, αλλά και στις υφιστάμενες τεχνικές ασφάλειας φυσικού στρώματος που εφαρμόζονται πιλοτικά ή κανονικά στις ασύρματες ζεύξεις.

Η κεντρική ιδέα της μελέτης είναι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης, και συγκεκριμένα μηχανικής και βαθιάς μάθησης, για την ενίσχυση της ασφάλειας στα ασύρματα δίκτυα. Αντί να χρησιμοποιούνται παραδοσιακές τεχνικές κρυπτογράφησης, οι οποίες αφορούν κυρίως το επίπεδο του λογισμικού, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση των τεχνικών ασφάλειας στο φυσικό επίπεδο της επικοινωνίας. Υπό αυτό το πρίσμα, το πειραματικό σκέλος αφορά την προσομοίωση ενός σεναρίου B5G δικτύου, στο οποίο δοκιμάζονται διάφοροι αλγόριθμοι μηχανικής και βαθιάς μάθησης. Αναπτύσσονται μοντέλα, όπως Random Forests (RF), Support Vector Machines (SVM), Deep Convolutional Neural Networks (DCNN) και Long Short-Term Memory (LSTM), με στόχο την πρόβλεψη πιθανών ωτακουστών.

Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι οι αλγόριθμοι μηχανικής και βαθιάς μάθησης μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Η συγκριτική ανάλυση των αλγορίθμων αποδεικνύει ότι τα μοντέλα βαθιάς μάθησης επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα απόκρισης, καθιστώντας τα πιο κατάλληλα για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων ασφάλειας.

Εν κατακλείδι, η διπλωματική εργασία αναδεικνύει και συνεισφέρει στη σημασία της ενσωμάτωσης τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στα δίκτυα επόμενης γενιάς, για τη διασφάλιση της ασφάλειας του φυσικού στρώματος και την αντιμετώπιση των απειλών σε ad-hoc δίκτυα.

Λέξεις Κλειδιά: Κυψελωτές Ασύρματες Επικοινωνίες, ad-hoc Δίκτυα, 5G, Beyond 5G, OFDM, Ασφάλεια Φυσικού Στρώματος, Μηχανική Μάθηση, Βαθιά Μάθηση, DCNN, LSTM, SVM, RF

Abstract

This thesis focuses on the study and development of Physical Layer Security (PLS) techniques in Beyond 5G networks, leveraging machine and deep learning methods. The primary goal of the work is to analyze the challenges faced by next-generation wireless networks in terms of security, especially in ad-hoc environments, and to simulate advanced PLS techniques using machine and deep learning algorithms.

The theoretical background includes the evolution of mobile communications, an analysis of wireless channels, modulation techniques, and multiple access methods, as well as multi-antenna technologies. Afterwards, the thesis provides an in-depth discussion of the operational principles of cellular systems in general, along with existing PLS techniques that are applied either in pilot programs or actual wireless links.

The central concept of the study is the use of artificial intelligence, and especially machine learning and deep learning, to enhance security in wireless networks. Instead of using traditional encryption techniques, which are primarily software-based, this work focuses on integrating security measures at the physical layer of communication. In this context, the experimental part of the research involves the simulation of a B5G network scenario, in which various machine and deep learning algorithms are tested. Models such as Random Forests (RF), Support Vector Machines (SVM), Deep Convolutional Neural Networks (DCNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) are developed, aiming to predict potential eavesdroppers.

The study's findings demonstrate that deep learning algorithms can offer significant advantages over traditional methods. Comparative analysis of the algorithms shows that deep learning models achieve higher accuracy and faster response times, making them more suitable for addressing modern security challenges.

In conclusion, this thesis highlights and contributes to the importance of integrating artificial intelligence technologies into next-generation networks to ensure physical layer security and to tackle threats in ad-hoc networks.

Key Words: Cellular Wireless Communications, ad-hoc Networks, 5G, Beyond 5G, OFDM, Physical Layer Security, Machine Learning, Deep Learning, DCNN, LSTM, SVM, RF

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024 στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Την επίβλεψη της εργασίας κατείχε η Καθηγήτρια κα Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη, προς την οποία θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για την ευκαιρία που μου προσέφερε και την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε να εντρυφήσω σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές της όποτε χρειάστηκε. Ευχαριστώ θερμά, επίσης, τους Καθηγητές κ. Ιάκωβο Βενιέρη και κ. Εμμανουήλ Βαρβαρίγο για τις εύστοχες επισημάνσεις τους και τις σημαντικές γνώσεις που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ειδικές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον Μεταδιδακτορικό Ερευνητή Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών, Δρ. Ιωάννη Μπαρτσιώκα για την εποικοδομητική βοήθεια και την αμέριστη και πρόθυμη αρωγή του σε κάθε στάδιο της εκπόνησης, καθώς η συμβολή του ήταν καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή υλοποίηση της εργασίας.

Φυσικά, δεν μπορώ να παραλείψω τις εγκάρδιες και αναρίθμητες ευχαριστίες μου προς την οικογένεια μου, που με την πίστη τους στις δυνατότητες μου και την συνεχή τους συμπαράσταση αποτέλεσαν έρεισμα για την εκπλήρωση των στόχων μου, αλλά και προς τους φίλους και τα αγαπημένα μου πρόσωπα, που άμεσα ή έμμεσα, συνέβαλλαν στην περάτωση του παρόντος πονήματος και στην απόκτηση του διπλώματός μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	8
Ευχαριστίες	10
1. Πρόλογος.....	16
1.1. Σκοπός	16
1.2. Διάρθρωση Εργασίας.....	16
2. Εξέλιξη Κινητών Επικοινωνιών	18
2.1 Δίκτυα 0G έως 3G	19
2.2 Δίκτυα 4G	20
2.3 Δίκτυα 5G	22
2.4 Δίκτυα 6G – 7G	24
2.5 Ad hoc Networks	26
3. Ασύρματο Κανάλι – Μετάδοση – Τεχνικές Φυσικού Στρώματος.....	28
3.1 Βασικές Αρχές Ασύρματων Ζεύξεων.....	28
3.2 Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης.....	31
3.3.6 Διαμόρφωση Πλάτους MPAM.....	33
3.2.2 Διαμόρφωση Φάσης MPSK.....	33
3.2.3 Διαμόρφωση Πλάτους-Φάσης MQAM.....	34
3.2.4 Διαμόρφωση Πλάτους-Φάσης MAPSK	35
3.2.5 Διαμόρφωση Συχνότητας MFSK	35
3.2.6 Διαμόρφωση Συχνότητας CPFSK	35
3.3 Σχήματα Πολλαπλής Πρόσβασης.....	36
3.3.1 Τεχνική FDMA	36
3.3.2 Τεχνική TDMA	37
3.3.3 Τεχνική CDMA	37
3.3.4 Τεχνική SDMA	38
3.3.5 Διαμόρφωση OFDM και Πολλαπλή Πρόσβαση OFDMA	39
3.3.6 Τεχνική NOMA.....	41
3.4 Θόρυβος.....	42
3.5 Απώλειες Διάδοσης.....	43
3.6 Ασφάλεια Φυσικού Στρώματος.....	45
4. Κυψελωτά Συστήματα Πολλαπλών Κεραιών	48
4.1 Κυψελωτή Δομή και Βασικές Σχέσεις.....	48
4.2 Ραδιοκάλυψη.....	50
4.3 Παρεμβολές στα Ασύρματα Κυψελωτά Συστήματα.....	51
4.4 Νέες τεχνολογίες Φυσικού στρώματος στα Κυψελωτά συστήματα.....	53

4.4.1 Τεχνολογία Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου (MIMO).....	53
4.4.2 Multi-User και Massive MIMO.....	56
4.4.3 Cell-Free Massive MIMO	59
4.4.4 RIS.....	60
5. Αρχές Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης για δίκτυα 5G και B5G.....	62
5.1 Είδη Μάθησης.....	62
5.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης στα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς.....	64
5.3 Βαθιά Μάθηση	66
6. Προσομοίωση Πραγματικού Σεναρίου B5G και Ανάπτυξη Προηγμένων Τεχνικών PLS.....	69
6.1 Επισκόπηση Βασικών Παραμέτρων Συστήματος	70
6.2 Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου Συστήματος.....	72
6.3 Περιγραφή Σεναρίου - Μοντελοποίηση Συστήματος	73
6.4 Δημιουργία Συνόλου Δεδομένων.....	75
6.5 Μοντέλα Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης.....	77
7. Αποτελέσματα και συγκριτική αξιολόγηση.....	85
7.1 Διαγραμματική Απεικόνιση και Ανάλυση	86
8. Επίλογος.....	95
8.1 Συμπεράσματα	95
8.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας	96
Βιβλιογραφία	98

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Η εξέλιξη των ασύρματων κινητών επικοινωνιών	18
Εικόνα 2.2 Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 4G.....	20
Εικόνα 2.3 Απαιτήσεις απόδοσης και σενάρια χρήσης 5G	22
Εικόνα 2.4 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύων 6G	24
Εικόνα 2.5 Περιπτώσεις χρήσης εναέριων ad hoc δικτύων.....	26
Εικόνα 3.1 Λειτουργικό Διάγραμμα Ασύρματης Ζεύξης.....	29
Εικόνα 3.2 Αστερισμοί M-PAM.....	32
Εικόνα 3.3 Αστερισμοί M-PSK.....	33
Εικόνα 3.4 Αστερισμοί M-QAM.....	33
Εικόνα 3.5 Συγκριτική απεικόνιση σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης	37
Εικόνα 3.6 Παράλληλο, ορθογωνικό σύστημα μετάδοσης	39
Εικόνα 3.7 Σύγκριση τεχνικών OFDM και OFDMA	40
Εικόνα 3.8 Εξάρτηση των απωλειών από το μήκος ζεύξης	44
Εικόνα 3.9 Ασφάλεια Φυσικού Στρώματος μέσω Deep Learning σε δίκτυα B5G	46
Εικόνα 4.1 Κυψελωτό εξαγωνικό σύστημα σε δύο διαστάσεις.....	48
Εικόνα 4.2 Block Διάγραμμα για MxN MIMO κανάλι.....	53
Εικόνα 4.3 Block Διάγραμμα και βασικά σημεία χωρικής πολυπλεξίας MIMO	54
Εικόνα 4.4 Λειτουργία mMIMO για uplink και downlink.....	57
Εικόνα 4.5 Σύγκριση κατανομημένου και cell-free mMIMO	58
Εικόνα 4.6 Υποβοηθούμενη από RIS ασύρματη επικοινωνία 6G.....	60
Εικόνα 5.1 Είδη μηχανικής μάθησης.....	63
Εικόνα 6.1 Block Διάγραμμα εργαστηριακού μέρους	69
Εικόνα 6.2 Τοπολογία ad-hoc δικτύου	73
Εικόνα 6.3 Παράδειγμα CSI εικόνας του συνόλου δεδομένων	75
Εικόνα 6.4 Αρχιτεκτονική μοντέλου RF	77
Εικόνα 6.5 Σύγκριση αρχιτεκτονικής μοντέλων DCNN	81
Εικόνα 6.6 Αρχιτεκτονική μοντέλου LSTM	83
Εικόνα 7.1 Σύγκριση SVM και RF.....	85
Εικόνα 7.2 Σύγκριση DCNN 1, DCNN 2 και LSTM.....	86
Εικόνα 7.3 Πίνακας σύγκρισης για όλα τα μοντέλα.....	88
Εικόνα 7.4 Καμπύλη ROC	89
Εικόνα 7.5 Σύγκριση SVM και RF με πλήρες σύνολο δεδομένων	89
Εικόνα 7.6 Σύγκριση DCNN 1, DCNN 2 και LSTM με πλήρες σύνολο δεδομένων.....	90
Εικόνα 7.7 Πίνακας σύγκρισης για όλα τα μοντέλα με πλήρες σύνολο δεδομένων.....	92
Εικόνα 7.8 Καμπύλη ROC με πλήρες σύνολο δεδομένων	93
Εικόνα 7.9 Χρόνος εκπαίδευσης των διάφορων μοντέλων ML/DL.....	93

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Ελάχιστες απαιτήσεις τεχνικής απόδοσης σύμφωνα με το IMT-2020	22
Πίνακας 3.1 Ζώνες Συχνοτήτων.....	28
Πίνακας 3.2: Ζώνες μικροκυματικών συχνοτήτων	28
Πίνακας 3.3: Πιθανότητες λάθους των σχημάτων ψηφιακής διαμόρφωσης	35
Πίνακας 3.4: Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών	42
Πίνακας 4.1: Χωρητικότητες για διάφορα συστήματα MIMO.....	55
Πίνακας 4.2: Σύγκριση συγκεντρωτικού, κατανεμημένου και cell-free mMIMO.....	59
Πίνακας 6.1: Βασικές παράμετροι σεναρίου προσομοίωσης.....	71
Πίνακας 6.2: Βασικές παράμετροι μετάδοσης.....	74
Πίνακας 6.3: Παράδειγμα μέρους του ue_data.xlsx του συνόλου δεδομένων.....	75
Πίνακας 7.1: Ακρίβεια, Ανάκληση και F1-Score για όλα τα μοντέλα.....	86
Πίνακας 7.2: Ακρίβεια, Ανάκληση και F1-Score για όλα τα μοντέλα με πλήρες σύνολο δεδομένων.....	91

1. Πρόλογος

1.1. Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης μπορεί να διαρθρωθεί σε τέσσερα επίπεδα:

- i. Ενδελεχής αναζήτηση και ανάλυση του θεωρητικού υπόβαθρου και της έως τώρα βιβλιογραφίας σχετικά με τα κυψελωτά συστήματα επόμενης γενιάς (Beyond 5G – B5G), τα αδόμητα δίκτυα διασυνδεδεμένων συσκευών (ad-hoc networks) και την συνύπαρξή τους.
- ii. Παρουσίαση και κατανόηση της ευαισθησίας των ασύρματων συστημάτων B5G, και ιδίως των ad-hoc δικτύων, σε επιθέσεις από παρεμβολείς, καθώς και των τεχνικών ασφάλειας φυσικού στρώματος (Physical Layer Security – PLS) που καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις.
- iii. Δημιουργία και προσομοίωση ενός υπολογιστικού πραγματικού σεναρίου ad-hoc συστήματος B5G.
- iv. Μελέτη και αξιοποίηση αλγορίθμων μηχανικής (Machine Learning – ML) και βαθιάς (Deep Learning – DL) μάθησης για την ανάπτυξη προηγμένων σχημάτων PLS στην ως άνωθι υποδομή B5G.

1.2. Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται με τρόπο που οδηγεί τον αναγνώστη ομαλά και διεξοδικά στην κατανόηση των ανωτέρω αναφερόμενων στόχων. Η δομή είναι τέτοια ώστε να συνδέει αβίαστα το θεωρητικό υπόβαθρο και την ποιοτική ανάλυση των τηλεπικοινωνιών με την πρακτική τους εφαρμογή. Συνοπτικά, τα θέματα που εξετάζονται ανά κεφάλαιο, τόσο για το θεωρητικό όσο και για το εργαστηριακό μέρος, είναι:

Κεφάλαιο 2^ο: Διαχρονική εξέλιξη των κινητών - κυψελωτών δικτύων, από 0G έως 7G, με βάση τις προκλήσεις και τις αντίστοιχες λύσεις που τα συνοδεύουν, τα πρότυπα που τα επικυρώνουν καθώς και τις μελλοντικές τάσεις.

Κεφάλαιο 3^ο: Παρουσιάζει τις βασικές αρχές για την σχεδίαση ασύρματων συστημάτων τα οποία εξυπηρετούν το trade-off ποιότητας και αξιοπιστίας. Αναλύει τις τεχνικές μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα, τις μεθόδους διαμόρφωσης και τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης. Αναφέρεται, επίσης, στη σημασία της ασφάλειας στο φυσικό στρώμα και τις σύγχρονες προκλήσεις που αντιμετωπίζει.

Κεφάλαιο 4^ο: Αναλυτική θεωρητική και μαθηματική περιγραφή των τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών (Multiple Input Multiple Output – MIMO, massive MIMO) και αναφορά στα νέα μοντέλα δικτύων, όπως τα cell-free και τα συστήματα RIS.

Κεφάλαιο 5^ο: Γενική επισκόπηση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης με έμφαση στους αλγόριθμους που εφαρμόζονται στα δίκτυα 5^{ης} και 6^{ης} γενιάς.

Κεφάλαιο 6°: Περιγράφει την προσομοίωση ενός πραγματικού σεναρίου δικτύου B5G, καθώς και την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών ασφάλειας με χρήση μηχανικής και βαθιάς μάθησης.

Κεφάλαιο 7°: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των αναπτυγμένων μοντέλων, ενώ πραγματοποιείται και συγκριτική αξιολόγηση των επιδόσεών τους.

Κεφάλαιο 8°: Συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης και προτείνει δυνατότητες βελτίωσης και μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας.

2. Εξέλιξη Κινητών Επικοινωνιών

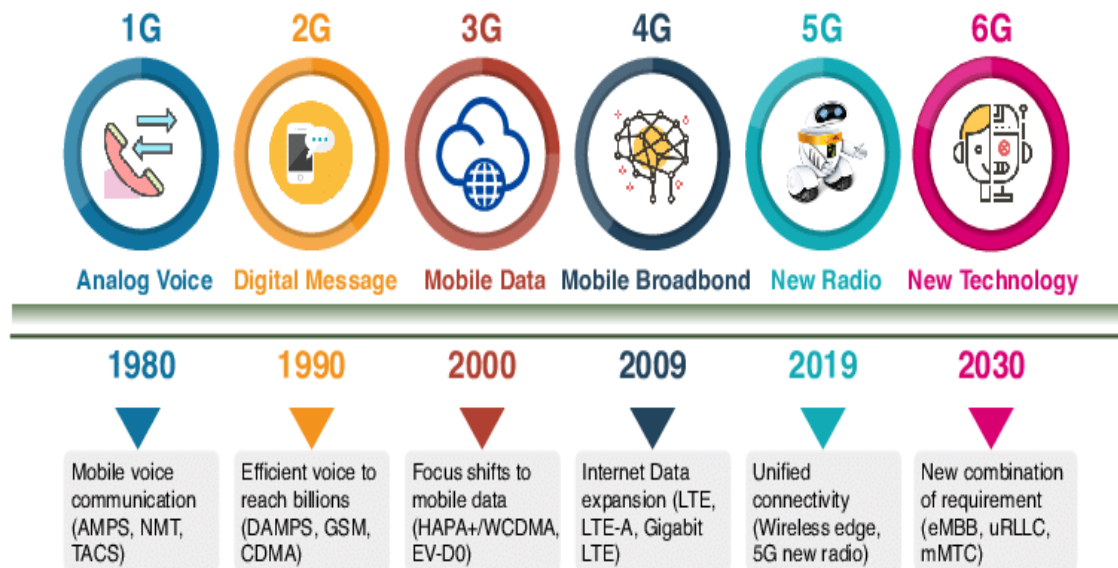
Ο άνθρωπος αποτελεί ένα φύσει επικοινωνιακό ον που από την απαρχή της εμφάνισης και δραστηριότητάς του αναζητά συνεχώς τρόπους για ανταλλαγή πληροφοριών και μηνυμάτων. Άλλωστε η επικοινωνία είναι θεμελιώδης προϋπόθεση της κοινωνικής συμβίωσης, της συνεργασίας, της δημιουργικότητας και της επιχειρηματικότητας των ανθρώπων και για το λόγο αυτό καθορίζει τον ρυθμό των πολιτισμικών εξελίξεων και την πορεία της γνώσης. Τα πρώτα εγχειρήματα για επικοινωνία ξεκίνησαν ήδη από τα αρχαία χρόνια με τα σήματα καπνού και τα ταχυδρομικά περιστέρια. Μετά από διάφορες τέτοιες εφευρέσεις ανά τον κόσμο, ήρθαν τον 19^ο αιώνα τα πρώτα επιστημονικά ευρήματα σχετικά με τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών, όταν ο Maxwell διατύπωσε τους νόμους της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας. Ακολουθεί το 1876 η μεταφορά του ήχου από το πρώτο τηλέφωνο του Graham Bell, η οποία έμελλε να εκμηδενίσει τις αποστάσεις και να αλλάξει την οικονομία, τις κοινωνικές σχέσεις, και τις πολεμικές αναμετρήσεις. Περίπου 20 χρόνια αργότερα λαμβάνει χώρα και η πρωταρχική εμφάνιση των ασύρματων επικοινωνιών, όταν ο Marconi επιτυγχάνει την αποστολή αρχικά σημάτων Mors και μετέπειτα του πρώτου μηνύματος πάνω από τον Ατλαντικό [1],[2].

Η ασύρματη επικοινωνία ορίζεται ως η ανταλλαγή πληροφοριών χωρίς τη χρήση καλωδίων, με κύριο μέσο μετάδοσης το κενό (αέρας). Σταδιακά οι ασύρματες επικοινωνίες οργανώθηκαν σε δίκτυα και συστήματα και εξελίχθηκαν σε ακρογωνιαίο λίθο του σύγχρονου πολιτισμού. Χρησιμοποιούν πεπερασμένους πόρους, συγκεκριμένα φάσματα ραδιοσυχνοτήτων, και ενσωματώνουν πληθώρα συμπληρωματικών τεχνολογιών. Η επόμενη σημαντική περίοδος υπάγεται στην ομπρέλα των ασύρματων επικοινωνιών και αφορά τις κινητές επικοινωνίες, οι οποίες βασίζονται στην έννοια των κυψελωτών συστημάτων. Το πρώτο εμπορικό αυτοματοποιημένο κυψελωτό δίκτυο κυκλοφόρησε στην Ιαπωνία το 1979 [3]. Τα ασύρματα συστήματα για κινητές και προσωπικές επικοινωνίες οργανώνονται σε τρεις περιοχές εφαρμογής. Η πρώτη είναι η ασύρματη πρόσβαση σε μεγάλα δίκτυα που υλοποιεί προσωπικές επικοινωνίες με περιορισμένες απαιτήσεις σε κινητικότητα. Για μεγαλύτερες απαιτήσεις κινητικότητας υφίστανται τα κυψελωτά συστήματα και τέλος, εγκαθιδρύονται και ασύρματα τοπικά δίκτυα, δηλαδή μικρές εσωτερικές ή εξωτερικές περιοχές κάλυψης [4].

Η νέα ασύρματη επανάσταση σηματοδοτείται από την εμφάνιση των ευρυζωνικών δικτύων (Broadband Wireless Access - BWA) λίγο μετά τη δεκαετία του '90, που ήρθε ως απάντηση στις ολοένα και αυξανόμενες συνδεδεμένες συσκευές αλλά και απαιτήσεις υπηρεσιών από τους χρήστες. Ο όρος BWA σχετίζεται πλέον με όλες τις πιθανές κλίμακες ραδιοκάλυψης, προσωπικά, τοπικά μητροπολιτικά και περιφερειακά δίκτυα. Εμπορικά θεμελιώθηκαν όλα από τη σειρά προτύπων 802 του διεθνή οργανισμού της IEEE [5].

Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα κινητής ασύρματης επικοινωνίας, με τα οποία ασχολείται το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας, έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές. Το Mobile Wireless Generation (G) προτείνει την προσαρμογή στις έννοιες του πλαισίου, της ταχύτητας, της τεχνολογίας, της συχνότητας, της χωρητικότητας δεδομένων, της καθυστέρησης κ.λπ. Κάθε γενιά έχει ορισμένα πρότυπα, διαφορετικές ικανότητες, νέες τεχνικές και νέα χαρακτηριστικά που την ξεχωρίζουν και την εξελίσσουν από τις προηγούμενες [6].

Στην παρούσα ενότητα, στόχος είναι η παρουσίαση των βασικών στοιχείων των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών κάνοντας μία ιστορική αναδρομή σε αυτά που σχεδιάστηκαν, εφαρμόστηκαν και αποτέλεσαν σταθμούς κατά την ανάπτυξη των ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Μεγαλύτερη έμφαση θα δοθεί στην τελευταία υλοποιηθείσα 5^η γενιά (Fifth Generation – 5G), ενώ θα πραγματοποιηθεί επίσης και αναφορά στις ακόμα πιο σύγχρονες προκλήσεις και έρευνες στο πλαίσιο ανάπτυξης και της 6ης γενιάς (6G).



Εικόνα 2.1: Η εξέλιξη των ασύρματων κινητών επικοινωνιών [7]

2.1 Δίκτυα 0G έως 3G

Τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, που αποτέλεσαν τον προάγγελο των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών, εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940 με τη μορφή των ραδιοτηλεφώνων. Αποτελούσαν προέκταση του δημόσιου τηλεφωνικού σταθερού δικτύου και πραγματοποιούσαν φωνητικές κλήσεις σε οχήματα. Οι τεχνολογίες στις οποίες θεμελιώθηκαν τα δίκτυα 0G είναι γνωστές ως Push to talk ή Press to transmit – PTT το 1950, Improved Mobile Telephone Service – IMTS το 1964 για τις πρώτες απευθείας αναλογικές κλήσεις σε κανάλια έως 450 MHz, Advanced Mobile Telephone System – AMTS που λειτουργεί σε ζώνες 900 MHz και OLT και MTD για τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας σε Νορβηγία και Σουηδία αντίστοιχα. Τα εν λόγω συστήματα είχαν διάφορα προβλήματα ποιότητας και αξιοπιστίας, με το μεγαλύτερό, όμως, μειονέκτημα τους να σχετίζεται με την ύπαρξη ενός μονόδρομου καναλιού. Ως εκ τούτου, οι δύο καλούντες δεν μπορούσαν να ακούσουν ο ένας τον άλλον ταυτόχρονα.

Το πρόβλημα αυτό έρχεται να αντιμετωπίσει, η πρώτη πραγματική γενιά ασύρματων κυψελωτών κινητών επικοινωνιών, γνωστή ως 1G, που ολοκληρώθηκε το 1979 στο Τόκιο της Ιαπωνίας με το Nippon Telephone and Telegraph – NTT, έφτασε στην Ευρώπη το 1981 με το Nordic Mobile Telephone – NMT, ενώ ακολούθησε το 1983 και η Αμερική με το πρώτο κινητό τηλέφωνο Motorola DynaTAC. Οι τεχνολογίες αυτές εισήγαγαν την πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA). Με άλλα λόγια, διαχώριζαν το συνολικό εύρος ζώνης σε

κανάλια των 30 kHz και πετύχαιναν ταχύτητες έως 2,4 Kbps. Παρόλη την επανάσταση που προσέφερε η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων μέσω του FDMA, η ποιότητα του ήχου παρέμενε κακή, η χωρητικότητα των συσκευών χαμηλή και η ασφάλεια των δεδομένων μηδενική. Επιπλέον, τα περισσότερα συστήματα που είχαν δημιουργηθεί ανά την Ευρώπη και τον κόσμο ήταν ασύμβατα μεταξύ τους.

Στο σημείο αυτό προβάλλει η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τεχνολογία, η οποία σήμανε την αρχή των κυψελωτών δικτύων δεύτερης γενιάς (2G), με την ολότητα αυτών να υπάγονται στο νεοσυσταθέν Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM) περίπου το 1990. Εκτός από την μετάδοση του ήχου, προστίθενται πλέον και άλλες υπηρεσίες όπως ψηφιακά κρυπτογραφημένα μηνύματα SMS, μηνύματα εικόνων αλλά και MMS. Τα πρότυπα του GSM αξιοποίησαν την πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA) σε συνδυασμό με την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας. Δηλαδή, αυτή τη φορά ο χρόνος διαιρείται σε σχισμές και κάθε κανάλι καταλαμβάνει το σύνολο των συχνοτήτων που διαθέτει η εκάστοτε σχισμή. Παράλληλα, με εφευρέτη την Αμερική, ήρθαν στο προσκήνιο και τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα CDMA. Σε αυτή την περίπτωση κάθε χρήστης διαμορφώνει την ακολουθία δεδομένων του με μια διαφορετική ακολουθία κώδικα, δημιουργώντας έτσι ένα σήμα ευρείας ζώνης. Και οι δύο αυτές τεχνικές επιτρέπουν την ταυτόχρονη διοχέτευση δεκάδων κλήσεων και αυξάνουν τον ρυθμό μετάδοσης σε έως και 64 Kbps [1],[3],[6].

Η αδιάκοπη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και του αριθμού των εξυπηρετούμενων συνέχισε να αποτελεί πρωταρχικό μέλημα των συστημάτων επικοινωνιών, γεγονός που οδήγησε σε μία μεταβατική γενιά, αυτή των 2.5G και 2.75G. Η πιο θεμελιώδης βελτίωση της γενιάς αυτής συνίσταται στους ενισχυμένους ρυθμούς δεδομένων GSM, το λεγόμενο EDGE, που αυξάνει την ταχύτητα στα 144 Kbps, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση υψηλού επιπέδου σε συνδυασμό με κωδικοποίηση. Ενσωματώνει μάλιστα και προσαρμοστικές τεχνικές ώστε να αντισταθμίσει τα φαινόμενα εξασθένησης. Το ενδιαφέρον, λοιπόν, στρέφεται στο μοναδικό έως τότε ανέγγιχτο πεδίο, στις υπηρεσίες πολυμέσων [2].

Υπό αυτό το πρίσμα, αναπτύχθηκαν στις αρχές του 21^{ου} αιώνα τα κυψελωτά συστήματα 3^{ης} γενιάς υπό την αιγίδα της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) και συγκεκριμένα με τη σειρά προτύπων IMT-2000. Καθίσταται πλέον εφικτή η σύνδεση στο διαδίκτυο, η πραγματοποίηση κλήσεων φωνής και βίντεο, η τηλεδιάσκεψη, η περιαγωγή κ.α.. Κάθε εφαρμογή αντιστοιχεί και σε διαφορετική ταχύτητα εξυπηρέτησης ανάλογα με την κινητικότητα και την τοποθεσία που την χαρακτηρίζει. Έτσι, υποστηρίζονται 144 Kbps για χρήση οχημάτων, 384 Kbps για πεζούς και έως 2 Mbps για χρήση σε εσωτερικούς χώρους. Η βασική τεχνολογία για την μετάδοση, πολυπλεξία και μεταγωγή της πληροφορίας είναι η μεταγωγή πακέτων. Στην πληροφορία του χρήστη προστίθενται πρόσθετα δεδομένα (επικεφαλίδα), τα οποία χρησιμοποιούνται σε εσωτερικές διαδικασίες του δικτύου για δρομολόγηση, διόρθωση λαθών και έλεγχο ροής. Τα παραπάνω ενθυλακώνονται μαζί σε πακέτα και μεταδίδονται [2],[3],[8].

2.2 Δίκτυα 4G

Η 4^η γενιά κινητών επικοινωνιών σχεδιάζεται με γνώμονα την παροχή ολοκληρωμένων και ασφαλών λύσεων οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Οι βασικές της αρχές συνοψίζονται στο

ακρωνύμιο MAGIC, όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 2.2. Υποστηρίζει όλες τις υπηρεσίες των συστημάτων 3G και προσθέτει νέα χαρακτηριστικά όπως η παγκόσμια περιαγωγή, η υπολογιστική νέφους κ.α., με τις ταχύτητες να σημειώνουν αλματώδη αύξηση και να αγγίζουν τα 100 Mbps υπό συνθήκες υψηλής κινητικότητας και τα 2 Gbps υπό μειωμένες απαιτήσεις κινητικότητας [6].



Εικόνα 2.2: Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 4G [2]

Τα δίκτυα 4G εξοπλίζονται με δύο νέες τεχνολογικές προδιαγραφές. Η μία από αυτές είναι οι προηγμένες Διεθνείς Κινητές Τηλεπικοινωνίες (International Mobile Telecommunications-Advanced - IMT-Advanced) και η άλλη σχετίζεται με την Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη (Long term Evolution - LTE). Και οι δύο καθορίζουν τα κριτήρια ταχύτητας, τη διεπαφή με το δίκτυο ραδιοπρόσβασης, την αυξημένη ασφάλεια καθώς και τις αναγκαίες αναβαθμίσεις των κινητών συσκευών, αφού κατασκευάζονται έξυπνοι κινητοί τερματικοί σταθμοί (smartphones) με δυνατότητα υποστήριξης σύνθετων εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο.

Βαρύνουσα σημασία στα συστήματα 4^{ης} γενιάς κατέχει η πρωτοεμφανιζόμενη τεχνολογία Wi-MAX. Πρόκειται για τον συνδυασμό δύο δικτυακών δομών. Αρχικά, υφίστανται ένα Δίκτυο Εξυπηρέτησης Επικοινωνίας (Communication Service Network – CSN), το οποίο αποτελείται από διάφορους servers για υποστήριξη της κινητικότητας και καθορισμό της κυκλοφορίας, όλοι συνδεδεμένοι μέσω της υποδομής IP. Η λειτουργία του ουσιαστικά περιλαμβάνει τη μεταφορά των σημάτων από το ένα Δίκτυο Εξυπηρέτησης Πρόσβασης (Access Service Network – ASN) στο άλλο, ή διαφορετικά μεταξύ των Σταθμών Βάσης (Base Station – BS) και κατ’ επέκταση των κινητών συσκευών. Η μεταφορά αυτή γίνεται και πάλι με μεταγωγή πακέτων και τεχνικές ορθογωνικής διαμόρφωσης συχνότητας (OFDM). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην υποδομή αυτή οι περισσότεροι πομποί και δέκτες αποτελούνται από πολυάριθμες και πολλαπλές κεραίες που συμμετέχουν όλες στη διαδικασία

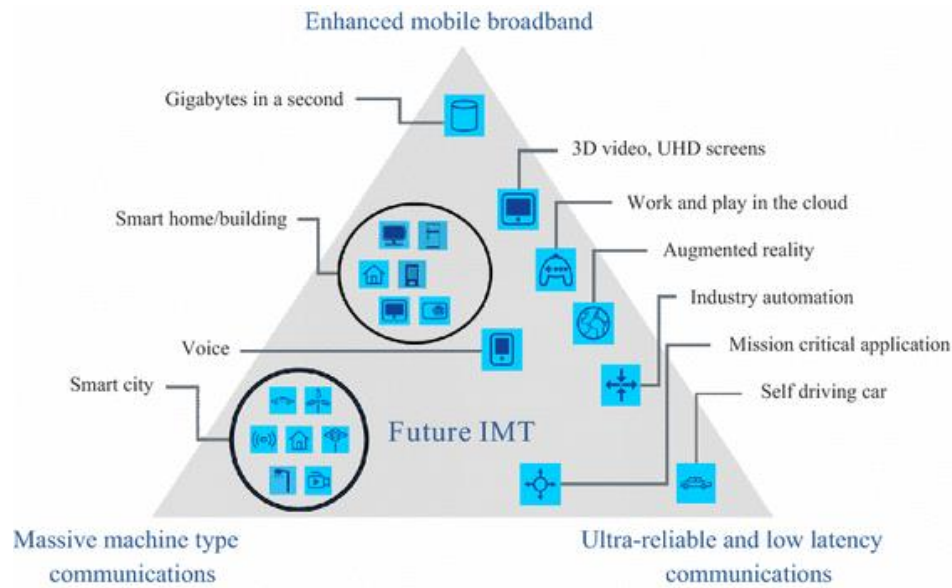
της μετάδοσης. Η τεχνολογία αυτή αναφέρεται ως Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος (Multiple Input Multiple Output – MIMO) και θα διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στις μελλοντικές γενιές.

Τέλος το LTE εισήγαγε και μία άλλη σημαντική έννοια, η οποία σχετίζεται με τους Κόμβους Αναμετάδοσης (Relay Nodes – RN). Οι δυνατότητές που έχουν τους καθιστούν υποσταθμούς βάσης μικρής ισχύος, ασύρματης σύνδεσης. Ειδικότερα, λαμβάνουν ένα ασθενές σήμα και το αναμεταδίδουν με βελτιωμένη ποιότητα, ιδιαίτερα σε περιοχές με δυσμενείς συνθήκες διάδοσης και έλλειψη υποδομών [9].

2.3 Δίκτυα 5G

Τα τελευταία περίπου πέντε χρόνια, έχει εδραιωθεί σχεδόν διεθνώς η 5^η γενιά δικτύων (5G) που προσφέρει εμπειρία πολυμέσων σε εξαιρετικά γρήγορες ταχύτητες και μειωμένο κόστος. Η σχεδίαση της ενεργοποιήθηκε ήδη από το 2015, όταν το 3GPP (3rd Generation Partnership Program – Οργανισμός για την Προτυποποίηση Κινητών Τηλεπικοινωνιών) ανέπτυξε μία νέα τεχνολογία ραδιοπρόσβασης, γνωστή ως New Radio – NR. Το NR επαναχρησιμοποιεί πολλές από τις δομές και τα χαρακτηριστικά του LTE. Ωστόσο, η ύπαρξη νέας τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης σημαίνει ότι το NR, σε αντίθεση με την εξέλιξη του LTE, δεν περιορίζεται από την ανάγκη διατήρησης της συμβατότητας προς τα πίσω, αλλά έχει ευρύτερες απαιτήσεις παρακινώντας ένα εν μέρει διαφορετικό σύνολο τεχνικών λύσεων. Το 5G-NR οργανώνεται από την IMT-2020 σε δύο περιοχές συχνοτήτων, τα 6 GHz που χρησιμοποιούνται κυρίως για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας υψηλότερης χωρητικότητας και τα 24 GHz που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης, ιδανικό για υπηρεσίες που απαιτούν υψηλή απόδοση. Όλες οι υπηρεσίες του 5G αποσκοπούν στην επίτευξη ενός συνδυασμού μέγιστης ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) και εμπειρίας (Quality of Experience – QoE) με φασματική και ενεργειακή απόδοση, υποστηρίζουν το Wireless World Wide Web (WWW) και υλοποιούνται υπό τις κάτωθι αρχές [10],[11]:

- **Extreme Mobile Broadband – eMBB:** υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε ευρεία περιοχή κάλυψης για ανθρωποκεντρική επικοινωνία με εφαρμογές AR/VR, HD βίντεο, 3D gaming
- **Enhanced Machine Type Communications – mMTC:** μηχανοκεντρική περίπτωση χρήσης που προσφέρει σύνδεση υψηλής πυκνότητας ηλεκτρονικών συσκευών, στα πλαίσια του Internet of Things (IoT) με χαμηλή αναλογία κατανάλωσης ενέργειας και υψηλό ρυθμό εξυπηρέτησης δεδομένων
- **Ultra-Reliable Low Latency Communications – uRLLC:** συνδυασμός των παραπάνω με εγγυημένη ταχύτητα, διαθεσιμότητα και αξιοπιστία για κρίσιμες εφαρμογές τηλεϊατρικής, περιβαλλοντικών καταστροφών, δίκτυα οχημάτων, ρομπότ



M.2083-02

Εικόνα 2.3: Απαιτήσεις απόδοσης και σενάρια χρήσης 5G [10]

Parameter	Minimum Technical Performance Requirement
Peak data rate	Downlink: 20 Gbit/s Uplink: 10 Gbit/s
Peak spectral efficiency	Downlink: 30 bit/s/Hz Uplink: 10 bit/s/Hz
User-experienced data rate	Downlink: 100 Mbit/s Uplink: 50 Mbit/s
Fifth percentile user spectral efficiency	3 × IMT-Advanced
Average spectral efficiency	3 × IMT-Advanced
Area traffic capacity	10 Mbit/s/m ² (Indoor hotspot for eMBB)
User plane latency	4 ms for eMBB 1 ms for URLLC
Control plane latency	20 ms
Connection density	1,000,000 devices per km ²
Energy efficiency	Related to two aspects for eMBB: (a) Efficient data transmission in a loaded case (b) Low energy consumption when there are no data
Reliability	The technology shall have the capability to support a high sleep ratio and long sleep duration. 1–10 ⁻⁵ success probability of transmitting a layer 2 PDU (Protocol Data Unit) of 32 bytes within 1 ms, at coverage edge in Urban Macro for URLLC
Mobility	Normalized traffic channel data rates defined for 10, 30, and 120 km/h at ~1.5 × IMT-Advanced numbers. Requirement for High-speed vehicular defined for 500 km/h (compared to 350 km/h for IMT-Advanced).
Mobility interruption time	0 ms
Bandwidth	At least 100 MHz and up to 1 GHz in higher-frequency bands. Scalable bandwidth shall be supported.

Πίνακας 2.1: Ελάχιστες απαιτήσεις τεχνικής απόδοσης σύμφωνα με το IMT-2020 [11]

Όπως και με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας, τα δίκτυα 5G έχουν μια σταθερή γεωγραφική περιοχή εξυπηρέτησης (κυψέλη). Όλες οι ασύρματες συσκευές σε μια κυψέλη συνδέονται σε δίκτυα μέσω τοπικών κεραιών χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα. Οι κεραιές συνδέονται με τη σειρά τους στην οπτική ίνα υψηλού εύρους ζώνης ή σε ένα ασύρματο backhaul δίκτυο για να ολοκληρώσουν την αλυσίδα των συνδέσεων. Οι υψηλότερες συχνότητες των ραδιοκυμάτων αυτών συνεπάγονται αφενός την αύξηση της ταχύτητας του δικτύου, που αγγίζει πλέον λίγα Gbps, και αφετέρου τη μείωση του μεγέθους των κυψελών [2],[3].

Για την υλοποίηση των δικτύων 5G έγινε χρήση τριών νέων καινοτόμων τεχνολογιών [9]:

- ο Cloud Computing: πληροφορίες, εικόνες και δεδομένα διαμοιράζονται μεταξύ των χρηστών μέσω του διαδικτύου, δηλαδή μέσω πλατφόρμων νέφους, αυξάνοντας έτσι την περιεκτικότητα σε αποθηκευτική μνήμη και απαλύνοντας τις ασύρματες συσκευές από το βάρος της υπολογιστικής ισχύος
- ο Massive MIMO: εκατοντάδες κεραιές εξυπηρετούν δεκάδες κινητά τερματικά ταυτόχρονα, μειώνοντας το κόστος για εξοπλισμό και τις ανάγκες ισχύος
- ο Millimeter-Wave: τα μήκη κύματος κυμαίνονται από 1 έως 10 χιλιοστά για εύρος ζώνης από 300 έως 30 GHz αντίστοιχα, επιτυγχάνοντας την εξυπηρέτηση τριπλάσιων ρυθμών δεδομένων σε εξαιρετικά πυκνά δίκτυα

2.4 Δίκτυα 6G – 7G

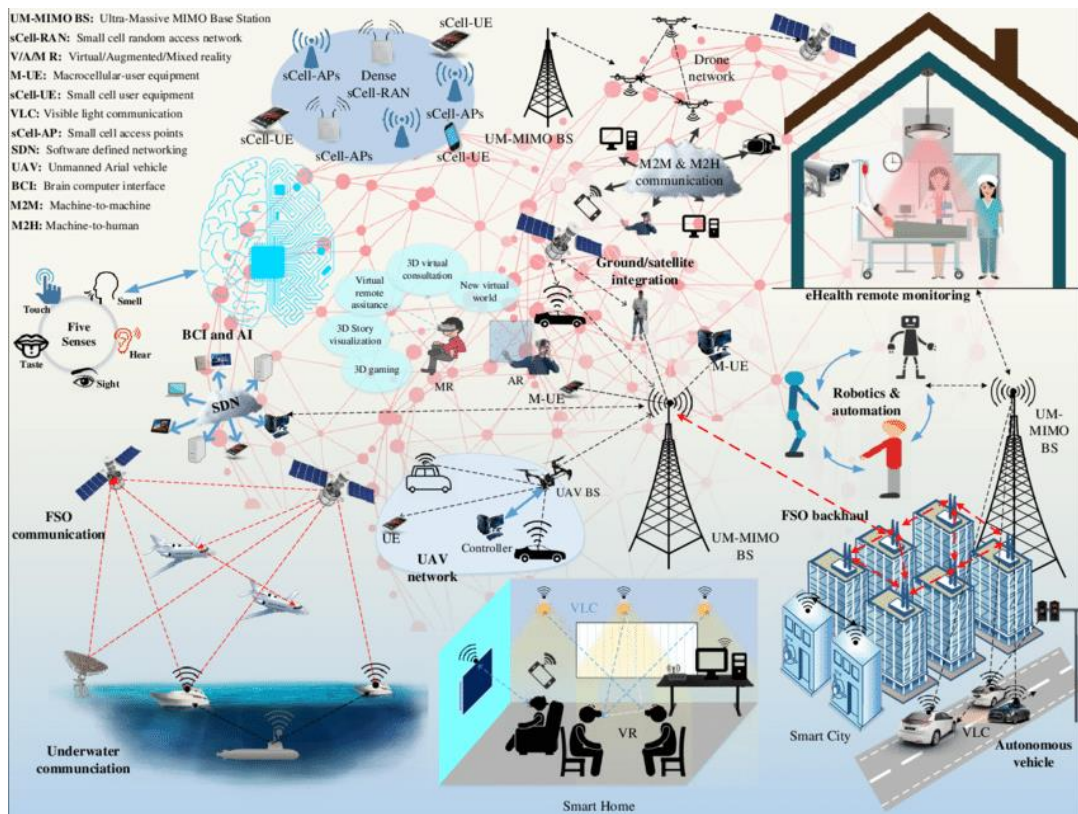
Υπό παρόμοιο πρίσμα αναπτύσσεται και η ιδέα των μελλοντικών γενιών δικτύων επικοινωνιών. Η διαφορά έγκειται στη συχνότητα λειτουργίας που για τα 6G ανέρχεται πλέον στις ζώνες 73GHz – 140GHz και 1THz – 3THz, με παράλληλη ενεργοποίηση συχνοτήτων ανώτερων χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave). Απόρροια αυτού είναι και η αναβάθμιση της παροχής δεδομένων σε 1 Tbps, καθώς και ο περαιτέρω περιορισμός της καθυστέρησης σε λιγότερο από 1 ms. Όλα αυτά βρίσκονται ήδη υπό μελέτη και κατασκευή σε πανεπιστήμια και τμήματα έρευνας και ανάπτυξης μεγάλων εταιρειών, όπως η Nokia και η Ericsson, ενώ αναμένεται να τυποποιηθούν από το πρότυπο IMT-2030 [10].

Όσον αφορά τον σχεδιασμό των δικτύων 6^{ης} γενιάς, πρόκειται να αποτελέσουν ένα κράμα ασύρματων συστημάτων 5G και δορυφορικών δικτύων. Ο δορυφόρος χρησιμοποιείται για μετάδοση φωνής, δεδομένων, διαδικτύου και βίντεο, τα δορυφορικά δίκτυα απεικόνισης της Γης προορίζονται για συλλογή περιβαλλοντικών πληροφοριών και καιρικών συνθηκών και το δορυφορικό δίκτυο πλοήγησης για το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS). Εν συνεχεία, στα δίκτυα 7^{ης} γενιάς, οι δορυφορικές λειτουργίες θα επεκταθούν και για τις κινητές επικοινωνίες, παραδείγματος χάριν για την χρήση κινητού τηλεφώνου κατά τη μετάβαση από μία χώρα σε μία άλλη χωρίς κόστη περιαγωγής ή για την ζωντανή μετάδοση βίντεο HD. Με βάση αυτά, προκύπτουν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα κυψελών, picocell, microcell, macrocell και δορυφορική κυψέλη, οι οποίες θα περιέχουν νάνο-κεραίες [6].

Οι τύποι υπηρεσιών που χρησιμοποιούνται στο 5G αναβαθμίζονται σε:

- **Computation Oriented Communications – COC:** καταμετρημένος υπολογισμός υποβοηθούμενος από την εκμάθηση σε συνεργασία με τα ευφυή gadgets
- **Contextually Agile eMBB Communications – CaeC:** επέκταση του eMBB πιο ευέλικτη και προσαρμόσιμη στο περιβάλλον του δικτύου, το φυσικό και κοινωνικό περιβάλλον
- **Event Defined uRLLC – EDuRLLC:** ακραία ή έκτακτα φαινόμενα όπου η πυκνότητα χρηστών, τα πρότυπα κίνησης και η διαθεσιμότητα φάσματος τροποποιούνται δυναμικά

Η βασική διαφοροποίηση, όμως, εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι επερχόμενες τεχνολογίες 6G και 7G αναμένεται να έχουν ως κατευθυντήρια γραμμή την Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI). Στόχος της είναι να ενσωματώσει υπολογισμούς, δρομολόγηση, ανίχνευση και ενίοτε αποκέντρωση σε δίκτυα επικοινωνίας. Δεν μπορεί να παραληφθεί, βέβαια, το γεγονός ότι οι τεχνολογίες αυτές, εξαιτίας της ύπαρξης πολλαπλών χρηστών σε πυκνά περιβάλλοντα τα οποία χρησιμοποιούν ως μοντέλα εκμάθησης, παράγουν τεράστιους όγκους δεδομένων (big data). Συνεπώς, τα νέα δίκτυα προαπαιτούν ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους για να προβλέψουν άμεσα και αποδοτικά ένα ασφαλές αποτέλεσμα. Με τα εφόδια της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης τα δίκτυα των επόμενων γενιών θα είναι έτοιμα να αυτοματοποιήσουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, να βελτιστοποιήσουν την αναγνώριση και επεξεργασία φυσικής γλώσσας και να εισάγουν την εικονική πραγματικότητα και τα ρομπότ στην καθημερινότητα των ανθρώπων [9],[10].



Εικόνα 2.4: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύων 6G [9]

2.5 Ad hoc Networks

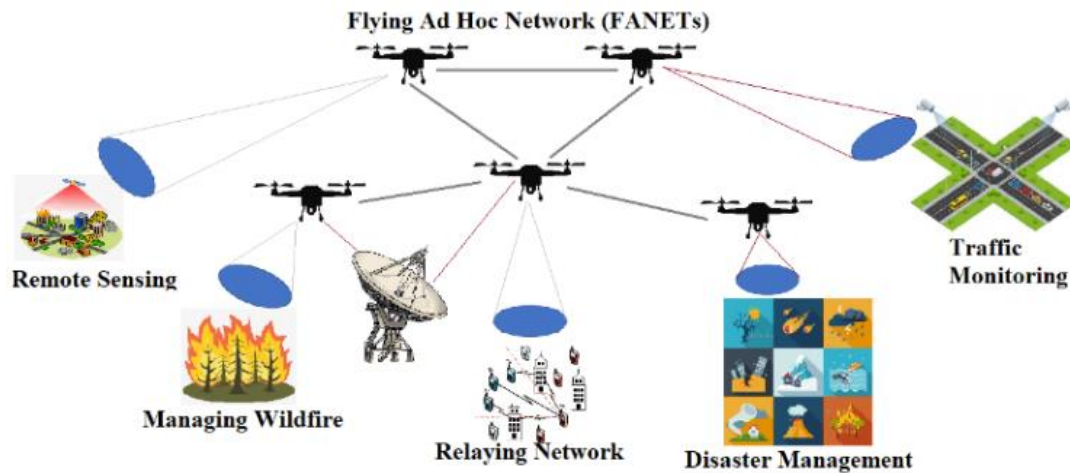
Μεγάλο μέρος της ακαδημαϊκής κοινότητας αλλά και της διεθνούς βιομηχανίας προσανατολίζεται ολοένα και περισσότερο στα ταχέως αναπτυσσόμενα ασύρματα αδόμητα δίκτυα. Η έρευνα αυτή πυροδοτήθηκε από την διαθεσιμότητα συστημάτων παγκόσμιου εντοπισμού θέσης GPS και τις χαμηλού κόστους ασύρματες συσκευές. Ένα ασύρματο κινητό ad hoc δίκτυο (Mobile Ad hoc Network – MANET), ή αλλιώς δίκτυο χωρίς υποδομή, είναι μία συλλογή κινητών κόμβων που διαμορφώνονται αυτόματα για να σχηματίσουν ένα άμεσο δίκτυο χωρίς σταθερή τοπολογία. Στη δυναμική αυτή σύνθεση, οι κόμβοι μπορούν να εισέλθουν ή να εξέλθουν ανά πάσα στιγμή από το σύστημα, ενώ έχουν απόλυτη ελευθερία κινητικότητας όσο βρίσκονται σε αυτό. Λόγω της έλλειψης κεντρικής διοίκησης, κάθε κόμβος καλείται να είναι κεντρικός υπολογιστής (host) και δρομολογητής την ίδια στιγμή. Επίσης, οι κόμβοι χειρίζονται μόνοι τους τις απαραίτητες εργασίες ελέγχου και δικτύωσης, μέσω της χρήσης κατανεμημένων αλγορίθμων ελέγχου. Όλοι βοηθούν στην αναμετάδοση δεδομένων σε άλλους κόμβους και ακριβώς αυτή η δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων (multihop) είναι που βελτιώνει την επίδοση και την απόδοση ισχύος του δικτύου. Από τα παραπάνω γίνονται εμφανή τα δύο κύρια πλεονεκτήματα των ad hoc ασύρματων δικτύων. Αρχικά, μπορούν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένες εφαρμογές και να δημιουργηθούν από οποιουδήποτε κόμβους δικτύου είναι διαθέσιμοι. Εκτός από αυτό, όμως, αποφεύγουν το κόστος, την εγκατάσταση και τη συντήρηση της υποδομής δικτύου. Για τους λόγους αυτούς βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα καταστάσεων, όπως είναι τα δίκτυα αισθητήρων, η εκπαίδευση, τα σενάρια έκτακτης ανάγκης και οι στρατιωτικές εφαρμογές [1],[12].

Τα στοιχεία που απαρτίζουν τα δίκτυα MANET λειτουργούν σε τομείς, οι οποίοι αναφέρονται σε ένα σύνολο λογικών και φυσικών στοιχείων που λειτουργούν συλλογικά για να δημιουργήσουν επικοινωνίες μεταξύ κόμβων και σταθερών σημείων πρόσβασης. Αυτοί οι τομείς ταξινομούνται ανάλογα με τη λειτουργία τους σε [13]:

- Τομέας στο Κινητό: αμφίδρομο δίκτυο επικοινωνίας μέσα στο κινητό, υποστηρίζει ενσύρματη ή ασύρματη σύνδεση
- Τομέας Ad hoc: ασύρματη επικοινωνία που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των κόμβων μεταξύ τους ή των κόμβων με το εκάστοτε σημείο πρόσβασης και ορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.11p (μαζί με τις παραλλαγές του για ασφάλεια, δικτύωση, διαχείριση πόρων και πολυκαναλικές λειτουργίες) ή μέσω άλλων ασύρματων τεχνολογιών (Wi-Fi, WiMAX, LTE)
- Τομέας υποδομής: σχηματίζεται από τα δίκτυα πρόσβασης και την υποδομή που υποστηρίζει την πρόσβαση στο Διαδίκτυο (backend), μπορεί να υλοποιηθεί ενσύρματα ή ασύρματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαμορφώνονται δύο τύποι επικοινωνίας. Η επικοινωνία μεταξύ των κινητών (Mobile to Mobile – M2M) αφορά την συλλογή δεδομένων και πληροφοριών από τους κόμβους και την αναμετάδοσή τους σε άλλους, ενώ η επικοινωνία κινητού με υποδομή (Mobile to Infrastructure – M2I) σχετίζεται με την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ενός κόμβου και του σταθμού ελέγχου εδάφους [14].

Υπάρχουν διάφορα είδη MANET, με τα βασικότερα να είναι τα δίκτυα ad hoc οχημάτων (VANET) και τα εναέρια ad hoc δίκτυα (FANET). Το FANET είναι ένα αυτό-οργανωμένο ασύρματο δίκτυο που επιτρέπει σε φθηνούς, ευέλικτους και εύχρηστους ιπτάμενους κόμβους, όπως τα αεροσκάφη και τα drones (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs), να επικοινωνούν μεταξύ τους ελλείψει σταθερής επίγειας υποδομής δικτύου. Τα εναέρια οχήματα περιέχουν αισθητήρες, GPS, επεξεργαστή, κάμερα, πομπές και κεραίες.



Εικόνα 2.5: Περιπτώσεις χρήσης εναέριων ad hoc δικτύων [12]

Από τη μία πλευρά, η αυτάρκεια των εν λόγω δικτύων τα καθιστά συχνή επιλογή για διάφορες εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, όμως, η απρόσκοπτη λειτουργία τους ταλανίζεται από διάφορες προκλήσεις. Το δυσκολότερο κομμάτι είναι η κατασκευή τους. Η διασφάλιση ότι κάθε συσκευή μπορεί πάντα να λαμβάνει πληροφορίες για να τις ανακατευθύνει σωστά είναι αρκετά περίπλοκη στην υλοποίηση και χρειάζεται βελτιωμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τέτοια πρωτόκολλα αρχίζουν να ενσωματώνονται στα δίκτυα 5G και 6G [15]. Σχετικά με τις χρησιμοποιούμενες συσκευές, αυτές τροφοδοτούνται συνήθως από μπαταρίες, γεγονός που περιορίζει την χωρητικότητα του επεξεργαστή τους, το εύρος ζώνης και τη μνήμη τους. Το σημαντικότερο, ίσως, πρόβλημα ωστόσο είναι η ασφάλεια των MANET. Η ασύρματη φύση και η κινητικότητα των κόμβων δικτύου επιτρέπει στους κακόβουλους παρεμβολείς να συνδέονται οποιαδήποτε στιγμή στο δίκτυο και αυτό εγείρει ανησυχία για την ασφάλεια των κόμβων και των μεταδιδόμενων δεδομένων [12].

3. Ασύρματο Κανάλι – Μετάδοση – Τεχνικές Φυσικού Στρώματος

Η αξιόπιστη μετάδοση πληροφοριών μέσω των ασύρματων συστημάτων διέπεται από διάφορες θεωρητικές αρχές και έρχεται αντιμέτωπη με φυσικούς μηχανισμούς που επιδρούν δυσμενώς στα μεταδιδόμενα σήματα. Ο κυρίαρχος στόχος στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έγκειται στην βέλτιστη παροχή υπηρεσιών υπό τις ελάχιστες δυνατές σπατάλες πόρων. Ο ασύρματος δίαυλος λειτουργεί με βάση την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή τα οπτικά κύματα και χρησιμοποιεί κεραιές για την εκπομπή και λήψη των σημάτων. Τα εν λόγω σήματα συνδέονται, μέσω της διαδικασίας της διαμόρφωσης, με διαφορετικές συχνότητες για διαφορετικούς σκοπούς διάδοσης και ενσωματώνουν την ψηφιακή πληροφορία, μέσω της ψηφιακής επεξεργασίας που υπόκεινται. Ωστόσο, η μετάδοση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων επηρεάζεται από φυσικά φαινόμενα, όπως είναι η εξασθένηση, η παραμόρφωση και οι διαλείψεις τα οποία χρήζουν αντιμετώπισης.

3.1 Βασικές Αρχές Ασύρματων Ζεύξεων

Όπως προαναφέρθηκε, η ασύρματη μετάδοση είναι άρρηκτα συνυφασμένη με τον ηλεκτρομαγνητισμό, χαρακτηρίζεται από περιορισμένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και υποστηρίζει κινητικότητα. Η διάδοση ραδιοκυμάτων ορίζεται ως η μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μεταξύ δύο κεραιών συμπεριλαμβανομένης και της επίδρασης του περιβάλλοντος. Ανάλογα τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται τα ραδιοκύματα κατατάσσονται στις εξής κάτωθι κατηγορίες:

- Κύματα Εδάφους: διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια της γης και διακρίνονται περαιτέρω σε κύματα χώρου (είτε απευθείας είτε ανακλώμενα από το έδαφος) και κύματα εδάφους (με απόσβεση που εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους)
- Τροποσφαιρικά Κύματα: καταφθάνουν στον δέκτη έπειτα από ανάκλαση ή σκέδαση από την τροπόσφαιρα και διαδίδονται σε συχνότητες από 30 έως 300 MHz
- Ιονοσφαιρικά Κύματα: καταφθάνουν στον δέκτη έπειτα από ανάκλαση ή σκέδαση από την ιονόσφαιρα (η αστάθεια της δημιουργεί δυσκολία στην πρόβλεψη των κυμάτων) και διαδίδονται σε συχνότητες από 3 έως 30 MHz

Εκτός από τον τρόπο μετάδοσης, μπορεί κανείς να κατηγοριοποιήσει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και με γνώμονα την συχνότητα. Οι μικροκυματικές συχνότητες που αναφέρονται στον Πίνακα 3.2 είναι αυτές που χρησιμοποιούνται πλέον και στα δίκτυα Beyond 5G [16].

Ζώνες Συχνότητας	Ονομασία	Υπηρεσίες
3 – 30 KHz	Very Low Frequencies	Συστήματα Πλοήγησης, Sonar
30 – 300 KHz	Low Frequencies	Ραδιοφάροι, Βοηθήματα Πλοήγησης
300 – 3000 KHz	Medium Frequencies	Ραδιοφωνία AM, Ραδιοεπικοινωνίες Ναυσιπλοΐας
3 – 30 MHz	High Frequencies	Τηλεφωνία, Τηλεγραφία, Τηλεμοιοτυπία, Επικοινωνίες πλοίων / αεροπλάνων και σταθμών εδάφους
30 – 300 MHz	Very High Frequencies	Τηλεόραση, Ραδιοφωνία FM, Συστήματα Εναέριας Κυκλοφορίας, CBs
300 – 3000 MHz	Ultra High Frequencies	Τηλεόραση, Δορυφορικές Επικοινωνίες, Συστήματα Radar, Κινητές Επικοινωνίες
3 – 30 GHz	Super High Frequencies	Μικροκυματικές Επικοινωνίες, Δορυφορικές Ζεύξεις, Κινητές Επικοινωνίες κοινού φέροντος
30 – 300 GHz	Extremely High Frequencies	Radar, Μελλοντικές επικοινωνίες ευρείας ζώνης

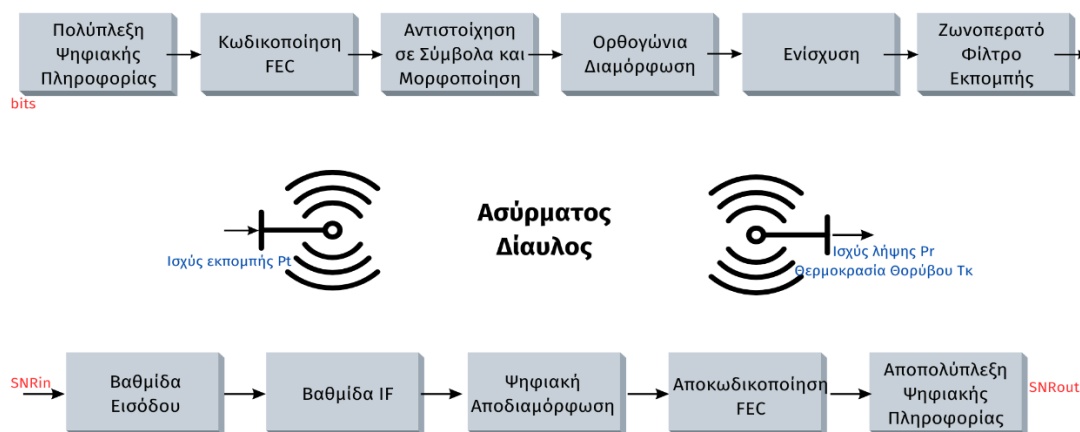
Πίνακας 3.1: Ζώνες συχνοτήτων [16]

Ζώνες Συχνότητας	Ονομασία
500 – 1000 MHz	VHF
1 – 2 GHz	L
2 – 3 GHz	S
3 – 4 GHz	S
4 – 6 GHz	C
6 – 8 GHz	C
8 – 10 GHz	X
10 – 12.4 GHz	X
12.4 – 18 GHz	Ku
18 – 20 GHz	K
20 – 26.5 GHz	K
26.5 – 40 GHz	Ka

Πίνακας 3.2: Ζώνες μικροκυματικών συχνοτήτων [16]

Τα κύματα αυτά διαδίδονται με τον ίδιο τρόπο σε διάφορα είδη ασύρματων ζεύξεων. Συγκεκριμένα υπάρχουν [16]:

- Ζεύξεις σημείο προς σημείο: συνήθως χρειάζονται ιδιαίτερα κατευθυντικές κεραίες
- Ζεύξεις ευρείας κάλυψης: ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλούς αποδέκτες με χρήση διπολικών κεραϊών ή γραμμικών στοιχειοκεραϊών (π.χ. ραδιοφωνία)
- Ζεύξεις οπτικής επαφής: ευθύγραμμη μετάδοση κυμάτων
- Ζεύξεις πέραν του ορίζοντα: το επιφανειακό κύμα διαδίδεται σε απόσταση μεγαλύτερη της οπτικής επαφής λόγω περίθλασης και διάθλασης
- Κινητές ζεύξεις: τουλάχιστον ένας εκ των πομπό ή δέκτη εμφανίζει κινητικότητα (π.χ. κινητή τηλεφωνία)



Εικόνα 3.1: Λειτουργικό Διάγραμμα Ασύρματης Ζεύξης

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ψηφιακού ασύρματου συστήματος επικοινωνίας. Η αξιοπιστία της συνολικής μετάδοσης και η ποιότητα υπηρεσίας κάθε τέτοιου συστήματος εξαρτώνται σημαντικά από τον ρυθμό εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Rate – BER) που φτάνουν στον δέκτη. Με τη σειρά του το BER εξαρτάται από τα διάφορα χαρακτηριστικά του συστήματος μέσω μίας συνάρτησης f .

$$BER = f\left\{M, R_c, \left(\frac{E_s}{n_0}\right)_{in}\right\}$$

Στάθμη σχήματος διαμόρφωσης M: Εν γένει η διαδικασία της ψηφιακής διαμόρφωσης έχει ως αναφορά την κωδικοποίηση της πληροφορίας που παράγεται από μία πηγή σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση και περιγράφεται ενδελεχώς στην επόμενη υποενότητα. Η στάθμη του σχήματος διαμόρφωσης αντιστοιχεί στον αριθμό των ψηφίων που ομαδοποιούνται ανά σύμβολο $k = \log_2 M$ bits/symbol. Όσο μεγαλύτερη είναι η στάθμη αυτή τόσο περισσότερο αυξάνεται το BER, καθώς τα σύμβολα τοποθετούνται σε κοντινότερες θέσεις στον αστερισμό με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο δυσδιάκριτα μεταξύ τους. Από την άλλη πλευρά, όμως, βελτιώνεται η φασματική απόδοση (Spectral Efficiency – SE). Απαιτείται, λοιπόν, να βρεθεί ισορροπία μεταξύ αυτού του trade-off για την εκάστοτε υπηρεσία.

Ρυθμός κώδικα R_C: Σχετίζεται με το σχήμα κωδικοποίησης FEC και επηρεάζει, μεταξύ άλλων μεγεθών, τον επιτεύξιμο ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης, σύμφωνα με την σχέση: $R_u = R_c \cdot$

R_b bits/sec, όπου R_b ο ρυθμός μετάδοσης ψηφίων. Επομένως, η αύξηση του ρυθμού κώδικα συνεπάγεται μείωση του ρυθμού εσφαλμένων ψηφίων.

Ανηγμένος Σηματοθορυβικός Λόγος E_s/n_0 : Μία εντόνως φθίνουσα συνάρτηση f συνδέει τον λόγο της ενέργειας συμβόλου (ή ψηφίου) προς τη φασματική πυκνότητα του θορύβου με το BER. Εύκολα αποδεικνύεται ότι παρόμοια σχέση εμφανίζει και ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του κυκλώματος απόφασης του δέκτη, καθώς $(\frac{E_s}{n_0})_{in} = SNR_{out} \cdot k_g$.

Η τελευταία σχέση προκύπτει από μία άλλη θεμελιώδη εξίσωση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, η οποία ορίζει την σταθερά του παλμού μορφοποίησης ως το γινόμενο του εύρους ζώνης ραδιοσυχνοτήτων και της διάρκειας συμβόλου. Συγκεκριμένα:

$$2B_g \cdot T_S = k_g \implies B_{RF} \cdot T_S = k_g$$

Από τα μεγέθη που αναφέρθηκαν παραπάνω, βαρύνουσα σημασία σε έναν ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δέκτη κατέχει ο σηματοθορυβικός λόγος. Στην Εικόνα 3.1 σημειώνονται δύο τέτοιοι λόγοι οι οποίοι δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$SNR_{in} = \frac{S_{in}}{k \cdot T_K \cdot B_{RF}}, \quad SNR_{out} = \frac{S_{in}}{k \cdot (T_K + T_e) \cdot B_{RF}}$$

όπου S_{in} είναι η ληφθείσα ισχύς στην είσοδο του δέκτη, k είναι η σταθερά Boltzmann, T_K η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας, που σχετίζεται τόσο με την συχνότητα λειτουργίας όσο και με τη γωνία ανύψωσης της κεραίας και T_e η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου των διατάξεων του δέκτη από την είσοδο έως το κύκλωμα απόφασης. Από τις εξισώσεις αυτές συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επίτευξη υψηλότερης αξιοπιστίας σε μία ασύρματη ζεύξη μπορεί να υλοποιηθεί, εκτός των άλλων, και με αύξηση της ληφθείσας ισχύος, είτε αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής είτε πολώνοντας κατάλληλα τις κεραίες. Ένας άλλος τρόπος είναι η μείωση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας από τον σχεδιαστή ή της ισοδύναμης θερμοκρασίας, επιλέγοντας ενδιάμεσα στοιχεία στο κύκλωμα με μεγαλύτερο κέρδος ή περιορίζοντας το μήκος και την απόσβεση των γραμμών μεταφοράς. Φυσικά το σύνολο όλων των αναφερθέντων μεγεθών, τεχνικών και σεναρίων υπαγορεύονται από την ανάγκη συμμόρφωσης με την χωρητικότητα του διαύλου. Σύμφωνα με το θεώρημα του Shannon ισχύει:

$$C = N \cdot B_{RF} \cdot \log_2(1 + SNR) \text{ bps}$$

Ο παραπάνω τύπος ορίζει τον μέγιστο εφικτό ρυθμό μετάδοσης ψηφίων, ο οποίος μπορεί να υποστηριχθεί από το πραγματικό σύστημα και να εξασφαλίσει αξιόπιστη λήψη με οσοδήποτε μικρή, επιθυμητή πιθανότητα σφάλματος για κάθε λαμβανόμενο bit [17].

3.2 Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Η έννοια της ψηφιακής διαμόρφωσης αντανακλά την μετάδοση πληροφορίας σε μορφή δυαδικών ψηφίων, δηλαδή οντοτήτων που λαμβάνουν την τιμή 0 ή 1 και προέρχονται τόσο από ψηφιακές όσο και από αναλογικές πηγές. Στην πράξη πρόκειται για μία αντιστοίχιση των ψηφίων ή μίας ομάδας ψηφίων πληροφορίας (σύμβολο) m_i σε ένα αναλογικό σήμα s_i , ώστε αυτό να μεταδοθεί μετέπειτα μέσω του διαύλου. Στην αντίθετη κατεύθυνση της λήψης απαντάται η έννοια της αποδιαμόρφωσης ή διαφορετικά της ανάκτησης της ακολουθίας

ψηφίων που απεστάλησαν από τον πομπό. Υπάρχουν διάφορα σχήματα διαμόρφωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με την εκάστοτε υπηρεσία. Η επιλογή βασίζεται στους εξής παράγοντες:

- Υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων
- Υψηλή φασματική απόδοση
- Ελαχιστοποίηση ισχύος εκπομπής
- Ελαχιστοποίηση πιθανότητας λανθασμένου ψηφίου
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης

Κάθε σήμα περιγράφεται μέσω κατάλληλης υπέρθεσης συναρτήσεων βάσης. Απόρροια αυτού είναι η δυνατότητα περιγραφής των σημάτων σε ένα διανυσματικό μιγαδικό χώρο πεπερασμένων διαστάσεων και η γεωμετρική αναπαράσταση αυτών με διαγράμματα αστερισμού. Με βάση την ορθογωνιοποίηση Gram-Schmidt αποδεικνύεται ότι κάθε σύνολο πραγματικών σημάτων πεπερασμένης ενέργειας στο διάστημα $[0, T)$ μπορεί να περιγραφεί ως γραμμικός συνδυασμός πραγματικών ορθοκανονικών συναρτήσεων βάσης. Έτσι, για ένα σήμα προκύπτει:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^N s_{ij} \cdot \varphi_j(t), \quad 0 \leq t < T$$

Εάν υποθέσουμε γραμμικές ζωνοπερατές τεχνικές διαμόρφωσης, όπως συνηθίζεται στα περισσότερα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τότε:

$$\varphi_1(t) = g(t) \cdot \cos(2\pi f_c t), \quad \varphi_2(t) = g(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

Το $g(t)$ αντιστοιχεί σε έναν παλμό βασικής ζώνης, ο οποίος χρησιμοποιείται για να αποδώσει συγκεκριμένα φασματικά χαρακτηριστικά. Η απλούστερη μορφή που μπορεί να λάβει είναι

ένας ορθογωνικός παλμός Non-Return-to-Zero NRZ: $g(t) = \sqrt{\frac{2}{T}}$.

Κατά την διαδικασία της αποδιαμόρφωσης, η κύρια λειτουργία που επιτελείται είναι ο εντοπισμός της περιοχής απόφασης Z_i στην οποία ανήκει το διάνυσμα r του σήματος λήψης $r(t)$. Ιδανικά, η απόφαση αυτή πρέπει να ληφθεί με την ελάχιστη πιθανότητα λάθους P_e . Για να γίνει αυτό, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας (likelihood function):

$$L(s_i) = \Pr(r|s_i)$$

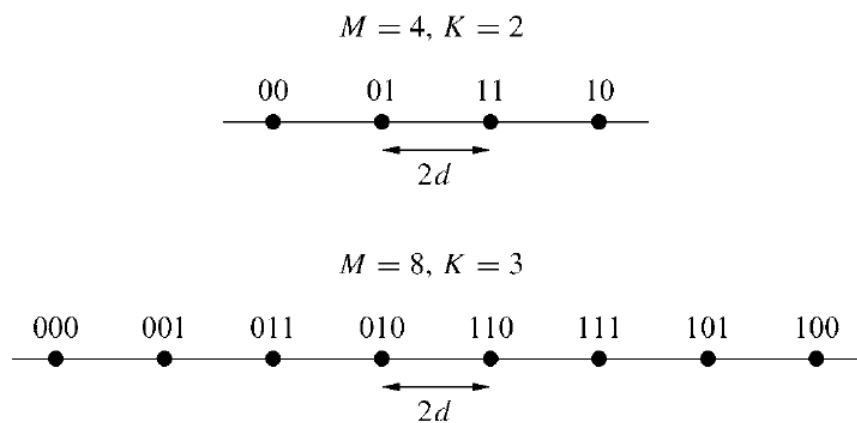
Στη συνέχεια γίνεται μία λίγο πιο εκτενής αναφορά στα είδη ψηφιακής διαμόρφωσης. Ανάλογα με το χαρακτηριστικό του διαμορφωμένου σήματος όπου ενσωματώνεται η πληροφορία, υπάρχουν τρεις γενικές κατηγορίες ψηφιακής διαμόρφωσης. Η πρώτη ονομάζεται **διαμόρφωση πλάτους**. Σε αυτήν τα διαμορφωμένα σήματα διαφέρουν μόνο ως προς το πλάτος, και επομένως βρίσκονται σε μια ευθεία. Η επόμενη κατηγορία είναι η **διαμόρφωση φάσης**, όπου τα ψηφία προς αποστολή μεταδίδονται διαμορφωμένα στην φάση του σήματος. Τα δύο αυτά είδη μπορούν να εφαρμοστούν και συνδυαστικά. Τέλος, υπάρχει και η **διαμόρφωση συχνότητας**. Η πληροφορία διαμορφώνει τη συχνότητα του φέροντος σήματος, οπότε προκύπτουν διαμορφωμένα σήματα σταθερής περιβάλλουσας, τα οποία όμως δεν ανήκουν στο ίδιο επίπεδο [5].

3.3.6 Διαμόρφωση Πλάτους MPAM

Πρόκειται για την απλούστερη μορφή γραμμικής διαμόρφωσης, την Pulse Amplitude Modulation – PAM, κατά την οποία η ορθογώνια συνιστώσα απαλείφεται. Η κωδικοποίηση των ψηφίων πληροφορίας πραγματοποιείται με την αντιστοίχισή τους στο πλάτος παλμών επιλεγμένης μορφής, έτσι ώστε τα εκπεμπόμενα σύμβολα να διαφέρουν μεταξύ τους αποκλειστικά σε ένα χαρακτηριστικό, το πλάτος των παλμών. Το διαμορφωμένο σήμα ακολουθεί τη σχέση:

$$s_i(t) = A_i \cdot g(t) \cdot \cos[2\pi f_c t + \psi_0], \quad 0 \leq t < T_s$$

όπου $A_i = (2i - 1)$, $i=1, \dots, M$ και διαθέτει ενέργεια: $E_{s_i} = A_i^2$. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα ο αστερισμός είναι μονοδιάστατος και γραμμικός, ενώ η ελάχιστη απόσταση των σημείων είναι $d_{\min} = 2d$. Η αντιστοίχιση των συμβόλων με τα σημεία του αστερισμού πραγματοποιείται κατά κανόνα με κωδικοποίηση Gray, οπότε τα γειτονικά σημεία διαφέρουν μόνο κατά ένα ψηφίο.



Εικόνα 3.2: Αστερισμοί M-PAM [1]

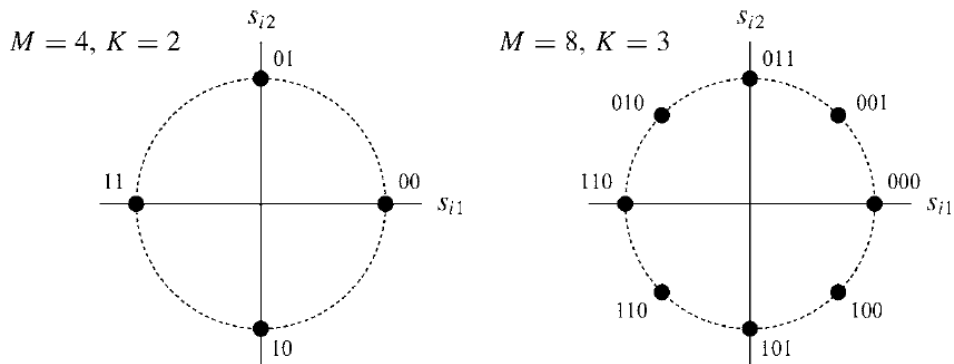
3.2.2 Διαμόρφωση Φάσης MPSK

Στην περίπτωση της Phase Shift Keying – PSK οι μεταβολές που σημειώνονται στην γωνία του σήματος εκπομπής αξιοποιούνται για την αναγνώριση της πληροφορίας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$s_i(t) = A \cdot g(t) \cdot \cos \left[2\pi f_c t + \psi_0 + (i - 1) \left(\frac{2\pi}{M} \right) \right]$$

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές ότι το εν λόγω σχήμα διαμόρφωσης οδηγεί σε μία συμφασική και μία ορθογώνια συνιστώσα και συνεπώς απαιτεί ορθογώνιο αποδιαμορφωτή. Όλες οι εκδοχές του σήματος εκπομπής διαθέτουν ίδια ενέργεια συμβόλου, ίση με $E_{s_i} = A^2$, με την παράμετρο A να εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής και να συμμετέχει επίσης στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων του, δισδιάστατου πλέον, αστερισμού: $d_{\min} =$

$2^A \cdot \sin(\pi/M)$. Η διαμόρφωση MPSK χαρακτηρίζεται από σταθερή περιβάλλουσα αν και μόνο αν επιλεγεί παλμός μορφοποίησης NRZ μοναδιαίας ισχύος [1].



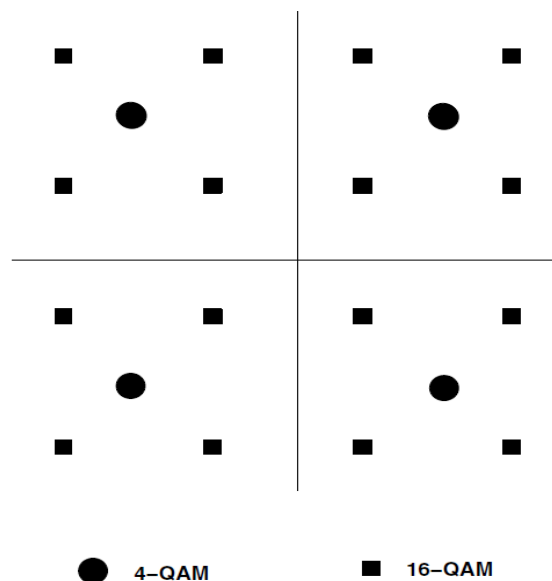
Εικόνα 3.3: Αστερισμοί M-PSK [5]

3.2.3 Διαμόρφωση Πλάτους-Φάσης MQAM

Σε αντιδιαστολή με τις προαναφερθείσες τεχνικές, η Quadrature Amplitude Modulation – QAM εμφανίζει δύο βαθμούς ελευθερίας καθώς η πληροφορία αντιστοιχίζεται τόσο στις μεταβολές του πλάτους όσο και της φάσης. Έτσι, το διαμορφωμένο σήμα γράφεται:

$$s_i(t) = A_i \cdot g(t) \cdot \cos[2\pi f_c t + \psi_0 + \theta_i], \quad 0 \leq t < T_s$$

Κάθε σύμβολο μεταφέρει ενέργεια $E_{s_i} = A_i^2$ και απέχει απόσταση από το διπλανό του $d_{\min} = 2d$, ομοίως με την MPAM. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διαμόρφωση MQAM με τετραγωνικό αστερισμό μεγέθους $M = L^2$ ισοδυναμεί με δύο διαμορφώσεις MPAM μεγέθους L , μία κατά την συμφασική και μία κατά την ορθογωνική συνιστώσα.



● 4-QAM ■ 16-QAM

Εικόνα 3.4: Αστερισμοί M-QAM [1]

3.2.4 Διαμόρφωση Πλάτους-Φάσης MAPSK

Παραλλάσσοντας λίγο το προηγούμενο είδος, και συγκεκριμένα αλλάζοντας τον αστερισμό από τετραγωνικό σε δακτύλιο ομόκεντρων κύκλων διαφορετικής ακτίνας, καταλήγει κανείς στην διαμόρφωση Amplitude Phase Shift Keying – APSK. Η παραλλαγή αυτή πετυχαίνει τη μείωση του πλήθους των δυνατών τιμών για τα πλάτη και κατ' επέκταση τη μείωση της ισχύος. Απώτερος στόχος αυτού είναι η καλύτερη αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων που εισάγουν οι μη γραμμικοί ενισχυτές. Για κάθε δακτύλιο το ισοδύναμο βαθυπερατό σήμα είναι:

$$u_{n,R} = r_{n,R} \cdot \exp \left[j \left(\frac{2\pi}{n_R} i + \psi_{n,R} \right) \right],$$

όπου $n_k, r_k, \psi_k, k=1, \dots, n_R$ το πλήθος των σημείων, η ακτίνα και η αρχική φάση του δακτυλίου k αντίστοιχα με $r_1 < \dots < r_{n,R}$

Το αντίστοιχο ζωνοπερατό διαμορφωμένο σήμα είναι:

$$s_i(t) = \text{Re}\{u_i(t) \cdot g(t) \cdot \cos[2\pi f_c t + \psi_0]\}$$

3.2.5 Διαμόρφωση Συχνότητας MFSK

Η διαμόρφωση συχνότητας Multiple Frequency Shift Key – MFSK συσχετίζει τα σύμβολα πληροφορίας με διαφορετικές τιμές της φέρουσας συχνότητας. Ειδικότερα, $\log_2 M$ ψηφία συσχετίζονται στη συχνότητα f_i σε κάθε διάρκεια συμβόλου. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα διαμορφωμένα σήματα χαρακτηρίζονται από σταθερή περιβάλλουσα, γεγονός που συνάδει με τη χρήση μη γραμμικών ενισχυτών και ευνοεί την ανθεκτικότητα σε δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης και την μείωση της ισχύος εκπομπής. Αναδύονται, ωστόσο, και κάποια μειονεκτήματα στην μέθοδο αυτή. Η μη γραμμική φύση του προβλήματος καθώς και η ασυνέχεια φάσης του σήματος εκπομπής οδηγούν σε μεγαλύτερα φασματικά εύρη για τα σήματα. Το διαμορφωμένο κατά MFSK σήμα έχει τη μορφή:

$$s_i(t) = A \cdot \cos[2\pi(f_c + a_i \Delta f)t + \psi_i], 0 \leq t < T$$

όπου $a_i = 2i - 1 - M, i=1, \dots, M$. Συνεπώς, ο ελάχιστος διαχωρισμός μεταξύ φερουσών συχνοτήτων είναι $2\Delta f$. Μία ειδική περίπτωση αποτελεί η διαμόρφωση Minimum Shift Keying – MSK στην οποία $M=2, \psi_1=\psi_2$ και $2\Delta f=1/2T_s$, αξιοποιώντας το ελάχιστο εύρος ζώνης.

3.2.6 Διαμόρφωση Συχνότητας CPFSK

Η διαμόρφωση Continuous Phase Frequency Shift Keying – CPFSK αποτελεί μία εναλλακτική υλοποίηση της FSK που στόχο έχει την εξάλειψη της ασυνέχειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση ενός μόνο φέροντος, το οποίο λαμβάνει τη μορφή:

$$s_i(t) = A \cdot \cos[2\pi f_c t + \psi_0 + \theta(t)]$$

Το εύρος ζώνης ενός τέτοιου σήματος ισούται περίπου με $B \approx 2M \cdot \Delta f + 2B_u$, δηλαδή κατά $2M \cdot \Delta f$ μεγαλύτερη από τις γραμμικές διαμορφώσεις [5].

Είδος Ψηφιακής Διαμόρφωσης	$P_b(\gamma_b = E_b/N_0)$
MPAM	$\frac{2(M-1)}{M \cdot \log_2 M} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{6\gamma_b \cdot \log_2 M}{M^2 - 1}}\right)$
MPSK	$\frac{2}{\log_2 M} \cdot Q\left(\sqrt{2\gamma_b \cdot \log_2 M} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right)$
MQAM	$\frac{4}{\log_2 M} \cdot Q\left(\sqrt{3\gamma_b \cdot \frac{\log_2 M}{M-1}}\right)$
BFSK	$Q(\sqrt{\gamma_b})$

Πίνακας 3.3: Πιθανότητες λάθους των σχημάτων ψηφιακής διαμόρφωσης

3.3 Σχήματα Πολλαπλής Πρόσβασης

Οι ασύρματες επικοινωνίες κατακλύζονται από συστήματα πολλαπλών χρηστών οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης, τον ραδιοδίαυλο. Ο ραδιοδίαυλος απαρτίζεται από τέσσερα είδη πόρων, που καλούνται ραδιοπόροι και είναι η συχνότητα, ο χρόνος, οι κώδικες και ο χώρος. Ένα από τα βασικότερα εγχειρήματα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών αποτελεί ο αποδοτικός διαμερισμός των εν λόγω πεδίων, έτσι ώστε να ελέγχεται και να συντονίζεται η πρόσβαση των χρηστών στο δίαυλο, εξασφαλίζοντας τους ορθογωνιότητα και διακριτά φυσικά κανάλια. Με αυτό τον τρόπο, κάθε χρήστης αντιλαμβάνεται την υπηρεσία με αδιάλειπτο ρυθμό και απολαμβάνει την ζητούμενη QoS. Οι τεχνικές κατανομής, ή γενικότερα το πεδίο της πολλαπλής πρόσβασης, συγκεντρώνουν ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, εξαιτίας της συνεχόμενης αύξησης των χρηστών και των αναγκών επικοινωνίας χωρίς, όμως, εφάμιλλη αύξηση και των διαθέσιμων πόρων.

3.3.1 Τεχνική FDMA

Η Frequency Division Multiple Access – FDMA είναι μία σχετικά απλή τεχνική η οποία βασίζεται στον διαχωρισμό του φάσματος σε συχνοτικά κανάλια. Κάθε κανάλι αποδίδεται σε έναν χρήστη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλον, γεγονός που ζημιώνει την φασματική απόδοση. Ωστόσο, ευνοεί την μετάδοση μηνυμάτων με το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό καθ' όλη τη διάρκεια. Η εκχώρηση των επιμέρους καναλιών στους χρήστες μπορεί να γίνει είτε στατικά ακολουθώντας ένα προκαθορισμένο σχέδιο, είτε δυναμικά λαμβάνοντας υπόψιν κάθε στιγμή το πλήθος και τα αιτήματα των εξυπηρετούμενων τερματικών. Για την υλοποίηση της μεθόδου αυτής χρειάζονται αυστηρά ζωνοπερατά φίλτρα, ενώ εισάγονται και συχνοτικά διαστήματα φύλαξης (guard bands) που εξασφαλίζουν την απομόνωση των καναλιών και περιορίζουν τις παρεμβολές γειτονικού καναλιού. Υφίστανται, βέβαια, ακόμη ομοδιαυλικές παρεμβολές.

3.3.2 Τεχνική TDMA

Η ιδέα της Time Division Multiple Access πηγάζει από τον καταμερισμό του χρόνου σε χρονοσχισμές (timeslots). Κάθε χρήστης λαμβάνει από μία χρονοσχισμή κατά τη διάρκεια της οποίας και μόνο μπορεί να μεταδίδει τα δεδομένα του. Οι χρονοσχισμές έχουν πολύ μικρή διάρκεια και επαναλαμβάνονται συνεχώς με κυκλικό τρόπο. Η διακοπτόμενη μετάδοση αφενός απαιτεί βραχυπρόθεσμη μνήμη για αποθήκευση δεδομένων από τις συσκευές, αλλά αφετέρου οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση ισχύος, αφού ο πομπός μπορεί να απενεργοποιηθεί ενόσω δεν χρησιμοποιείται. Είναι ένα σχήμα με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από το προηγούμενο, το οποίο όμως επιτυγχάνει πολλαπλάσιους -και εν ανάγκη μεταβαλλόμενους- ρυθμούς μετάδοσης, βελτιώνοντας την απόδοση σε QoS. Η TDMA λαμβάνει υπόσταση μόνο με ψηφιακές τεχνικές και χρήζει συγχρονισμού μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων χρηστών. Υποφέρει αρκετά από τη διασυμβολική παρεμβολή, λόγω της μειωμένης διάρκειας συμβόλου καθώς και από την ομοδιαυλική παρεμβολή, με τρόπο που αναλύεται στο ακόλουθο κεφάλαιο. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η προσθήκη ικανού πλήθους πλεοναζόντων ψηφίων (preamble) και χρονικών διαστημάτων φύλαξης (guard time interval), προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι μεταδόσεις δεν αλληλεπικαλύπτονται.

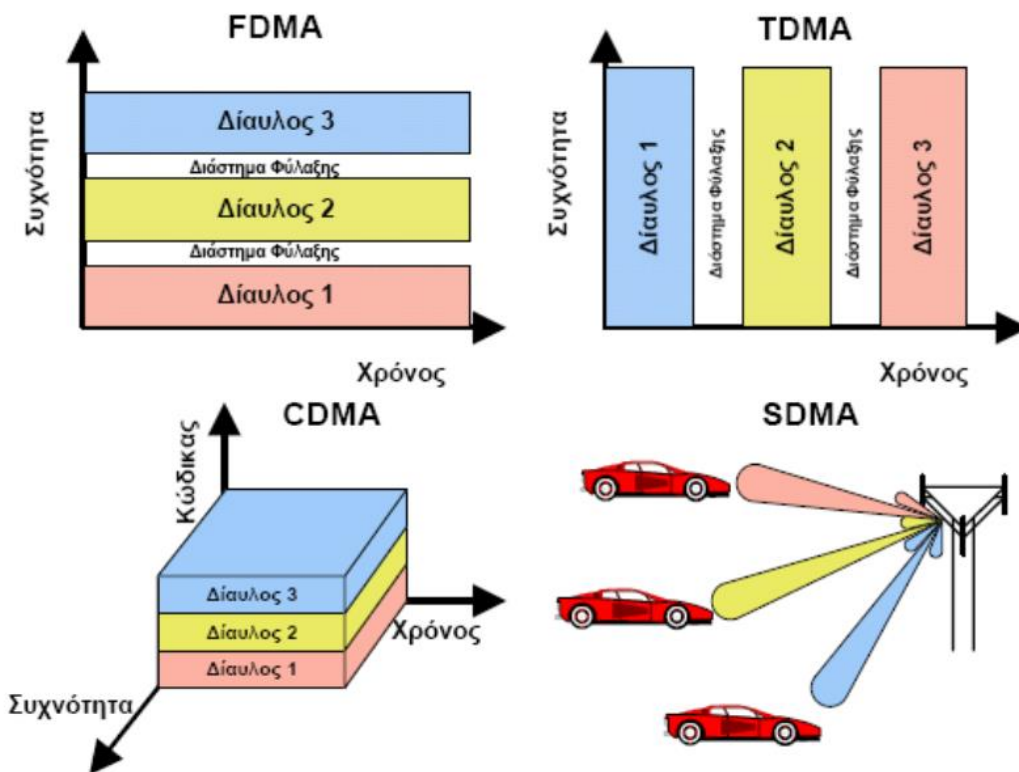
3.3.3 Τεχνική CDMA

Η Code Division Multiple Access – CDMA γεννήθηκε ως απάντηση στην ανάγκη εκμετάλλευσης των σιωπηλών περιόδων του διαύλου και πύκνωσης της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, με σκοπό να αυξηθεί η χωρητικότητα χρηστών ανά κυψέλη. Χρησιμοποιήθηκαν, λοιπόν, ευρείας ζώνης ψευδοτυχαία σήματα διασποράς (κώδικες) τα οποία είναι διαφορετικά για κάθε χρήστη και διαμορφώνουν το στενής ζώνης σήμα πληροφορίας που εκπέμπει (spread spectrum). Στον δέκτη γίνεται αναγνώριση του επιθυμητού χρήστη μέσω της διαδικασίας της συσχέτισης. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό, παρόλο που όλοι εκπέμπουν ταυτόχρονα και στην ίδια συχνότητα, λόγω της ιδιότητας της ορθογωνικότητας των κωδικών. Μάλιστα, επιδρά θετικά και στην ασφάλεια της μετάδοσης των δεδομένων καθώς παρουσιάζει σχετική ατρωσία στο jamming, γεγονός που το καθιστά συχνή επιλογή για στρατιωτικές εφαρμογές. Επιπρόσθετα, σε ενδεχόμενη εμφάνιση επιλεκτικών διαλείψεων επηρεάζεται μόλις ένα μικρό ποσοστό του φάσματος του σήματος, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της ισχύος σε μεγάλο εύρος ζώνης. Το κυρίαρχο μειονέκτημα της CDMA είναι ότι υπάρχει περιορισμός στο πλήθος των υφιστάμενων ορθογωνικών κωδικών διασποράς για δεδομένο εύρος ζώνης. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να υπερκεραστεί με τους ήμι-ορθογώνιους κώδικες, που παράγονται με την μέθοδο Direct Sequence CDMA. Δημιουργείται, όμως, έτσι ένα άλλο πρόβλημα αυτό του near-far. Δηλαδή, όταν ένας χρήστης που εκπέμπει με μεγάλη ισχύ συνδεθεί σε έναν κοντινό σταθμό βάσης, τότε οι ασθενέστεροι απομακρυσμένοι χρήστες γίνονται μη ανιχνεύσιμοι.

3.3.4 Τεχνική SDMA

Η τεχνική Space Division Multiple Access έρχεται για να λύσει το πρόβλημα των παρεμβολών. Χρησιμοποιώντας έξυπνες, προσαρμοστικές κεραιές, δημιουργούνται συγκεκριμένοι λοβοί ακτινοβολίας με δυναμικό τρόπο και πραγματοποιείται έλεγχος της ακτινοβολούμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας για κάθε χρήστη στην περιοχή κάλυψης. Οι κεραιές που επιλέγονται συνήθως είναι στοιχειοκεραίες με καθορισμένο σύνολο διαγραμμάτων ακτινοβολίας (switched beam antennas) ή στοιχειοκεραίες με δυναμικά προσαρμοζόμενα βάρη (adaptive beamforming antennas). Κάθε κύριος λοβός, λοιπόν, αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης, στην οποία μπορούν εν συνεχεία να εφαρμοστούν οι προαναφερθείσες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης [18].

Στην πράξη εφαρμόζεται κυρίως στα σύγχρονα ασύρματα κυψελωτά συστήματα και είναι γνωστή ως τομεοποίηση των κυψελών των Σταθμών Βάσης. Για παράδειγμα, μία απλή περίπτωση εφαρμογής της SDMA είναι ο χωρισμός της κυψέλης σε N γωνιακούς τομείς εύρους $360^\circ/N$ ο καθένας. Επικρατέστερες τιμές για το γωνιακό αυτό εύρος είναι 120° ή 60° . Στα επόμενα κεφάλαια θα εμβαθύνουμε περισσότερο στο σχήμα αυτό, καθώς είναι συνυφασμένο με τα συστήματα πολλαπλών κεραιών MIMO, τα οποία συμμετέχουν και στο πρακτικό μέρος της εργασίας.



Εικόνα 3.5: Συγκριτική απεικόνιση σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης [18]

3.3.5 Διαμόρφωση OFDM και Πολλαπλή Πρόσβαση OFDMA

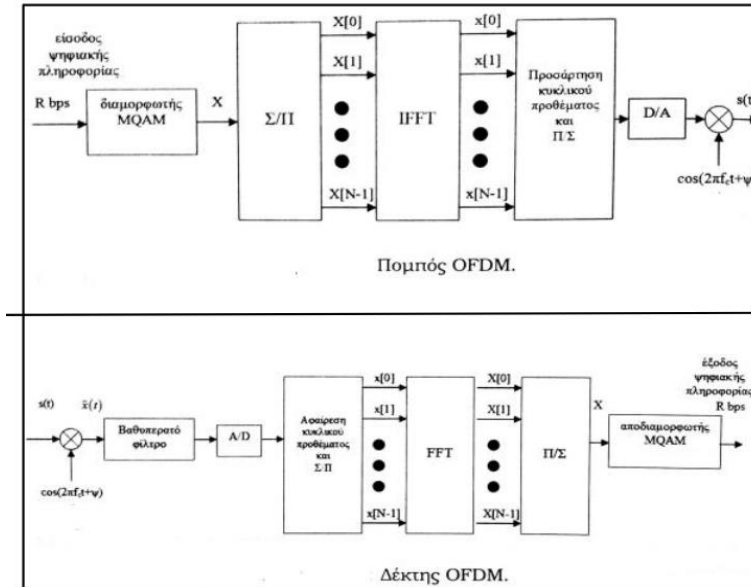
Η Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM αποτελεί μία τεχνική πολυδιαυλικής (multicarrier) διαμόρφωσης, η οποία είχε σημαντική παρουσία στα συστήματα LTE και παγιώθηκε με την είσοδο των επικοινωνιών New Radio – NR 5G. Ο λόγος πίσω από αυτό είναι ότι το εν λόγω σχήμα παρουσιάζει ανθεκτικότητα στη διασπορά χρόνου και μπορεί να εκμεταλλευτεί ταυτόχρονα και με την ίδια ευκολία τόσο το πεδίο του χρόνου όσο και αυτό της συχνότητας, εξοικονομώντας φασματικούς πόρους. Αυτή η τεχνική έχει επιλεγεί και για την προσομοίωση που ακολουθεί. Στην πράξη διαιρεί το μεταδιδόμενο σήμα ευρείας ζώνης σε μεγάλο αριθμό παράλληλων σημάτων στενής ζώνης. Δημιουργούνται, έτσι, πολλά παράλληλα ισοδύναμα υποσυστήματα, καθένα από τα οποία μεταδίδει ένα μέρος της πληροφορίας με αργό ρυθμό, ενώ ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παραμένει σταθερός. Η κατάλληλη διαίρεση της ροής πληροφορίας σε επιμέρους ροές κατορθώνει να αντιμετωπίσει τις επιλεκτικές διαλείψεις. Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει σωστά και να μην προκαλεί προβλήματα η αλληλοεπικάλυψη των καναλιών, είναι τα κανάλια να είναι μεταξύ τους ορθογώνια. Με άλλα λόγια, πρέπει οι φέρουσες συχνότητες αυτών να είναι ακέραια πολλαπλάσια μίας βασικής συχνότητας. Με αυτό τον τρόπο οι κορυφές – μέγιστα στο φάσμα ενός υποκαναλιού αντιστοιχούν σε μηδενισμούς στο φάσμα των γειτονικών υποκαναλιών. Επίσης, το εύρος ζώνης κάθε υποδιαύλου καλείται να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης συνοχής του συνολικού ασύρματου διαύλου. Προκύπτει, λοιπόν, η εξής ακολουθία αναλογιών: $B_N < B_C \Rightarrow T_N \simeq \frac{1}{B_N} > \frac{1}{B_C} \simeq \sigma_T$. Όταν η διάρκεια συμβόλου του εκάστοτε υποδιαύλου είναι μεγαλύτερη από την συνολική διασπορά καθυστέρησης, τότε διασφαλίζεται η δραστική μείωση της ISI. Στην περίπτωση του NR μπορεί να υποστηριχθεί μία πληθώρα από φασματικά εύρη, από macro cells <1GHz έως και millimeter waves, καθώς αναπτύσσεται μία ευέλικτη αριθμολογία OFDM με αποστάσεις υποφερόντων που κυμαίνονται από 15 kHz έως 240 kHz. Μια μικρή απόσταση υποφερόντων (subcarrier spacing) έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει ένα σχετικά μεγάλο κυκλικό πρόθεμα σε απόλυτο χρόνο με εύλογη επιβάρυνση. Αντιθέτως, για τον χειρισμό, παραδείγματος χάριν, αυξημένου θορύβου σε υψηλότερες συχνότητες και για μεγάλα εύρη ζώνης επιλέγονται μεγαλύτερες αποστάσεις υποφερόντων [11],[18].

Έστω ακολουθία δεδομένων $x[n] = x[0], \dots, x[N-1]$. Χωρίζεται σε N επιμέρους ροές και κατ' επέκταση σήματα στενής ζώνης τα οποία διέρχονται από το σύστημα που φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Κάθε ένα διαμορφώνει ένα υποφέρον συχνότητας f_n και εύρους ζώνης B_N . Υποθέτουμε ότι το σήμα μορφοποιείται με παλμό ανυψωμένου συνημιτόνου παράγοντα διαπλάτυνσης β , οπότε η αντίστοιχη διάρκεια συμβόλου ισούται με: $T_N = \frac{(1+\beta)}{B_N}$. Το συνολικό διαμορφωμένο σήμα ευρείας ζώνης έχει μορφή:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \cdot p(t) \cdot \cos(2\pi f_n t + \psi_n)$$

όπου s_n το σύμβολο που μεταδίδεται διαμορφωμένο στο n -οστό υποφέρον

Η απαίτηση που αναφέρθηκε παραπάνω για τις φέρουσες εκφράζεται ως: $f_n = f_c + nB_N$



Εικόνα 3.6: Παράλληλο, ορθογωνικό σύστημα μετάδοσης [5]

Όπως αποτυπώνεται και στο ως άνω block διάγραμμα, η διαμόρφωση OFDM περιλαμβάνει και ευθύ ή αντίστροφο Fast Fourier Transform – FFT, ο οποίος επιλέχθηκε για την ανάκτηση του σήματος λόγω της απλούστερης και οικονομικότερης υλοποίησής του. Η ισοστή έξοδος του IFFT για το εκπεμπόμενο σήμα θα είναι:

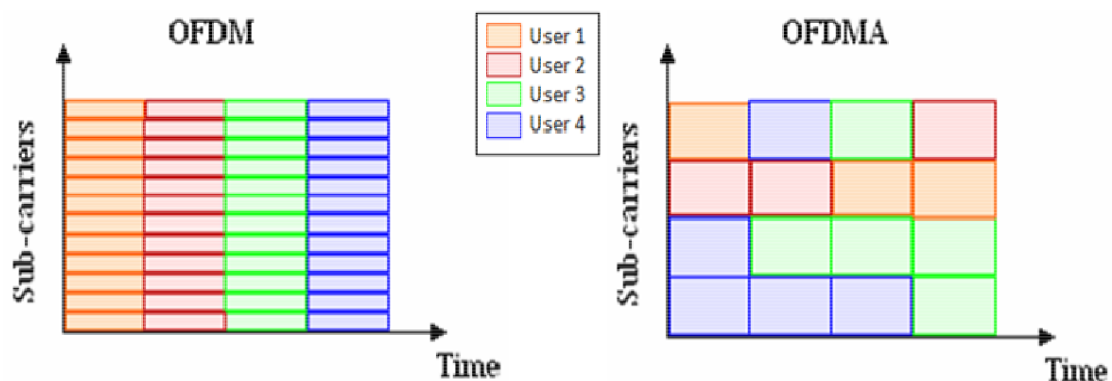
$$x(i) = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{\frac{j2\pi i k}{N}}, 0 \leq i \leq N - 1$$

Η χρήση του προαπαιτεί, ωστόσο, την εισαγωγή ενός κυκλικού προθέματος στην αρχή του μηνύματος, ώστε να υπολογίζεται η έξοδος του διαύλου ως κυκλική συνέλιξη. Συγκεκριμένα, επιλέγονται τα τελευταία M χρονικά δείγματα και προσαρτώνται στην αρχή της ακολουθίας, η οποία γίνεται πλέον $x_{new}[n]$ [5].

Προφανώς αναδύονται και διάφορες δυσκολίες στην υλοποίηση της OFDM. Η κυριότερη προέρχεται από το μεγάλο πλήθος υποκαναλιών το οποίο συνεπάγεται και μεγάλο αριθμό κυκλωματικών στοιχείων, δηλαδή αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα κατασκευής. Ειδικά τα ζωνοπερατά φίλτρα που χρειάζονται για την ορθογωνιότητα των υποφερόντων, πρέπει να είναι σχεδόν ιδανικά, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω το κόστος. Ακόμη, παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε θέματα συγχρονισμού του δέκτη σε σχέση με τα είδη διαμόρφωσης που έχουν ένα μοναδικό φέρον [11].

Η OFDM, όπως προαναφέρθηκε, είναι εξαιρετικά διαδεδομένη στα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς όπου χρησιμοποιείται άλλοτε ως τεχνική πολυπλεξίας και άλλοτε ως είδος διαμόρφωσης. Φυσικά, δεν υπάρχει κάποιος ανασταλτικός παράγοντας στην χρήση της και ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, απλώς συνήθως σε αυτή την περίπτωση συνδυάζεται με τις τεχνικές που αναλύθηκαν προηγουμένως, TDMA, CDMA ή SDMA και ανάγεται πλέον σε Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι το OFDM καθορίζει το σύνολο των υποφερόντων, ενώ η OFDMA αναλαμβάνει το διαχωρισμό αυτών σε ομάδες και τον διαμοιρασμό τους στους χρήστες του συστήματος. Οι τρόποι διαμοιρασμού ποικίλλουν. Τα υποκανάλια μπορούν να ανατεθούν στους χρήστες τόσο σε ισομεγέθη τμήματα όσο και σε μεταβλητά ανάλογα με το είδος της μεταφερόμενης

πληροφορίας, τις ανάγκες QoS, το είδος ψηφιακής διαμόρφωσης κ.α. Εν γένει, αν στον χρήστη i εκχωρηθούν J_i υποκανάλια από τα N διαθέσιμα, αυτά ισοδυναμούν με εύρος ζώνης $B_i = \frac{J_i \cdot B}{N}$ και επιτυγχάνουν ρυθμό μετάδοσης $R_i = \frac{J_i \cdot R_s}{N}$. Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παρουσιάζει αυτή τη φορά αύξηση και το σύστημα γίνεται λιγότερο ευάλωτο σε φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης. Σημειώνεται ότι η επιλογή των J_i υποκαναλιών δεν γίνεται απαραίτητα με συνεχόμενο τρόπο, αλλά μπορεί να γίνει και με τυχαία κατανομή. Η προσέγγιση αυτή προσθέτει αισθητή ευελιξία στην διαχείριση και κατανομή των ραδιοπόρων, υπό ένα εξατομικευμένο πρίσμα, επιβαρύνει, όμως, το σύστημα με πρόσθετο τηλεπικοινωνιακό φόρτο. Ο σταθμός βάσης (Base Station – BS) χρειάζεται πληροφορίες για τους διαύλους της κατερχόμενης ζεύξης (downlink) και παράλληλα τα κινητά τερματικά (Mobile Terminals – MT) χρειάζονται πληροφορίες για τα φέροντα που τους έχουν αποδοθεί στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink). Σε ένα σύνθετο, πραγματικό και ταχέως μεταβαλλόμενο περιβάλλον, επομένως, οι γνώσεις αυτές πρέπει να ανανεώνονται συνεχώς. Παρατηρείται, επίσης, υψηλός λόγος μέγιστης προς μέση ισχύ (PARP) λόγω του αυξημένου πλήθους υποκαναλιών, εντείνοντας τις μη γραμμικές παραμορφώσεις. Στα σύγχρονα συστήματα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με εξελιγμένες τεχνικές ελέγχου ισχύος και χρονισμού [18],[19].



Εικόνα 3.7: Σύγκριση τεχνικών OFDM και OFDMA [19]

3.3.6 Τεχνική NOMA

Μέχρι και τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς οι ορθογώνιες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης πετύχαιναν αρκετά καλά επίπεδα QoS και QoE. Με την εμφάνιση, όμως, των ασύρματων συστημάτων B5G και 6G, ήρθε στο προσκήνιο η ανάγκη για ακόμα μεγαλύτερη φασματική απόδοση και σε ακόμα μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν βελτιωμένες τεχνολογίες προς αυτή την κατεύθυνση, με πρωταρχική την Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA. Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές που περιεγράφηκαν, τώρα λαμβάνει χώρα μία μη ορθογώνια κατανομή πόρων, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση των ίδιων υποφερόντων ακόμη και εντός των ορίων μίας κυψέλης. Η υλοποίηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Στην πολυπλεξία πεδίου ισχύος (Power Domain NOMA) κάθε χρήστης αντιστοιχίζεται με ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος, σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι του. Στην πολυπλεξία πεδίου κώδικα (Code Domain NOMA) γίνεται χρήση χαμηλής συσχέτισης

ακολουθιών διασποράς για τη μετάδοση των ροών δεδομένων κάθε χρήστη. Και στις δύο περιπτώσεις, η ταυτόχρονη μετάδοση πληροφοριών σε πολλούς χρήστες μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση. Αν και το CD-NOMA παρέχει τη δυνατότητα για συγκριτικά μεγαλύτερη βελτίωση της SE, απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης και δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμο στα τρέχοντα συστήματα. Από την άλλη πλευρά, η υλοποίηση του PD-NOMA είναι σχετικά απλή, καθώς δεν απαιτεί σημαντικές αλλαγές στις υφιστάμενες υποδομές [20].

Η τεχνική αυτή, ωστόσο, εγείρει διάφορα ζητήματα CCI, τα οποία σημαντικό μέρος της διεθνούς βιβλιογραφίας πασχίζει να επιλύσει με τεχνικές ανίχνευσης σήματος πολλαπλών χρηστών. Όσον αφορά το CD-NOMA, το CCI μετριάζεται μέσω κωδικοποίησης υπέρθεσης (SC) στον πομπό. Τα μηνύματα των πολλαπλών MT πολυπλέκονται στον ίδιο υποφορέα. Ως εκ τούτου, το μεταδιδόμενο σήμα είναι η υπέρθεση πολλαπλών σημάτων MT με διαφορετικούς συντελεστές ισχύος αντιστοιχισμένους σε καθένα από αυτά. Για να διασφαλιστεί η δικαιοσύνη, οι χρήστες που αντιμετωπίζουν κακές συνθήκες καναλιού απολαμβάνουν μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος. Στο PD-NOMA ο περιορισμός του CCI βασίζεται στην διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) στον δέκτη. Ειδικότερα, η επιθυμητή πληροφορία εξάγεται από το υπερτιθέμενο σήμα αποκωδικοποιώντας διαδοχικά τα σήματα σε φθίνουσα σειρά ισχύος και αντιμετωπίζοντας κάθε φορά τα υπόλοιπα ως παρεμβολές. Κάνοντας λόγο για δυσκολίες στην NOMA δεν μπορεί να παραληφθεί η έντονη επιρροή της απόδοσης των συστημάτων αυτών από την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή [21].

3.4 Θόρυβος

Ο θόρυβος ταλανίζει όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και είναι ο βασικός περιοριστικός παράγοντας της απόδοσης και αξιοπιστίας τους. Πρόκειται για ένα συνονθύλευμα ασυσχέτιστων ηλεκτρομαγνητικών οντοτήτων διαφορετικής προέλευσης, το οποίο περιγράφεται μαθηματικά ως μία τυχαία διαδικασία. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες θορύβου:

- Τεχνητός Θόρυβος: προέρχεται από διάφορων ειδών συσκευές ή μηχανήματα τα οποία σχετίζονται με ανθρώπινη δραστηριότητα. Έχει συνήθως κρουστική μορφή και αποσβένεται σχετικά σύντομα. Η αντιμετώπιση του επιτυγχάνεται με καταστολείς θορύβου στις συσκευές.
- Φυσικός Θόρυβος: απορρέει από διάφορα φυσικά φαινόμενα. Ένας είδος φυσικού θορύβου είναι ο ουράνιος θόρυβος, ο οποίος επηρεάζει κυρίως τις ασύρματες επικοινωνίες και οφείλεται στην ηλιακή δραστηριότητα και γαλαξιακή ακτινοβολία. Με κατάλληλο προσανατολισμό των κεραιών λήψης μπορεί να αποφευχθεί. Υπάρχει, όμως, και ο κυκλωματικός θόρυβος που χωρίζεται περαιτέρω σε θερμικό και θόρυβο βολής. Ο πρώτος είναι απότοκος της τυχαίας κίνησης ελεύθερων ηλεκτρονίων σε ένα παθητικό στοιχείο, ενώ ο δεύτερος της τυχαίας διακύμανσης κατά την παραγωγή φορέων σε ένα ενεργό στοιχείο.

Στις περισσότερες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές που χρήζουν ποσοτικού υπολογισμού του θορύβου χρησιμοποιείται ο λευκός θόρυβος. Πρόκειται για μία μορφή θορύβου με ισχύ ομοιόμορφα κατανομημένη σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, η φασματική πυκνότητα ισχύος του λευκού θορύβου είναι σταθερή και ίση με:

$$S_n(f) = \frac{n_0}{2}, \forall f$$

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν ο θερμικός και ο ουράνιος θόρυβος. Ως μέγεθος που προστίθεται στο σήμα και ακολουθεί κανονική κατανομή $N(0,\sigma)$, έχει καθιερωθεί η ονομασία του ως Προσθετικός Λευκός Θόρυβος Τύπου Gauss – AWGN. Αυτή η μορφή χρησιμοποιείται και στην προσομοίωση μας [16].

3.5 Απώλειες Διάδοσης

Εκτός από τον θόρυβο, ο ασύρματος δίαυλος υποφέρει και από άλλα φαινόμενα που δημιουργούν δυσμενείς συνθήκες κατά την μετάδοση, όπως οι διαλείψεις ή οι παρεμβολές. Μάλιστα, τις περισσότερες φορές τα φαινόμενα αυτά μεταβάλλονται με το χρόνο κατά τρόπο απρόβλεπτο, γεγονός που δυσχεραίνει την μοντελοποίηση και τον μετριάσμο τους. Η βασικότερη επίδρασή τους αφορά την ισχύ λήψης. Αφενός προκαλούν εξασθένιση της ισχύος λόγω φαινομένων απόσβεσης (attenuation) και αφετέρου προκαλούν μεταβολή της ισχύος λόγω φαινομένων σκίασης (shadowing). Η απόσβεση θεωρείται ντετερμινιστικό μέγεθος και αντιπροσωπεύει τη μέση απώλεια διάδοσης που οφείλεται σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100m. Η σκίαση είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης σκεδαστών και εμποδίων κατά μήκος της ευθείας πομπού – δέκτη, οι οποίοι γεννούν τα φαινόμενα της απορρόφησης, περίθλασης, σκέδασης και ανάκλασης των ραδιοκυμάτων σε αποστάσεις έως 100m. Αμφότεροι οι ανωτέρω παράγοντες υπάγονται στις *απώλειες διάδοσης μεγάλης κλίμακας*.

Η πρόβλεψη της απόσβεσης αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο για την σχεδίαση και διαστασιολόγηση ενός ασύρματου συστήματος επικοινωνιών, καθώς παρέχει την δυνατότητα ελέγχου και πρόβλεψης της συμπεριφοράς και των αλλαγών που υπόκειται ένα σήμα κατά την μετάδοσή του. Έχει δοθεί, λοιπόν, μεγάλη έμφαση στον τομέα αυτό και έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα διάδοσης που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Φυσικά/Αναλυτικά Μοντέλα: βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα και φυσικούς μηχανισμούς και εκφράζουν τη διάδοση με μαθηματικό υπόβαθρο. Υπερσύνολο όλων αυτών αποτελεί το **Γενικό Μοντέλο Απωλειών Διάδοσης**, το οποίο υπολογίζει τις απώλειες διάδοσης σε dB ως:

$$L(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_R}{P_T}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right) - 10\gamma \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

όπου d_0 η απόσταση εκκίνησης της μακρινής περιοχής της κεραίας και γ ο εκθέτης απωλειών που εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4.

Περιβάλλον	Εκθέτης απωλειών γ
Αστικές μακροκυψέλες	3.7-6.5
Αστικές μικροκυψέλες	2.7-3.5
Όροφος με γραφεία	1.6-3.5
Διαφορετικοί όροφοι με γραφεία	2-6
Κατάστημα	1.8-2.2
Εργοστάσιο	1.6-3.3
Οικία	3

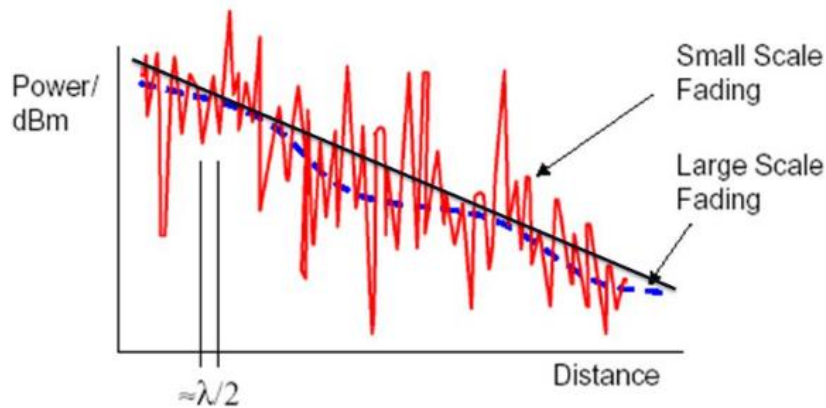
Πίνακας 3.4: Τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών [5]

- Εμπειρικά Μοντέλα: βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα και μετρήσεις τα οποία επεξεργάζονται κατάλληλα για να εξάγουν απλές σχέσεις με ειδικές εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρονται [16]:

- **Μοντέλο Egli** $\rightarrow L_{50}(dB) = 20 \cdot \log(h_{BS} \cdot h_{MS}) - 40 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log\left(\frac{40}{f}\right)$
- **Μοντέλο Okumura-Hata** $\rightarrow L_{50}(dB) = 69,55 + 26,16 \cdot \log(f_c) - 13,82 \cdot \log(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{BS})) \cdot \log(d)$ για αστικό περιβάλλον,
 $L_{50}(dB) = L_{50}(urban) - 4,78 \cdot \log(f_c)^2 + 18,33 \cdot \log(f_c) - 40,94$ για αγροτικό περιβάλλον,
 όπου $a(h_{MS}) = (1,11 \cdot \log(f_c) - 0,7) \cdot h_{MS} - 1,56 \cdot \log(f_c) + 0,8$
 και $150 \leq f_c \leq 1500 \text{ MHz}, 30 \leq h_{BS} \leq 200 \text{ m}, 1 \leq h_{MS} \leq 10 \text{ m}, 1 \leq d \leq 20 \text{ km}$
- **Μοντέλο COST 231-Hata** $\rightarrow L_{50}(dB) = 46,3 + 33,9 \cdot \log(f_c) - 13,82 \cdot \log(h_{BS}) - a(h_{MS}) + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_{BS})) \cdot \log(d) + c_m$
 όπου $a(h_{MS}) = 3,2 \cdot (\log(11,75 \cdot h_{MS}))^2 - 4,97$, $c_m = 3$ για αστικό περιβάλλον,
 $a(h_{MS}) = (1,11 \cdot \log(f_c) - 0,7) \cdot h_{MS} - 1,56 \cdot \log(f_c) + 0,8$, $c_m = 0$ για αγροτικό περιβάλλον,
 και $1,5 \leq f_c \leq 2 \text{ GHz}, 30 \leq h_{BS} \leq 200 \text{ m}, 1 \leq h_{MS} \leq 10 \text{ m}, 1 \leq d \leq 20 \text{ km}$

Σε κάθε ζεύξη η μεταβολή της ισχύος δεν γίνεται αποκλειστικά με αργό ρυθμό όπως αναλύθηκε έως τώρα. Απαντώνται, επιπλέον, και ταχείες μεταβολές της ισχύος σε μικρότερες αποστάσεις ή σε μικρότερα χρονικά διαστήματα, οι οποίες ονομάζονται *απώλειες διάδοσης μικρής κλίμακας*. Στην ουσία πρόκειται για το φαινόμενο των διαλείψεων (fading), που πηγάζει από διάφορους φυσικούς μηχανισμούς [5]:

- Πολυδιαδρομική Διάδοση: σε όλα τα πραγματικά περιβάλλοντα διάδοσης παρεμβάλλονται σκεδαστές μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Έτσι, δημιουργούνται πολλαπλοί δίαυλοι - διαδρομές και ως εκ τούτου πολλαπλές εκδοχές του σήματος εκπομπής. Αυτές καταφθάνουν στην πλευρά της λήψης σε διαφορετικούς χρόνους (τυχαίες φάσεις) και με διαφορετική εξασθένιση (τυχαία πλάτη) και για αυτό η ανασύνθεση του σήματος υποφέρει από διαλείψεις. Διασπορά καθυστέρησης: $\sigma_T = \sqrt{(\tau^2)_{mean} - \tau_{mean}^2}$.
- Κινητικότητα Τερματικών: μεταξύ σταθμού βάσης και κινητών αναπτύσσεται σχετική κίνηση, η οποία πυροδοτεί μία αντίστοιχη χρονική μεταβολή της φέρουσας συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler (θετική αν ο χρήστης πλησιάζει και αρνητική αν απομακρύνεται από τον ΣΒ: $f_D = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos\theta$).
- Κινητικότητα Σκεδαστών: εκτός από τους χρήστες κίνηση ενδέχεται να εμφανιστεί και σε διάφορους σκεδαστές και τότε οι μετατοπίσεις Doppler πλήττουν τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες.
- Φασματική Θεώρηση: λαμβάνει χώρα όταν το σήμα έχει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του διαύλου, κάτι που προκαλεί παραμόρφωση χωρίς, όμως, σημαντική επίδραση στις διαλείψεις.



Εικόνα 3.8: Εξάρτηση των απωλειών από το μήκος ζεύξης [5]

3.6 Ασφάλεια Φυσικού Στρώματος

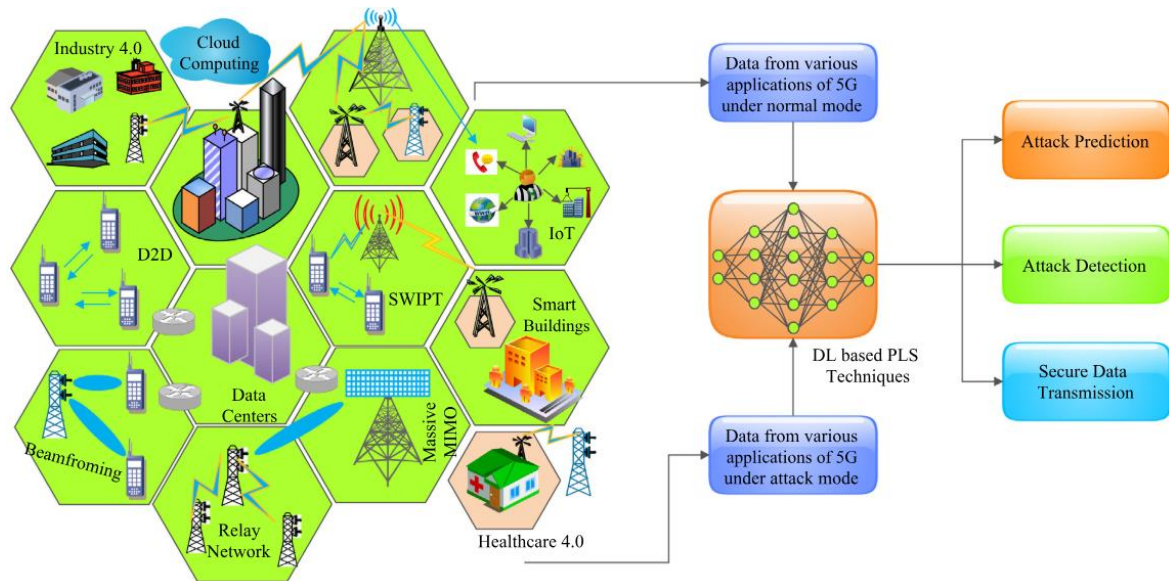
Η από άκρο σε άκρο ασφάλεια αποτελεί μείζον ζήτημα στις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες, καθώς η αδιάκοπη συνδεσιμότητα και η υψηλή ταχύτητα αφενός βελτιώνουν σημαντικά την μεταφορά δεδομένων αλλά αφετέρου επιφέρουν διάφορες προκλήσεις για την ιδιωτικότητα του δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι που κατά καιρούς απασχολούν τη διεθνή ερευνητική κοινότητα σχετικά με την ασφάλεια των συστημάτων τηλεπικοινωνιών. Ένας από αυτούς είναι και η ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer Security – PLS), η οποία έχει αναγνωριστεί ως μια πιθανή προσέγγιση για την επίτευξη εμπιστευτικότητας στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιώντας την εγγενή τυχαιότητα των ασύρματων επικοινωνιών. Παρόλο που αποτελεί έναν ενεργό τομέα έρευνας για αρκετά χρόνια, δεν έχει κατορθώσει ακόμα να ενσωματώσει αποδείξεις ασφαλείας σε τυποποιημένα πλαίσια. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορες προκλήσεις που κατακλύζουν το φυσικό επίπεδο, όπως η μεταβλητότητα και οι αβεβαιότητες στο κανάλι διάδοσης ραδιοσυχνοτήτων, οι παραλλαγές της συσκευής και η διαχείριση καταναμημένων μυστικών κλειδιών για τεράστιο όγκο συσκευών.

Οι πιο γνωστή μέθοδος PLS έως τώρα σχετίζεται με την υλοποίηση κρυπτογραφημένων φυσικών επιπέδων μέσω συστημάτων ευρέως φάσματος. Στον τομέα του χρόνου αυτό επιτυγχάνεται με το φάσμα διασποράς άμεσης ακολουθίας. Τα δείγματα χρόνου ενός εκπεμπόμενου σήματος κωδικοποιούνται με κωδικές εξάπλωσης που έχουν μήκος πολύ μεγαλύτερο από μια περίοδο bit. Εάν οι κωδικοί διασποράς είναι μυστικοί ή κρυπτογραφημένοι, το σύστημα αυτό παρέχει έλεγχο ταυτότητας και εμπιστευτικότητα στο φυσικό επίπεδο καθώς επίσης και ιδιότητες κατά της πλαστογράφησης. Υπό παρόμοιο πλαίσιο αναπτύσσεται και το φάσμα πολλαπλών φορέων για τον τομέα των συχνοτήτων. Εδώ τα υποφέροντα ενός σήματος είναι αυτά που κωδικοποιούνται με κωδικούς διασποράς. Εκμεταλλεύεται τόσο την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) όσο και την πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA), παρέχοντας καλή φασματική απόδοση και ανθεκτικότητα σε εξασθένιση και παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών.

Με την εγκαθίδρυση των δικτύων 5G και του συνεπακόλουθου νέου φυσικού στρώματος NR, τα συστήματα επικοινωνιών έγιναν πιο ευάλωτα σε επιθέσεις και η ανάγκη για τεχνικές ασφαλείας προσέδρασε εκ νέου αυξημένο ενδιαφέρον. Τα δεδομένα των χρηστών

διατηρούνται πλέον σε βάσεις δεδομένων που ανήκουν σε παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Ο αριθμός του εξοπλισμού χρηστών (User Equipment – UE), των υπηρεσιών και της ετερογένειας των συνδεδεμένων UE αυξάνονται συνεχώς. Δημιουργούνται νέες απαιτήσεις για την υποστήριξη τεχνολογιών IoT. Οι περισσότερες εφαρμογές 5G είναι αποκεντρωμένες, πράγμα που σημαίνει ότι τα UE μπορούν να ενταχθούν ή να αποχωρήσουν από το δίκτυο ανά πάσα στιγμή. Όλα αυτά σχηματίζουν ένα νέο σύνολο απειλών και ανησυχιών για την ασφάλεια των σημερινών δικτύων, καθώς η διανομή και η διαχείριση των κρυπτογραφικών κλειδιών γίνεται εξαιρετικά δύσκολη. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα, ανακαλύφθηκαν πιο εξελιγμένες τεχνικές PLS, οι οποίες δεν εξαρτώνται από την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Μερικές από αυτές είναι οι εξής: έγχυση τεχνητού θορύβου για την υποβάθμιση της ποιότητας του σήματος στους eavesdroppers, ασφαλής διαμόρφωση δέσμης για την εξάλειψη της λήψης σήματος στους eavesdroppers, αυτόματη ταξινόμηση διαμόρφωσης για ανίχνευση εισβολής και δακτυλικό αποτύπωμα ραδιοσυχνότητας.

Ωστόσο, η εισαγωγή ακόμη πιο νέων τεχνολογιών στα συστήματα επικοινωνιών και η επέλαση των 5G και 6G δικτύων επιφέρουν νέες απειλές στο φυσικό επίπεδο. Για παράδειγμα, το massive MIMO απαιτεί σωστές τιμές πληροφοριών κατάστασης καναλιού (Channel State Information – CSI) για αποτελεσματική διαμόρφωση δέσμης σε ασύρματα δίκτυα. Ένας πιλοτικός παρεμβολέας, ο οποίος αναπαράγει και παρέχει τα ίδια πιλοτικά σήματα με τους εξουσιοδοτημένους χρήστες, δύναται να διαταράξει την εκτίμηση καναλιού κατά τη φάση εκπαίδευσης καναλιού και μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα επίπεδα ασφάλειας. Επίσης, το NOMA, που χρησιμοποιείται για τη διευκόλυνση της μαζικής συνδεσιμότητας και της αποτελεσματικότητας του φάσματος, είναι επιρρεπές σε επιθέσεις παρεμβολής και υποκλοπής. Το ενδιαφέρον, λοιπόν, στρέφεται σταδιακά προς την τεχνητή νοημοσύνη. Ειδικότερα η Μηχανική και η Βαθιά Μάθηση θεωρούνται ισχυρές τεχνικές εξερεύνησης δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκμάθηση της κανονικής και μη φυσιολογικής συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων, με βάση τον τρόπο με τον οποίο UE και ΣΒ επικοινωνούν μεταξύ τους. Επιπλέον, καθώς οι τεχνικές DL μπορούν να προβλέψουν αποτελεσματικά μελλοντικές νέες περιπτώσεις μαθαίνοντας από τις τρέχουσες, μπορούν να προβλέψουν αποτελεσματικά και νέες επιθέσεις, οι οποίες είναι συχνά μεταλλάξεις προηγούμενων επιθέσεων. Ο κύριος στόχος των αλγορίθμων ML και DL είναι να συλλάβουν μοτίβα από το διαθέσιμο περιορισμένο σύνολο δεδομένων και στη συνέχεια να δημιουργήσουν ένα μοντέλο για να κατηγοριοποιήσουν νέες εισόδους με βάση τα μαθησιακά μοτίβα. Χρησιμοποιούνται πλέον σε πολλές εφαρμογές PLS, όπως η αυτόματη ταξινόμηση διαμόρφωσης, η εκτίμηση καναλιών, η κωδικοποίηση ασφαλούς καναλιού, ο έλεγχος ταυτότητας φυσικού στρώματος και ο εντοπισμός των επιθέσεων παρεμβολής. Η τελευταία αυτή εφαρμογή θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενα κεφάλαια, καθώς αποτελεί και τον βασικό στόχο της παρούσας εργασίας [22],[23].



Εικόνα 3.9: Ασφάλεια Φυσικού Στρώματος μέσω Deep Learning σε δίκτυα 5G [23]

4. Κυψελωτά Συστήματα Πολλαπλών Κεραιών

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, τα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αποσκοπούν στην επίτευξη της μέγιστης δυνατής ραδιοκάλυψης. Ταυτόχρονα η επίτευξη αυτή πρέπει να συνοδεύεται και από τη βέλτιστη χρήση του φάσματος, χωρίς σπατάλη ισχύος και ενέργειας. Άλλη μία βασική πρόκληση αποτελεί η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος, δηλαδή του αριθμού των ταυτόχρονα εξυπηρετούντων χρηστών. Φυσικά, δεν πρέπει να παραλείπεται και η ποιότητα της εξυπηρέτησης αυτής, η οποία έχει διττή απεικόνιση στο σύστημα. Από τη μία σχετίζεται με την κάλυψη των αναγκών των χρηστών και την QoS, ενώ από την άλλη σχετίζεται με την εξασφάλιση διατήρησης της επικοινωνίας κατά την κίνηση μεταξύ γεωγραφικών ζωνών. Όλα τα παραπάνω ήταν αδύνατο να ικανοποιηθούν από τα συμβατικά συστήματα και ως εκ τούτου οι Επιτροπές Τηλεπικοινωνιών ακολούθησαν την πολλά υποσχόμενη κυψελωτή προσέγγιση.

Τα κυψελωτά συστήματα αποτελούνται από πολλούς πομπούς μικρής ισχύος -αντί για έναν ισχυρό πομπό- καθένας από του οποίους καλύπτει ένα μικρό τμήμα της περιοχής εξυπηρέτησης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος που λέγεται κυψέλη (cell). Ο σταθμός βάσης που αντιστοιχεί σε κάθε κυψέλη αντιστοιχίζεται σε ένα μέρος των συνολικών ραδιοδιαύλων. Η χωρική κατανομή των σταθμών βάσης στις κυψέλες και η φασματική κατανομή των ομάδων συχνοτήτων στους σταθμούς βάσης γίνεται με γνώμονα την **επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων**. Στο πλαίσιο αυτό, γειτονικοί ΣΒ λαμβάνουν διαφορετικές ομάδες διαύλων, ώστε όλοι οι διαθέσιμοι δίαυλοι να κατανέμονται σε μικρό αριθμό γειτονικών ΣΒ. Ως αποτέλεσμα οι συχνότητες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν όσες φορές χρειάζεται και οι παρεμβολές μεταξύ ΣΒ που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες είναι επαρκώς χαμηλές. Είναι σαφές πως ο αριθμός των χρηστών του συστήματος είναι ανάλογος του αριθμού των σταθμών βάσης και αντιστρόφως ανάλογος της εκπεμπόμενης ισχύος αυτών, πράγμα που σημαίνει ότι η αύξηση της χωρητικότητας δεν επιφέρει αύξηση και στο φάσμα [4].

4.1 Κυψελωτή Δομή και Βασικές Σχέσεις

Σε κάθε ασύρματο δίκτυο υπάρχουν ομάδες γειτονικών κυψελών, με κάθε ομάδα να αποτελείται από K κυψέλες. Κάθε μία από αυτές χρησιμοποιεί n πλήρως αμφίδρομα κανάλια. Κάθε ομάδα με αυτά τα χαρακτηριστικά ονομάζεται συστάδα (cluster). Επομένως, σε μία συστάδα ο συνολικός αριθμός καναλιών που περιέχει είναι: $S = n \cdot K$, ενώ η συνολική ζώνη συχνοτήτων που της αντιστοιχεί προκύπτει ως το άθροισμα των ζωνών συχνοτήτων που έχει καταναμηθεί στις K κυψέλες. Αν η συστάδα επαναλαμβάνεται M φορές στην τοπολογία, τότε η συνολική χωρητικότητα του συστήματος σε αριθμό καναλιών ισούται με:

$$C = M \cdot n \cdot K$$

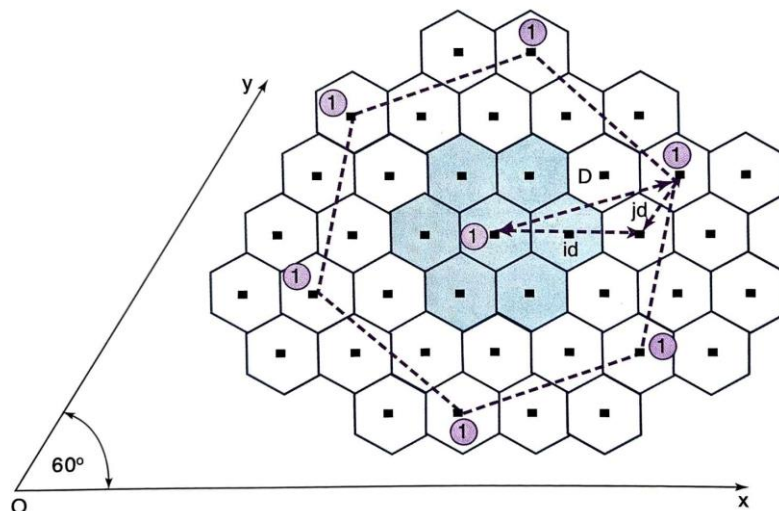
Ο αριθμός $1/K$ είναι στην πραγματικότητα ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse factor), ο οποίος με τη σειρά του καθορίζει την απόσταση επαναχρησιμοποίησης (reuse distance) D . Το $D = \sqrt{K}$ είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο κυψελών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες, αλλά ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες. Εκτός από το μέγεθος της κυψέλης, η απόσταση επαναχρησιμοποίησης εξαρτάται

φυσικά από άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως η μορφή του περιγράμματος της γεωγραφικής περιοχής, το ύψος της κεραίας και η ισχύς εκπομπής.

Η θεωρητική ραδιοκάλυψη που απορρέει από μία ομοιοκατευθυντική κεραία είναι στην ιδανική περίπτωση κυκλική, με τον σταθμό βάσης να τοποθετείται στο κέντρο του κύκλου. Θεωρώντας δύο διαστάσεις, αφού μέχρι εκεί μπορούμε να μιλήσουμε με σαφή μαθηματική ακρίβεια, το μέγιστο ποσοστό χώρου που μπορεί να καταληφθεί από κύκλους είναι $\pi/12 = 0,9069$. Αυτή είναι και η βέλτιστη πυκνότητα ραδιοκάλυψης που μπορεί να επιτευχθεί και κάτι τέτοιο καθίσταται εφικτό αν χρησιμοποιηθεί εξαγωνικό πλέγμα. Αυτός είναι ο λόγος πίσω από την επικράτηση των εξαγωνικών κυψελών στην σύγχρονη τηλεπικοινωνιακή θεωρία. Έστω, λοιπόν, εξαγωνικές κυψέλες ακτίνας R και διακέντρου $d = \sqrt{3}R$ σε μία τοπολογία σαν αυτή της Εικόνας 4.1. Από το θεώρημα των συνημιτόνων ισχύει: $D = (i \cdot d)^2 + (j \cdot d)^2 - 2(i \cdot d)(j \cdot d)\cos\theta$ και για $\theta=120^\circ$ προκύπτει: $D = (i^2 + i \cdot j + j^2) \cdot d^2$. Αν τα κέντρα όλων των ομοδιαυλικών κυψελών ορίζουν ένα νέο εξάγωνο, τότε αυτό περιέχει τις K κυψέλες της συστάδας και $K/3$ κυψέλες από την συστάδα κάθε μίας από τις περιφερειακές κυψέλες ενδιαφέροντος. Συνολικά, δηλαδή, το μεγάλο εξάγωνο περιέχει $3K$ κυψέλες. Όπως είναι γνωστό, το εμβαδόν ενός κανονικού εξαγώνου είναι ανάλογο του τετραγώνου της πλευράς του και συνεπώς: $3K = \frac{S_D}{S_C} = \frac{D^2}{R^2}$, όπου S_D το εμβαδόν του εξαγώνου με πλευρά D και S_C το εμβαδόν της κυψέλης. Συνδυάζοντας τις προηγούμενες σχέσεις, βρίσκει κανείς ότι:

$$K = i^2 + i \cdot j + j^2 \text{ και } D = R \cdot \sqrt{3K}$$

Σημειώνεται ότι τα i, j λαμβάνουν ακέραιες τιμές, οπότε οι δυνατές τιμές για το K είναι: 1,2,3,4,7,9,12,13,...



Εικόνα 4.1: Κυψελωτό εξαγωνικό σύστημα σε δύο διαστάσεις [4]

Ένα πολύ συχνό φαινόμενο που παρατηρείται στα κυψελωτά δίκτυα είναι αυτό της διαπομπής (handover). Πρόκειται για ένα φαινόμενο απαραίτητο για την ορθή και αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων, το οποίο όμως χρήζει ιδιαίτερης προσοχής κατά την σχεδίαση για να μην λειτουργεί αρνητικά. Η διαπομπή είναι μία διαδικασία μεταγωγής, κατά την οποία η επικοινωνία ενός κινούμενου τερματικού μεταφέρεται από έναν ΣΒ σε έναν

γειτονικό, δηλαδή αλλάζει κυψέλη και συχνότητα. Λαμβάνει χώρα όταν η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος γίνει μικρότερη από το κατώφλι του εκάστοτε συστήματος. Υποθέτοντας ότι η στάθμη αυτή είναι X , τότε η αίτηση για την εκκίνηση της διαπομπής θα πρέπει να γίνεται όταν η ισχύς λήψης φτάνει την τιμή $X+\Delta$. Η ρύθμιση του Δ κατέχει βαρύνουσα σημασία, καθώς εξασφαλίζει τις επιτυχείς διαπομπές, τον περιορισμό των μη αναγκαίων διαπομπών και τον έλεγχο της κίνησης εντός κάθε κυψέλης. Μία μεγάλη τιμή για το Δ ισοδυναμεί με μεγάλο χρόνο υπέρβασης του κατωφλίου X , μέσα στον οποίο ενδέχεται να αλλάξει η εικόνα του συστήματος και του κινητού και να μην χρειάζεται πια διαπομπή. Μία μικρή τιμή του Δ στον αντίποδα, εγκυμονεί τον κίνδυνο να χαθούν κλήσεις αν δεν προλαβαίνουν να γίνουν οι διαπομπές. Βέλτιστη επιλογή, λοιπόν, αποτελεί η δυναμική ρύθμιση του Δ , που συνυπολογίζει την ταχύτητα του κινητού και τον εκθέτη απωλειών διαδρομής. Εν γένει, υπάρχουν δύο είδη διαπομπών:

- Σκληρή διαπομπή (hard handoff): αποκοπή της επικοινωνίας προτού αποκατασταθεί από τον νέο ΣΒ
- Ήπια διαπομπή (soft handoff): διαφορική λήψη στο κινητό και στο δίκτυο ταυτόχρονα από τον αρχικό και τελικό ΣΒ

4.2 Ραδιοκάλυψη

Όπως προαναφέρθηκε, ο αντικειμενικός σκοπός των συστημάτων κινητών επικοινωνιών συγκεντρώνεται γύρω από την έννοια της ραδιοκάλυψης. Εμβαθύνοντας στον όρο αυτό, οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών δίνουν την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ κινητών χρηστών ή κινητών χρηστών και σταθερών δικτύων, οποιαδήποτε χρονική στιγμή και σε οποιαδήποτε θέση. Δημιουργούν, λοιπόν, πολλά υποδίκτυα τα οποία συνδέονται μέσω ενός ενσύρματου δικτύου και ρυθμίζουν την κάλυψη με την κατάλληλη τοποθέτηση σταθμών βάσης. Ωστόσο, η κάλυψη παρουσιάζει διαφορές ανάλογα με την συγκέντρωση χρηστών, τις γεωγραφικές συνθήκες και τις απαιτήσεις. Για να ικανοποιηθούν σωστά οι εκάστοτε προδιαγραφές τα δίκτυα χρησιμοποιούν διαφορετικού τύπου κυψέλες, μεταξύ των οποίων:

- Μεγάλες κυψέλες (megacells): χρησιμοποιούνται σε δορυφορικά συστήματα και καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.
- Μακροκυψέλες (macrocells): χαρακτηρίζονται από ακτίνα $> 1\text{km}$ και καλύπτουν περιοχές με μέση ή χαμηλή πυκνότητα χρηστών, συνήθως αγροτικές. Ο ΣΒ τους εκπέμπει υψηλή ισχύ και υποφέρει ελάχιστα από απώλειες διαδρομής, πετυχαίνοντας παρόμοια ποιότητα σε ανοδική και καθοδική ζεύξη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές ως κυψέλη – ομπρέλα, η οποία καλύπτει τα κενά μεταξύ των μικρότερων κυψελών και δρα ενισχυτικά στις διαπομπές, σε μία πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική.
- Μικροκυψέλες (microcells): προτιμώνται σε περιοχές με μεγαλύτερη πυκνότητα συνδρομητών και εκτείνονται σε ακτίνα $< 1\text{km}$, ενώ διακρίνονται ανάλογα με τις διαστάσεις τους σε σταυροειδείς μισού ή πλήρους τετραγώνου και ευθύγραμμες. Τόσο ο ΣΒ όσο και το κινητό τερματικό εκπέμπουν χαμηλή ισχύ και τα ραδιοκύματα μεταδίδονται κατά μήκος των δρόμων. Το περιβάλλον αυτό παρουσιάζει μικρή διασπορά καθυστέρησης με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλών ρυθμών δεδομένων.

- ο Πικοκυψέλες (picocells): εξασφαλίζουν ασύρματη κάλυψη εσωτερικών χώρων ή περιοχών υψηλής πυκνότητας τηλεπικοινωνιακής κίνησης (hot-spots) και έχουν ακτίνα κάλυψης της τάξης των 10m.

Η μείωση της ακτίνας των κυψελών αναφέρεται γενικά ως διάσπαση κυψελών και είναι ο βασικός τρόπος αντιμετώπισης της εξυπηρέτησης υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Ωστόσο, αυξάνουν τον απαιτούμενο αριθμό σταθμών βάσης και συνεπώς το κόστος ανάπτυξης και κλιμάκωσης του δικτύου, ενώ προκαλούν επίσης και περισσότερες διαπομπές. Μία τεχνική που χρησιμοποιείται προς επίλυση των παραπάνω ζητημάτων είναι η τομεοποίηση κυψελών. Κάθε κυψέλη διαχωρίζεται ακτινικά σε τομείς, συνήθως 120° ή 60°, τοποθετώντας κατευθυντικές κεραιές στους ΣΒ. Σε κάθε έναν από τους τομείς του ίδιου ΣΒ εκχωρείται ένα ξένο υποσύνολο καναλιών. Παρόλο που ο αριθμός των ΣΒ είναι τώρα πιο περιορισμένος, αυξάνεται το πλήθος των κεραιών που διαθέτουν. Το αντίτιμο αυτό, όμως, αντισταθμίζεται από τις μειωμένες διαπομπές, καθώς οι σύγχρονοι ΣΒ επιτρέπουν τις διαπομπές των κινητών μεταξύ τομέων της ίδιας κυψέλης χωρίς την εμπλοκή του κέντρου μεταγωγής.

Τα τελευταία χρόνια, όπως τονίστηκε και στην εισαγωγή της εργασίας, η τηλεπικοινωνιακή κίνηση παρουσιάζει εκθετική αύξηση την οποία οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν μπορούν να ακολουθήσουν. Σε μία προσπάθεια ανακάλυψης νέων καινοτόμων τεχνικών αύξησης της χωρητικότητας χωρίς ενεργειακή επιβάρυνση έχει προταθεί η χρήση femtocells. Είναι κυψέλες με πολύ μικρή περιοχή κάλυψης που εγκαθίστανται στον τελικό καταναλωτή, ο οποίος με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο κορμού. Υποστηρίζονται από μικρούς, οικονομικούς και με χαμηλή ισχύ σταθμούς βάσης, οι οποίοι μπορούν να κάνουν χρήση μίας ή περισσότερων τεχνικών ραδιοπρόσβασης. Ανάμεσά τους και η δυναμική ραδιοπρόσβαση μέσω κατάλληλων αλγορίθμων. Φυσικά, και αυτά τα συστήματα παρουσιάζουν προβλήματα με κυριότερα την διαχείριση των παρεμβολών και της κινητικότητας. Μία άλλη τεχνική που κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος στην κυψελωτά συστήματα είναι η χρήση ευφυών κεραιών (smart antennas). Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας αυτών. Αφενός, η κεραία επεμβαίνει στην αρχιτεκτονική και παρακολουθεί τα τερματικά μέσα στην ραδιοκάλυψη ώστε να παράγει τις κατάλληλες πολλαπλές ανεξάρτητες δέσμες. Αφετέρου, η κεραία επιλέγει συνεχώς την καλύτερη δέσμη για εκπομπή και λήψη με βάση τον σηματοθορυβικό λόγο. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται σημαντικά και οι παρεμβολές.

4.3 Παρεμβολές στα Ασύρματα Κυψελωτά Συστήματα

Η ασύρματη επικοινωνία πλήττεται κατά κύριο λόγο από δύο φαινόμενα. Το ένα από αυτά είναι ο θόρυβος, ο οποίος είναι συνυφασμένος περισσότερο με σταθερές συνδέσεις σημείου προς σημείο και μελετήθηκε διεξοδικά στα προηγούμενα κεφάλαια. Θεωρώντας τώρα ένα περιβάλλον στο οποίο πομπός και δέκτης τίθενται σε κίνηση, ο μείζον ανασταλτικός παράγοντας για την ποιότητα επικοινωνίας έγκειται στις διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών. Όταν μάλιστα συνυπάρχουν στο ίδιο σύστημα πολλοί πομποδέκτες που μοιράζονται κοινούς ή παραπλήσιους διαύλους τότε αναδύεται το φαινόμενο των παρεμβολών. Οι παρεμβολές προέρχονται από κινητά τερματικά που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη, από κλήσεις που εκτυλίσσονται σε γειτονικές κυψέλες είτε από σταθμούς βάσης που εκπέμπουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, δηλαδή από στοιχεία και διαδικασίες που εισάγουν ανεπιθύμητες

ενέργειες στη ζώνη συχνοτήτων του διαύλου. Τα αποτελέσματα των παρεμβολών είναι επίσης πολυδιάστατα, με χαρακτηριστικές περιπτώσεις την διαφωνία σε δίαυλο φωνής, την απόρριψη κλήσεως, την διακοπή της σύνδεσης, την εισαγωγή καθυστέρησης μετάδοσης ή την απώλεια πακέτων.

Ο πιο συχνός τύπος παρεμβολών είναι η **ομοδιαλυτική παρεμβολή (Co-Channel Interference – CCI)**, η οποία αποτελεί απότοκο της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας και αναπτύσσεται μεταξύ διαύλων ίδιας συχνότητας που λειτουργούν σε διαφορετικές θέσεις της περιοχής κάλυψης. Για να είναι δυνατός ο περιορισμός μίας τέτοιας παρεμβολής, προηγείται η ποσοτικοποίησή της, η οποία γίνεται με τον λόγο σήματος προς παρεμβολή εκφρασμένο με τη βοήθεια της λαμβανόμενης ισχύος ως εξής:

$$\frac{S}{I} = \frac{P_S}{P_I}$$

Ο στόχος είναι ο λόγος αυτός να υπερβαίνει μία οριακή τιμή T , διαφορετική για κάθε υπηρεσία, σύμφωνα με τον επιθυμητό βαθμό εξυπηρέτησης και την ανεκτή πιθανότητα διακοπής. Για τα κυψελωτά συστήματα ορίζεται σε γενικές γραμμές περίπου στα 18 dB για το 90% της περιοχής κάλυψης. Πρωταρχικό μέσο για την επίτευξη του στόχου είναι η σχεδίαση των συστημάτων με την κατάλληλη απόσταση επαναχρησιμοποίησης για την αντίστοιχη ακτίνα κυψέλης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην γενική περίπτωση, κατά την σχεδίαση του κυψελωτού συστήματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο θόρυβος στον ανωτέρω λόγο. Άρα προκύπτει η συνολική έκφραση για k παρεμβάλλοντες πομπούς στον δέκτη:

$$SNIR = \frac{S}{N_0 + I} = \frac{S}{N_0 + \sum I_k}$$

Υπάρχουν διάφοροι ρυθμιστικοί παράγοντες με τους οποίους μπορεί κανείς να αποφύγει την υπέρμετρη CCI:

- Περισσότερες κυψέλες στην ομάδα επαναχρησιμοποίησης ώστε να αυξηθεί το D
- Προσοχή στην κατανομή καναλιών και δυναμική ανάθεση πόρων
- Κατευθυντικές κεραιές με τομεοποίηση για μείωση των παρεμβαλλουσών κυψελών
- Χρησιμοποίηση διαφορικής λήψης

Ένα άλλο συχνό πρόβλημα είναι η μερική επικάλυψη της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού σήματος με άλλα ανεπιθύμητα. Αυτό εκφράζεται ως **παρεμβολή γειτονικών διαύλων (Adjacent Channel Interference – ACI)** και μπορεί να ελεγχθεί λίγο πιο εύκολα. Γειτονικός θεωρείται ένας δίαυλος που είναι ο πλησιέστερος φασματικά στην ίδια κυψέλη του διαύλου ενδιαφέροντος. Ο βαθμός κατά τον οποίο η ACI επηρεάζει την επίδοση του συστήματος εξαρτάται από την απόσταση των γειτονικών διαύλων, την απόκριση των φίλτρων εισόδου στο δέκτη και κατ' επέκταση την επιλεκτικότητα του τελευταίου καθώς και την στατιστική κατανομή του λόγου των δύο σημάτων. Η παρεμβολή γειτονικών διαύλων μπορεί να μετριαστεί αν αυτοί απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με: $\frac{|f_2 - f_1|}{W}$, όπου W το εύρος ζώνης του διαύλου.

Σημαντικά προβλήματα εισάγει ενίοτε και η **ενδοδιαμόρφωση (Intermodulation – IM)**. Δεδομένου ότι το σήμα εισόδου αποτελεί άθροισμα N συχνοτήτων, κρίνεται απαραίτητη η διέλευση του από ενισχυτή ή περιοριστή ισχύος. Τα στοιχεία αυτά, όμως, είναι μη γραμμικά και επομένως εισάγουν όρους ενδοδιαμόρφωσης. Και σε αυτή την περίπτωση το κλειδί

βρίσκεται στην ορθή κατανομή καναλιών, ώστε η συχνότητα που αποτελεί προϊόν ενδοδιαμόρφωσης να μην συμπίπτει με άλλη φέρουσα στη ζώνη λήψης. Γι' αυτό δημιουργούνται ζώνες διαχωρισμού εκπομπής – λήψης.

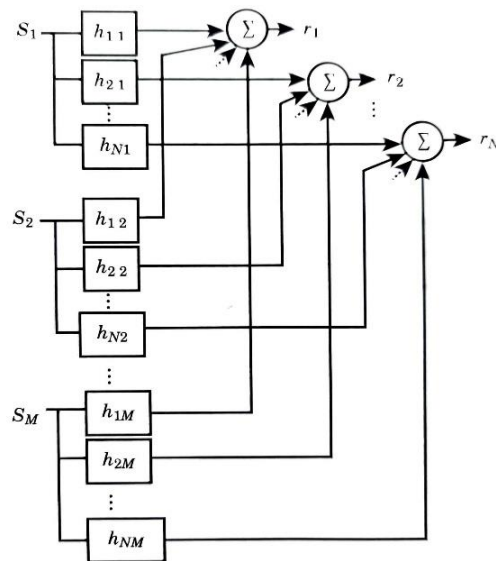
Τα ζητήματα των παρεμβολών συμπληρώνονται με την παρουσία της **διασυμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference – ISI)**. Η αιτία πίσω από αυτή είναι άλλοτε η μεγάλη εξάπλωση της χρονοκαθυστέρησης σε μέσο που υφίστανται πολυδιαδρομική διάδοση και άλλοτε ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί χρειάζεται κατάλληλη επιλογή παλμών μορφοποίησης και παραμορφωτικών διατάξεων ενίσχυσης και φίλτραρίσματος, με σκοπό ο ρυθμός μετάδοσης ψηφίων να μην ξεπερνά την χρονική διασπορά σύμφωνα με τη σχέση: $R_b < \frac{1}{2\tau_d}$ [4].

4.4 Νέες τεχνολογίες Φυσικού στρώματος στα Κυψελωτά συστήματα

Η ραγδαία ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων σε συνδυασμό με τον πολλαπλασιασμό των ασύρματων συσκευών και υπηρεσιών πυροδοτούν συνεχώς νέες τεχνικές και επιτεύγματα για την τηλεπικοινωνιακή κοινότητα. Παρακάτω περιγράφονται οι βασικότερες τεχνολογίες φυσικού στρώματος που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες και επιδιώκουν την υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υψηλής ποιότητας, οπουδήποτε και οποτεδήποτε.

4.4.1 Τεχνολογία Πολλαπλής Εισόδου – Πολλαπλής Εξόδου (MIMO)

Οι διατάξεις MIMO ξεκίνησαν ως ένας τρόπος καταπολέμησης των πολλαπλών οδεύσεων, αφού τις εκμεταλλεύτηκαν μετατρέποντας ένα κανάλι μετάδοσης σημείο-προς-σημείο σε πολλαπλά, παράλληλα κανάλια. Ένα κεραιοσύστημα $M_T \times M_R$ MIMO ανήκει στην κατηγορία των ευφών κεραιών και αποτελείται από M_T κεραιές εκπομπής και M_R κεραιές λήψης. Κάθε κεραιά λήψης βλέπει μία υπέρθεση όλων των εκπεμπόμενων σημάτων, με τουλάχιστον ένα αντίγραφο κάθε σήματος - διαδρομής να μην έχει υποστεί έντονη εξασθένιση ώστε να μπορεί να ανακτηθεί επαρκώς. Η ιδιαιτερότητα του έγκειται στην χρησιμοποίηση χώρο-χρονικής επεξεργασίας σήματος, η οποία δρα ενισχυτικά στην χωρητικότητα και βελτιώνει το BER, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα εξαιρετική αποδοτικότητα εύρους ζώνης και ισχύος. Με άλλα λόγια, απαλλάσσουν τον δέκτη από κάθε μεταβατικό φαινόμενο στην έναρξη ή την λήξη του σήματος, έτσι ώστε να απομένει μία απόκριση μόνιμης κατάστασης που εμπεριέχει διάφορα κέρδη.



Εικόνα 4.2: Block Διάγραμμα για MxN MIMO κανάλι [24]

Ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται και την διάταξή τους, υπάρχουν τρία διαφορετικά συστήματα με παρόμοια λογική:

- Μίας εισόδου πολλαπλών εξόδων (Single Input Multiple Output – SIMO)
- Πολλαπλών εισόδων μίας εξόδου (Multiple Input Single Output – MISO)
- Πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output – MIMO)

Η γενική μαθηματική μοντελοποίηση μίας τέτοιας ζεύξης είναι:

$$r = H \cdot s + n$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix}$$

όπου n είναι ένα διάνυσμα θορύβου AWGN. Ο πίνακας H ονομάζεται πίνακας συντελεστών του καναλιού ή πίνακας κέρδους μόνιμης κατάστασης και αποτελείται από μιγαδικές αποκρίσεις h_{ij} για κάθε πιθανό συνδυασμό διαύλων μεταξύ της κεραιάς εκπομπής i και της κεραιάς λήψης j . Σε περίπτωση ντετερμινιστικού καναλιού ο πίνακας H είναι σταθερός κάθε στιγμή και μπορεί να γίνει γνωστός τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Αν το κανάλι είναι τυχαίο τότε χρησιμοποιούνται μοντέλα εξασθένισης Rayleigh και ο πίνακας κέρδους είναι γνωστός μόνο στον δέκτη. Αυτός τον αποστέλλει στον πομπό μέσω ενός καναλιού ανατροφοδότησης, ώστε να του κοινοποιήσει τις Πληροφορίες Κατάστασης Καναλιού (Channel State Information – CSI).

Όπως ειπώθηκε λίγο πριν, το πλεονέκτημα των συστημάτων MIMO είναι η εισαγωγή κερδών στο κανάλι. Ένα από αυτά είναι το κέρδος συστοιχίας (array gain) που προκύπτει από την διαμόρφωση δέσμης (beamforming) είτε στην πλευρά του πομπού είτε στον δέκτη. Σε αυτή την τεχνική, το ίδιο σύμβολο αποστέλλεται από κάθε κεραιά εκπομπής με βάρη v_i και λαμβάνεται από κάθε κεραιά λήψης με βάρη u_i , τα οποία κανονικοποιούνται με αποτέλεσμα ο πίνακας συνδιακύμανσης εισόδου και εξόδου να έχει μοναδιαία τάξη. Σε μία πιο φυσική προσέγγιση, η διαμόρφωση δέσμης αποτελεί ουσιαστικά μία τεχνική κατευθυντικής

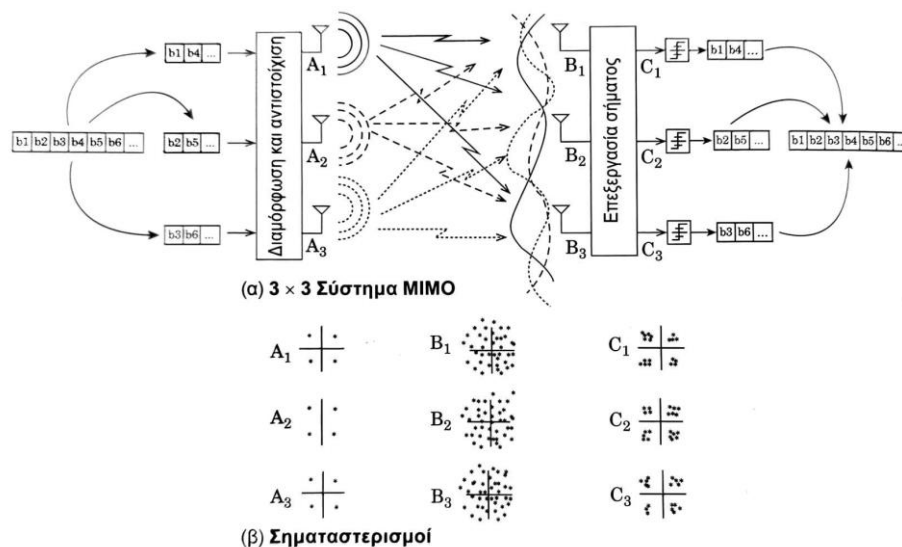
μετάδοσης, η οποία ενισχύει το διάγραμμα ακτινοβολίας προς κάποιες κατευθύνσεις και το καταπιέζει προς τις υπόλοιπες. Έτσι, πετυχαίνει αύξηση του μέσου SNR λήψης κατά:

$$SNR_{out} = \frac{M_R \cdot E \cdot |h|^2 \cdot \sigma_s^2}{\sigma_n^2} = M_R \cdot SNR_{in}$$

όπου σ_s , σ_n η μέση ισχύς των σημάτων εκπομπής και θορύβου αντίστοιχα και $E|h|^2$ το μέσο κέρδος ισχύος για το σύνολο των πολλαπλών διαδρομών [1].

Πολύ σημαντική κρίνεται επίσης και η συνεισφορά του κέρδους διαφοροποίησης (diversity gain) και συγκεκριμένα αυτού που προκύπτει από χωρική διαφοροποίηση κατά τον συνδυασμό των ίδιων σημάτων από πολλαπλά, ανεξάρτητα κανάλια διαλείψεων. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι που εξασφαλίζουν πλήρη ή μερική ανεξαρτησία των καναλιών, με επικρατέστερη στα συστήματα MIMO να είναι η διαφορική προστασία χώρου και χρόνου. Μέσω αυτής της τεχνικής το σύστημα στοχεύει στην διάθεση αντιγράφων του σήματος σε L τέτοια κανάλια, με το L να αναφέρεται και ως τάξη διαφοροποίησης. Ενώ με το κέρδος συστοιχίας αυξήσαμε τη μέση στάθμη του σήματος, με το κέρδος διαφοροποίησης πετυχαίνουμε την μείωση της διακύμανσης της στάθμης αυτής και άρα και της πιθανότητας διάλειψης. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για κάποιο απαιτούμενο BER, όσο αυξάνεται το L τόσο μικρότερο γίνεται το αναγκαίο SNR λειτουργίας. Για διαλείψεις Rayleigh η αναλογία αυτή είναι: $P_B^L \propto SNR^{-L}$.

Στα πιο εξελιγμένα συστήματα χρησιμοποιείται διαφοροποίηση και στην εκπομπή αλλά και στην λήψη με κατάλληλη επεξεργασία σήματος, βελτιώνοντας διπλά την απόδοση επικοινωνίας. Το εν λόγω σχήμα ονομάζεται χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing) ή υπερ-διαφοροποίηση (hyper-diversity). Σε αντιδιαστολή με τις δύο προαναφερθείσες τεχνικές, εδώ αποστέλλονται διαφορετικές ροές δεδομένων – πληροφορίες, οι οποίες υπόκεινται διαφορετικές κωδικοποιήσεις προκειμένου να ληφθούν από τις πολλαπλές κεραίες του δέκτη και να διαχωριστούν ύστερα από επεξεργασία σήματος. Η ακριβής διαδικασία περιγράφεται στην κάτωθι Εικόνα.



Εικόνα 4.3: Block Διάγραμμα και βασικά σημεία χωρικής πολυπλεξίας MIMO [24]

Παρατηρείται ότι η σειριακή ροή ψηφίων μετατρέπεται σε παράλληλες ακολουθίες, ισάριθμες με τον αριθμό των κεραιών εκπομπής, οι οποίες σχηματίζουν τα αντίστοιχα σύμβολα διαμόρφωσης. Τα σύμβολα μεταδίδονται στον δίαυλο μέσω πολλαπλών διαδρομών και κάθε

κεραία του δέκτη λαμβάνει την υπέρθεση όλων των συμβόλων. Εκεί λαμβάνει χώρα μία πολύπλοκη επεξεργασία σήματος που ολοκληρώνεται με την εκτίμηση των συμβόλων εκπομπής ως εξής: $\hat{s} = H^{-1} \cdot r$. Από την τελευταία σχέση είναι σαφές ότι προαπαιτούμενο της χωρικής πολυπλεξίας είναι η γνώση του πίνακα συντελεστών. Παρόλο που πρόκειται για μία πολύπλοκη διαδικασία, πετυχαίνει πολύ καλή εκμετάλλευση του εύρους ζώνης χωρίς να καταναλώνει περισσότερη ισχύ. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχει αναπτυχθεί και τεχνική προσαρμοστικού MIMO (adaptive MIMO Switching) η οποία επιτρέπει την εναλλαγή των τεχνικών ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στο ασύρματο περιβάλλον.

Αρρηκτα συνυφασμένη με τις τεχνικές χώρο-χρονικής κωδικοποίησης και πολυπλεξίας είναι και η επιλογή του κατάλληλου δέκτη. Οι πλέον αποδοτικοί δέκτες που έχουν αναπτυχθεί για την βέλτιστη ανάκτηση πληροφορίας στα συστήματα MIMO είναι [18]:

- Δέκτης Μέγιστης Πιθανοφάνειας: $\widehat{s}_{ML} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} \|r - H \cdot s\|^2$
- Δέκτης Zero Forcing: $\widehat{s}_{ZF} = s + (H^H \cdot H)^{-1} \cdot H^H \cdot n$
- Δέκτης Ελάχιστου Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος: $\widehat{s}_{MMSE} = s + (H^H \cdot H + \frac{M_T}{SNR})^{-1} \cdot H^H \cdot n$
- Δέκτης Διατεταγμένης Διαδοχικής Ακύρωσης Παρεμβολής

Σε μία μελέτη για τα συστήματα MIMO δεν μπορεί φυσικά να παραληφθεί η εκτίμηση της χωρητικότητας του καναλιού που αποτελεί αδιαμφισβήτητα ένα από τα κυριότερα ζητήματα προς βελτίωση. Παρακάτω συγκεντρώνονται οι πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις.

Σύστημα	Χωρητικότητα
SISO	$C = B \cdot \log_2[\det(1 + SNR)]$
SIMO	$C = B \cdot \log_2(1 + \frac{P}{\sigma_n^2} \sum_{i=1}^{M_R} h_i ^2)$
MISO	$C = B \cdot \log_2(1 + \frac{P}{M_T \cdot \sigma_n^2} \sum_{j=1}^{M_T} h_j ^2)$
MIMO με ντετερμινιστικό πίνακα H	$C = B \cdot \log_2 \left[\det \left(I_{N_r} + \frac{H R_x H^H}{\sigma_n^2} \right) \right], M_R < M_T$ $C = B \cdot \log_2 \left[\det \left(I_{N_t} + \frac{H^H R_x H}{\sigma_n^2} \right) \right], M_R > M_T$
MIMO με τυχαίο πίνακα H	$C_{erg} = E \left\{ B \cdot \sum_{i=1}^{R_H} \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i P}{M_T \sigma_n^2} \right) \right\}$

Πίνακας 4.1: Χωρητικότητες για διάφορα συστήματα MIMO [18]

4.4.2 Multi-User και Massive MIMO

Η έως τώρα ανάλυση μπορεί να χαρακτηριστεί ως MIMO ενός χρήστη (Single User MIMO – SU-MIMO) καθώς ναι μεν αφορά την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών, επιτρέποντας όμως την επικοινωνία με έναν χρήστη κάθε φορά, αφού δεν μπορούν να εκτελούν από κοινού

υπολογισμούς. Με αφορμή τον περιορισμό αυτό αλλά και τις άλλες προκλήσεις που αναφέρθηκαν εισάχθηκε αργότερα μία νέα έννοια, το MIMO πολλαπλών χρηστών (Multi User MIMO – MU-MIMO). Πυλώνας αυτού είναι μία νέα μορφή διαφοροποίησης με διαμόρφωση δέσμης, η οποία αποτελεί ουσιαστικά έναν τύπο SDMA για ταυτόχρονη πρόσβαση πολλών ανεξάρτητων συσκευών στο σύστημα. Έτσι, επιτυγχάνεται βελτίωση της χωρητικότητας κάθε συσκευής αλλά και του συστήματος σαν σύνολο. Όσον αφορά την σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος, η ζεύξη ανόδου παρουσιάζει παρόμοια δομή με την περίπτωση των SU-MIMO. Η κατεύθυνση downlink, όμως, αποτελεί ένα λίγο πιο καινοτόμο πεδίο. Όπως είναι γνωστό, κάθε χρήστης έχει γνώση μόνο των δικών του παραμέτρων διάδοσης και δεν μπορεί να συνεργαστεί με τους υπόλοιπους, τους οποίους βλέπει ως παρεμβολή. Η ευθύνη μορφοποίησης του σήματος, λοιπόν, εναπόκειται στον πομπό ώστε να ελαχιστοποιήσει την παρεμβολή σε κάθε χρήστη. Αυτό είναι δυνατό με από κοινού σχεδιασμό της διαμόρφωσης και κωδικοποίησης από το επίπεδο φυσικού στρώματος (Physical Layer – PHY) και το κανάλι πολλαπλής πρόσβασης του επιπέδου σύνδεσης. Συγκεκριμένα, η διαμόρφωση δέσμης αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση της εκπομπής προς μία κατεύθυνση, ελαχιστοποιώντας την προς οπουδήποτε αλλού. Έτσι, σχηματίζονται ταυτόχρονες ροές δεδομένων από ή προς διαφορετικές συσκευές (χωρική επαναχρησιμοποίηση) αυξάνοντας την ρυθμιαπόδοση (throughput) σε κάθε διαδρομή αλλά και σε όλο το δίκτυο [24].

Λίγα χρόνια αργότερα, η ιδέα πίσω από το MU-MIMO ερευνήθηκε περαιτέρω και οδήγησε στην ανάπτυξη του massive MIMO (mMIMO), το οποίο έχει συνδεθεί με την έλευση των υψηλών συχνοτήτων του 5G. Ο λόγος πίσω από αυτό είναι η εκθετική αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών και των διακινούμενων δεδομένων τις οποίες τα παραδοσιακά συστήματα MIMO δεν είναι σε θέση να διαχειριστούν. Το mMIMO χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιών με μεγάλο αριθμό κεραιών -συνήθως 64 ή 128- στο σταθμό βάσης ακριβώς για να μπορεί να εξυπηρετεί δεκάδες χρήστες ταυτόχρονα. Για την ακρίβεια υπάρχουν δύο τρόποι οργάνωσης ενός τέτοιου συστήματος [25]:

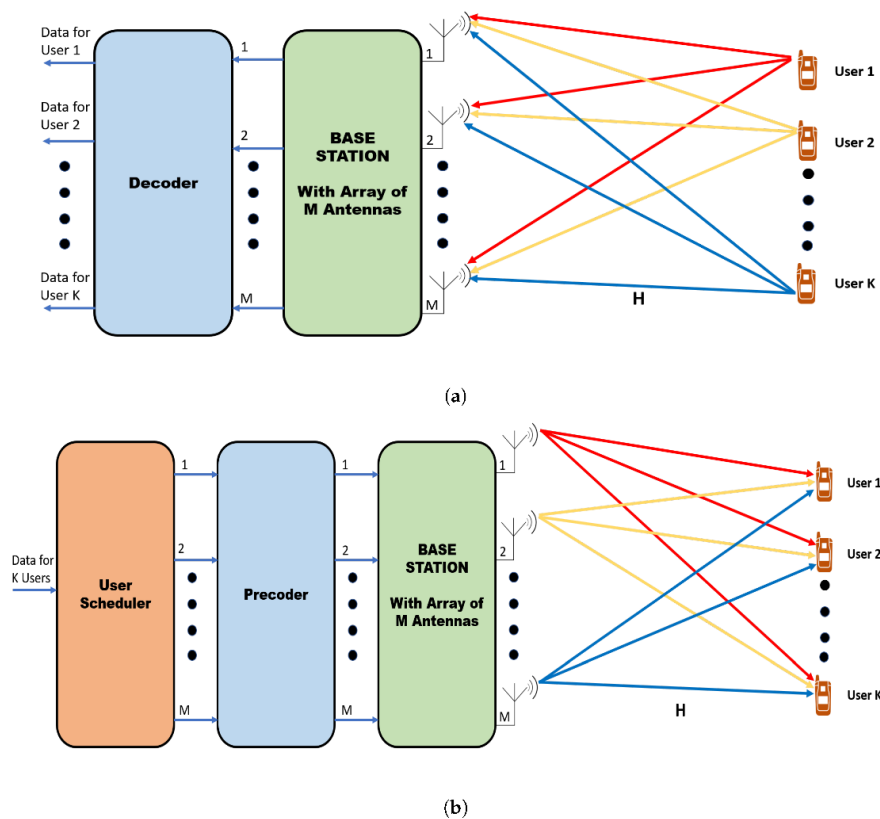
- **Centralized mMIMO:** χρησιμοποιούν μια συμπαγή συστοιχία κεραιών μεγάλης κλίμακας στο ΣΒ και έχουν το πλεονέκτημα των χαμηλών απαιτήσεων γενικής χρήσης και μπροστινής μεταφοράς κοινής χρήσης δεδομένων.
- **Distributed mMIMO:** βασίζονται σε μεγάλο αριθμό κεραιών γεωγραφικά απλωμένων σε μια κυψέλη, που συνδέονται μέσω συνδέσμων backhaul υψηλής χωρητικότητας (οπτικές ίνες). Επομένως επιτυγχάνουν υψηλό κέρδος διαφοροποίησης έναντι της εξασθένησης λόγω σκίασης και εκμεταλλεύονται την ανεξάρτητη εξασθένηση των σημάτων τους παρέχουν ομοιόμορφα καλή εξυπηρέτηση για όλα τα UE.

Ομοίως με πριν, ο τρόπος λειτουργίας βασίζεται στην προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης υψηλού κέρδους και σε εφαρμογές SDMA με τη βοήθεια των οποίων η ενέργεια κατευθύνεται σε μία μικρή περιοχή του χώρου κάθε φορά, παρέχοντας καλύτερη φασματική απόδοση. Η πολιτική κατανομής ισχύος που ακολουθείται κατά κανόνα είναι η ισότιμη κατανομή και αυτό διότι ο αριθμός των κεραιών BS αυξάνεται χωρίς όριο. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι οι μεγάλες συστοιχίες κεραιών παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα με την αύξηση της ισχύος εκπομπής. Αυτή η λογική ταιριάζει απόλυτα με τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα mm-Wave, καθώς ευνοεί την επίτευξη εξατομικευμένων SNIR εντός μίας κυψέλης, διατηρώντας την παρεμβολή σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, τα τεράστια κέρδη της κεραίας του mMIMO αντισταθμίζουν επαρκώς τη σοβαρή απώλεια διαδρομής του σήματος mmWave. Έτσι, η

ενσωμάτωση αυτών των δύο τεχνολογιών επιτρέπει στα συστήματα 5G και B5G να πολλαπλασιάσουν επί 1000 την απόδοσή τους. Μάλιστα, λαμβάνοντας υπόψιν ότι το φυσικό μέγεθος των συστοιχιών κεραίας τείνει συνεχώς να μειώνεται για λόγους κόστους αλλά και κατανάλωσης ενέργειας, η δημιουργία μικρότερων μεγεθών κυψελών είναι πολλά υποσχόμενη για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας mmWave.

Το mMIMO έχει αποδειχτεί ότι συνοδεύεται από πολλαπλά οφέλη. Μερικά από αυτά είναι η αύξηση της χωρητικότητας, η αξιοπιστία σύνδεσης, η υψηλή φασματική και ενεργειακή απόδοση, η βελτίωση της ασφάλειας και της ευρωστίας, ο υψηλός βαθμός ελευθερίας, η μείωση κόστους και η απλοποίηση στην επεξεργασία σήματος. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί και ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης. Υπάρχει ανάγκη για εξελιγμένο υλικό μόνο στο σταθμό βάσης, ενώ το UE μπορεί να έχει ακόμη και μία μόνο κεραία με απλό σχεδιασμό, γεγονός που είναι πρωτοποριακό αν αναλογιστεί κανείς ότι τα τρέχοντα smartphones έχουν 2 έως 4 κεραίες.

Ήδη από το 2017 μεγάλες εταιρείες και ερευνητικά κέντρα πανεπιστημίων εφαρμόζουν το mMIMO για τις εφαρμογές τους. Η Vodafone και η Huawei έκαναν μαζί ένα πραγματικό πείραμα για να δοκιμάσουν συστήματα massive MIMO και πέτυχαν ταχύτητα 717 Mbps. Η Nokia παρήγαγε ένα ελαφρύ και αποδοτικό chipset για τη σχεδίαση μίας κεραίας mMIMO, το οποίο μπορούσε να υποδιπλασιάσει το μέγεθος της κεραίας. Η Samsung απέδειξε ότι το τεράστιο MIMO θα μπορούσε να παρέχει ταυτόχρονη ροή βίντεο υψηλής ταχύτητας χωρίς καθυστέρηση σε ένα πολυσύχναστο μέρος, πειραματιζόμενη σε ένα γεμάτο στάδιο στη Νότια Κορέα. Τον Ιανουάριο του 2019, η Sprint Mobile ολοκλήρωσε την πρώτη κλήση δεδομένων 5G στον κόσμο χρησιμοποιώντας 2,5 GHz και Massive MIMO στο εμπορικό δίκτυο 3GPP 5G NR.

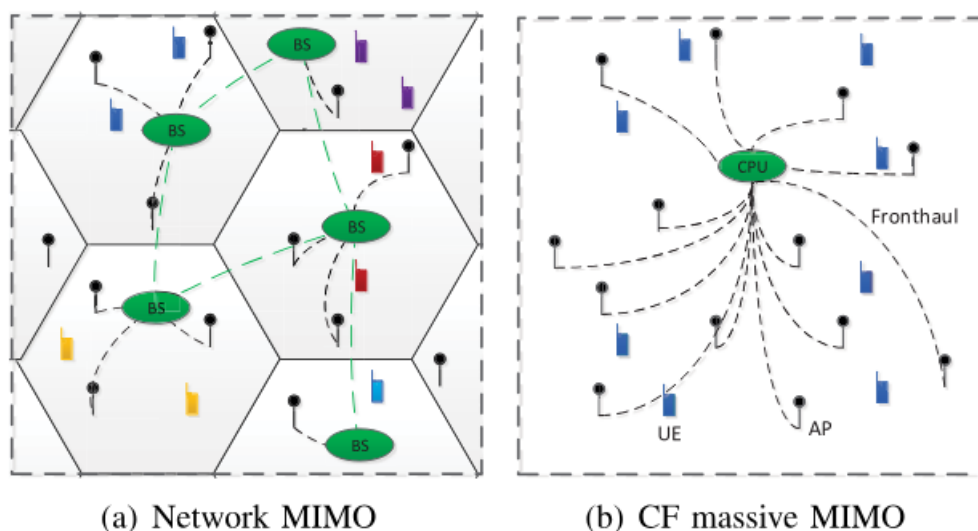


Εικόνα 4.4: Λειτουργία mMIMO για uplink και downlink [26]

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ακόμη ορισμένες προκλήσεις που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και αντιμετώπισης. Μία από αυτές είναι η μόλυνση πιλότου, η οποία προκαλείται αν οι χρήστες γειτονικών κυψελών χρησιμοποιούν μη ορθογώνια πιλοτικά σήματα, εξαιτίας τους γεγονότος ότι ο αριθμός των ορθογωνικών πιλοτικών σημάτων είναι μικρότερος από τον αριθμό των χρηστών. Κάτι τέτοιο πυροδοτεί κατευθυνόμενες διακυψελικές παρεμβολές, οι οποίες, σε αντίθεση με άλλες πηγές παρεμβολών, αυξάνονται όσο αυξάνεται ο αριθμός των κεραιών του σταθμού βάσης. Προσοχή πρέπει να δοθεί και στον σχεδιασμό της διάταξης κεραίας, καθώς αν τοποθετηθούν πολύ κοντά μεταξύ τους, όπως συμβαίνει συχνά στα συστήματα mMIMO τότε θα αλληλοεπιδρά η σύζευξη των στοιχείων. Τέλος, σημαντικό ζήτημα είναι και η εκτίμηση καναλιού και CSI, ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων FDD, τα οποία δεν συνδυάζονται καλά με το massive MIMO [26],[27].

4.4.3 Cell-Free Massive MIMO

Με την πρόοδο των τελευταίων χρόνων τα καταναμημένα συστήματα massive MIMO εξελίχθηκαν σε συστήματα χωρίς κυψέλες (Cell Free – CF). Διατηρώντας την λειτουργία TDMA, οι πολυάριθμες γεωγραφικά καταναμημένες κεραιές λειτουργούν τώρα ως σημεία πρόσβασης (Access Points – APs) τα οποία εκμεταλλεύονται το τοπικό CSI και εκτελούν κοινή μετάδοση, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα όλα τα UEs. Η μετάδοση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός δικτύου fronthaul και μίας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU). Η CPU στέλνει τα δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης και τους συντελεστές ελέγχου ισχύος στα APs, ενώ αυτά ανατροφοδοτούν τα δεδομένα που λαμβάνουν από τα UEs στην ανερχόμενη ζεύξη προς την CPU μέσω της σύνδεσης fronthaul. Στη συνέχεια, ο θόρυβος, η εξασθένηση και η παρεμβολή μεταξύ χρηστών μπορούν να υπολογιστούν κατά μέσο όρο σύμφωνα με τον νόμο των μεγάλων αριθμών. Η λύση CF mMIMO θεωρείται ιδανική για σενάρια κάλυψης εσωτερικών χώρων και hotspot επόμενης γενιάς, όπως είναι ένα έξυπνο εργοστάσιο, σιδηροδρομικοί σταθμοί, μικρά χωριά, εμπορικά κέντρα, στάδια, μετρό, νοσοκομεία και μία πανεπιστημιούπολη. Παρακάτω γίνεται μία σύγκριση σε επίπεδο απεικόνισης αλλά και χαρακτηριστικών μεταξύ των παραδοσιακών και των CF συστημάτων μαζικού MIMO.



Εικόνα 4.5: Σύγκριση καταναμημένου και cell-free mMIMO [25]

Architecture	Centralized	Distributed	Cell Free
Αριθμός κεραιών	Μεγάλος	Μέτριος	Μεγάλος
Κόστος εγκατάστασης	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Ποικιλομορφία	Μικρή	Μέτρια	Μεγάλη
Σκλήρυνση καναλιού	Δυνατή	Αδύναμη	Μέτρια
Ευνοϊκή διάδοση	Δυνατή	Αδύναμη	Μέτρια
Ομοιόμορφη κάλυψη	Κακή	Μέτρια	Καλή
Ενεργειακή αποδοτικότητα	Μεγάλη	Μικρή	Πολύ μεγάλη
Εκτίμηση καναλιού	Παγκόσμια	Παγκόσμια	Τοπική
Πόροι fronthaul	Λίγοι	Πολλοί	Μερικοί

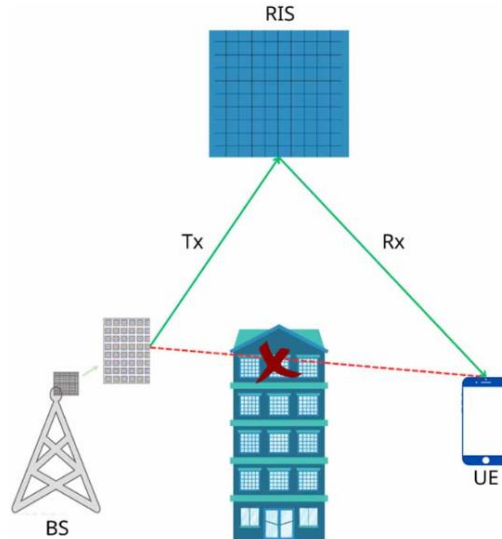
Πίνακας 4.2: Σύγκριση συγκεντρωτικού, κατανεμημένου και cell-free mMIMO [25]

Όπως επισημάνθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένα θεμελιώδες ζήτημα στις ασύρματες επικοινωνίες επόμενης γενιάς σχετίζεται με την ασφάλεια φυσικού στρώματος, η οποία απειλείται από την μεγάλη πυκνότητα σε AP και UE. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη η στροφή της ερευνητικής κοινότητας προς την κατεύθυνση του συγκερασμού PLS και CF. Δεδομένου ότι το πρωτόκολλο μετάδοσης και οι πιλοτικές ακολουθίες είναι τυποποιημένες και δημόσιες, οι πιλοτικές ακολουθίες για την εκτίμηση των καναλιών θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από έναν έξυπνο υποκλοπέα για να επιτεθεί ενεργά στα δίκτυα. Ένα πρώτο εγχείρημα προτείνει ένα απλό σχήμα ανίχνευσης για τον προσδιορισμό της διάστασης του υποχώρου του πίνακα Η λήψης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο προϋποθέτει την ορθογωνιότητα των πιλοτικών ακολουθιών που εκχωρούνται σε κάθε UE. Σε διαφορετική περίπτωση απαιτείται εξελιγμένη και ενεργός ανίχνευση για τα μαζικά δίκτυα CF MIMO. Γνωρίζοντας ότι υπάρχουν πολυάριθμα κατανεμημένα AP στα δίκτυα που συνδέονται μέσω ενός fronthaul σε μια CPU και τα οποία ανταλλάσσουν πληροφορίες, είναι εφικτό να βασιστούμε σε αυτά για την από κοινού ανίχνευση της παρουσίας υποκλοπής και ως εκ τούτου την καταστολή της επίθεσης. Μια άλλη πιθανή προσέγγιση είναι αυτή της εκμετάλλευσης της υψηλής χωρικής συσχέτισης των CF mMIMO, συνεχίζοντας με τον διαχωρισμό των δικτύων σε τμήματα με επίκεντρο τον χρήστη. Στα δίκτυα B5G και 6G οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να υλοποιηθούν με τη βοήθεια της μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης [25].

4.4.4 RIS

Πρόσφατα ήρθε στο προσκήνιο της τηλεπικοινωνιακής έρευνας μία νέα τεχνολογία, που αφορά υλικό αυτή τη φορά και ονομάζεται Αναδιαμορφώσιμη Ευφυής Επιφάνεια (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RIS). Πρόκειται για μία έξυπνη επιφάνεια αποτελούμενη από πληθώρα παθητικών τρισδιάστατων ανακλαστικών στοιχείων που τοποθετούνται μεταξύ του σταθμού βάσης και των κινητών τερματικών. Η επιφάνεια αυτή προσδίδει ευφυία στην διαδικασία της διαμόρφωσης δέσμης, επιτρέποντας σε κάθε στοιχείο της να ρυθμίζει ανεξάρτητα και δυναμικά είτε το πλάτος είτε τη φάση του προσπίπτοντος σήματος. Συνηθίζεται να αναλαμβάνουν το ρόλο αναμεταδότη σε τυφλά σημεία του δικτύου

6G ή στα άκρα της περιοχής κάλυψης, βελτιώνοντας τη συνδεσιμότητα και την αξιοπιστία. Τα χαρακτηριστικά αυτά λειτουργούν επιβληθτικά στην χωρητικότητα των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, χωρίς τη χρήση ενισχυτών ισχύος και έχοντας χαμηλό κόστος υλικού και εγκατάστασης. Γι' αυτό ακριβώς το RIS θεωρείται ρυθμιστικός παράγοντας των μελλοντικών πράσινων επικοινωνιών [20].



Εικόνα 4.6: Υποβοηθούμενη από RIS ασύρματη επικοινωνία 6G [20]

5. Αρχές Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης για δίκτυα 5G και B5G

Η ταχεία υιοθέτηση της τεχνολογίας 5G υπόσχεται έναν εκπληκτικό ρυθμό αύξησης των νέων συνδεδεμένων συσκευών και μία συνεχή επέκταση της χωρητικότητας του δικτύου που θα συνοδεύονται από ένα ευρύ φάσμα ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Δημιουργείται, λοιπόν, ένα καθεστώς διαδικτύου των πάντων (Internet of Everything – IoE) το οποίο απαιτεί ισχυρή αλληλεπίδραση με την ευφυΐα. Κάτι τέτοιο υποδεικνύει ότι οι Επόμενες Γενιές Δικτύων Επικοινωνιών (B5G) θα διαθέτουν επίσης προηγμένες γνωστικές ικανότητες, προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης ψηφιακός μετασχηματισμός. Ως εκ τούτου η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) και η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning – ML) αναδύονται ως βασικά εργαλεία για τα μελλοντικά δίκτυα, στρέφοντας το ενδιαφέρον της διεθνούς βιβλιογραφίας προς την κατεύθυνση αυτή. Η σύγκλιση του 5G και του ML επιτρέπει την ανάπτυξη ευέλικτων και προσαρμοστικών ευφυών δικτύων που υποστηρίζουν επεκτασιμότητα, αποκεντρωμένη νοημοσύνη, βελτιωμένη λειτουργική απόδοση με μείωση της ανθρώπινης παρέμβασης και απλούστερη τεχνολογική πολυπλοκότητα, καθώς και βελτιωμένη ασφάλεια δικτύου. Φυσικά, η υιοθέτηση τέτοιων μεθόδων σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμα στάδια. Οι ερευνητικές δραστηριότητες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη διάφορες πτυχές, όπως τη διαθεσιμότητα και τη χρηστικότητα των συνόλων δεδομένων που απαιτούνται για την προδιαγραφή και τη δοκιμή λύσεων AI/ML, κανονιστικές πτυχές και πρακτικά θέματα εφαρμογής.

Η Μηχανική Μάθηση είναι ένας κλάδος της Τεχνητής Νοημοσύνης που εστιάζει στην ανάπτυξη αλγορίθμων και μοντέλων με σκοπό να προσδώσει σε υπολογιστικές μηχανές την δυνατότητα να μαθαίνουν, να κάνουν προβλέψεις και να λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς την προϋπόθεση ρητού προγραμματισμού τους. Με άλλα λόγια, μία μηχανή παρατηρεί πολλά παραδείγματα μίας συγκεκριμένης εργασίας και βοηθά το σύστημα να βελτιώσει την επίδοσή του στην εργασία αυτή με βάση κάποιο κριτήριο αξιολόγησης. Στόχος της μάθησης είναι η δυνατότητα παραγωγής σωστών εκτιμήσεων σχετικά με δεδομένα τα οποία αντιμετωπίζονται για πρώτη φορά από το σύστημα. Η διαδικασία της υλοποίησής της περιλαμβάνει την κατασκευή και μελέτη μοντέλων τα οποία βασίζονται σε στατιστικές τεχνικές και μαθηματικά πρότυπα αναλύουν και ερμηνεύουν πολύπλοκα μοτίβα και σχέσεις. Έτσι, μαθαίνουν από τα σύνολα δεδομένων ή ακόμα και από το ίδιο το περιβάλλον και βελτιώνονται από την εμπειρία τους ώστε να γενικεύουν μοτίβα και να εκτελούν ενέργειες με επεκτάσιμο τρόπο σε νέα, αόρατα πραγματικά φαινόμενα [10],[28].

5.1 Είδη Μάθησης

Η υλοποίηση των τεχνικών ML πραγματοποιείται μέσα από ένα ευρύ φάσμα αλγορίθμων. Ανάλογα με τον ακριβή σκοπό τους και την πολιτική που ακολουθούν ως προς τον τρόπο επίτευξης αυτού, προκύπτουν τρεις βασικές οικογένειες αλγορίθμων ML.

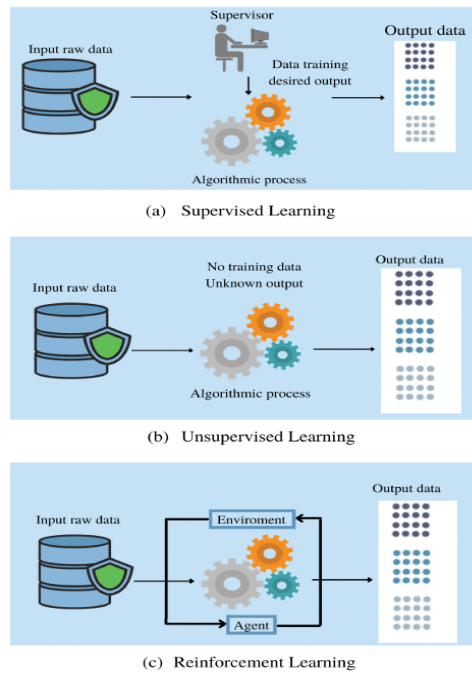
Η πρώτη οικογένεια ονομάζεται **εποπτευόμενη μάθηση (Supervised Learning – SL)** και χαρακτηρίζεται από προσημασμένο σύνολο δεδομένων, δηλαδή από μία σειρά δεδομένων με τιμές που συνοδεύονται από τις αντίστοιχες ετικέτες τους. Αυτές οι ετικέτες μπορούν να παραχθούν είτε από ανθρώπους είτε αυτόματα με βάση κάποιον υπολογισμό. Οι περισσότεροι

αλγόριθμοι υιοθετούν την τακτική του διαχωρισμού του συνόλου δεδομένων σε σύνολο εκπαίδευσης (training set) και σύνολο επικύρωσης (validation set) σε αναλογία 80%-20% ή παρόμοια. Το πρώτο χρησιμοποιείται κατά την εκπαίδευση των μοντέλων, ενώ το δεύτερο είναι ένα μέσο για την πρώτη εκτίμηση της απόδοσης του μοντέλου. Οι πιο ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης της εποπτευόμενης μάθησης είναι τα προβλήματα ταξινόμησης ή παλινδρόμησης. Η ταξινόμηση μαθαίνει από ταξινομημένα δεδομένα και σχετίζεται με την πρόβλεψη της ετικέτας της κλάσης στην οποία κατατάσσει κάθε στοιχείο του συνόλου δοκιμών. Στην πράξη, το σύστημα εκπαιδεύεται από πολλά παραδείγματα σε κάθε τάξη, μαζί με τις ετικέτες τους, προκειμένου να μάθει πώς να ταξινομεί νέες παρουσίες, θεωρώντας ότι κάθε συγκεκριμένη τιμή ανήκει σε μία δεδομένη κλάση. Στον αντίποδα, ο όρος παλινδρόμηση αναφέρεται στην πρόβλεψη μίας αριθμητικής τιμής – στόχου. Και πάλι υπάρχει σύνολο δεδομένων ωστόσο η πρόβλεψη βασίζεται σε μία εκτιμήτρια συνάρτηση, η οποία ανάλογα με το είδος του προβλήματος μπορεί να είναι γραμμική, πολυωνυμική ή σιγμοειδής.

Αρκετά προβλήματα, όμως, απαρτίζονται από δεδομένα τα οποία δεν περιλαμβάνουν ετικέτες. Τότε χρησιμοποιείται **μάθηση χωρίς επίβλεψη (Unsupervised Learning -UL)**, κατά την οποία διατηρούνται οι έννοιες της εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής, αλλά το μοντέλο προσπαθεί αυτή τη φορά μόνο του να προσδιορίσει τα κοινά χαρακτηριστικά των δεδομένων εισόδου. Με άλλα λόγια το σύστημα επιχειρεί να βρει τις ετικέτες μόνο του, χωρίς εξωτερική βοήθεια και γνωρίζοντας μόνο τον αριθμό των χαρακτηριστικών προς εξόρυξη.

Η τελευταία κατηγορία είναι γνωστή ως **ενισχυτική μάθηση (Reinforcement Learning - RL)** και διαφέρει αρκετά από τις υπόλοιπες. Η δράση της βασίζεται σε μία οντότητα μάθησης που ονομάζεται πράκτορας, ενώ η λειτουργία της καθορίζεται από ένα καθεστώς ανταμοιβής (θετική περίπτωση) – τιμωρίας (αρνητική περίπτωση). Ειδικότερα, ο πράκτορας αποτελεί τη διεπαφή του συστήματος με το περιβάλλον, ανατροφοδοτώντας το δεύτερο με πληροφορίες σχετικά με την ανταμοιβή ή την τιμωρία που συνοδεύει κάθε μετάβαση από μία κατάσταση σε μία άλλη. Στη συνέχεια ο ίδιος λαμβάνει την απόφαση για τις επικείμενες ενέργειες με γνώμονα πάντα την μεγιστοποίηση της ανταμοιβής με την πάροδο του χρόνου.

Ανεξαρτήτου φύσης προβλήματος και μάθησης υπάρχουν δύο καταστάσεις που πρέπει να ελέγχονται κάθε φορά που σχηματίζεται ένα μοντέλο, προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα, τα οποία καθιστούν αδύνατη την ορθή απεικόνιση όλων των χαρακτηριστικών του συνόλου δεδομένων. Από τη μία πρόκειται για το φαινόμενο της υποπροσαρμογής που λαμβάνει χώρα όταν ένα μοντέλο αδυνατεί να μειώσει επαρκώς το σφάλμα του στο σύνολο εκπαίδευσης. Κάτι τέτοιο υποδηλώνει ότι δεν δύναται να περιγράψει όλα τα χαρακτηριστικά του συνόλου δεδομένων και να γενικεύσει τις προβλέψεις του. Από την άλλη πλευρά, πολλές φορές εμφανίζεται η υπερπροσαρμογή κατά την οποία εντοπίζεται σημαντική διαφορά μεταξύ των σφαλμάτων εκπαίδευσης και δοκιμής. Σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο περιγράφει περισσότερα χαρακτηριστικά από τα πραγματικά [29].



Εικόνα 5.1: Είδη μηχανικής μάθησης [29]

5.2 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης στα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς

Τα συστήματα δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχουν εξελιχθεί από υποδομή επικοινωνίας σε κρίσιμη και απαραίτητη βιομηχανική και κοινωνική υποδομή. Η ιδέα των έξυπνων συνδέσεων βασίζεται στον συγκερασμό των νέων δικτύων 5G και 6G με την τεχνητή νοημοσύνη, προκειμένου να επιταχυνθεί ένας ψηφιακός μετασχηματισμός. Οι αυξημένοι ρυθμοί δεδομένων, η μειωμένη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, η βελτιωμένη κάλυψη, καθώς και ο φορητός υπολογισμός άκρων υποστηρίζουν ακόμη και τις πιο απαιτητικές και εξελιγμένες εφαρμογές IoT. Η σύγκλιση του 5G και της τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει την ανάπτυξη ευέλικτων και προσαρμοστικών ευφυών δικτύων που υποστηρίζουν επεκτασιμότητα και αποκεντρωμένη νοημοσύνη μεταφέροντας τις υπολογιστικές δυνατότητες από κεντρικούς κόμβους στην άκρη, βελτιωμένη λειτουργική αποτελεσματικότητα μειώνοντας την ανθρώπινη παρέμβαση καθώς και βελτιωμένη ασφάλεια δικτύου. Η σύγκλιση αυτή ερευνάται ήδη σε πολλαπλούς κάθετους τομείς και θεμελιώνεται στην εισαγωγή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης σε διάφορες λειτουργίες του δικτύου [30]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένοι από τους πιο πολυχρησιμοποιημένους αυτούς αλγορίθμους ML.

Μηχανές Διανύσματος Υποστήριξης (Support Vector Machines – SVMs)

Στη μηχανική μάθηση, οι μηχανές διανύσματος υποστήριξης είναι εποπτευόμενα μοντέλα εκμάθησης με σχετικούς αλγόριθμους που αναλύουν δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο για ταξινόμηση όσο και για παλινδρόμηση. Πρακτικά, τα ακατέργαστα δεδομένα σχεδιάζονται ως σημεία σε ένα χώρο n διαστάσεων (όπου το n υποδηλώνει την ποσότητα των υφιστάμενων περιπτώσεων). Η τιμή ενός συγκεκριμένου στιγμιότυπου συνδέεται με μια συγκεκριμένη συντεταγμένη, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη ταξινόμηση των δεδομένων. Ένα απλό παράδειγμα θα ήταν ένα μοντέλο 2D με ένα σύνολο σημείων

δεδομένων. Ο στόχος είναι να διαχωριστούν αυτά τα σημεία σε διαφορετικές κατηγορίες χρησιμοποιώντας μια γραμμή που ονομάζεται όριο απόφασης. Στην ουσία είναι η γραμμή μεταξύ των δύο πλησιέστερων σημείων που κρατούν τα άλλα σημεία δεδομένων διαχωρισμένα. Εκτός από την εκτέλεση γραμμικής ταξινόμησης, τα SVMs μπορούν να εκτελέσουν αποτελεσματικά και μια μη γραμμική ταξινόμηση χρησιμοποιώντας τον λεγόμενο κόλπο πυρήνα και χαρτογραφώντας σιωπηρά τις εισόδους τους σε χώρους χαρακτηριστικών υψηλών διαστάσεων. Τα SVMs βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις επιλογής κεραίας εκπομπής με ταξινόμηση των πληροφοριών καναλιού, ανίχνευσης παρουσίας εισβολέα αλλά και πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης.

Τυχαία Δάση (Random Forests – RFs)

Τα Random Forests είναι ένα ισχυρό και ευέλικτο μοντέλο μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται για ταξινόμηση αλλά και παλινδρόμηση. Η δομή του μοντέλου αποτελείται από έναν συνδυασμό πολλών δέντρων απόφασης, καθένα από τα οποία εκπαιδεύεται σε ένα διαφορετικό υποσύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης. Ένα δέντρο απόφασης είναι ένα γράφημα που αναπαριστά τις επιλογές και τα αποτελέσματά τους σε μορφή δέντρου και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μοντέλο ταξινόμησης ή παλινδρόμησης. Στα μοντέλα ταξινόμησης, το δέντρο είναι πεπερασμένο ενώ στα μοντέλα παλινδρόμησης είναι συνεχές. Το σύνολο δεδομένων χωρίζεται σε μικρότερα υποσύνολα και το δέντρο αναπτύσσεται σε κόμβους απόφασης και κόμβους φύλλων. Οι κόμβοι στο γράφημα αντιπροσωπεύουν ένα γεγονός ή μια επιλογή και οι άκρες του γραφήματος αντιπροσωπεύουν τους κανόνες ή τις συνθήκες απόφασης. Η ρίζα είναι ο ανώτερος κόμβος απόφασης σε ένα δέντρο, ο οποίος συσχετίζεται με τον καλύτερο προγνωστικό παράγοντα. Με άλλα λόγια, κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει χαρακτηριστικά σε μια ομάδα που πρόκειται να ταξινομηθεί και κάθε κλάδος αντιπροσωπεύει μια τιμή που μπορεί να λάβει ο κόμβος. Σε ένα μοντέλο RF, λοιπόν, οι αποφάσεις των επιμέρους δέντρων συνδυάζονται για να παράγουν την τελική πρόβλεψη. Αυτό το φαινόμενο μειώνει τον κίνδυνο υπερπροσαρμογής (overfitting) και βελτιώνει την ακρίβεια του μοντέλου. Τα Random Forests είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στον θόρυβο των δεδομένων και προσφέρουν εξαιρετική απόδοση ακόμη και με πολύπλοκα και μεγάλα σύνολα δεδομένων.

Συσταδοποίηση K-Means (K-Means Clustering)

Το K-means είναι ένας από τους απλούστερους αλγόριθμους μάθησης χωρίς επίβλεψη που λύνει το γνωστό πρόβλημα ομαδοποίησης. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, τα δεδομένα ταξινομούνται σε έναν αριθμό συστάδων (που προσδιορίζονται από το K) έτσι ώστε όλα τα συστατικά του συμπλέγματος να είναι ομοιογενή μεταξύ τους και ετερογενή από τα συστατικά άλλων συστάδων. Η κύρια ιδέα είναι να ορίσουμε K κέντρα, ένα για κάθε συστάδα. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

- Για κάθε σύμπλεγμα επιλέγεται K αριθμός σημείων δεδομένων που ονομάζονται κεντροειδή.
- Τα σημεία δεδομένων συγκεντρώνονται σε ένα σύμπλεγμα έτσι ώστε το άθροισμα της τετραγωνικής απόστασης μεταξύ αυτών των σημείων και του κέντρου να είναι το ελάχιστο δυνατό.
- Υπολογίζονται εκ νέου τα κεντροειδή

- Η μικρότερη απόσταση για κάθε σημείο δεδομένων δημιουργείται για τα νέα κεντροειδή και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ληφθεί μια σταθερή τιμή.

Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks)

Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι μια σειρά αλγορίθμων που προσπαθεί να αναγνωρίσει τις υποκείμενες σχέσεις σε ένα σύνολο δεδομένων μέσω μιας διαδικασίας που μιμείται τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Με αυτή την έννοια, τα νευρωνικά δίκτυα αναφέρονται σε συστήματα νευρώνων, είτε οργανικής είτε τεχνητής φύσης. Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες εισόδους. Με αυτό τον τρόπο, το δίκτυο παράγει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα χωρίς να χρειάζεται να επανασχεδιαστούν τα κριτήρια εξόδου. Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο συμπεριφέρεται πάντα με τον ίδιο τρόπο. Λειτουργεί σε τρία στρώματα. Το επίπεδο εισόδου δέχεται είσοδο, το κρυφό στρώμα αποτελείται από ένα έως τρία κρυφά επίπεδα και επεξεργάζεται την είσοδο και εν τέλει το επίπεδο εξόδου στέλνει την υπολογισμένη έξοδο. Η εκπαίδευση των ANN γίνεται μέσω backpropagation και βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της αναμενόμενης και της πραγματικής εξόδου. Βρίσκουν εφαρμογή σε ανάγκες πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης ή των προαπαιτούμενων μετρικών μίας σύνδεσης, ενώ θεωρούνται από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για ασφάλεια φυσικού στρώματος σχετικά με την αυθεντικοποίηση χρηστών και την ανίχνευση επιθέσεων [28],[30].

5.3 Βαθιά Μάθηση

Η Βαθιά Μάθηση αποτελεί υποσύνολο της Μηχανικής Μάθησης που αξιοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, εκπαιδώντας τα με πολλαπλά επίπεδα για την ανάλυση και επεξεργασία σύνθετων μοτίβων σχέσεων που εμφανίζονται στα δεδομένα. Βασίζεται σε πολυεπίπεδες δομές, όπου κάθε επίπεδο εξάγει χαρακτηριστικά και πληροφορίες από τα δεδομένα, καθιστώντας την ικανή να μαθαίνει και να βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου. Ανάλογα με το πλήθος των χρησιμοποιούμενων επιπέδων – στρωμάτων καθορίζεται και το βάθος του μοντέλου, γι' αυτό και συχνά αναφέρονται ως Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (Deep Neural Networks – DNNs). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι εμπνευσμένα από τη δομή και τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και ειδικότερα από το συνδεδεμένο δίκτυο νευρώνων. Στο γεγονός αυτό έγκειται και το βασικότερο πλεονέκτημα τους, δηλαδή η ιεραρχική αναπαράσταση των δεδομένων μέσω της βαθιάς αρχιτεκτονικής. Στις εγκεφαλικές και βιολογικές λειτουργίες κάθε στρώμα αναγνωρίζει όλο και πιο πολύπλοκες δομές σχημάτων, αντικειμένων και εννοιών συνδυάζοντας τις εξόδους των προηγούμενων στρωμάτων. Ομοίως δρα και κάθε στρώμα ενός DNN το οποίο μαθαίνει σταδιακά πιο αφηρημένα χαρακτηριστικά, επιτρέποντας στο δίκτυο να καταγράφει περίπλοκα μοτίβα και εξαρτήσεις στα δεδομένα εισόδου. Η ιεραρχική αυτή εκμάθηση καθιστά το DL ιδανική λύση για εργασίες αναγνώρισης εικόνας και φωνής, επεξεργασίας φυσικής γλώσσας, αυτόματης οδήγησης και γενετικής μοντελοποίησης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της βαθιάς μάθησης σχετίζεται με την ικανότητά της να αναπαριστά συναρτήσεις της ίδιας πολυπλοκότητας με ένα ρηχό μοντέλο, χρησιμοποιώντας όμως λιγότερους νευρώνες. Αυτό οφείλεται στην πολυστρωματική διαρρύθμιση που χειρίζεται αποτελεσματικά μεγάλες ποσότητες δεδομένων [10]. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένες

βασικές τεχνικές DL που χρησιμοποιούνται σε συστήματα τηλεπικοινωνιών B5G και συγκεκριμένα στο φυσικό επίπεδο αυτών.

Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks – CNNs)

Το CNN είναι μια πολύ γνωστή τεχνική DL που έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία εισόδων πίνακα και ειδικεύεται στην ανάλυση εικόνων. Κάθε CNN αποτελείται από ένα συνδυασμό τουλάχιστον τριών νευρωνικών στρωμάτων. Κάθε στρώμα έχει ξεχωριστό ρόλο και λειτουργεί διαφορετικά από τα υπόλοιπα. Όσον αφορά το συνελικτικό στρώμα (convolution layer), είναι υπεύθυνο να εφαρμόζει φίλτρα πάνω στα δεδομένα εισόδου, εκτελώντας συνελίξεις για να εξάγει τοπικά χαρακτηριστικά όπως άκρες, γωνίες και υφές. Μετά από διάφορες μαθηματικές πράξεις προκύπτει ένας χάρτης χαρακτηριστικών που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα εντοπισμένα χαρακτηριστικά. Ακολουθεί το στρώμα συγκέντρωσης (pooling layer) το οποίο σκοπό έχει να μειώσει τις διαστάσεις του χάρτη χαρακτηριστικών και συνεπώς τον αριθμό των παραμέτρων και τους υπολογισμούς στο δίκτυο. Παρά τις αλλαγές δεν επηρεάζεται το βάθος των δεδομένων εισαγωγής. Αυτή η λειτουργία που λαμβάνει χώρα στο Pooling layer ονομάζεται υποδειγματοληψία. Στο τέλος, υπάρχει ένα στρώμα ολοκλήρωσης (fully connected layer) όπου πραγματοποιείται high-level επεξεργασία σε σχέση με το υπόλοιπο νευρωνικό δίκτυο. Ενσωματώνονται οι διάφορες αποκρίσεις των χαρακτηριστικών των δεδομένων εισαγωγής από τα προηγούμενα στρώματα και παράγεται το τελικό αποτέλεσμα. Την διάταξη ενδέχεται να συμπληρώνουν και άλλα στρώματα ενεργοποίησης ή κανονικοποίησης ανάλογα με την εκάστοτε λειτουργία.

Μακροπρόθεσμη Μνήμη (Long Short-Term Memory – LSTM)

Το LSTM είναι ένα είδος αρχιτεκτονικής νευρωνικού δικτύου που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των συνελικτικών νευρωνικών δικτύων με την ικανότητα μνήμης των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων (Recurrent Neural Networks - RNNs). Σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που εμφανίζονται με τη μακροπρόθεσμη εξάρτηση στις αλληλουχίες δεδομένων. Ένα μοντέλο LSTM αποτελείται από τρία βασικά χαρακτηριστικά.

- Κυψελίδα Μνήμης (Memory Cell): είναι το κεντρικό στοιχείο που επιτρέπει την αποθήκευση και διατήρηση πληροφοριών για μεγάλες χρονικές περιόδους.
- Πύλες (Gates): ελέγχουν τη ροή των πληροφοριών μέσα και έξω από την κυψελίδα μνήμης. Υπάρχουν τρεις κύριες πύλες:
 - Πύλη Εισόδου (Input Gate): ελέγχει ποιες από τις νέες πληροφορίες θα αποθηκευτούν στην κυψελίδα μνήμης.
 - Πύλη Διαγραφής (Forget Gate): καθορίζει ποιες πληροφορίες θα διαγραφούν από την κυψελίδα μνήμης.
 - Πύλη Εξόδου (Output Gate): ρυθμίζει την έξοδο των πληροφοριών από την κυψελίδα μνήμης και καθορίζει την επόμενη κατάσταση της μνήμης.
- Κατάσταση Κυψελίδας (Cell State): μεταφέρει σχετικές πληροφορίες κατά μήκος της αλληλουχίας, προσαρμοζόμενη από τις πύλες.

Μία πιο εξελιγμένη μορφή αποτελούν τα συνελικτικά LSTM, τα οποία περιέχουν συνελικτικούς νευρώνες με σκοπό να αναγνωρίζουν χαρακτηριστικά και μοτίβα. Αντί να λαμβάνουν είσοδο σειριακά, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά RNN, οι συνελικτικοί

νευρώνες λαμβάνουν ως είσοδο ταυτόχρονα περιοχές δεδομένων. Αυτό τους επιτρέπει να διατηρούν την χωρική πληροφορία κατά την επεξεργασία. Ωστόσο, οι συνελκτικοί νευρώνες δεν αποθηκεύουν πληροφορίες για προηγούμενα δεδομένα, καθώς η επεξεργασία τους είναι ανεξάρτητη από τον χρόνο. Εδώ εισέρχεται ο ρόλος του LSTM, που μπορεί να μάθει, να αποθηκεύει και να ανακαλέσει πληροφορίες από μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις. Το Convolutional LSTM αποτελείται από μια σειρά ConvLSTM επιπέδων, όπου κάθε επίπεδο λαμβάνει είσοδο από το προηγούμενο επίπεδο και επεξεργάζεται τις περιοχές χρησιμοποιώντας συνελκτικούς πυρήνες και gates, όπως στα LSTM. Η τελική έξοδος του είναι μια τμηματοποίηση του πίνακα εισόδου, όπου κάθε τμήμα αντιστοιχεί σε μια κατηγορία ή μια πιθανότητα να ανήκει σε μια κατηγορία. Εν γένει, τα LSTM είναι ένα ισχυρό εργαλείο στην φαρέτρα της μηχανικής μάθησης, ικανό να διαχειρίζεται δεδομένα με μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις και να προσφέρει αξιόπιστες προβλέψεις και αναλύσεις σε διάφορους τομείς [23].

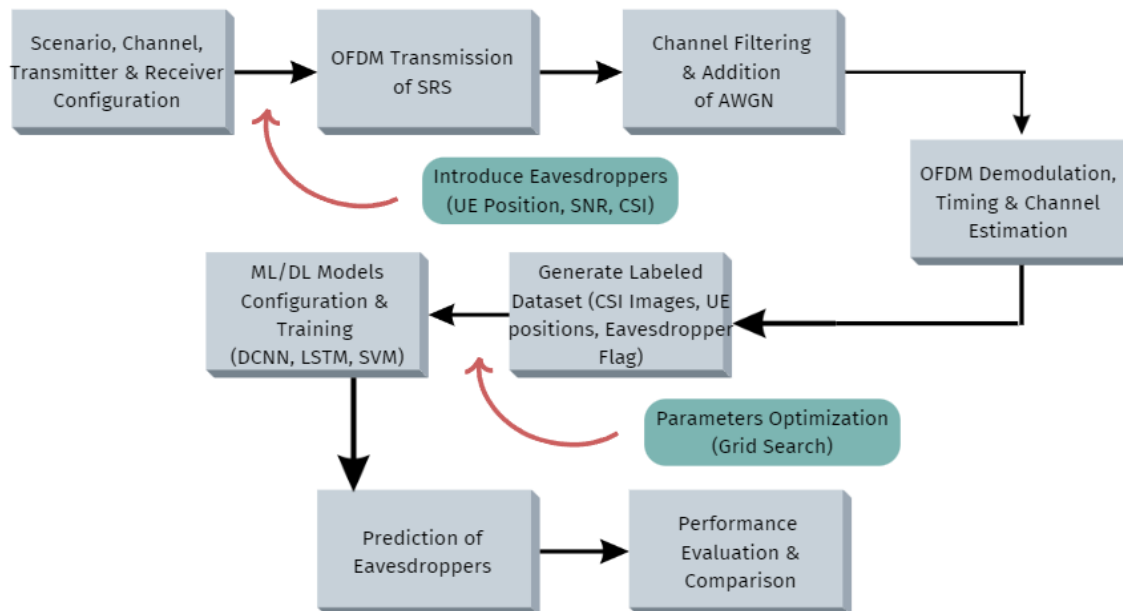
6. Προσομοίωση Πραγματικού Σεναρίου B5G και Ανάπτυξη Προηγμένων Τεχνικών PLS

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην διεξοδική ανάλυση του εργαστηριακού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό και με γνώμονα το θεωρητικό υπόβαθρο που προηγείται, αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν προηγμένες τεχνικές ασφάλειας φυσικού στρώματος σε δίκτυα επόμενης γενιάς, αξιοποιώντας σύγχρονες μεθόδους μηχανικής και βαθιάς μάθησης. Το εργαστηριακό μέρος αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος αφορά στην προσομοίωση ενός περιβάλλοντος B5G στο υπολογιστικό εργαλείο MATLAB. Η προσομοίωση βασίζεται σε ένα σενάριο βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων (Industrial Internet of Things - IIoT), που παρέχει το ιδανικό περιβάλλον για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των τεχνικών AI/ML. Συγκεκριμένα, λαμβάνει χώρα μια σειρά από βήματα που περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση του σεναρίου, του καναλιού επικοινωνίας, καθώς και των παραμέτρων του πομπού και δέκτη. Κατά τη διαδικασία, μεταδίδονται σήματα αναφοράς (Sounding Reference Signals - SRS) μέσω της τεχνολογίας OFDM, τα οποία διέρχονται από το κανάλι και υπόκεινται σε φιλτράρισμα και προσθήκη λευκού θορύβου (AWGN). Ακολουθεί η αποδιαμόρφωση, ο χρονισμός και η εκτίμηση καναλιού. Εκτός από την αμιγή προσομοίωση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, το πρόγραμμα διερευνά και την ακρίβεια τοποθέτησης του εξοπλισμού χρήστη μέσω τεχνητής νοημοσύνης. Ειδικότερα, συγκρίνονται οι επιδόσεις της AI στην εκτίμηση της θέσης των UEs σε σχέση με την παραδοσιακή τεχνική της διαφοράς χρόνου άφιξης (Time Difference of Arrival - TDoA), η οποία αποτελεί κλασική προσέγγιση στα δίκτυα NR.

Επιπλέον, επεμβαίνουμε στο περιβάλλον, εισάγοντας ορισμένα UEs που λειτουργούν ως κακόβουλοι ακροατές (eavesdroppers). Η ιδιότητά τους αυτή επιλέγεται με βάση τη θέση τους, τη στάθμη λαμβανόμενου σήματος προς θόρυβο (SNR) και τις ανωμαλίες κατά την εκτίμηση κατάστασης καναλιού (CSI). Η εισαγωγή αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της ευρύτερης ασφάλειας του δικτύου και αποτελεί το συνδυαστικό κρίκο με το δεύτερο εργαστηριακό μέρος. Τα δεδομένα αλλά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση και δοκιμή διαφόρων μοντέλων μηχανικής και βαθιάς μάθησης, όπως βαθιά συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα, δίκτυα μακροπρόθεσμης μνήμης και μηχανές διανύσματος υποστήριξης. Αυτά τα μοντέλα αναπτύχθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού python και επιδιώκουν να προβλέψουν ποια από τα UE είναι κακόβουλοι ακροατές. Τέλος, πραγματοποιείται και μία αναλυτική σύγκριση των μοντέλων με απώτερο σκοπό την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των τεχνικών μηχανικής και βαθιάς μάθησης στην ενίσχυση της ασφάλειας φυσικού στρώματος, αναδεικνύοντας τον ρόλο της τεχνητής νοημοσύνης στη θωράκιση των δικτύων Beyond 5G απέναντι σε σύγχρονες απειλές.

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η συλλογή πραγματικών δεδομένων τηλεπικοινωνιακής κίνησης αποτελεί ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα. Εξαιτίας του απορρήτου των προσωπικών δεδομένων καθώς και της πολιτικής των εταιρειών επικοινωνίας, δεν μπορεί κανείς να αποκτήσει πρόσβαση σε δεδομένα χρηστών, ασύρματων συστημάτων και επικοινωνιών. Ακόμη περισσότεροι αναχαιτιστικοί παράγοντες εμφανίζονται όταν πρόκειται για ad-hoc δίκτυα, και πόσο μάλλον για δίκτυα που προσελκύουν το ενδιαφέρον επιθέσεων, τα οποία είναι σε μεγάλο μέρος ιδιωτικά. Είναι, λοιπόν, σαφές πως η διαδικασία της

προσομοίωσης κρίνεται απαραίτητη στην περίπτωση μας, ώστε να εξάγουμε μέσα από αυτή ένα σύνολο δεδομένων, όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό, για να χρησιμοποιηθεί από τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης.



Εικόνα 6.1: Block Διάγραμμα εργαστηριακού μέρους

6.1 Επισκόπηση Βασικών Παραμέτρων Συστήματος

Εξαιτίας του ευρέος φάσματος εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στις ασύρματες επικοινωνίες, αναμένεται να αποτελέσουν κρίσιμο μέρος των δικτύων επικοινωνιών 5G και 6G. Ήδη το 3GPP ερευνά επισταμένως περιπτώσεις χρήσης αυτών σε δίκτυα 5G για την Έκδοση 18. Πάνω σε ένα από αυτά τα use-cases, που περιλαμβάνεται στο TR 38.843 και σχετίζεται με τις βελτιώσεις ακρίβειας θέσης, βασίστηκε και το σενάριο για την παρούσα εργασία [31]. Το παράδειγμα περιλαμβάνει την εκτίμηση της θέσης του εξοπλισμού χρήστη σε ένα ad-hoc βιομηχανικό περιβάλλον με τη βοήθεια τεχνητής νοημοσύνης. Εν προκειμένω, το περιβάλλον αναπτύχθηκε σε καθεστώς 5G δικτύου και προστέθηκαν σε αυτό κακόβουλοι ακροατές, αξιοποιώντας πλέον τις δυνατότητες AI/ML όχι μόνο για την ακρίβεια τοποθέτησης UE αλλά και για τον εντοπισμό πιθανών eavesdroppers. Πριν την εμβάθυνση στην προσομοίωση, κρίνεται αναγκαία η παράθεση των βασικών εννοιών και κυριότερων παραμέτρων που συμμετέχουν σε αυτή [32].

- Η **συχνότητα** λειτουργίας αποτελεί την κυριότερη ίσως παράμετρο σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Έχει επιλεγθεί η τιμή των 28 GHz, που εμπίπτει στο Frequency Range 2 (FR2) του 5G, καθώς προσφέρει ένα ισορροπημένο συνδυασμό χωρητικότητας και απόδοσης σε ένα περιβάλλον με πολλές προκλήσεις, όπως η παρουσία πυκνού εξοπλισμού και η ανάγκη για αξιόπιστη και ταχεία επικοινωνία. Παρά τα πιθανά προβλήματα κάλυψης λόγω της μειωμένης διείσδυσης, η αυξημένη

χωρητικότητα και οι δυνατότητες χωρικής επαναχρησιμοποίησης καθιστούν αυτή τη συχνότητα ιδανική για βιομηχανικές εφαρμογές.

- Ο **αριθμός των ΣΒ** αποτελεί μία θεμελιώδη παράμετρο που επηρεάζει την κάλυψη του δικτύου, την ποιότητα του σήματος, και την ακρίβεια της εκτίμησης θέσης. Στο σύστημα αυτό, οι ΣΒ τοποθετούνται σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους (20 μέτρα) και σε συγκεκριμένο ύψος (8 μέτρα), καθορίζοντας έτσι την πολυπλοκότητα του καναλιού και το επίπεδο παρεμβολής μεταξύ των ΣΒ. Αυξάνοντας τον αριθμό τους επιτυγχάνεται βελτιωμένη κάλυψη και καλύτερη εκτίμηση της θέσης, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και η πολυπλοκότητα λόγω της εντατικοποίησης του φαινομένου multipath.
- Εξίσου βαρύνουσα σημασία παρουσιάζει και ο **αριθμός των UE** που προσομοιώνονται, καθώς και η γεωγραφική τους κατανομή που επιδρά άμεσα στην αξιοπιστία της προσομοίωσης. Στον κώδικα αυτό, δημιουργούνται 500 UE, τα οποία τοποθετούνται είτε τυχαία είτε σε πλέγμα. Η τυχαία τοποθέτηση προσομοιώνει πραγματικές συνθήκες δικτύου, όπου οι χρήστες κινούνται ανεξάρτητα, ενώ η τοποθέτηση σε πλέγμα θέτει την πυκνότητα χρηστών στα 30 μέτρα και χρησιμοποιείται για πιο ελεγχόμενες δοκιμές.
- Η **κινητικότητα των UE** καθορίζεται από την παράμετρο MobilityUE, η οποία εκφράζει την ταχύτητα κίνησης των UE μέσα στον χώρο σε km/h. Η τιμή που έχει δοθεί είναι 3 km/h, που αντιστοιχεί στην ταχύτητα ενός πεζού. Η κινητικότητα αυτή είναι σημαντική για την προσομοίωση ενός δυναμικού περιβάλλοντος όπου οι χρήστες μπορεί να μετακινούνται, επηρεάζοντας την ποιότητα του σήματος και τις ανάγκες για χρονοδιαφορική άφιξη (TDoA) και διαχείριση του δικτύου.
- Ο **αριθμός των υποφερόντων** (subcarriers) είναι πρωταρχική παράμετρος για το σύστημα OFDM και επηρεάζει την απόδοση του συστήματος σε επίπεδο εύρους ζώνης, ανθεκτικότητας σε παρεμβολές και πολυπλοκότητας επεξεργασίας σήματος. Στην προσομοίωση που έλαβε χώρα, ο αριθμός των υποφερόντων καθορίζεται από την παράμετρο NSizeGrid, η οποία είναι ορισμένη σε 270. Αυτό σημαίνει ότι το φάσμα συχνοτήτων χωρίζεται σε 270 υποφορείς, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους 30 kHz.
- Η **διαμόρφωση του χώρου** και τα χαρακτηριστικά του σχετίζονται με τη διασπορά του σήματος, την παρεμβολή και τη σκέδαση. Η πυκνότητα των εμποδίων είναι ορισμένη σε 0.6 με ύψος 6 μέτρα, χαρακτηριστικά που δημιουργούν ένα ρεαλιστικό περιβάλλον με αυξημένη πολυπλοκότητα και συχνές απώλειες σήματος λόγω σκέδασης ή απορρόφησης.
- Το **SNR** είναι μια κρίσιμη παράμετρος που εξαρτάται από το είδος διαμόρφωσης, την ισχύ εκπομπής, την απόσταση από το σταθμό βάσης και τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Η τιμή του επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της επικοινωνίας. Υψηλό SNR σημαίνει καλύτερη ποιότητα σήματος, γεγονός που διευκολύνει την ακριβή εκτίμηση του καναλιού και τη μείωση των σφαλμάτων στην ανίχνευση θέσης.
- Η **ισχύς εκπομπής** επηρεάζει την απόσταση που μπορεί να καλύψει το σήμα και κατ'επέκταση την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Μια υψηλή ισχύς εκπομπής μπορεί να βελτιώσει το SNR, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιοχές με υψηλή απορρόφηση ή παρεμβολή. Ωστόσο, μπορεί επίσης να αυξήσει τις παρεμβολές σε κοντινούς ΣΒ ή UE. Για του σταθμούς βάσης έχει οριστεί στα 24 dBm.

Παράμετροι	Προσομοίωση
Σενάριο	Indoor Factory, Dense Hall
Συχνότητα	28 GHz (FR2)
Είδος κυψελών	Micro-cells εξαγωνικές
Ύψος κεραιών	BS: 8 m, UE: 1.5 m
Τοποθέτηση BS	Σε απόσταση 20 m σε κάθε άξονα
Τοποθέτηση UE	Σε απόσταση 30 m σε κάθε άξονα
Κινητικότητα UE	3 km/h
Κατανομή UE	Τυχαία
Αριθμός χρηστών	500
Επίπεδο θορύβου	5 dB
Ισχύς εκπομπής	BS: 24 dBm, UE: 23 dBm, Eavesdropper: > 23 dBm
Εκτίμηση καναλιού και χρονισμού	Ιδανική
Διαμοιρασμός δεδομένων σε σύνολα εκπαίδευσης / επικύρωσης	80%

Πίνακας 6.1: Βασικές παράμετροι σεναρίου προσομοίωσης

6.2 Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου Συστήματος

Προς διευκόλυνση της κατανόησης του πειράματος και προτού προχωρήσουμε σε αναλυτική περιγραφή αυτού, παρέχεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου με αναφορά στις βασικές συναρτήσεις και οντότητες αυτού.

(1) Καθορισμός σεναρίου και βασικών παραμέτρων.

simulation.m → *simParameters*

(2) Δημιουργία σεναρίου, εισαγωγή ΣΒ - UEs και εμφάνιση τοπολογίας

h5GIndoorFactoryScenario.m

(3) Καθορισμός φορέα και Ηχητικών Σημάτων Αναφοράς (Sounding Reference Signals – SRS)

nrConfig, nrSRSConfig

(4) Διαμόρφωση καναλιών διάδοσης

nrOFDMInfo, → simParameters.Carrier

(5) Απώλειες Μονοπατιού

nrPathLossConfig

(6) Για κάθε ζεύγος ΣΒ – UE:

Προσομοίωση μετάδοσης στα κανάλια

h38901Channel.m (class) → *nodes connection, create channel, beamforming, user mobility, fast fading, LoS probability...*

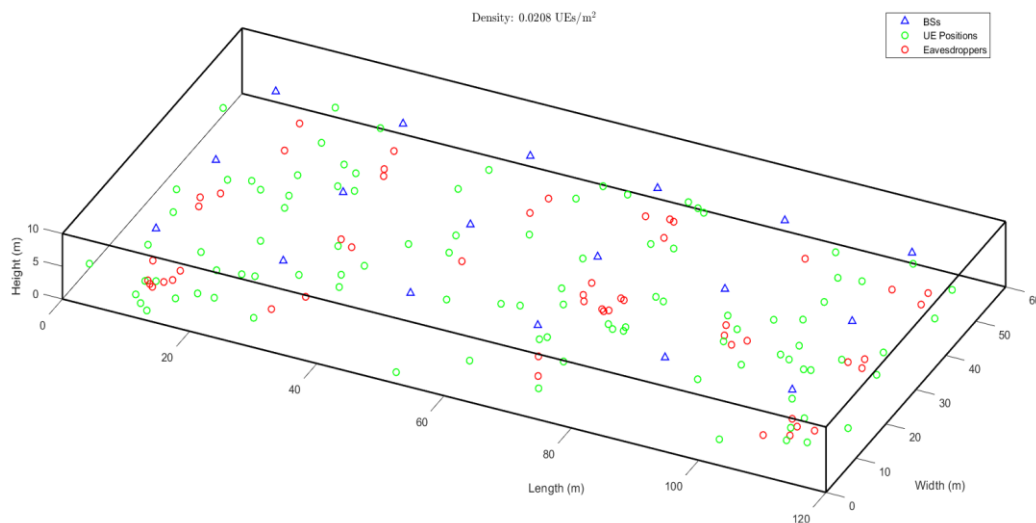
(7) Μετάδοση σημάτων και δημιουργία συνόλων εκπαίδευσης και δοκιμής σε μορφή CSI εικόνων

channels2ImageDataset.m

- (8) Επισήμανση συνόλων εκπαίδευσης και δοκιμής και προσθήκη τοποθεσίας και ισχύος UE
ue_data
- (9) Δημιουργία μοντέλων ML/DL
create_dcnm_model.py, create_dcnm_model.py, create_dcnm_model.py,
create_svm_model.py, create_rf_model.py
- (9) Εκπαίδευση Μοντέλων και βελτιστοποίηση παραμέτρων
KerasClassifier, GridSearchCV
- (10) Προβλέψεις Μοντέλων
- (11) Συγκριτική Ανάλυση
Accuracy, f1-score, training time

6.3 Περιγραφή Σεναρίου - Μοντελοποίηση Συστήματος

Σύμφωνα με την Εικόνα 6.1 και τον ως άνω αλγόριθμο η μοντελοποίηση του συστήματος ανάγεται σε μερικές επιμέρους διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σειριακά και συνεισφέρουν στην προσομοίωση ενός ετερογενούς δικτύου επόμενης γενιάς. Η πρώτη κατά σειρά είναι η δημιουργία της τοπολογίας του δικτύου και των βασικών συσκευών που το απαρτίζουν. Πρόκειται για μία ασύρματη εσωτερική βιομηχανική εγκατάσταση (Indoor Factory), βασισμένη στις προδιαγραφές TR 38.901 και TR 38.857 του 3GPP. Το σενάριο που αναπτύσσεται αντιπροσωπεύει το εσωτερικό ad-hoc δίκτυο ενός εργοστασίου, που χαρακτηρίζεται από πυκνή κατανομή αντικειμένων. Αυτό περιλαμβάνει διάφορα εμπόδια, όπως τοίχους και μηχανήματα, που επηρεάζουν τη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Τοποθετούνται σταθεροί σταθμοί βάσης σε υψηλά σημεία, σχηματίζοντας ένα πλέγμα εντός του χώρου. Κάθε σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με κεραιές που έχουν συγκεκριμένη διάταξη και πολωμένες γωνίες. Αυτοί λαμβάνουν σήμα από έναν κεντρικό σταθμό βάσης και υλοποιούν sidelink συνδέσεις εκπέμποντας με ισχύ 24 dBm προς τους διάφορους χρήστες. Οι χρήστες με τη σειρά τους μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε προκαθορισμένες είτε σε τυχαίες θέσεις. Για τις ανάγκες του εν λόγω σεναρίου επιλέγεται τυχαία κατανομή, ενώ υποστηρίζονται δύο τύποι χρηστών. Αφενός εισέρχονται στο σύστημα τυπικοί χρήστες, δηλαδή UE που αντιστοιχούν σε συσκευές του εργοστασίου. Αυτοί τοποθετούνται τυχαία εντός του χώρου προσομοίωσης και αντιπροσωπεύουν το 65% του συνολικού αριθμού χρηστών. Αφετέρου, το υπόλοιπο 35% είναι υποκλοπείς, που έχουν στο μεγαλύτερο μέρος τους παρόμοια χαρακτηριστικά με τα τυπικά UEs, αλλά τοποθετούνται σε σημεία κοντινότερα προς τους σταθμούς βάσης. Επίσης, προκειμένου να μπορούν να ανιχνεύουν τα σήματα καθώς και να ανιχνεύονται από τους σταθμούς βάσης με ικανοποιητικό throughput, οι υποκλοπείς εξοπλίζονται με αυξημένη έως διπλάσια ισχύ εκπομπής. Για τις ανάγκες του πειράματος και της πληρότητας των δεδομένων έγινε προσομοίωση του συστήματος για 500 UEs. Προς ευκολότερη κατανόηση και καθαρότερη εικόνα, όμως, της τοπολογίας και της πυκνότητας χρηστών παρατίθεται η κάτωθι οπτικοποίηση του σεναρίου που αντιστοιχεί σε λιγότερους χρήστες.



Εικόνα 6.2: Τοπολογία ad-hoc δικτύου

Εφόσον έχει στηθεί το σύστημα, το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία καναλιών επικοινωνίας σύμφωνα με τα πρότυπα που αναφέρθηκαν. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης *h38901ChannelSetup* και καθορίζεται από τις παραμέτρους της προσομοίωσης. Κύριος στόχος της συνάρτησης είναι να δημιουργήσει ένα σύνολο καναλιών επικοινωνίας μεταξύ σταθμών βάσης (ΣΒ) και χρηστών (UE), με βάση τις παραμέτρους που έχουν οριστεί από τον χρήστη, προσφέροντας μια ακριβή και ρεαλιστική αναπαράσταση του ασύρματου περιβάλλοντος. Σε πρώτη φάση δημιουργείται ένας φορέας για το σήμα, λαμβάνοντας υπόψιν τις διάφορες παραμέτρους του σεναρίου, όπως τη διαμόρφωση του φορέα, το ρυθμό δειγματοληψίας, και τις θέσεις των σταθμών βάσης και των χρηστών. Παράλληλα ρυθμίζονται και τα ηχητικά σήματα αναφοράς. Πρόκειται για σήματα τα οποία αποστέλλονται από τους χρήστες προς τον εκάστοτε σταθμό βάσης και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού και συγκεκριμένα παραμέτρων όπως οι διαδρομές διάδοσης, η φασματική αποδοτικότητα και οι απώλειες. Τα SRS είναι καθοριστικά για την προσαρμοστική διαμόρφωση του καναλιού (adaptive modulation) και την επιλογή της δέσμης (beamforming). Όσον αφορά τη διαμόρφωση του φορέα αυτή ακολουθεί την τεχνική OFDM που περιεγράφηκε στη θεωρία εκτενώς. Έτσι επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών σημάτων με διαχωρισμό συχνοτήτων, αναπτύσσοντας ταυτόχρονα σημαντική ανθεκτικότητα σε φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης, ώστε να διατηρεί την ποιότητα του σήματος σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο.

Ο κώδικας χρησιμοποιεί ένα τρισδιάστατο πλέγμα θέσεων για τους σταθμούς βάσης και τους χρήστες, και δημιουργεί ένα κανάλι για κάθε ζεύγος ΣΒ-UE. Μία σημαντική απόφαση που λαμβάνεται στις συναρτήσεις αυτές αφορά το αν η σύνδεση μεταξύ ενός ΣΒ και ενός UE είναι ορατή (Line of Sight – LoS) ή όχι (Non Line of Sight – NLoS). Επιπλέον, το κάθε κανάλι περιλαμβάνει τόσο τα χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας (Large Scale – LS), όπως είναι η απώλεια διαδρομής, όσο και τα χαρακτηριστικά μικρής κλίμακας (Small Scale – SS), με την εισαγωγή του fast fading. Ειδικότερα, οι απώλειες μονοπατιού σχετίζονται με την εξασθένηση

της ισχύος του σήματος καθώς αυτό διαδίδεται από τον πομπό προς τον δέκτη. Οι απώλειες αυτές επηρεάζονται από παράγοντες όπως η απόσταση, η συχνότητα, και τα εμπόδια στο μονοπάτι του σήματος. Για το παρόν σύστημα χρησιμοποιείται μία παραλλαγή του Γενικού Μοντέλου Απωλειών Διάδοσης για εσωτερικό χώρο. Ανάλογα με τις απώλειες που παρουσιάζει ένα κανάλι και τις συνθήκες που το διακατέχουν επιλέγεται ο βέλτιστος εξυπηρετητής ΣΒ για έναν συγκεκριμένο UE, ο οποίος μπορεί να μην είναι ο πλησιέστερος αλλά αυτός που προσφέρει τις μικρότερες απώλειες. Πρόκειται, μάλιστα, για ένα χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τους τυπικούς χρήστες από τους eavesdroppers. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται ότι τα κανάλια αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια τις ιδιαιτερότητες του ασύρματου περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων των συσχετισμένων χωρικών χαρακτηριστικών όταν αυτά είναι ενεργοποιημένα. Επιπλέον, η συνάρτηση ενσωματώνει την αντιστροφή των ρόλων εκπομπής και λήψης, ώστε να προσομοιώνει και την αντίστροφη επικοινωνία, από τον χρήστη προς τη σταθμό βάσης, που είναι συχνά απαραίτητη σε συγκεκριμένα σενάρια. Το αποτέλεσμα επομένως της προσομοίωσης είναι ένα σύνολο καναλιών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ανάλυση και βελτιστοποίηση του δικτύου.

Παράμετροι	Προσομοίωση
Απόσταση υποφερόντων	30 kHz
Σύμβολα μορφοποίησης καναλιού	14
Κυκλικό Πρόθεμα καναλιού	normal
Σύμβολα μορφοποίησης SRS	12
Κυκλική μετατόπιση SRS	60
Ύψος κεραιών	BS: 8 m, UE: 1.5 m
Αριθμός Resource Blocks ανά μετάδοση	264
Εύρος ζώνης	100 MHz
SRS Positioning	True
Αριθμός κεραιών εκπομπής	32
Αριθμός κεραιών λήψης	1

Πίνακας 6.2: Βασικές παράμετροι μετάδοσης

6.4 Δημιουργία Συνόλου Δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η όλη διαδικασία της μετάδοσης αποσκοπεί στην δημιουργία συνόλων δεδομένων. Χρειάζεται, επομένως, να πραγματοποιηθεί μετατροπή των χαρακτηριστικών που εξάγονται από τα κανάλια επικοινωνίας σε εικόνες οι οποίες θα αποτελέσουν είσοδο για τα μοντέλα μηχανικής και βαθιάς μάθησης. Κλειδί για την μετατροπή αυτή είναι η συνάρτηση *channels2ImageDataset*. Αφού αρχικοποιηθούν οι κατάλληλες παράμετροι, η συνάρτηση προσομοιώνει όσα αναφέρθηκαν και διαμορφώθηκαν παραπάνω για την μετάδοση σημάτων SRS, την εκτίμηση καναλιού για κάθε χρήστη και την μετέπειτα μετάδοση από τον σταθμό βάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία δεδομένων καναλιών, τα οποία αρχικά αποθηκεύονται στον πίνακα συντελεστών *H* του κάθε

καναλιού και εν συνεχεία μετατρέπονται σε μορφή εικόνων CSI. Κάθε εικόνα έχει διαστάσεις: (NumSubCarriers x NumOFDMSymbols x NumPorts x NumBaseStations) και αντανακλά τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του περιβάλλοντος διάδοσης, όπως την επίδραση πολλαπλών διαδρομών και την απόσβεση του σήματος λόγω της απόστασης. Σειρά έχει ο διαχωρισμός των δεδομένων, με τυχαίο πάντα τρόπο, σε σύνολο εκπαίδευσης που αντιστοιχεί στο 80% και σύνολο δοκιμών που αντιστοιχεί στο 20%. Στο τελευταίο βήμα, τα δεδομένα αυτά επισημαίνονται με τις αντίστοιχες ετικέτες του υποκλοπέα (1) ή του τυπικού χρήστη (0). Ωστόσο, ορισμένα από τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, δεν αρκούνται αποκλειστικά στην είσοδο των CSI εικόνων. Για το λόγο αυτό, το αρχείο ue_data.xlsx που περιλαμβάνει τις ετικέτες, εμπλουτίζεται επίσης και με τις θέσεις των UE καθώς και με την τιμή της ισχύος εκπομπής που τα χαρακτηρίζει. Η σημασία των πληροφοριών αυτών θα γίνει κατανοητή αργότερα.



Εικόνα 6.3: Παράδειγμα CSI εικόνας του συνόλου δεδομένων

X Position	Y Position	Transmit Power	Eavesdropper Flag
105.95	6.5	23	0
107.94	52.82	23	0
51.04	31.44	23	0
96.5	32.11	23	0
12.826	27.501	32.57495358	1
27.348	47.864	33.61450372	1
47.36	32.751	36.28276481	1

Πίνακας 6.3: Παράδειγμα μέρους του ue_data.xlsx του συνόλου δεδομένων

6.5 Μοντέλα Μηχανικής και Βαθιάς Μάθησης

Για τους σκοπούς του πειράματος δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα μηχανικής μάθησης και τρία μοντέλα βαθιάς μάθησης, τα οποία περιγράφονται με σειρά παρακάτω. Όλα τα μοντέλα υιοθετούν την τεχνική της μάθησης με επίβλεψη και εκτελούν ταξινόμηση, αποσκοπώντας στην εξαγωγή πρόβλεψης της κατηγορίας του κάθε UE, δηλαδή του αν αποτελεί eavesdropper ή όχι. Σημειώνεται ότι όλα τα μοντέλα υπόκεινται σε διαδικασία βελτιστοποίησης υπερπαραμέτρων με Αναζήτηση Πλέγματος (Grid Search – GS), ώστε να προσαρμοστούν καλύτερα στα δεδομένα του συγκεκριμένου προβλήματος. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί cross-validation για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς παραμέτρων, αναζητώντας εκείνον που θα αποδώσει τα μέγιστα στο εκάστοτε μοντέλο. Μετά την επιλογή των καλύτερων υπερπαραμέτρων, τα βέλτιστα μοντέλα ML/DL εκπαιδεύονται με τα δεδομένα του training set. Τέλος, πραγματοποιούνται οι προβλέψεις για το test set και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή δυαδικών ετικετών (0 ή 1), ανάλογα με το αν το μοντέλο προβλέπει την παρουσία ενός eavesdropper.

Μηχανή Διανύσματος Υποστήριξης (Support Vector Machine – SVM)

Πρόκειται για το πιο απλό μοντέλο ML που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Το μοντέλο αποτελείται από ένα pipeline που περιλαμβάνει την κανονικοποίηση των δεδομένων και την μοντελοποίηση του SVM. Η χρήση του SVM για κατηγοριοποίηση είναι ενθαρρυντική σε αυτό το σενάριο λόγω της ικανότητάς του να χειρίζεται δεδομένα υψηλής διάστασης, όπως οι εικόνες CSI, και να διαχωρίζει γραμμικά ή μη-γραμμικά κλάσεις μέσω της χρήσης πυρήνων. Με άλλα λόγια προσπαθεί να ανιχνεύσει διαφορές και ανωμαλίες που παρουσιάζονται εξαιτίας της παρουσίας υποκλοπών. Η προσθήκη θέσεων ως επιπλέον χαρακτηριστικών δρα ενισχυτικά στο μοντέλο, παρέχοντας πληροφορίες που μπορούν να βοηθήσουν στην καλύτερη κατηγοριοποίηση των χρηστών. Δοκιμάζονται τρεις παράμετροι:

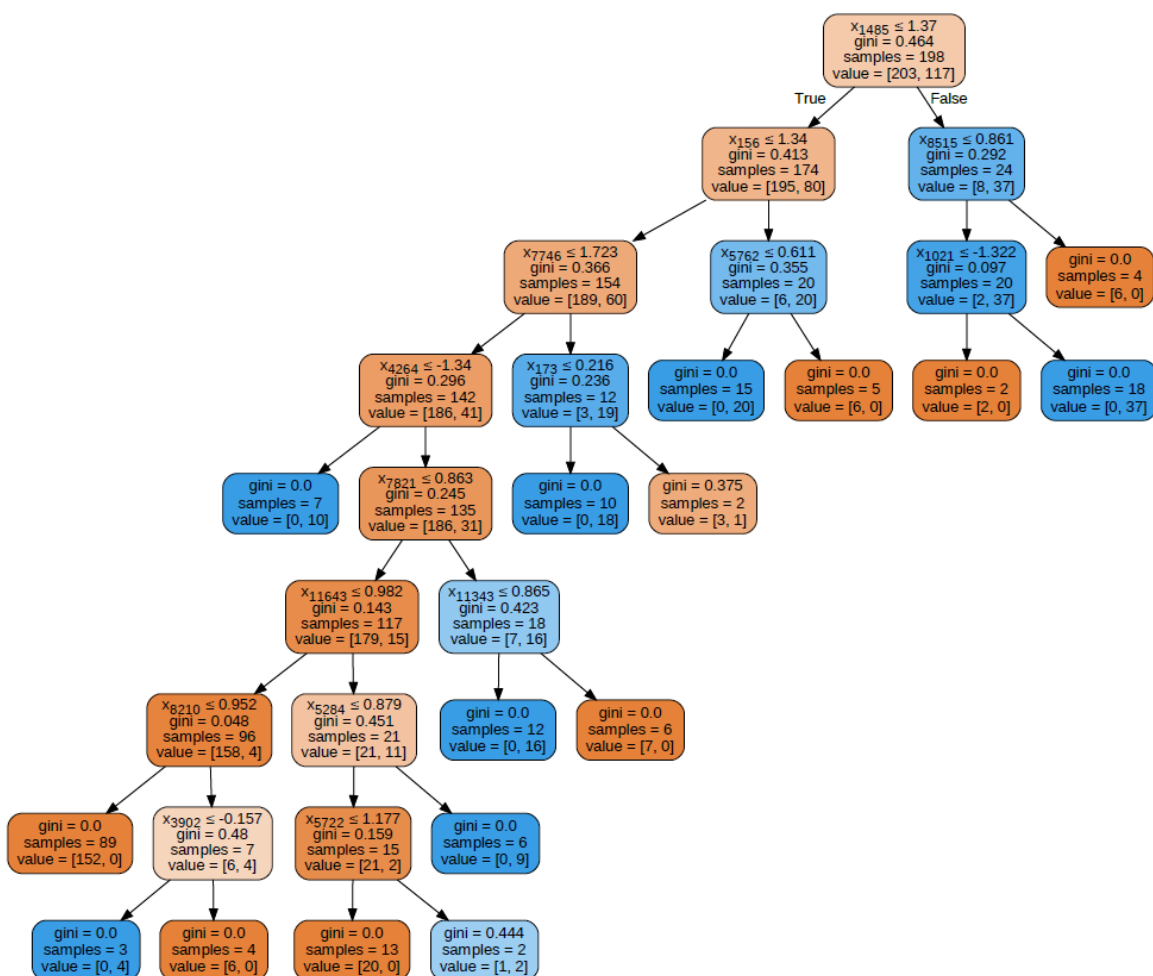
- **C - Παράμετρος Κανονικοποίησης:** παίζει καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο της ισορροπίας μεταξύ της πολυπλοκότητας του μοντέλου και της ακρίβειας και ελέγχει το πόσο αυστηρά θα προσπαθήσει να αποφύγει σφάλματα κατά την εκπαίδευση.
- **Kernel - Πυρήνας:** χρησιμοποιείται από το SVM για τον υπολογισμό των διαχωριστικών ορίων μεταξύ των κλάσεων.
- **Παράμετρος gamma:** σχετίζεται με το μήκος κλίμακας του πυρήνα του SVM και ελέγχει την επίδραση που έχει ένα μεμονωμένο δείγμα στο συνολικό μοντέλο. Εν γένει, όσο υψηλότερο είναι το C και χαμηλότερο το gamma τόσο πιο γενικά είναι τα αποτελέσματα του μοντέλου, αποφεύγοντας της υπερπροσαρμογή (overfitting).

```
param_grid_svm = {  
    'svm__C': [0.1, 1, 10],  
    'svm__gamma': ['scale', 'auto'],  
    'svm__kernel': ['linear', 'rbf']  
}
```

Best parameters for SVM: {'svm__C': 0.1, 'svm__gamma': 'scale', 'svm__kernel': 'rbf'}

Τυχαίο Δάσος (Random Forest – RF)

Όπως αναφέρθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο, το Random Forest είναι ένας από τους πιο ισχυρούς αλγόριθμους κατηγοριοποίησης, ιδανικός για προβλήματα όπως η ανίχνευση eavesdroppers, καθώς μπορεί να χειριστεί δεδομένα υψηλής διάστασης και ποικιλία χαρακτηριστικών (όπως εικόνες CSI και πληροφορίες θέσης) χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη προ-επεξεργασία. Αρχικά ορίζεται ένα βασικό μοντέλο μέσω του RandomForestClassifier, το οποίο ακολουθεί την διαδικασία λήψης αποφάσεων που αποτυπώνεται στην Εικόνα 6.4. Οι κόμβοι του δέντρου περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τον κανόνα διαχωρισμού, τον αριθμό των δειγμάτων που περιλαμβάνονται σε κάθε κόμβο καθώς και το ποσοστό της καθαρότητας του κόμβου (μετρούμενο από την τιμή «gini»), το οποίο δείχνει πόσο καλά έχουν διαχωριστεί τα δείγματα σε εκείνο το σημείο.



Εικόνα 6.4: Αρχιτεκτονική μοντέλου RF

Το εκπαιδευμένο μοντέλο αξιολογείται μέσω της διαδικασίας `cross_val_score`, η οποία υπολογίζει τη βαθμολογία του μοντέλου σε πέντε διαφορετικά υποσύνολα του training set. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εκτίμηση της απόδοσης του μοντέλου να γίνεται συνεχώς σε νέα δεδομένα, διασφαλίζοντας την αποφυγή του overfitting. Η βελτιστοποίηση υπερπαραμέτρων αυτή τη φορά έχει ως εξής:

- **n_estimators**: συμβολίζει τον αριθμό των δέντρων απόφασης που θα δημιουργηθούν στο δάσος. Μεγαλύτερος αριθμός δέντρων συνήθως οδηγεί σε καλύτερη ακρίβεια, αλλά αυξάνει και τον χρόνο εκπαίδευσης.
- **max_depth**: είναι το μέγιστο βάθος των δέντρων. Ο περιορισμός του βάθους βοηθά στην αποφυγή του overfitting, , αλλά δεν γενικεύει καλά σε νέα δεδομένα.
- **min_samples_split**: ισοδυναμεί με τον ελάχιστο αριθμό δειγμάτων που απαιτούνται για να γίνει διαχωρισμός (split) σε έναν εσωτερικό κόμβο. Μείωση των δειγμάτων επιτρέπει μεγαλύτερο βάθος δέντρων και πιο λεπτομερείς διαχωρισμούς, ενώ ενδεχόμενη αύξηση οδηγεί σε πιο γενικούς διαχωρισμούς.
- **min_samples_leaf**: ισοδυναμεί αντίστοιχα με τον ελάχιστο αριθμό δειγμάτων που απαιτούνται για να δημιουργηθεί ένα φύλλο (leaf) στο δέντρο.
- **max_features**: είναι ο αριθμός των χαρακτηριστικών που εξετάζονται σε κάθε split και βοηθά τα δέντρα να διαφοροποιηθούν μεταξύ τους, γεγονός που βελτιώνει τη σταθερότητα του μοντέλου.
- **bootstrap**: επιλέγει αν κάθε δέντρο θα κατασκευαστεί με δείγματα που έχουν επιλεγθεί με επανάληψη από το αρχικό σύνολο δεδομένων.

```
param_grid_rf = {  
    'n_estimators': [100, 200],  
    'max_depth': [10, 20],  
    'min_samples_split': [2, 5],  
    'min_samples_leaf': [1, 2, 4],  
    'max_features': ['auto', 'sqrt', 'log2'],  
    'bootstrap': [True, False]  
}
```

Best parameters for RF: {'bootstrap': True, 'max_depth': 10, 'max_features': 'sqrt', 'min_samples_leaf': 2, 'min_samples_split': 5, 'n_estimators': 100}

Βαθύ Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο 1 (Deep Convolutional Neural Network – DCNN 1)

Αναμφισβήτητα το DCNN είναι το πλέον κατάλληλο μοντέλο για ανάλυση εικόνας και πολύπλοκων μοτίβων, καθώς η βαθιά του αρχιτεκτονική επιτρέπει την εκμάθηση τόσο απλών όσο και σύνθετων χαρακτηριστικών. Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιείται η κλάση «Sequential» της βιβλιοθήκης Keras, ενώ για την εκπαίδευση χρησιμοποιείται η «binary_crossentropy» ως συνάρτηση απώλειας, δεδομένου ότι πρόκειται για πρόβλημα δυαδικής κατηγοριοποίησης. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της δομής και των επιπέδων του DCNN.

- **Conv2D** (Convolutional Layer): εφαρμόζει φίλτρα μεγέθους πάνω στα δεδομένα εισόδου με σκοπό να μειώσει τη διάσταση των δεδομένων και να ανιχνεύσει παράλληλα σημαντικά χαρακτηριστικά αυτών.
- **Batch Normalization**: συμμετέχει στη σταθεροποίηση της διαδικασίας εκπαίδευσης εξομαλύνοντας τις τιμές των ενεργοποιήσεων.
- **ReLU** (Rectified Linear Unit): είναι μια ενεργοποίηση που προσθέτει μη γραμμικότητα στο μοντέλο, βοηθώντας το να μάθει πιο πολύπλοκα μοτίβα.

- **MaxPooling2D**: το pooling επίπεδο μειώνει περαιτέρω τη διάσταση των δεδομένων, διατηρώντας τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά.
- Ακολουθούν δύο διαδοχικές επαναλήψεις της αρχικής υποδομής με τα επίπεδα Conv2D, Batch Normalization και ReLU.
- **GlobalAveragePooling2D**: υπολογίζει τον μέσο όρο των χαρακτηριστικών σε κάθε κανάλι, μετατρέποντας τον 4D πίνακα δεδομένων σε πίνακα δύο διαστάσεων.
- **Dense Layer (Fully Connected Layer)**: είναι το τελευταίο επίπεδο και αποτελείται από ένα πλήρως συνδεδεμένο επίπεδο με 1 νευρώνα και sigmoid ενεργοποίηση, το οποίο παράγει μια δυαδική έξοδο για την κατηγοριοποίηση του δείγματος (αν είναι eavesdropper ή όχι).

Το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει ως είσοδο μόνο τις εικόνες CSI και τις αντίστοιχες ετικέτες και δεν γνωρίζει επιπλέον πληροφορίες για τα UE. Οι υπερπαράμετροι που εξετάζει είναι:

- **filters1, filters2, filters3**: αντιστοιχούν στον αριθμό των φίλτρων σε κάθε Conv2D επίπεδο. Περισσότερα φίλτρα μπορούν να ανιχνεύσουν πιο σύνθετα χαρακτηριστικά, αλλά αυξάνουν και το υπολογιστικό κόστος.
- **kernel_size1, kernel_size2, kernel_size3**: αντιστοιχούν στο μέγεθος των πυρήνων (kernels) σε κάθε Conv2D επίπεδο, το οποίο καθορίζει την περιοχή που καλύπτουν τα φίλτρα. Μεγαλύτερα kernels μπορούν να ανιχνεύσουν ευρύτερα μοτίβα, αλλά μειώνουν τη λεπτομέρεια.
- **batch_size**: είναι το μέγεθος των batches για την εκπαίδευση του μοντέλου. Συνήθως όταν επιλέγεται μικρός αριθμός η εκπαίδευση είναι περισσότερο θορυβώδης αλλά πετυχαίνει καλύτερη γενίκευση.
- **epochs**: ορίζει τον αριθμό των εποχών εκπαίδευσης.

```
param_grid_dcnn = {  
    'model__filters1': [32, 64, 128],  
    'model__filters2': [64, 128],  
    'model__filters3': [128, 256],  
    'model__kernel_size1': [(5, 5), (7, 7)],  
    'model__kernel_size2': [(3, 3), (5, 5)],  
    'model__kernel_size3': [(3, 3)],  
    'batch_size': [4, 8],  
    'epochs': [10, 20]  
}
```

Best parameters for DCNN 1: {'batch_size': 4, 'epochs': 10, 'model__filters1': 32, 'model__filters2': 128, 'model__filters3': 256, 'model__kernel_size1': (7, 7), 'model__kernel_size2': (5, 5), 'model__kernel_size3': (3, 3)}

Βαθύ Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο 2 (Deep Convolutional Neural Network – DCNN 2)

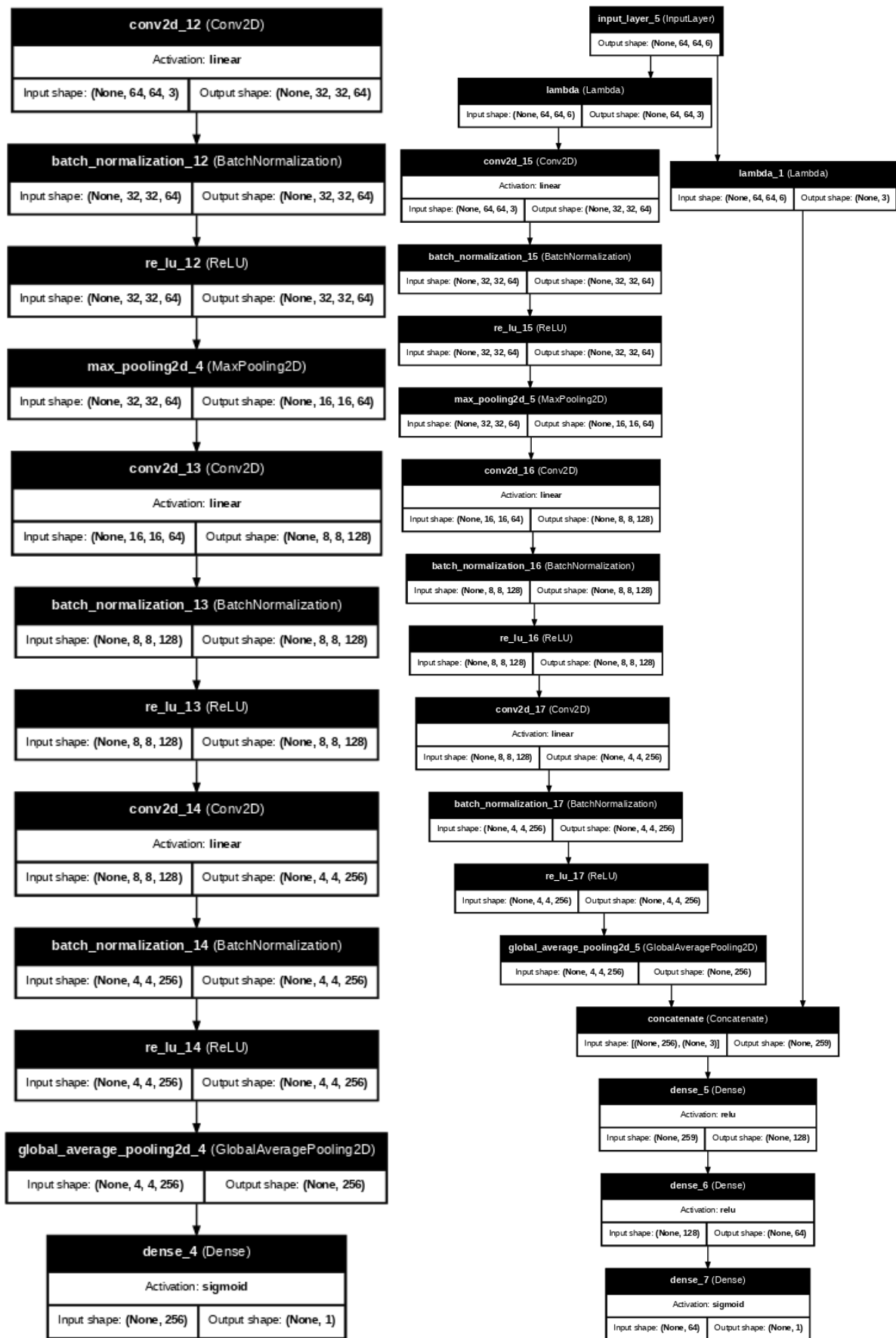
Πρόκειται για ένα μοντέλο που βασίζεται ισχυρά στο προηγούμενο, αποτελώντας μια πιο σύνθετη και ολοκληρωμένη προσέγγιση αυτού, αφού λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις οπτικές πληροφορίες αλλά και άλλα κατηγορικά δεδομένα. Συνεπώς, η είσοδος του αποκτά πλέον

διαστάσεις (64, 64, 3 + 3), όπου 3 είναι τα κανάλια χρώματος των εικόνων και 3 οι επιπλέον πληροφορίες που παρέχονται από το ue_data.xlsx. Για την σωστή διαχείριση τους και τον διαχωρισμό των δεδομένων, το μοντέλο κάνει χρήση της συνάρτησης Lambda. Κατόπιν, τα δεδομένα εικόνας περνούν μέσα από τα Convolutional και Pooling επίπεδα, ενώ τα δεδομένα θέσης και ισχύος συνδυάζονται με τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν μετά το Global Average Pooling, προσθέτοντας έτσι μια νέα διάσταση στο τελικό αποτέλεσμα. Σε αντιδιαστολή με το αρχικό DCNN, προστίθενται τώρα δύο νέα πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα (Dense) με ReLU ενεργοποίηση, πριν από το τελικό sigmoid επίπεδο. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία πιο πολύπλοκων μοντέλων που συνδυάζουν τις πληροφορίες από την εικόνα και τη θέση πριν ληφθεί η τελική απόφαση. Επόμενο είναι φυσικά να αυξηθούν και οι παράμετροι βελτιστοποίησης στην αναζήτηση πλέγματος, καθώς εισέρχονται επιπλέον και οι αριθμοί των νευρώνων στα νέα επίπεδα πυκνώσης.

```
param_grid_dcnn_2 = {  
    'model__filters1': [32, 64],  
    'model__filters2': [64, 128],  
    'model__filters3': [128, 256],  
    'model__dense1': [64, 128],  
    'model__dense2': [64, 128],  
    'model__kernel_size1': [(5, 5), (7, 7)],  
    'model__kernel_size2': [(3, 3)],  
    'model__kernel_size3': [(3, 3), (5, 5)],  
    'batch_size': [4, 8],  
    'epochs': [10]  
}
```

Best parameters for DCNN 2: {'batch_size': 4, 'epochs': 10, 'model__dense1': 64, 'model__dense2': 128, 'model__filters1': 64, 'model__filters2': 128, 'model__filters3': 256, 'model__kernel_size1': (5, 5), 'model__kernel_size2': (3, 3), 'model__kernel_size3': (5, 5)}

Παρατίθεται εικόνα που αποτυπώνει τη δομή και των δύο DCNN μοντέλων, με σκοπό την συγκριτική τους ανάλυση και κατανόηση. Στην εικόνα εμφανίζονται επίσης και οι διαστάσεις εισόδου και εξόδου κάθε επιπέδου, τονίζοντας τη σταδιακή μείωση της διάστασης των δεδομένων καθώς εμβαθύνουμε στο δίκτυο.



Εικόνα 6.5: Σύγκριση αρχιτεκτονικής μοντέλων DCNN

Μακροπρόθεσμη Μνήμη (Long Short-Term Memory – LSTM)

Το τελευταίο μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτελεί έναν τύπο αναδρομικού νευρωνικού δικτύου (RNN), σχεδιασμένο για την ανάλυση ακολουθιακών δεδομένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ενός eavesdropper, με είσοδο που περιλαμβάνει τόσο εικόνες όσο και θέσεις. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα εισόδου ακολουθούν τη συνδυασμένη μορφή που περιεγράφηκε και στο δεύτερο μοντέλο DCNN. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρειάζεται μία προεπεξεργασία των δεδομένων για να αποκτήσουν τη μορφή της εισόδου που αναμένει το δίκτυο. Οι εικόνες "ρευστοποιούνται" ώστε να έχουν σχήμα (batch_size, time_steps, features), με σκοπό να είναι συμβατές με τα LSTM επίπεδα. Σε παρόμοιο ύφος, οι θέσεις επαναλαμβάνονται για κάθε χρονικό βήμα, δημιουργώντας μια ακολουθία θέσεων με το ίδιο χρονικό μήκος όπως οι εικόνες. Τελικά, η διαστρωμάτωση του μοντέλου διαμορφώνεται ως εξής:

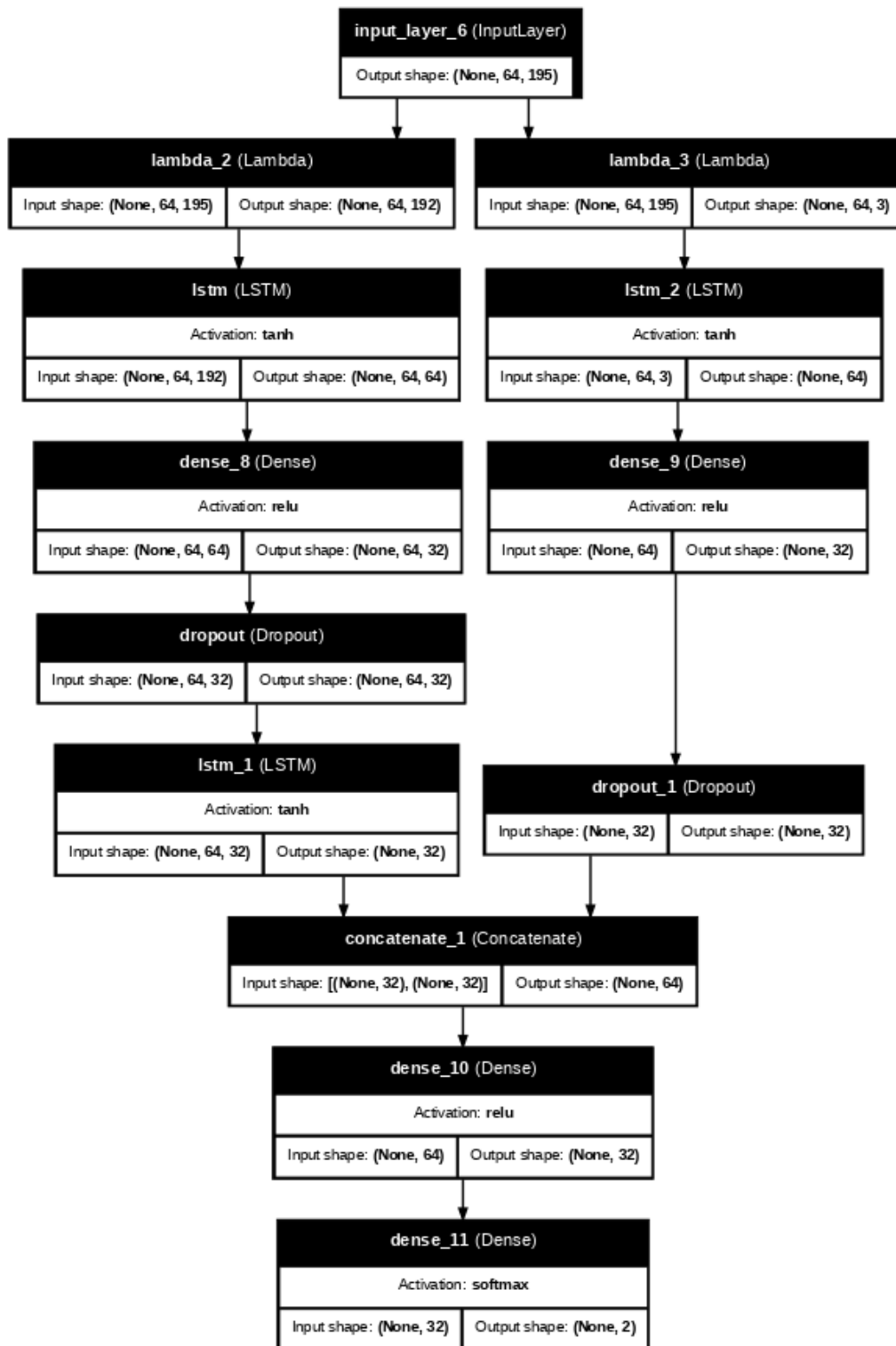
- **LSTM Layer:** αυτό το επίπεδο επεξεργάζεται τα δεδομένα εικόνας και αποθηκεύει την πληροφορία που θεωρείται σημαντική για τα επόμενα βήματα.
- **Dense Layer:** περιέχει dense μονάδες και ενεργοποίηση ReLU και συμβάλλει στην εξαγωγή σημαντικών χαρακτηριστικών από τα δεδομένα εικόνας.
- **Dropout Layer:** χρησιμοποιείται για να μειώσει την πιθανότητα overfitting.
- **LSTM Layer:** αυτή τη φορά δεν επιστρέφει ακολουθία, αλλά ένα μόνο τελικό χαρακτηριστικό διάνυσμα.
- Ακολουθεί επανάληψη της αρχικής ακολουθίας LSTM, Dense και Dropout που επεξεργάζεται τα δεδομένα θέσης - ισχύος με τρόπο παρόμοιο όπως έγινε στις εικόνες.
- **Συνδυασμός Εξόδων:** Οι έξοδοι από τις δύο διαδρομές (εικόνας και θέσεων) συνδυάζονται χρησιμοποιώντας ένα επίπεδο σύνθεσης ('Concatenate').
- **Dense Layer:** δέχεται ως είσοδο το συνδυασμένο διάνυσμα χαρακτηριστικών και το περνά από ένα ακόμη πυκνό επίπεδο με ReLU ενεργοποίηση, συνδυάζοντας τις πληροφορίες και αυξάνοντας την πολυπλοκότητα.
- **Dense Layer:** το τελευταίο επίπεδο πυκνώσεως έχει ενεργοποίηση softmax, και παράγει τις πιθανότητες για την τελική κατηγοριοποίηση.

Το παραπάνω μοντέλο έχει αρκετές υπερπαραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοσή του:

- **units:** είναι ο αριθμός των μονάδων στα LSTM στρώματα, που καθορίζει την ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να αποθηκευτεί από το δίκτυο.
- **dense_units:** είναι αριθμός των νευρώνων στα dense επίπεδα.
- **dropout_rate:** συμβολίζει τον ρυθμό απόρριψης, δηλαδή το ποσοστό των μονάδων που "κλείνουν" σε κάθε βήμα εκπαίδευσης για να αποφεύγεται το overfitting.
- **optimizer:** αντιστοιχεί στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των βαρών του μοντέλου κατά την εκπαίδευση

```
param_grid_lstm = {  
    'model__units': [32, 64],  
    'model__dense_units': [16, 32],  
    'model__dropout_rate': [0.3, 0.5],  
    'batch_size': [16],  
    'epochs': [10, 20],  
    'optimizer': ['adam', 'rmsprop']  
}
```

Best Parameters for LSTM: {'batch_size': 16, 'epochs': 10, 'model__dense_units': 16, 'model__dropout_rate': 0.5, 'model__units': 32, 'optimizer': 'rmsprop'}



Εικόνα 6.6: Αρχιτεκτονική μοντέλου LSTM

7. Αποτελέσματα και συγκριτική αξιολόγηση

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του σύγχρονου ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, όπως περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 6 και συλλέχθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα. Στη συνέχεια εκπαιδεύτηκαν τα μοντέλα μηχανικής και βαθιάς μάθησης και προέβησαν σε προβλέψεις για να ταξινομήσουν τους χρήστες σε ακουστικούς υποκλοπείς και τυπικά UE. Στόχος είναι η εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για ένα μεγάλο εύρος χρηστών καθώς και η σύγκριση των μοντέλων ως προς την επίδοσή τους. Η αξιολόγηση βασίζεται σε ορισμένες μετρικές.

Η πιο διαδεδομένη ίσως μετρική αξιολόγησης είναι η **Ακρίβεια (Accuracy – Acc)**. Σε περιπτώσεις δυαδικής ταξινόμησης, όπως είναι και η συγκεκριμένη, η ακρίβεια υπολογίζεται εύκολα σύμφωνα με τον τύπο:

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

- **True Positive – TP**: Αληθώς θετικά, δηλαδή χρήστες που προβλέφθηκαν ως τυπικοί και πράγματι ήταν.
- **True Negative – TN**: Αληθώς αρνητικά, δηλαδή χρήστες που προβλέφθηκαν ως eavesdroppers και πράγματι ήταν.
- **False Positive – FP**: Ψευδώς θετικά, δηλαδή χρήστες που προβλέφθηκαν ως τυπικοί ενώ δεν ήταν.
- **False Negative – FN**: Ψευδώς αρνητικά, δηλαδή χρήστες που προβλέφθηκαν ως eavesdroppers ενώ δεν ήταν.

Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση εγκυμονεί κάποιους κινδύνους όταν αφορά σε ταξινόμηση εικόνων, που ενδέχεται να παραπλανήσουν τον αναγνώστη από την πραγματική ερμηνεία του μοντέλου. Πρακτικά, στις εικόνες CSI οι ανωμαλίες που υποδεικνύουν την ύπαρξη κάποιου ύποπτου UE, ενώ είναι εξαιρετικά σημαντικές καταλαμβάνουν λίγο όγκο σε σχέση με το φυσιολογικό και μπορεί να μην υπάρχουν και καθόλου σε κάποιες περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, η τιμή της ακρίβειας μπορεί να είναι πολύ υψηλή ακόμα και στις περιπτώσεις όπου το μοντέλο δεν εντοπίζει τον eavesdropper, αρκεί η πλειονότητα των τυπικών χρηστών να είναι σωστή.

Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν και άλλες μετρικές σε συνδυασμό με την ακρίβεια. Δύο από αυτές είναι η **Εναισθησία ή Ανάκληση (Sensitivity – Sen or Recall – Rec)** και η **Ειδικότητα (Specificity – Spe)**, οι οποίες αποκαλύπτουν περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με την ακρίβεια όταν ο αριθμός των αληθώς θετικών και αρνητικών περιπτώσεων είναι σημαντικά άνισος. Δίνονται από τις σχέσεις:

$$Sen = Rec = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$Spe = \frac{TN}{TN + FP}$$

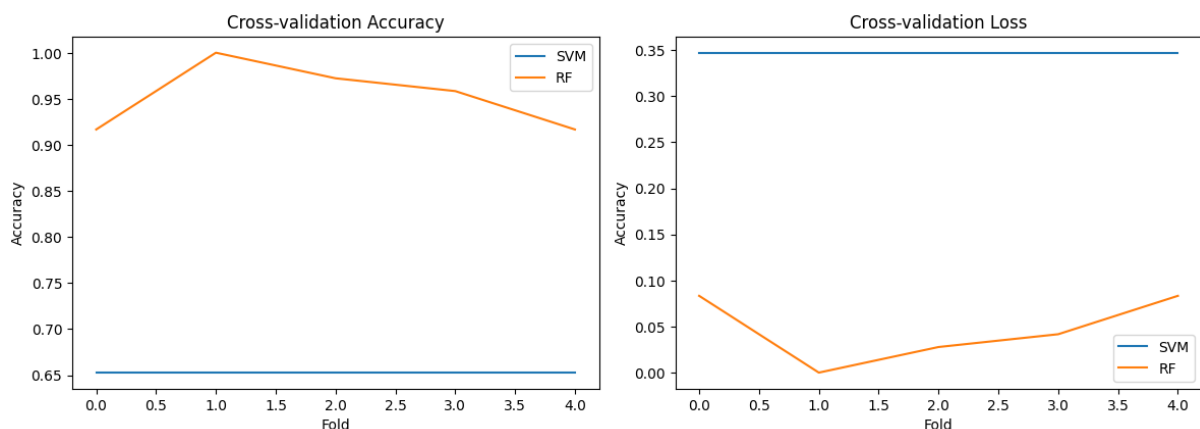
Μία πιο συγκεντρωτική μετρική, γνωστή ως **F1-Score** είναι:

$$F1 - Score = \frac{2 * Pre * Rec}{Pre + Rec} = \frac{2 * \frac{TP}{TP + FP} * \frac{TP}{TP + FN}}{\frac{TP}{TP + FP} + \frac{TP}{TP + FN}} = \frac{2 * TP}{2 * TP + FP + FN}$$

Εκτός από τις αριθμητικές μετρικές, χρησιμοποιήθηκαν επίσης και διαγραμματικά κριτήρια, όπως είναι αυτό της **Καμπύλης Χαρακτηριστικής Λειτουργίας Δέκτη (Receiver Operating Characteristic – ROC)**. Προκύπτει από τη σχεδίαση της ευαισθησίας σε σχέση με το ποσοστό ψευδώς θετικών (ίσο με 1 μείον την ειδικότητα) σε όλες τις δυνατές τιμές κατωφλίου. Το αποτέλεσμα είναι πάντα μία μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση μέσα στο μοναδιαίο τετράγωνο που συνδέεται με τα σημεία (0,0) και (1,1). Όσο πιο κοντά βρίσκεται η καμπύλη ROC στο σημείο (0,1) τόσο καλύτερες είναι οι προβλέψεις του προς εξέταση μοντέλου. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη ROC (Area Under the Curve – AUC) είναι μια άλλη πιθανή μετρική αξιολόγησης με τιμές στο [0,1], όπου η τιμή 0.5 υποδηλώνει τυχαίες εικασίες, ενώ η τιμή 1 υποδηλώνει άριστη απόδοση [33].

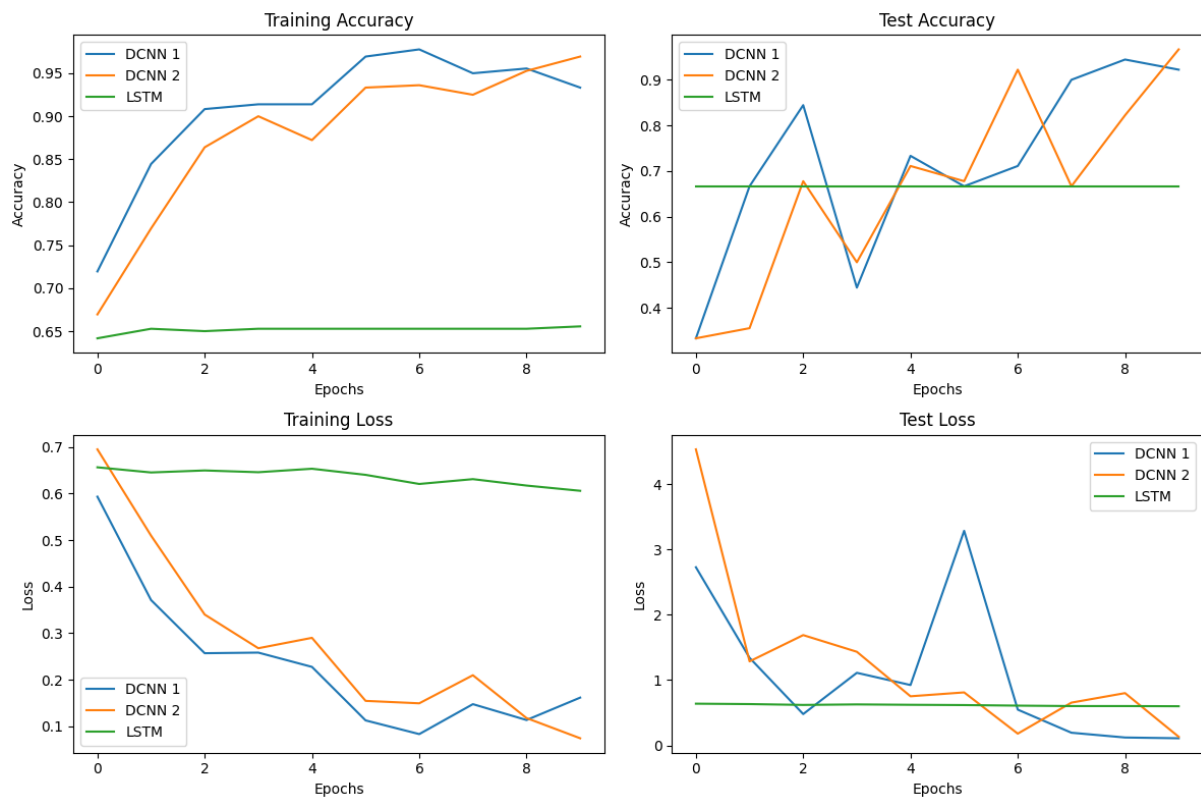
7.1 Διαγραμματική Απεικόνιση και Ανάλυση

Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται αναλυτικά και με διαφορετικούς τρόπους η επίδοση όλων των μοντέλων ML/DL που αναλύθηκαν προηγουμένως. Θα παρατεθούν τα ίδια γραφήματα για δύο παραλλαγές των δεδομένων. Στην πρώτη προσομοίωση δεν αποθηκεύτηκε στα παραγόμενα δεδομένα η ισχύς εκπομπής του κάθε χρήστη, παρόλο που συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς, ενώ στη δεύτερη περίπτωση τα μοντέλα είχαν στη διάθεσή τους και αυτό το δεδομένο. Ακολουθούν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 7.1: Σύγκριση SVM και RF

Οι παραπάνω καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις επιδόσεις της μηχανής διανυσμάτων υποστήριξης και του τυχαίου δάσους για διαφορετικά τμήματα του συνόλου δεδομένων κατά την διαδικασία του cross-validation. Στην τεχνική αυτή το σύνολο δεδομένων χωρίζεται σε k ίσα τμήματα, που ονομάζονται folds. Το μοντέλο εκπαιδεύεται σε $k-1$ από αυτά και στη συνέχεια αξιολογείται στο εναπομείναν fold. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται k φορές, κάθε φορά χρησιμοποιώντας διαφορετικό fold ως test set και τα υπόλοιπα ως training set. Παρατηρείται ότι το Random Forest επιτυγχάνει σταθερά ικανοποιητική ακρίβεια και χαμηλή απώλεια, ενώ το Support Vector Machine εμφανίζει την αντίθετη συμπεριφορά. Επομένως, το RF υπερνικά την σύγκριση αναμφισβήτητα. Από την άλλη πλευρά, βέβαια, η μείωση καθώς περνάνε τα folds για το RF υποδηλώνει πιθανό overfitting.



Εικόνα 7.2: Σύγκριση DCNN 1, DCNN 2 και LSTM

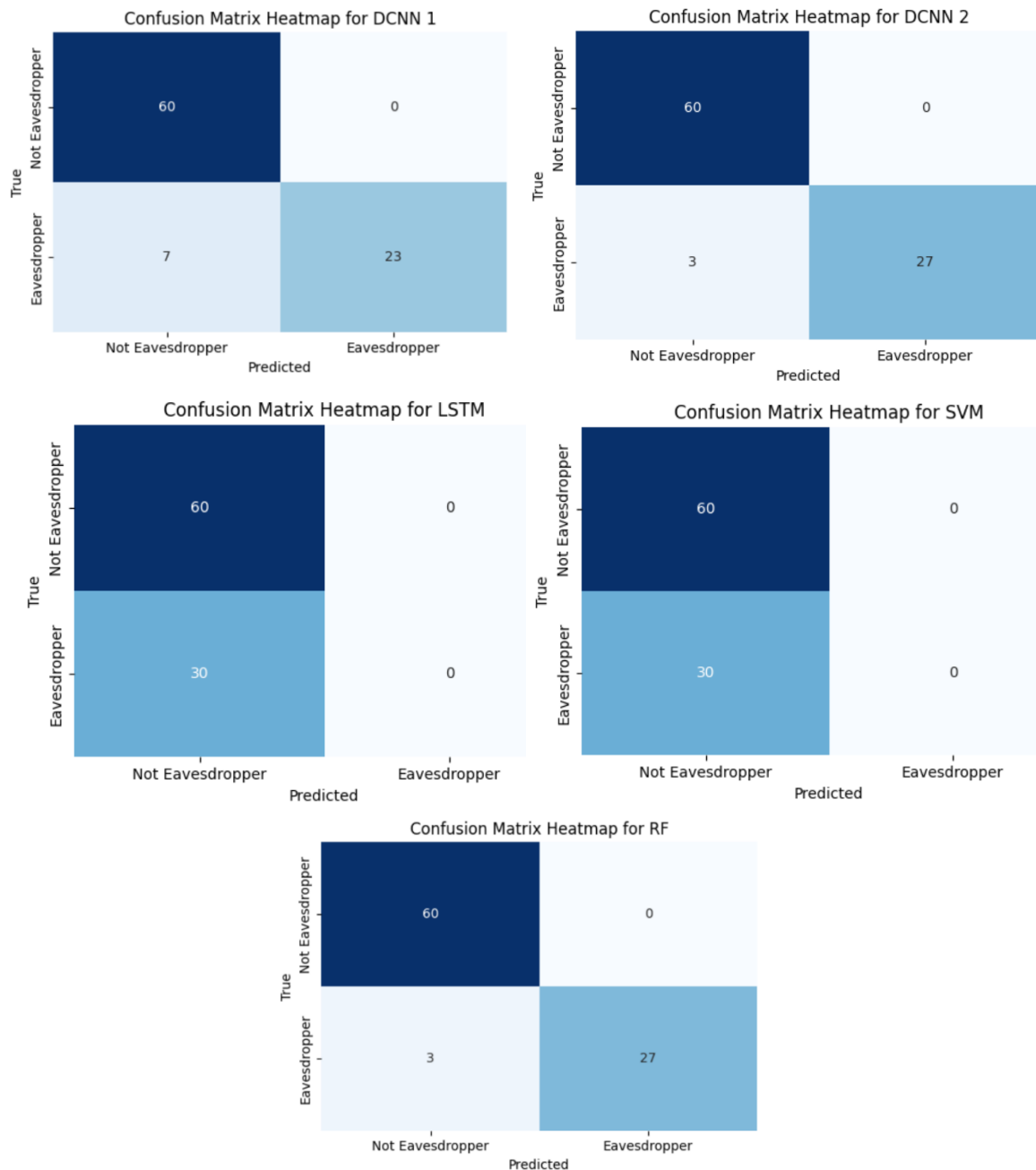
Μία αντίστοιχη σύγκριση πραγματοποιείται και για τα νευρωνικά δίκτυα, σε συνάρτηση αυτή τη φορά με την εξέλιξη των εποχών κατά το fitting των μοντέλων. Όσον αφορά το σύνολο εκπαίδευσης, τα μοντέλα DCNN 1 και DCNN 2 δείχνουν αυξητική τάση στην ακρίβεια κατά τη διάρκεια των εποχών, με το DCNN 1 να φτάνει πιο γρήγορα υψηλά επίπεδα αλλά στο τέλος να μειώνεται ελαφρώς, ενδεχομένως λόγω υπερπροσαρμογής. Η εικόνα για το LSTM είναι εκ διαμέτρου αντίθετη, αφού δεν δείχνει να καταφέρνει να προσαρμοστεί καλά στα δεδομένα καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Η ίδια εικόνα διαμορφώνεται και για την απώλεια, με τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα να σημειώνουν μεν πιο δραστική μείωση αλλά με αρκετές διακυμάνσεις. Η απόδοση τους είναι πανομοιότυπη. Προς επικύρωση των παραπάνω, παρατίθεται πίνακας με τις ακριβείς τιμές των μετρικών για όλα τα μοντέλα.

		Ακρίβεια	Ανάκληση	F1-Score
DCNN 1	<i>Not eavesdropper</i>	0.90	1.00	0.94
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.77	0.87
DCNN 2	<i>Not eavesdropper</i>	0.95	1.00	0.98
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.90	0.95

LSTM	<i>Not eavesdropper</i>	0.67	1.00	0.80
	<i>Eavesdropper</i>	0.00	0.00	0.00
SVM	<i>Not eavesdropper</i>	0.67	1.00	0.80
	<i>Eavesdropper</i>	0.00	0.00	0.00
RF	<i>Not eavesdropper</i>	0.95	1.00	0.98
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.90	0.95

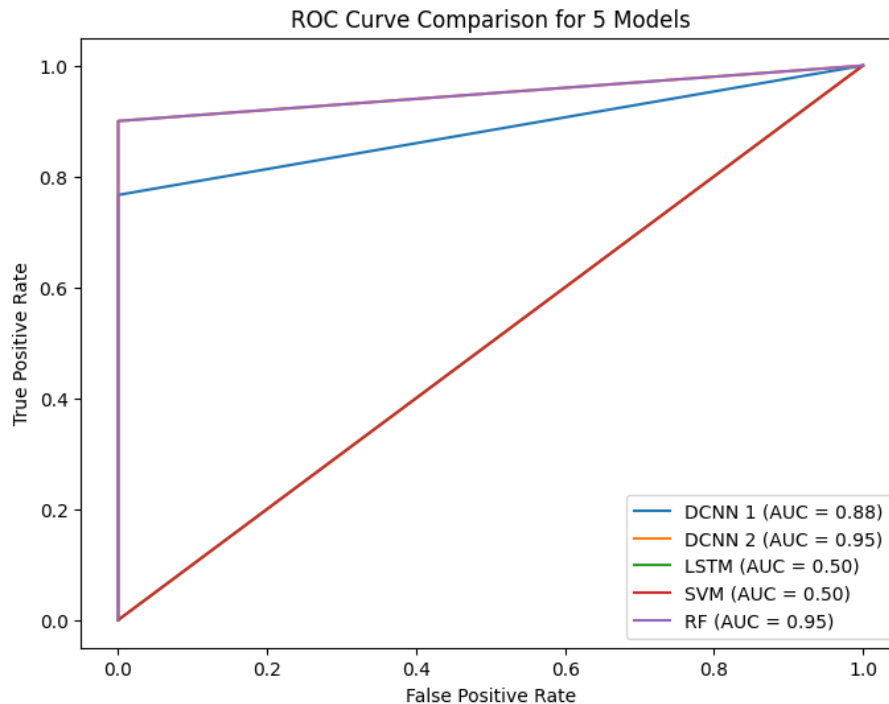
Πίνακας 7.1: Ακρίβεια, ανάκληση και F1-Score για όλα τα μοντέλα

Ένα άμεσο συμπέρασμα που συνάγεται από τον παραπάνω πίνακα, είναι ότι οι διάφορες τεχνικές αντιδρούν διαφορετικά στα δεδομένα και χρειάζεται ξεχωριστή ανάλυση για την κάθε μία. Το πρώτο μοντέλο DCNN δείχνει καλή απόδοση στην κατηγορία "Not eavesdropper", αναγνωρίζοντας ορθώς όλες τις περιπτώσεις τυπικών χρηστών, χωρίς να αφήνει καμία ανεξερεύνητη. Ωστόσο, η ακρίβεια υποδηλώνει ότι υπάρχουν λίγες περιπτώσεις όπου το μοντέλο ίσως ταξινομεί κάποιον λανθασμένα ως "Not eavesdropper", διατηρώντας όμως μία ικανοποιητική συνολική απόδοση, όπως φαίνεται από το F1-score. Στην κατηγορία "Eavesdropper", όταν το μοντέλο αποφασίζει ότι κάποιος είναι eavesdropper είναι πάντα σωστό, αλλά αποτυγχάνει να τους ανιχνεύσει όλους. Το δεύτερο μοντέλο DCNN ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά αλλά βελτιώνει αισθητά την απόδοση σε σχέση με το πρώτο και στις δύο κατηγορίες. Αντίστοιχα, το RF αποδεικνύεται ως ένα εξίσου αποτελεσματικό μοντέλο. Στα δύο εναπομείναντα η απόδοση δεν είναι καθόλου ενθαρρυντική, καθώς αποτυγχάνουν πλήρως στην κλάση των υποκλοπέων, αδυνατώντας να εντοπίσουν το πρωταρχικό ζητούμενο αυτού του προβλήματος PLS. Οι αναλυτικές προβλέψεις αποτυπώνονται στους πίνακες σύγχυσης που ακολουθούν.



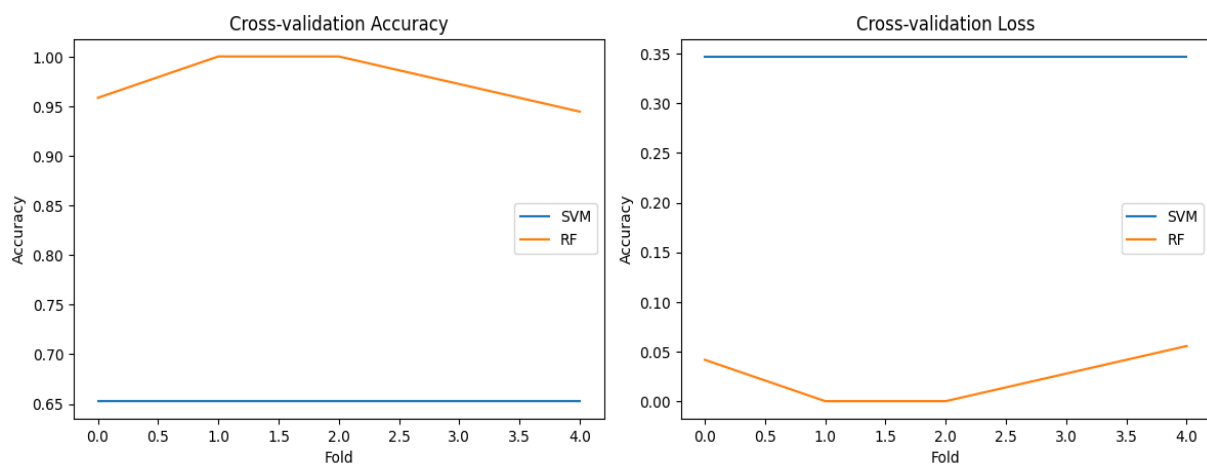
Εικόνα 7.3: Πίνακας σύγκρισης για όλα τα μοντέλα

Σε μία άλλη οπτικοποίηση, μπορούμε να συγκρίνουμε τα μοντέλα με βάση τις καμπύλες ROC που διαγράφουν. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.4, η καμπύλη που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο (0,1) και ταυτόχρονα έχει το υψηλότερο AUC αντιστοιχεί, όπως ήταν αναμενόμενο, στο βαθύ νευρωνικό δίκτυο που δέχεται ως είσοδο τόσο τις εικόνες CSI όσο και τα δεδομένα θέσεων και ισχύος, η οποία συμπίπτει και με την καμπύλη του τυχαίου δάσους. Και σε αυτή την απεικόνιση φαίνεται η μικρή διαφορά στην επίδοση του DCNN 1 και η σημαντική υστέρηση των άλλων δύο τεχνικών.



Εικόνα 7.4: Καμπύλη ROC

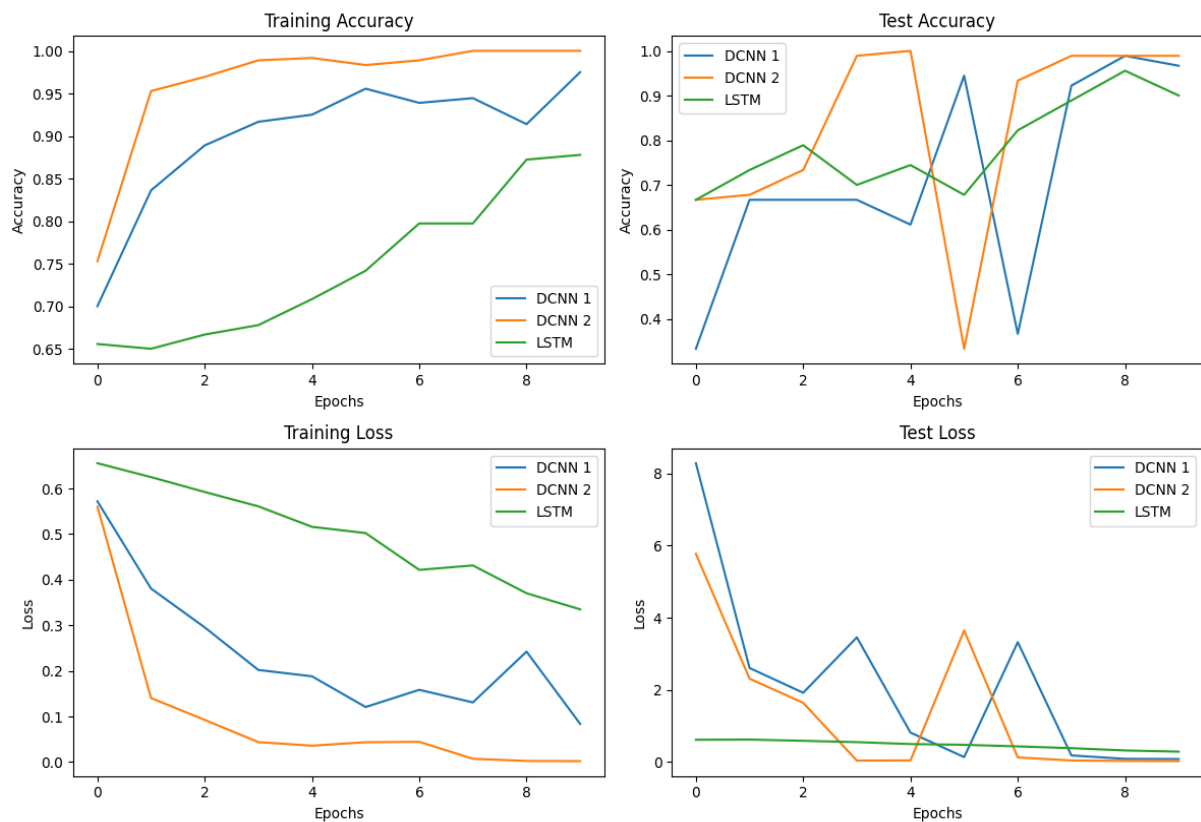
Μέχρι εδώ, τα αποτελέσματα είναι σχετικά ικανοποιητικά, ωστόσο φαίνεται ότι ορισμένα μοντέλα ενέχουν το στοιχείο της τυχαιότητας, ενώ άλλα μπορούν να επιτύχουν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Απόρροια αυτού, λοιπόν, είναι η ανάγκη εμπλουτισμού του συνόλου δεδομένων. Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα UE που προσπαθούν να κρυφακούσουν τις μεταδόσεις αναγκάζονται σε αυξημένη ισχύ. Έτσι, θεωρήθηκε τυχαία ισχύς εκπομπής για τους υποκλοπείς σε ένα διάστημα [1.5Tx, 2Tx] και προστέθηκε στα σύνολα δεδομένων και δοκιμής, οδηγώντας στα αποτελέσματα που ακολουθούν.



Εικόνα 7.5: Σύγκριση SVM και RF με πλήρες σύνολο δεδομένων

Όπως και στην πρώτη περίπτωση, το Random Forest έχει συνολικά και σταθερά εμφανώς καλύτερη επίδοση από το Support Vector Machine μοντέλο, το οποίο δεν παρουσιάζει καμία απολύτως διαφορά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απότομη μείωση στο τελευταίο fold για το RF υποδηλώνει πιθανό overfitting ή ένα δύσκολο υποσύνολο δεδομένων, ενώ η μικρή εναλλαγή

στην απώλεια του κατά το 2^ο fold φανερώνει ότι είναι πιο ευαίσθητο σε αλλαγές των δεδομένων και μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα στις αρχικές διαιρέσεις του cross-validation.



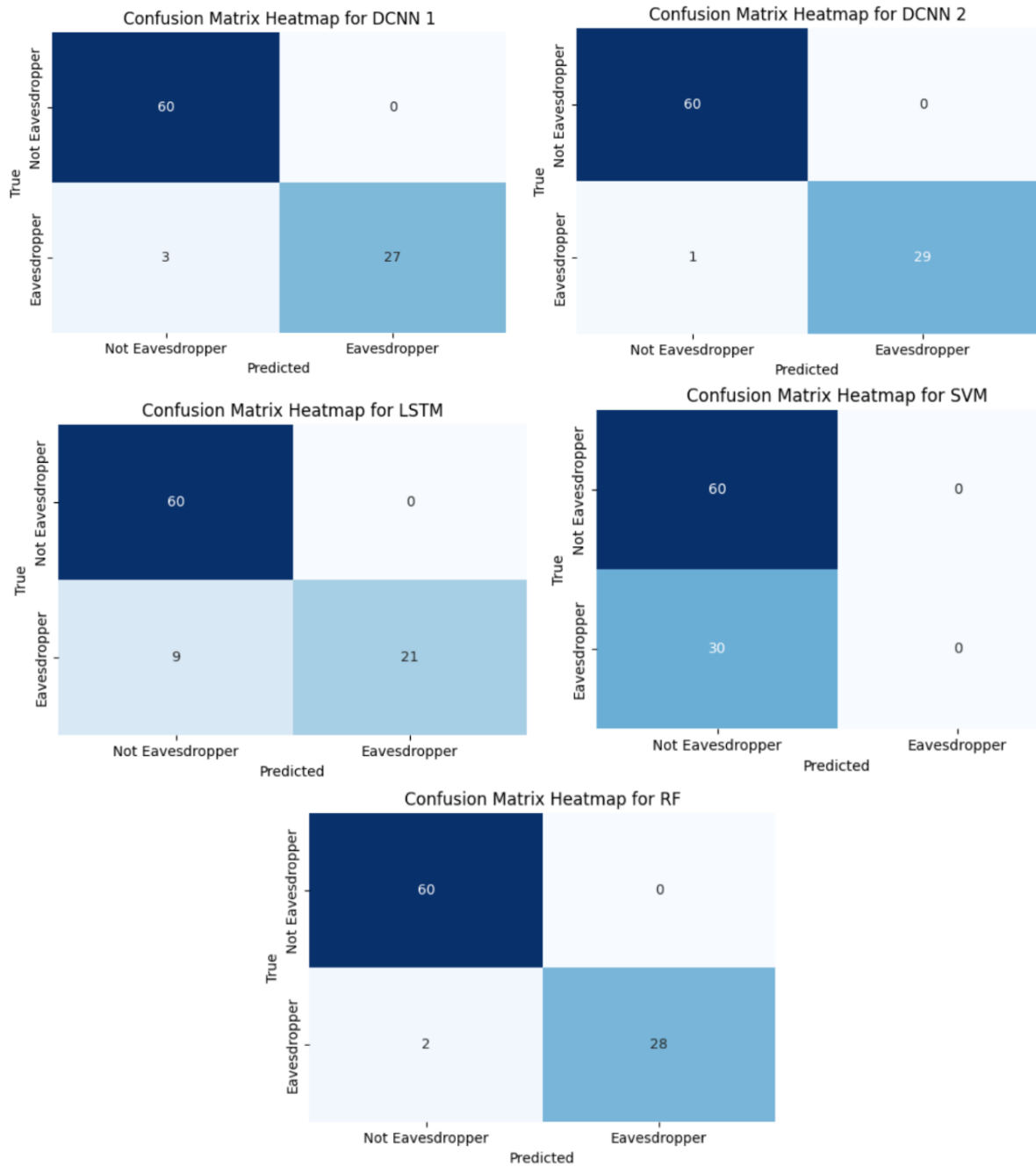
Εικόνα 7.6: Σύγκριση DCNN 1, DCNN 2 και LSTM με πλήρες σύνολο δεδομένων

Περνώντας στα μοντέλα βαθιάς μάθησης, Όσον αφορά το σύνολο εκπαίδευσης, όλα τα μοντέλα αυξάνουν την ακρίβειά τους ανάλογα με τον αριθμό των εποχών, με το DCNN 2 να φτάνει πιο γρήγορα υψηλά επίπεδα (σχεδόν 100%). Αντιθέτως, το LSTM παρουσιάζει πιο αργή βελτίωση, αλλά κατορθώνει αυτή τη φορά να επιτύχει ποσοστό μεγαλύτερο του 85%. Η ίδια εικόνα διαμορφώνεται και για την απώλεια, με τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα να πετυχαίνουν πιο μεγάλη μείωση. Στο σύνολο δεδομένων, η ακρίβεια έχει αρκετές διακυμάνσεις για όλα τα μοντέλα. Το DCNN 2 χαρακτηρίζεται από κορυφώσεις και πτώσεις, αλλά συνολικά φαίνεται να αποδίδει καλά, διατηρώντας και εδώ την καλύτερη επίδοση, ενώ το δίκτυο μακροπρόθεσμης μνήμης ακολουθεί και πάλι πιο σταθερή συμπεριφορά.

		Ακρίβεια	Ανάκληση	F1-Score
DCNN 1	<i>Not eavesdropper</i>	0.95	1.00	0.98
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.90	0.95
DCNN 2	<i>Not eavesdropper</i>	0.98	1.00	0.99
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.97	0.98
LSTM	<i>Not eavesdropper</i>	0.87	1.00	0.93
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.70	0.82
SVM	<i>Not eavesdropper</i>	0.67	1.00	0.80
	<i>Eavesdropper</i>	0.00	0.00	0.00
RF	<i>Not eavesdropper</i>	0.97	1.00	0.98
	<i>Eavesdropper</i>	1.00	0.93	0.97

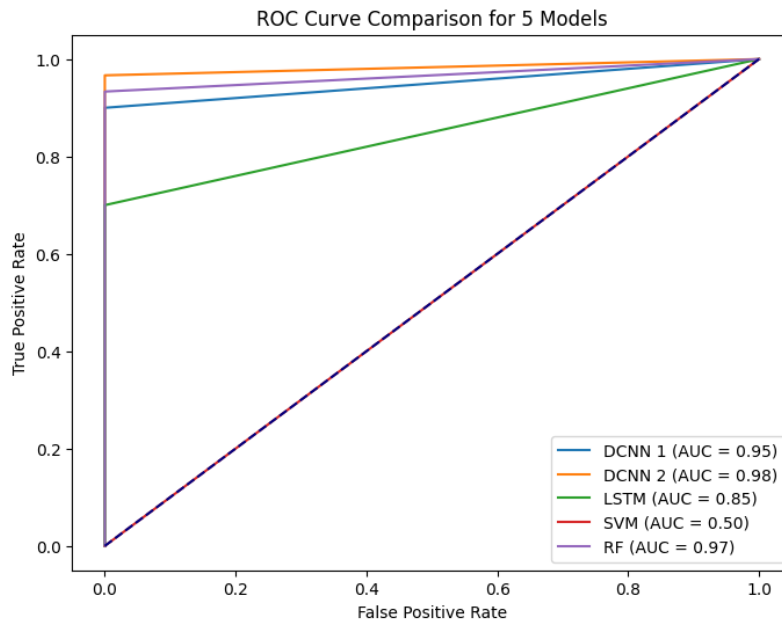
Πίνακας 7.2: Ακρίβεια, ανάκληση και F1-Score για όλα τα μοντέλα με πλήρες σύνολο δεδομένων

Σε γενικές γραμμές, όλα τα μοντέλα που επιλέχθηκαν επιτυγχάνουν εξαιρετική απόδοση, με το μόνο που παρεκκλίνει να είναι το SVM. Ειδικότερα, έχει χαμηλή ακρίβεια στην πρόβλεψη των τυπικών χρηστών, ενώ δεν μπορεί να διακρίνει κανέναν ωτακουστή. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ακατάλληλο για αυτό το εγχείρημα. Μία σημαντική πληροφορία που εξάγεται από τον ως άνωθι πίνακα, είναι ότι όλα τα μοντέλα σημειώνουν μοναδιαία ανάκληση στην κλάση των eavesdropper, γεγονός που σημαίνει ότι δεν κάνουν καμία ψευδώς αρνητική πρόβλεψη. Εκτός από το SVM, η δεύτερη χειρότερη επίδοση αποδίδεται στο LSTM, το οποίο εμφανίζει την τάση να ταξινομεί εσφαλμένα τους eavesdropper ως τυπικά UE. Στα τρία εναπομείναντα μοντέλα οι διαφορές είναι σχετικά μικρές με το DCNN 2 να προηγείται στην κούρσα, καθώς πετυχαίνει τη μεγαλύτερη ακρίβεια και το πιο υψηλό f1-score και στις δύο κλάσεις συνδυαστικά, ενώ το μικρό του προβάδισμα στην ανάκληση των eavesdropper του προσφέρει μία πιο ισορροπημένη απόδοση. Μπορεί, όμως, κανείς χωρίς πρόβλημα να θεωρήσει ότι τόσο το DCNN 2 όσο και το RF μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου για την δυαδική αυτή ταξινόμηση, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή και τις απαιτήσεις της. Οι αναλυτικές προβλέψεις αποτυπώνονται στους πίνακες σύγκρισης που ακολουθούν.



Εικόνα 7.7: Πίνακας σύγχυσης για όλα τα μοντέλα με πλήρες σύνολο δεδομένων

Με λίγα λόγια, όλα τα μοντέλα προέβλεψαν σωστά τους τυπικούς χρήστες, ενώ τα δύο καλύτερα μοντέλα δεν κατάφεραν να εντοπίσουν μόλις έναν και δύο υποκλοπείς αντίστοιχα ανάμεσα στους 30.



Εικόνα 7.8: Καμπύλη ROC με πλήρες σύνολο δεδομένων

Σε πολλά πειράματα δίνεται έμφαση στον χρόνο που χρειάζεται ένα μοντέλο για να εκπαιδευτεί, καθώς αυτό σχετίζεται με την υπολογιστική ισχύ των χρησιμοποιούμενων μηχανημάτων. Όπως φαίνεται στη συνέχεια, όλα τα μοντέλα χρειάζονται λιγότερο από 50 δευτερόλεπτα για να εκπαιδευτούν στα δεδομένα. Οι χρόνοι αυτοί αφορούν σε σύνολο δεδομένων για 360 UE που αντιστοιχεί περίπου σε 280 KB. Τα μοντέλα μηχανικής μάθησης είναι σαφώς γρηγορότερα, με το RF να χρειάζεται μόλις 2 δευτερόλεπτα. Η πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τα μοντέλα βαθιάς μάθησης αυξάνει σημαντικά το χρόνο εκπαίδευσής τους, με τον υψηλότερο για το DCNN 2 να αγγίζει τα 48 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 7.9: Χρόνος εκπαίδευσής των διάφορων μοντέλων ML/DL

Αναλογίζοντας την σχεδόν παρόμοια επίδοση των δύο αυτών μοντέλων, μία πρώτη εκτίμηση θα οδηγούσε στην επιλογή του DCNN 2 για την ταξινόμηση του είδους των χρηστών, δεδομένου ότι τα βαθιά συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα είναι ιδανικά για την ταξινόμηση και τμηματοποίηση εικόνων. Ωστόσο, τα παραπάνω αποδεικνύουν πως θα μπορούσε κανείς να καταφύγει εναλλακτικά και στο τυχαίο δάσος αν οι υπολογιστικοί του πόροι και οι ανάγκες του πειράματος χρήζουν μικρής διάρκειας.

8. Επίλογος

8.1 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τις εξελίξεις στο παγκόσμιο τοπίο των τηλεπικοινωνιών και δικτύων, δύο από τα ζητήματα που συγκεντρώνουν μεγάλη προσοχή και ενδιαφέρον γύρω από την επιστημονική, ερευνητική και επαγγελματική -σταδιακά- κοινότητα σχετίζονται αφενός με την εξασφάλιση της ασφάλειας στις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίας και αφετέρου με την ενσωμάτωση της καλπάζουσας τεχνητής νοημοσύνης σε αυτές. Παίρνοντας αυτό ως δεδομένο, λοιπόν, η παρούσα εργασία επιχειρεί να εντάξει προηγμένες τεχνικές μηχανικής μάθησης σε ένα τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον με σκοπό την βελτίωση της ασφάλειας στο φυσικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η δυνατότητα πρόβλεψης της ταυτότητας των χρηστών, θεωρώντας ότι υπάρχουν είτε τυπικοί χρήστες είτε κρυφοί ωτακουστές, μέσα σε ένα βιομηχανικό ad-hoc δίκτυο που αποτελείται από διάφορους υποσταθμούς βάσης και εκατοντάδες UE. Το περιβάλλον υπακούει στις αρχές και τα πρότυπα των δικτύων Beyond 5G.

Τονίζεται για άλλη μία φορά ότι τα πραγματικά δεδομένα που αντικατοπτρίζουν τις ιδιότητες του φυσικού στρώματος είναι δυσεύρετα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, λόγω των κανονισμών ιδιωτικότητας που διέπουν τις εταιρείες παροχής καθώς και της ανταγωνιστικής φύσης της εν λόγω αγοράς. Το γεγονός αυτό αποτελεί έμμεσα και τον πρωταρχικό περιορισμό της έρευνας, καθώς τα συνθετικά σύνολα δεδομένων δεν αντανακλούν πλήρως την πολυπλοκότητα και ποικιλομορφία που υφίστανται σε ένα πραγματικό δίκτυο B5G και σίγουρα δεν αντιπροσωπεύουν όλα τα μοτίβα που χρησιμοποιούνται σε επιθέσεις φυσικού επιπέδου. Κάτι τέτοιο επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, καθώς τα μοντέλα ενδέχεται να μην είναι πλήρως εκπαιδευμένα για όλες τις πιθανές επιθέσεις.

Παρόλα αυτά, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του περιβάλλοντος B5G, όπως περιεγράφηκε διεξοδικά στο Κεφάλαιο 7. Ο προσομοιωτής μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του MATLAB, και οι παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη περιλάμβαναν στοιχεία της διάδοσης σήματος, εκτίμηση καναλιού και απώλειες μονοπατιού, με γνώμονα την τεχνολογία OFDM. Οι εκτιμήσεις καναλιού συλλέχθηκαν σε εικόνες CSI και μαζί με τα δεδομένα των χρηστών συντέλεσαν το σύνολο δεδομένων για τα μετέπειτα μοντέλα μηχανικής μάθησης. Το πλήθος χρηστών (500) θα μπορούσε να μην καθορίζεται ως παράμετρος εισόδου, αλλά να πραγματοποιείται σταδιακή δημιουργία αυτών και έλεγχος δυνατότητας εξυπηρέτησης εκάστου, το οποίο απαιτεί κατάλληλη τροποποίηση της συνάρτησης *h5GIndoorFactoryScenario.m* αλλά και της μοντελοποίησης καναλιού. Επιπλέον, θα μπορούσαν στα δεδομένα των χρηστών να προστεθούν και μετρήσεις για το κανάλι όπως το SNR λήψης, το throughput και άλλες μετρικές επίδοσης. Έτσι οι κλάσεις των χρηστών θα αποκτούσαν νέες διαστάσεις προς σύγκριση και διαφοροποίηση, ενώ ταυτόχρονα θα μπορούσε να εξεταστεί και η ποιότητα της μετάδοσης σε κάθε περίπτωση και το κατά πόσο αυτή επηρεάζεται από τις τεχνικές PLS.

Στη συνέχεια, σχεδιάζονται και εκπαιδεύονται πέντε μοντέλα μηχανικής μάθησης, DCNN 1, DCNN 2, LSTM, SVM και RF, τα οποία αποσκοπούν στην πρόβλεψη των eavesdropper. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο Random Forest προσφέρει εξαιρετική απόδοση με χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, ενώ τα Convolutional Networks

επιτυγχάνουν εξίσου καλή ταξινόμηση, ιδιαίτερα σε μεγάλα και σύνθετα σύνολα δεδομένων. Και οι δύο αλγόριθμοι, επομένως, μπορούν να αναβαθμίσουν τις τεχνικές ασφαλείας φυσικού στρώματος σε δίκτυα επόμενης γενιάς, διακρίνοντας ενδεχόμενους υποκλοπείς σε επικοινωνίες αυξημένης κρισιμότητας και εμπιστευτικότητας. Ωστόσο, τα μοντέλα βαθιάς μάθησης απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους για εκπαίδευση και βελτιστοποίηση, γεγονός που αυξάνει το κόστος και τον χρόνο του πειράματος. Αυτό αποτελεί πρόκληση για την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε συστήματα με περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες, όπως είναι οι φορητές συσκευές ή τα ad-hoc δίκτυα.

8.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε εξετάζει μία πολύ μικρή πτυχή των δυνατοτήτων και επιτευγμάτων που υπόσχεται ο συγκερασμός AI και 6G. Ακόμη και στον τομέα της PLS η ανίχνευση eavesdropper που μελετήθηκε μπορεί και χρειάζεται να αναβαθμιστεί με πολλαπλούς τρόπους.

Καταρχάς, η μελλοντική ασφάλεια στο 6G οφείλει να αντιμετωπίσει τις υφιστάμενες ευπάθειες. Παρατηρείται ήδη η χρήση AI από την αντίπερα όχθη της PLS. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως επιθέσεις αντίθετων μοντέλων ή επιθέσεις αποφυγής και συχνά συνιστούν έγχυση ψευδών δεδομένων ή αύξηση της κανονικής δικτυακής κίνησης με απώτερο σκοπό την αλλαγή της συμπεριφοράς ενός μοντέλου ασφαλείας, την επιδείνωση της απόδοσης του δικτύου και τελικά την αποφυγή εντοπισμού των υποκλοπέων. Ενσωματώνοντας τη μηχανική μάθηση με την QoS και QoE αναδύεται μία άλλη πιθανή λύση στην καταπολέμηση των απειλών επίθεσης. Τα μοντέλα πρόβλεψης QoS αναλύουν τις τρέχουσες πληροφορίες δικτύου και προβλέπουν προκλήσεις QoS μέσω της τακτικής κίνησης των χρηστών αλλά και τυχόν κακόβουλης κίνησης που μπορεί να εμφανιστεί στο δίκτυο. Τέτοιες μέθοδοι ανάλυσης πρόβλεψης στοχεύουν να αποτρέψουν ακόμη και την ίδια την εμφάνιση μιας επίθεσης και φαίνονται ελπιδοφόρες για την ριζική καταπολέμηση των επιθέσεων ασφαλείας [14].

Η ενσωμάτωση μοντέλων ML και DL στις τεχνικές ασφαλείας φυσικού στρώματος επιδέχονται περαιτέρω βελτίωσης, μέσω της χρήσης ακόμη πιο καινοτόμων τεχνολογιών. Μία από αυτές είναι ο Κινητός Υπολογισμός Αιχμής (Mobile Edge Computing – MEC), ο οποίος μεταφέρει την παροχή υπηρεσιών από το cloud στην άκρη του δικτύου και έχει θεωρηθεί ως βιώσιμη επιλογή στην εποχή του IoT. Η ενσωμάτωση του DL με το MEC για PLS μπορεί να μειώσει τον λανθάνοντα χρόνο και να επιτρέψει την ανίχνευση επίθεσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Ωστόσο, ο υπολογισμός αιχμής βρίσκεται ακόμη σε πρώιμη φάση και υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που εμποδίζουν την εκτέλεσή του. Ένα άλλο υποσχόμενο πεδίο είναι η ανάπτυξη της Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης (Deep Reinforcement Learning - DRL). Κατά την κατασκευή τεχνικών PLS που βασίζονται στο DRL τα μοντέλα εκπαιδεύονται σε διαφορετικά χαρακτηριστικά καναλιών, μοτίβα επίθεσης και άλλες ιδιότητες, ειδικά για το υλικό, αναπτύσσοντας ένα πολυεπίπεδο περιβάλλον πρόβλεψης. Τέλος, η ανάπτυξη τεχνικών μηχανικής και βαθιάς μάθησης με την ικανότητα παροχής υπηρεσιών ασφαλείας σε μεγάλους όγκους δεδομένων αποτελεί μία σημαντική ερευνητική τάση. Ολοένα και περισσότερες εφαρμογές big data κερδίζουν έδαφος όπως η Υγεία 4.0 ή Βιομηχανία 4.0. Πρόκειται, όμως, για ένα δύσκολο εγχείρημα, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμα πρωτόκολλα για τη μετάδοση

δεδομένων στην περιοχή από 70 έως 150 Tbits/s ενώ και η τεράστιας πυκνότητας κυκλοφορία που απαιτούν, καθιστά δυσχερή την παρακολούθηση της μετάδοσης αυτής σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου [23].

Βιβλιογραφία

- [1] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [2] R. Agrawal, "Comparison of Different Mobile Wireless Technology (From 0G to 6G)," *ECS Transactions*, vol. 107, no. 1, pp. 4799–4839, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1149/10701.4799ecst>.
- [3] I. Kishor, P. Rathore, and P. Samaria, "A Review on Mobile Computing Wireless Communication Technology using 0th Generation to 7th Generation," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 1, Jan. 2020, e-ISSN: 2395-0056.
- [4] Μ. Θεολόγου, *Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών*, 2nd ed. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [5] Π. Κωττής and Π.-Δ. Αράπογλου, *Ασύρματες Επικοινωνίες*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [6] R. Tidke, P. Uttarwar, D. Dantwate, and U. Tupe, "A Literature Review On: Wireless Technologies From 0G to 7G," *Iconic Research and Engineering Journals*, vol. 4, no. 6, Dec. 2020, ISSN: 2456-8880.
- [7] M. Adhikari and A. Hazra, "6G-Enabled Ultra-Reliable Low-Latency Communication in Edge Networks," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 67–74, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/mcomstd.0001.2100098>.
- [8] Ι. Σ. Βενιέρης, *Δίκτυα Ευρείας Ζώνης: Τεχνολογίες και Εφαρμογές με έμφαση στο Διαδίκτυο*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- [9] B. Shah, M. Murtaza, and M. Raza, "Comparison of 4G and 5G Cellular Network Architecture and Proposing of 6G, a new era of AI," 2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA), Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/citisia50690.2020.9371846>.
- [10] Ι. Μπαρτσιώκας, "Machine and deep learning algorithms for radio resource management in 5G and beyond networks," Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.12681/eadd/54804>.
- [11] E. Dahlman, S. Parkvall, and Johan Sköld, *5G NR : The next generation wireless access technology*. London, United Kingdom: Academic Press, 2021.
- [12] D. Ramphull, A. Mungur, S. Armoogum and S. Pudaruth, "A Review of Mobile Ad hoc NETWORK (MANET) Protocols and their Applications," 2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2021, pp. 204-211, doi: 10.1109/ICICCS51141.2021.9432258.
- [13] M. Maad Hamdi, L. Audah, S. Abduljabbar Rashid, A. Hamid Mohammed, S. Alani and A. Shamil Mustafa, "A Review of Applications, Characteristics and Challenges in Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs)," 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/HORA49412.2020.9152928.

- [14] S. Lateef, M. Rizwan, and Muhammad Abul Hassan, “Security Threats in Flying Ad Hoc Network (FANET),” *Studies in computational intelligence*, pp. 73–96, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97113-7_5.
- [15] R. Agrawal et al., “Classification and comparison of ad hoc networks: A review,” *Egyptian Informatics Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 1–25, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.10.004>.
- [16] X. Καυάλης and Π. Κωττής, *Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις*, 2nd ed. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2023.
- [17] Π. Κωττής, *Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες: Διαμόρφωση & Μετάδοση Σημάτων*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [18] Φ. Κωνσταντίνου, Α. Κανατάς, and Π. Γεώργιος, *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*, 2nd ed. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2013.
- [19] C. Stocchi, N. Marchetti, and Neeli Rashmi Prasad, “Self-optimized radio resource management techniques for LTE-A local area deployments,” Feb. 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/wirelessvitae.2011.5940928>.
- [20] I. A. Bartsiokas, P. K. Gkonis, A. K. Papazafeiropoulos, D. I. Kaklamani, and I. S. Venieris, “Federated Learning for 6G HetNets’ Physical Layer Optimization,” *Advances in information quality and management*, pp. 1–28, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7366-5.ch070>.
- [21] M. A. Seimeni, P. Alevizaki, P. K. Gkonis, D. I. Kaklamani, and I. S. Venieris, “On resource scheduling and interference mitigation in distributed massive-MIMO wireless orientations via NOMA transmission,” *Physical communication*, vol. 53, pp. 101725–101725, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2022.101725>.
- [22] K. Ramezanpour, J. Jagannath, and A. Jagannath, “Security and privacy vulnerabilities of 5G/6G and WiFi 6: Survey and research directions from a coexistence perspective,” *Computer Networks*, vol. 221, p. 109515, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109515>.
- [23] H. Sharma and N. Kumar, “Deep learning based physical layer security for terrestrial communications in 5G and beyond networks: A survey,” *Physical Communication*, vol. 57, p. 102002, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2023.102002>.
- [24] B. Sklar and F. Harris, *Ψηφιακές Επικοινωνίες: Θεωρία και Εφαρμογές*, 3rd ed. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2021.
- [25] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, and L. Hanzo, “Cell-Free Massive MIMO: A New Next-Generation Paradigm,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878–99888, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930208>.
- [26] R. Chataut and R. Akl, “Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction,” *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2753, May 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20102753>.
- [27] T. Kebede, Y. Wondie, J. Steinbrunn, H. B. Kassa, and K. T. Kornegay, “Precoding and Beamforming Techniques in mmWave-Massive MIMO: Performance Assessment,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 16365–16387, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3149301>.

- [28] Κ. Διαμαντάρας and Δ. Μπότσης, Μηχανική Μάθηση. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2019.
- [29] I. A. Bartsiokas, P. K. Gkonis, D. I. Kaklamani and I. S. Venieris, "ML-Based Radio Resource Management in 5G and Beyond Networks: A Survey," in IEEE Access, vol. 10, pp. 83507-83528, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3196657.
- [30] D. A. Milovanovic, Z. S. Bojkovic, and Tulsi Pawan Fowdur, Driving 5G Mobile Communications with Artificial Intelligence towards 6G. CRC Press, 2023.
- [31] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Technical Report 38.843: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 16)," 3GPP, Tech. Rep., Dec. 2021. [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3983>
- [32] "AI for Positioning Accuracy Enhancement," Mathworks.com, 2024. <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/ai-for-ue-positioning-in-5g.html> (accessed Aug. 25, 2024).
- [33] Oona Rainio, Jarmo Teuho, and Riku Klén, "Evaluation metrics and statistical tests for machine learning," Scientific Reports, vol. 14, no. 1, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x>.