

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανικών Υπολογιστών και Πληροφορικής



UNIVERSITY OF
PATRAS
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Τεχνικές Machine Learning για τη βελτίωση της ανάθεσης
πόρων σε Δίκτυα 5G

Φοίβος Αλλαγιώτης
1056636

Τριμελής Επιτροπή:

Μπούρας Χρήστος, Επιβλέπων Καθηγητής
Γαροφαλάκης Ιωάννης, Καθηγητής
Παπαιωάννου Εύη, Επ. Καθηγήτρια

Πάτρα, Ιούνιος 2022

Η παρούσα εργασία έχει πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του ερευνητικού εργαστηρίου Κατανεμημένων Δικτύων και Τηλεματικής του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών.



Lab of Distributed System and Telematics

<http://telematics.upatras.gr/telematics/>

Copyright ©–All rights reserved Φοίβος Αλλαγιώτης, 2022.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην πτυχιακή εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών.

(Υπογραφή)

.....
Φοίβος Αλλαγιώτης

Περίληψη

Τα ετερογενή δίκτυα (HetNets) έχουν χαρακτηριστεί ως μια κρίσιμη τεχνολογία για τις επικοινωνίες 5G, επιτρέποντας την ταχεία επέκταση του φόρτου κίνησης, των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Τα HetNets μπορούν να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου και να εξυπηρετήσουν επιπλέον χρήστες εγκαθιστώντας μικρά κελιά μέσα σε μακροκυψέλες. Ωστόσο, λόγω των παρεμβολών μεταξύ μικρών κυψελών και μακροκυψελών, η κατανομή πόρων για τέτοια δίκτυα γίνεται πιο δύσκολη από ό,τι για τα ομογενή κυψελωτά δίκτυα, καθιστώντας την ποιότητα της προσφοράς υπηρεσιών πιο δύσκολη. Το Deep Reinforcement Learning (DRL) χάραξε τον δρόμο, για εφαρμογές στην κατανομή πόρων για 5G HetNets, λόγω των πρόσφατων ανακαλύψεων στον τομέα. Παρουσιάζουμε μια μοναδική τεχνική κατανομής πόρων που βασίζεται στο DRL που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε Small όσο και σε Macro Cells. Σύμφωνα με τη διαδικασία κατανομής πόρων, ένας αυτόνομος πράκτορας, στην περίπτωσή μας, ένας ελεγκτής δικτύου, εκτελεί ενέργειες για να καθορίσει την καλύτερη συσχέτιση χρηστών σε Σταθμούς Βάσης (Base Stations - BSs) καθώς και την αποδοτικότερη ανάθεση Μπλοκ Φυσικών Πόρων (Physical Resource Blocks - PRBs) χωρίς να χρειάζεται ή να περιμένει καμία πληροφορία. Σκοπός του πράκτορα είναι η αύξηση της απόδοσης του δικτύου, μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας και διατήρηση της Ποιότητας της Υπηρεσίας που προσφέρεται στον χρήστη.

Λέξεις Κλειδιά — 5 G, Ανάθεση Πόρων, Ετερογενή Δίκτυα, Ενισχυτική Μάθηση, Deep Q-Learning

Abstract

HetNets have been hailed as a critical technology for 5G communications, enabling the rapid expansion of the capacity of mobile networks. HetNets can increase network capacity and serve additional users by installing small cells inside macro cells. However, due to the interference between small and macro cells, the allocation of resources for such networks becomes more difficult than for normal cellular networks, making the quality of service delivery more difficult. Deep Reinforcement Learning (DRL) has paved the way for 5G HetNets resource allocation applications due to recent breakthroughs in the field. Introducing a unique DRL-based resource allocation technique that can be used on both Small and Macro Cells. Under the resource allocation process, a standalone agent, in our case a network controller, executes certain actions to determine the best Base Stations (BSs) as well as the most efficient Physical Resource Blocks (PRBs) without needing or waiting for any information. The purpose of the agent is to increase the efficiency of the network, reduce energy consumption and maintain the Quality of Service (QoS), offered to the user.

Keywords — 5 G, Resource Allocation, HetNets, Reinforcement Learning, Deep Q-Learning

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Κατανεμημένων Συστημάτων και Τηλεματικής. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Βασίλειο Κόκκινο και τον Δρ. Απόστολο Γκάμα, για την καθοδήγησή τους και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ασπασία Κουκουβέλα, για την βοήθεια που πρόσφερε σε σημαντικά κομμάτια της διπλωματικής αυτής εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	x
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	xiii
Κατάλογος σχημάτων	xiii
Κατάλογος πινάκων	xv
Κατάλογος αλγορίθμων	xvi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Σημασία του Προβλήματος	1
1.2 Στόχοι της Εργασίας	2
1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας	4
2 Δίκτυα 5G	6
2.1 Προηγούμενες Γενιές Κινητών Δικτύων Επικοινωνιών	6
2.1.1 Η Γενιά 1G	6
2.1.2 Η Γενιά 2G	7
2.1.3 Η Γενιά 3G	7
2.1.4 Η Γενιά 4G	8
2.2 Η Γενιά 5G	9

2.2.1	Οι Απαιτήσεις της Αρχιτεκτονικής των Δικτύων 5G	14
3	Τεχνολογίες Δικτύων 5G	21
3.1	Η Τεχνολογία MIMO	22
3.1.1	Λειτουργία	22
3.1.2	Αρχιτεκτονικά Χαρακτηριστικά	23
3.1.3	Η Τεχνολογία MU-MIMO	28
3.2	Η Τεχνολογία DUDe	31
3.2.1	Λειτουργία	31
3.2.2	Αρχιτεκτονικά Χαρακτηριστικά	32
3.2.3	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	34
3.2.4	Υπηρεσίες και Εφαρμογές	36
4	Μηχανική Μάθηση	38
4.1	Ιστορική Αναδρομή	38
4.2	Προσεγγίσεις	40
4.2.1	Εποπτευόμενη Μάθηση	41
4.2.2	Μη-Εποπτευόμενη Μάθηση	44
4.2.3	Ημι-Εποπτευόμενη Μάθηση	46
4.2.4	Ενισχυτική Μάθηση	47
5	Ανάπτυξη Εξομοιωτή	49
5.1	Περιγραφή	49
5.2	Θεωρητικό Υπόβραθρο	51
5.3	Περιγραφή Μηχανισμού	53
5.4	Μοντέλο Συστήματος	56

5.5	Εξόδοι και Παραδείγματα Χρήσης	59
6	Προτεινόμενος Αλγόριθμος	65
6.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο	65
6.1.1	Περιβάλλον	66
6.1.2	Πράκτορας	67
6.1.3	Κανάλια Επικοινωνίας	67
6.2	Επίλυση Μαρκοβιανής Διαδικασίας Απόφασης με RL	68
6.2.1	Βασικές Έννοιες MDP	69
6.2.2	Q-Learning	72
6.2.3	Deep Q-Learning	75
6.3	Περιγραφή	77
6.3.1	Περιβάλλον	77
6.3.2	Χώρος Καταστάσεων	78
6.3.3	Χώρος ενεργειών	78
6.3.4	Συνάρτηση ανταμοιβής	79
6.3.5	Πράκτορας	80
7	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	83
7.1	Επεξήγηση Μεθοδολογίας	83
7.2	Αποτελέσματα Μηχανισμού	84
7.3	Επιρροή Μηχανισμού στο Δίκτυο	86
8	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	89
8.1	Σύνοψη	89
8.2	Συμπεράσματα	90

8.3	Μελλοντική Έρευνα	91
	Βιβλιογραφία	93

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - - Ακρωνύμια

IoT	Internet of Things
BS	Base Station
RA	Resource Allocation
QoS	Quality of Service
EE	Energy Efficiency
TPO	Transmit Power Output
AMC	Adaptive Modulation and Coding
CDMA	Code Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
HetNet	Heterogeneous Networks
MIMO	Multiple Input Multiple Output
CoMP	Coordinated MultiPoint
DUDe	Downlink Uplink Decoupling
NC	Network Centric
UC	User Centric
UL	Uplink
DL	Downlink
UE	User Equipment
MCBS	Macro Cell BS
SCBS	Small Cell BS
5G	Fifth Generation
ML	Machine Learning
GT	Game Theory
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
Η.Π.Α	Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής
NMT	Nordic Mobile Telephone
1G	First Generation
2G	Second Generation
SMS	Short Time Messages
MMS	Multimedia Messages
TDMA	Time Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobiles
GPRS	General Packet Radio Services
EDGE	Enhanced DATA GSM Environment

PSK	Phase Shift Keying
Bps	bits per second
3G	Third Generation
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
HSPA+	Enhanced High Speed Packet Access
4G	Fourth Generation
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
Wi-Fi	Wireless Fidelity
Hz	Hertz
mmWave	millimeter Wave
2D	Two Dimension
OCI	Order Cel Interference
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
D2D	Device to Device
V2V	Vehicle to Vehicle
LTE	Long Term Evolution
RNA	Radio Access Network
NLOS	Non-Line of Sight
SDMA	Space Division Multiple Access
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
HA	Horn Antennas
VoIP	Voice over Internet Protocol
NG	New Generation
3GPP	Third Generation Partnership Program
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
GTP	GPRS Tunelling Protocol
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
SISO	Single Input Single Output
MANET	Mobile Ad Hoc Network
SNR	Signal-to-Noise Ratio
IEEE	Institutes of Electrical and Electronics Engineers
ITU	International Telecommunications Union
G.hn	Gigabit home networks
SIMO	Single Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
LAN	Local Area Network
RF	Radio Frequency
BLAST	Bell Labs Layered Space-Time
SPARC	Single Antenna Selective Control Speed
PARC	Daily Line Speed Control
MU-MIMO	Multi User MIMO
FEC	Forward Error Concatenation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
STBC	Space-Time Blocking Code

IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
GI	Guard Interval
RFID	Radio Frequency Identification
SU-MIMO	Single User MIMO
ICI	Inter-Cell Interference
CSI	Channel State Information
RI	Rank Index
PMI	Precoding Matrix Index
CQI	Channel Quality Indicator
MCS	Modulation and Coding Scheme
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
BC	Broadcast Channel
MAC	Multiple Access Channel
ACK	Acknowledgement
NAK	Negative ACK
MTC	Machine Type Communication
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
PL	Path Loss
RB	Resource Block
LTE-A	LTE Advanced
CRAN	Central RAN
CPRI	Common Public Radio Link
AS	Access-Stratum
RRC	Radio Resource Control
MME	Mobility Management Entity
NAS	Non-AS
eNodeB	Evolved Node B
SE	Spectral Efficiency
IBM	International Business Machines
AI	Artificial Intelligence
DNN	Deep Neural Network
ANN	Artificial Neural Network
LSTM	Long-Short Term Memory
CTC	Connectionist Temporal Classification
SL	Supervised Learning
USL	Unsupervised Learning
SSL	Semi-Supervised Learning
RL	Reinforcement Learning
SARSA	State-Action-Reward-State-Action
DQL	Deep Q-Learning
DDPG	Deep Deterministic Policy Gradient
AP	Access Point
RAT	Radio Access Technology
eMBB	enhanced Mobile Broadband
mMTC	massive Machine Type Communications
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
KPI	Key Performance Indicator
PRB	Physical RB

RSRP	Reference Signal Received Power
RBUR	RB Utilization Ratio
CSV	Comma Separated Values
GUI	Graphical User Interface
MDP	Markov Decision Process

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Ξενόγλωσσος όρος

Internet of Things
Base Station
Resource Allocation
Quality of Service
Energy Efficiency
Transmit Power Output
Adaptive Modulation and Coding
Code Division Multiple Access
Frequency Division Multiple Access
Heterogeneous Networks
Multiple Input Multiple Output
Coordinated MultiPoint
Downlink Uplink Decoupling
Network Centric
User Centric
Uplink
Downlink
User Equipment
Macro Cell Base Station
Small Cell Base Station
Fifth Generation
Machine Learning
Game Theory
Nippon Telegraph and Telephone
First Generation
Second Generation
Short Time Messages
Multimedia Messages
Time Division Multiple Access
Global System for Mobiles
General Packet Radio Services
Enhanced Data GSM Environment
Phase Shift Keying
bits per second
Third Generation

Απόδοση

Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Σταθμός Βάσης
Κατανομή Πόρων
Ποιότητα της Εξυπηρέτησης
Ενεργειακή Απόδοση
Έξοδος Ισχύος Μετάδοσης
Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση
Διαίρεση Κώδικα Πολλαπλής Πρόσβασης
Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης
Ετερογενή Δίκτυα
Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος
Συντονισμένο Πολυσημείο
Αποσύνδεση Κατερχόμενης-Ανερχόμενης Ζεύξης
Δικτυοκεντρικό
Με επίκεντρο τον χρήστη
Ανερχόμενη ζεύξη
Κατερχόμενη ζεύξη
Εξοπλισμός χρήστη
Σταθμός Βάσης μακροκυψέλης
Σταθμός Βάσης μικρής κυψέλης
Πέμπτη Γενιά
Μηχανική μάθηση
Θεωρία παιγνίων
Τηλέγραφος και Τηλέφωνο Nippon
Πρώτη γενιά
Δεύτερη γενιά
Μηνύματα σύντομου χρόνου
Μηνύματα πολυμέσων
Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου
Παγκόσμιο σύστημα για κινητά
Ραδιοφωνικές υπηρεσίες γενικού πακέτου
Ενισχυμένο περιβάλλον δεδομένων GSM
Κλειδί μετατόπισης φάσης
bits ανά δευτερόλεπτο
Τρίτη γενιά

Universal Mobile Telecommunications Service

Καθολική υπηρεσία κινητών τηλεπικοινωνιών

Enhanced High Speed Packet Access Ενισχυμένη πρόσβαση πακέτων υψηλής ταχύτητας**Fourth Generation** Τέταρτη γενιά**Orthogonal Frequency Division Multiplexing**

Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας

Worldwide Interoperability for Microwave Access

Παγκόσμια διαλειτουργικότητα για μικροκυματική πρόσβαση

Wireless Fidelity Ασύρματη πιστότητα**millimeter Wave** Μικροκύματα**Two Dimension** Δισδιάστατο**Order-Cell Interference** Παρεμβολή τάξης-κυττάρου**Orthogonal Frequency Division Multiple Access**

Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας

Device to Device Συσκευή προς συσκευή**Vehicle to Vehicle** Όχημα προς όχημα**Long Term Evolution** Μακροπρόθεσμη εξέλιξη**Radio Access Network** Δίκτυο ασύρματης πρόσβασης**Non-Line of Sight** Μη οπτική επαφή**Space Division Multiple Access** Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χώρου**Analog to Digital Converter** Μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό**Digital to Analog Converter** Μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό**Horn Antennas** Κεραίες Horn**Voice over Internet Protocol** Φωνή μέσω πρωτοκόλλου Internet**New Generation** Νέα γενιά**Third Generation Partnership Program** Πρόγραμμα σύμπραξης τρίτης γενιάς**Internet Protocol** Πρωτόκολλο Internet**Integrated Services Digital Network** Ολοκληρωμένο ψηφιακό δίκτυο υπηρεσιών**GPRS Tunnelling Protocol** Πρωτόκολλο διοχέτευσης GPRS**User Datagram Protocol** Πρωτόκολλο δεδομένων χρήστη**Transmission Control Protocol** Πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης**Single Input Single Output** Ενιαία είσοδος ενιαία έξοδος**Mobile Ad Hoc Network** Κινητό δίκτυο Ad Hoc**Signal-to-Noise Ratio** Λόγος σήματος προς θόρυβο**Institutes of Electrical and Electronics Engineers**

Ινστιτούτα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

International Telecommunications Union

Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών

Gigabit home networks Οικιακά Δίκτυα Gigabit**Single Input Multiple Output** Ενιαία είσοδος Πολλαπλή έξοδος**Multiple Input Single Output** Πολλαπλή είσοδος Ενιαία έξοδος**Local Area Network** Τοπικό δίκτυο**Radio Frequency** Ραδιοσυχνότητα**Multi User MIMO** MIMO πολλαπλών χρηστών**Forward Error Concatenation** Εμπρόσθια συνένωση σφαλμάτων**Quadrature Amplitude Modulation** Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους**Space-Time Blocking Code** Κώδικας μπλοκαρίσματος χώρου-χρόνου**Inverse Fast Fourier Transform** Αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier

Guard Interval	Διάστημα φύλαξης
Radio Frequency Identification	Αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων
Single User MIMO	MIMO ενός χρήστη
Inter-Cell Interference	Παρεμβολές μεταξύ κυττάρων
Channel State Information	Πληροφορίες κατάστασης καναλιού
Rank Index	Δείκτης κατάταξης
Precoding Matrix Index	Δείκτης πίνακα προκωδικοποίησης
Channel Quality Indicator	Δείκτης ποιότητας καναλιού
Modulation and Coding Scheme	Σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης
Non-Orthogonal Multiple Access	Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση
Broadcast Channel	Κανάλι εκπομπής
Multiple Access Channel	Κανάλι πολλαπλής πρόσβασης
Acknowledgement	Αναγνώριση
Negative Acknowledgement	Αρνητική Αναγνώριση
Machine Type Communication	Επικοινωνία τύπου μηχανήματος
Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο
Path Loss	Απώλεια διαδρομής
Resource Block	Μπλοκ πόρων
LTE Advanced	Προηγμένο LTE
Central RAN	Κεντρικό RAN
Radio Resource Control	Ραδιοέλεγχος πόρων
Mobility Management Entity	Οντότητα διαχείρισης κινητικότητας
Evolved Node B	Εξελιγμένος κόμβος B
Spectral Efficiency	Φασματική απόδοση
Artificial Intelligence	Τεχνητή νοημοσύνη
Deep Neural Network	Βαθύ νευρωνικό δίκτυο
Artificial Neural Network	Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο
Long-Short Term Memory	Μακροπρόθεσμη-βραχυπρόθεσμη μνήμη
Connectionist Temporal Classification	Συνδεσμολογική χρονική ταξινόμηση
Supervised Learning	Επιβλεπόμενη μάθηση
Unsupervised Learning	Μη επιβλεπόμενη μάθηση
Semi-Supervised Learning	Ημι-επιβλεπόμενη μάθηση
Reinforcement Learning	Ενισχυτική μάθηση
Access Point	Σημείο πρόσβασης
Radio Access Technology	Τεχνολογία ραδιοπρόσβασης
enhanced Mobile Broadband	Ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα
massive Machine Type Communications	Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής
Ultra-Reliable and Low Latency Communications	
Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες	
Key Performance Indicator	Βασικός δείκτης επιδόσεων
Physical RB	Φυσικό μπλοκ πόρων
Reference Signal Received Power	Ελήφθη ισχύς σήματος αναφοράς
Resource Block Utilization Rate	Ποσοστό χρήσης μπλοκ πόρων
Comma Separated Values	Τιμές διαχωρισμένες με κόμμα
Graphical User Interface	Γραφική διεπαφή χρήστη
Markov Decision Process	Μαρκοβιανή διαδικασία απόφασης

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Τα Πλεονεκτήματα του Δικτύου 5G [6]	10
2.2	Διάγραμμα με τις υπηρεσίες του Δικτύου 5G.	11
2.3	Τυπική και υβριδική αρχιτεκτονική δικτύου mmWave.	15
2.4	Μετάβαση από ευρυγώνια σε κατευθυνόμενη διεπαφή αέρα.	16
2.5	Κύρια Υποσυστήματα Κυψελοειδών Δικτύων [5].	18
2.6	Το Πεδίο Ελέγχου και το Πεδίο Χρήστη συνθέτουν τον Mobile Core [5].	19
3.1	Παράδειγμα βασικού συστήματος MIMO.	22
3.2	Διαφορετικές μορφές κεραίας.	25
3.3	Βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος MIMO.	26
3.4	SU-MIMO, MU-MIMO και CoMP.	29
3.5	Το DUDe στην πράξη.	34
4.1	Οι κύριες προσεγγίσεις της Μηχανικής Μάθησης.	41
4.2	Πρόβλημα ταξινόμησης στην εποπτευόμενη μάθηση.	43
4.3	Τυπικό παράδειγμα παλινδρόμησης.	44
4.4	Συσταδιοποίηση στη Μηχανική Μάθηση.	46
5.1	Η αρχιτεκτονική που ακολουθεί ο εξομοιωτής.	50
5.2	Η διαδικασία που ακολουθεί ο εξομοιωτής.	55

5.3	Η αρχική οθόνη του εξομοιωτή.	59
5.4	Οι διάφορες επιλογές σεναρίων του εξομοιωτή.	60
5.5	Ο εξομοιωτής αφού επιλεγθεί το σενάριο.	61
5.6	Η τελική οθόνη πριν την εκτέλεση του εξομοιωτή.	62
5.7	GUI Εξομοιωτή. Σενάριο με 7 Macrocells, 14 Microcells, 28 Picocells και 385 Χρήστες.	63
6.1	Ο Κύκλος Ενισχυτικής Μάθησης.	66
6.2	Το νευρωνικό δίκτυο που αποτελεί τον πράκτορα.	81
6.3	Παράδειγμα λειτουργίας του Μηχανισμού.	82
7.1	Οι ανταμοιβές που ελήφθησαν κατά τα επεισόδια εκπαίδευσης.	85
7.2	Η συνολική απόδοση του δικτύου, μετρημένη σε Gbps.	86
7.3	Η συνολική κατανάλωση ισχύος του δικτύου, μετρημένη σε kW.	87
7.4	Το QoS του δικτύου, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών.	88

Κατάλογος πινάκων

5.1	Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για ένα σενάριο	54
6.1	Χαρακτηριστικά του Deep Q-Learner	80

Κατάλογος αλγορίθμων

1	Διαδικασία ένωσης UE με BS	54
2	Αλγόριθμος Q-Learning	74
3	Ο αλγόριθμος DQL με χρήστη Experience buffer	77

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σημασία του Προβλήματος

Η δημοτικότητα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) βρίσκεται σε άνοδο, με νέες εφαρμογές και υπηρεσίες να γίνονται διαθέσιμες καθημερινά. Ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών προβλέπεται να αυξηθεί εκθετικά αυτή τη δεκαετία και μέχρι το 2025 εκτιμάται ότι το δίκτυο IoT θα έχει αυξηθεί, κατά περισσότερες από 75 δισεκατομμύρια συσκευές. Πρόκειται για τριπλάσια αύξηση του αριθμού των ατόμων που χρησιμοποιούν τεχνολογία IoT σε σύγκριση με το 2019. Για την αποτελεσματική διαχείριση των φυσικών πόρων των σταθμών βάσης (Base Station - BSs) του δικτύου, απαιτείται βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων (Resource Allocation - RA).

Η δυσκολία παροχής υπηρεσιών σε χρήστες κινητής τηλεφωνίας οφείλεται στον αυξανόμενο όγκο δεδομένων που διακινούνται. Οι πάροχοι μπορούν να αυξήσουν τους BS μακροπρόθεσμα προκειμένου να παρέχουν καλύτερες υπηρεσίες, αλλά υπάρχει χώρος για πιο έξυπνη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Υποθέτοντας ότι τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα θα επικεντρωθούν στην κατασκευή της υπάρχουσας υποδομής δικτύου αντί στην αντικατάστασή της, η πρόκληση είναι να μοιράζονται βέλτιστα οι τρέχοντες πόροι δικτύου στις υπηρεσίες παροχής

Για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας υψηλής ποιότητας σε πολλούς ανθρώπους, τα συστήματα πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζονται πολλή κίνηση ταυτόχρονα. Αυτό μπορεί συχνά να οδηγήσει σε προβλήματα στη βελτιστοποίηση της κοινής χρήσης των διαθέσιμων πόρων ενός δεδομένου συστήματος. Στόχος του παρόχου είναι να καλύψει τις ανάγκες όλων των χρηστών όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικά. Αυτά τα προβλήματα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα παραγόντων, όπως η κατανομή της ισχύος και τα διαθέσιμα κανάλια ή υποσταθμοί, καθώς και ο χειρισμός διαφόρων παρεμβολών και θορύβου, καιρικά φαινόμενα και η ευκολία επικοινωνίας κάθε χρήστη με το BS. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το πόσο γρήγορα γίνεται μια κλήση περιλαμβάνουν την προτεραιότητα των χρηστών εντός του δικτύου, τους αλγόριθμους δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται από κάθε BS και τις διαφορετικές εφαρμογές ή υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται στο ίδιο δίκτυο. Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα άτομα σε ένα σύνθετο σενάριο είναι ακόμη πιο δύσκολο να επιλυθούν.

Κάθε δίκτυο επικοινωνίας έχει το δικό του σύνολο λειτουργικών χαρακτηριστικών, τα οποία

καθορίζονται από τους συγκεκριμένους αλγόριθμους του και επηρεάζονται από ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών παραγόντων. Είναι σαφές ότι ένα γενικό μοντέλο μελέτης δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα RA και το καθένα πρέπει να μελετηθεί από μόνο του. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η διαχείριση των κινητών δικτύων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον ρόλο της RA, καθώς είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

1.2 Στόχοι της Εργασίας

Η κατανομή πόρων είναι ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού και της διαχείρισης των δικτύων επικοινωνίας. Για να αναλύσουμε περαιτέρω το πρόβλημα του RA, πρέπει να προσδιορίσουμε τους πόρους που πρέπει να διατεθούν. Ορισμένοι είναι:

- Οι Χρονικές Περίοδοι, που πρέπει να χωρίζονται σε διαφορετικές περιόδους, έτσι ώστε πολλοί κόμβοι να μπορούν να μοιράζονται το ίδιο κανάλι χωρίς καμία σύγκρουση.
- Μετάδοση Ισχύος/Ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται για τη διανομή της συνολικής διαθέσιμης ισχύος στον πομπό στις διάφορες κεραίες ή στρώματα.
- Το Εύρος Ζώνης, και η διαδικασία κατανομής ραδιοσυχνοτήτων σε διαφορετικές εφαρμογές.
- Χρήστες, κάθε χρήστης θα πρέπει να αντιστοιχιστεί στην κεραία που βρίσκεται πλησιέστερα σε αυτόν και που μπορεί να παρέχει την καλύτερη εξυπηρέτηση.
- Φάσμα, εκχωρώντας ζώνες χαμηλής, μεσαίας και υψηλής συχνότητας ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

Οι προαναφερθέντες πόροι, του ασύρματου δικτύου, ο κώδικας μετάδοσης ή κυματομορφής, η ζώνη συχνοτήτων, η χρονική περίοδος και η ισχύς μετάδοσης, πρέπει να κατανεμηθούν προσεκτικά μεταξύ πολλών διεπαφών για να παρέχουν υψηλή απόδοση, δικαιοσύνη στους χρήστες και σταθερή ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS). Μια βασική πρόκληση για τα ασύρματα δίκτυα είναι η ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency - EE), ένας κοινός πόρος που πρέπει να κατανεμηθεί αποτελεσματικά. Σε ορισμένες χώρες, το κόστος της λειτουργικής υποδομής αυξάνεται ραγδαία [1]. Επομένως, το χαμηλό λειτουργικό κόστος και η απόδοση επένδυσης για τους διαχειριστές συστημάτων επιτυγχάνονται μέσω της αποτελεσματικής χρήσης του φάσματος και της ισχύος. Ένας άλλος σπάνιος πόρος είναι η ισχύς μετάδοσης του κινητού τερματικού. Σε αυτήν την περίπτωση, η πιο αποτελεσματική προσέγγιση για την παράταση της διάρκειας ζωής των μπαταριών των κινητών τερματικών είναι η προσεκτική και αποτελεσματική διανομή ισχύος.

Στην περίπτωση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, οι BSs και οι υποσταθμοί κατασκευάζονται με συγκεκριμένες προδιαγραφές ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός θα έχει μέγιστη ισχύ μετάδοσης του (Transmit Power Output - TPO) ανεξάρτητα από το πώς χρησιμοποιείται. Το TPO δεν ταυτίζεται με την ισχύ ενός BS. Αυτό συμβαίνει, επειδή μια κεραία που μπορεί να εκπέμψει ένα σήμα, μπορεί να προκαλέσει απώλειες στη γραμμή ρεύματος ή ακόμα και κέρδος. Οι έξυπνες επιλογές TPO εντός του συστήματος διασφαλίζουν καλύτερη συνολική απόδοση του

συστήματος. Ο όρος "καλύτερη απόδοση" μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα με το τι επιδιώκουμε να επιτύχουμε. Οι στόχοι μας μπορεί να περιλαμβάνουν καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, αυξημένη συνολική χωρητικότητα δικτύου, ευρύτερη γεωγραφική κάλυψη, μεγαλύτερες αποστάσεις λήψης, ακόμη και αυξημένη διάρκεια ζωής του δικτύου και του εξοπλισμού του [2].

Αυξάνοντας το TPO σε ένα σύστημα επικοινωνίας, μπορεί να επιφέρει πολλαπλά οφέλη, στην συνολική λειτουργία του δικτύου. Αρχικά, ένα μεγαλύτερο TPO επιτρέπει την ύπαρξη υψηλότερης ισχύος σήματος στον δέκτη. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR), το οποίο με την σειρά του ελαχιστοποιεί το ποσοστό σφάλματος ανά δυαδικό ψηφίο (Bit Error Rate- BER) μιας ψηφιακής επικοινωνίας. Επιτυγχάνοντας υψηλότερο SNR, τα συστήματα ενσωματωμένα με Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC) μπορούν να μεταδώσουν πληροφορίες με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, αυξάνοντας την φασματική απόδοση του συστήματος. Επίσης, ο υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης μεταφράζεται σε μειωμένη πιθανότητα απώλειας σήματος, ειδικότερα σε ασύρματα δίκτυα που παρουσιάζουν απώλεια σήματος καναλιών ή ξεθώριασμα καναλιών. Υπάρχουν όμως μειονεκτήματα, με την χρήση υψηλότερης ισχύος μετάδοσης. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο αυξάνεται. Αυτό μπορεί να είναι πρόβλημα σε συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα που έχουν περιορισμένη διάρκεια μπαταρίας. Ακόμα ένα μειονέκτημα, είναι η αύξηση των παρεμβολών μεταξύ χρηστών που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Σε ένα σύστημα επικοινωνίας πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα ευρείας εμβέλειας (Code Division Multiple Access - CDMA), υπάρχουν πολλοί χρήστες, οι οποίοι μοιράζονται συγκεκριμένες συχνότητες και το σήμα τους διακρίνεται μόνο μέσω διαφορετικών κωδικοποιήσεων. Σε αυτά τα συστήματα ο αριθμός των χρηστών μέσα σε μια κυψέλη καθώς και η ακτίνα της κυψέλης περιορίζονται από την ποσότητα παρεμβολής στην κυψέλη. Κατά συνέπεια, καθώς αυξάνονται οι παρεμβολές, μειώνεται το μέγεθος και η χωρητικότητα της κυψέλης. Αλλά ακόμη και σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαφορετικές συχνότητες (Frequency Division Multiple Access - FDMA), οι παρεμβολές παραμένουν, τουλάχιστον μεταξύ διαφορετικών κυψελών. Αυτό είναι συνέπεια του γεγονότος ότι κάθε χρήστης χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα του συστήματος να επαναχρησιμοποιήσει μία συχνότητα.

Τα μελλοντικά ασύρματα πρότυπα που παρουσιάζονται στο [3] προωθούν την έννοια του Ετερογενούς Δικτύου (Heterogeneous Network - HetNet). Το δίκτυο αυτό, αποτελείται από διαφορετικούς BS και κόμβους αναμετάδοσης, χαμηλής κατανάλωσης, που τοποθετούνται με σκοπό την κάλυψη στην ακμή της κυψέλης και τους εσωτερικούς χρήστες. Ο στόχος του είναι η βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και της δικαιοσύνης των χρηστών. Στο [4] προτείνεται ένα νέο πρότυπο σχεδιασμού δικτύου που φέρνει τους πομπούς και τους δέκτες πιο κοντά μεταξύ τους, επιτρέποντας καλή ποιότητα σύνδεσης, αλλά με μικρή ισχύ μετάδοσης. Δυστυχώς, η εγγύτητα πολλών δεκτών και πομπών οδηγεί σε σοβαρές παρεμβολές εντός του δικτύου, οι οποίες μπορεί να έχουν σοβαρό αντίκτυπο στην απόδοση του συστήματος εάν δεν αντιμετωπιστούν σωστά. Για την επίτευξη αποτελεσματικής RA και παρεμβολών στα HetNets, μέθοδοι όπως ο συντονισμός πολλαπλών κυψελών και τεχνολογίες όπως αυτή της Πολλαπλής Εισόδου - Πολλαπλής Εξόδου (Multiple Input-Multiple Output - MIMO) θα είναι πολύ χρήσιμες.

Μια καλή προσέγγιση RA θα πρέπει να επιτρέπει ευέλικτο συντονισμό μεταξύ των κόμβων BS, αλλά θα πρέπει επίσης να επιτρέπει την εφαρμογή των απαραίτητων πρωτοκόλλων σε κάθε BS. Ο συντονισμός ήταν πολύ επιτυχημένος στη μείωση των παρεμβολών μεταξύ των κόμβων που παρεμβαίνουν (π.χ. Συντονισμένα Πολυσημεία (Coordinated MultiPoint - CoMP)). Ωστόσο,

αυτό θεωρείται αρκετά ακριβό όσον αφορά τα γενικά έξοδα μεταφοράς. Για παράδειγμα, το CoMP απαιτεί ολοκληρωμένο συντονισμό BS, συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ όλων των συνεργαζόμενων BS. Αντίθετα, η διαδικασία RA απαιτεί σημαντικά μικρότερο φορτίο σήματος και καμία ανταλλαγή δεδομένων, παρά τον κίνδυνο υποβάθμισης της απόδοσης.

Επομένως, οι στόχοι της εργασίας είναι η μελέτη των δικτύων 5G, μαζί με της καινοτόμες τεχνολογίες που προσφέρουν, όπως η προαναφερόμενη MIMO αλλά και η τεχνολογία DUDe (Downlink Uplink Decoupling). Στην συνέχεια, αφού μελετηθούν όλες οι πτυχές, και επιλεγθούν οι πόροι που επιθυμούμε να αναθέσουμε, σχεδιάζεται ένας μηχανισμός που επιλύει το πρόβλημα του RA σε δίκτυα 5G. Του μηχανισμού η λειτουργία, εξηγείται και αναλύεται εκτενώς, μαζί με τα οφέλη που προσφέρει, αλλά και πως μπορεί να εφαρμοστεί στα σύγχρονα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, με σκοπό της ικανοποίησης των συνδρομητών, αλλά και της ομαλής λειτουργίας του δικτύου. Τέλος, επισημάνεται και η ανάγκη για σχεδιασμό και υλοποίηση τέτοιων μηχανισμών.

1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Ξεκινώντας από την τεχνολογία DUDe, η πρόσφατη αρχιτεκτονική 5G HetNet έχει ουσιαστικά απομακρυνθεί από το τρέχον μοντέλο που ως επίκεντρο έχει το δίκτυο (Network Centric - NC) και έχει μετατοπιστεί προς την κατεύθυνση ενός πρωτοποριακού μοντέλου που εστιάζει στον χρήστη (User Centric - UC). Αυτό το νέο μοντέλο δικτύου προσανατολισμένο στον χρήστη υπόσχεται αυξημένη συνδεσιμότητα μεταξύ των συνδρομητών δικτύου και των BS που τους έχουν ανατεθεί σε πυκνές αναπτύξεις HetNet. Η θεμελιώδης πτυχή που διαφοροποιεί τα δίκτυα που είναι ομοιογενή και παραδοσιακά, είναι το γεγονός ότι ένα HetNet αποσυνδέει το κεντρικό δίκτυο και το διαιρεί σε δύο δίκτυα, της Ανερχόμενης Ζεύξης (Uplink - UL) και της Κατερχόμενης Ζεύξης (Downlink - DL). Αυτά θεωρούνται ως δύο ξεχωριστά δίκτυα με διαφορετικά μοντέλα συστημάτων, το καθένα με την αντίστοιχη αρχιτεκτονική του. Θα εκμεταλλευτούμε τα παραπάνω και θα προσφέρουμε τη δυνατότητα σε έναν Εξοπλισμό Χρήστη (User Equipment - UE) να επικοινωνεί πιθανώς με πολλά BS προς την κατεύθυνση UL και DL, παρέχοντας έτσι περισσότερο έλεγχο στη διαχείριση όλων των πιθανών συσχετίσεων UE-BS για τα αποσυνδεδεμένα δίκτυα. Η έννοια των δικτύων HetNets προβλέπει τη βελτίωση των τρεχουσών υποδομών μακροκυψελών (Macrocells), με την εγκατάσταση Small Cell BSs (SCBS) κατά μήκος των ορίων Macrocells, παρέχοντας στους χρήστες καλύτερη κάλυψη κοντά στα όρια κυψελών.

Συνεχίζοντας με την τεχνολογία MIMO, το MIMO και τα πυκνά HetNets θεωρούνται ως η υποψήφια τεχνολογία για τα μελλοντικά κυψελωτά δίκτυα 5G, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση του φάσματος. Εξυπηρετώντας πολλούς χρήστες, η τεχνολογία MIMO, όπου ο κάθε BS χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό κεραιών, μπορεί να επιτύχει τεράστια βελτίωση για την απόδοση του φάσματος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε ένα HetNet, το SCBS αναπτύσσεται εντός μιας κάλυψης μακροκυψελών και τα small cells μπορούν να εκφορτώσουν την κίνηση δεδομένων. Επομένως, τα HetNets, τα οποία αποτελούνται από πολλά MIMO BS με διαφορετικές ισχύς, αριθμούς κεραιών και δυνατότητες απολαβής πολυπλεξίας, θα αυξήσουν την απόδοση του φάσματος του συστήματος. Ένα από τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του HetNet είναι ότι ένας χρήστης ακμής κυψέλης μπορεί ενδεχομένως να συσχετιστεί είτε με το macrocell BS είτε με ένα SCBS, με αποτέλεσμα διαφορετική απόδοση. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να δημιουργηθούν μηχανισμοί για τη συσχέτιση των χρηστών με BS στα πυκνά HetNets,

έτσι ώστε η διαθέσιμη ασύρματη υποδομή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Δεδομένου ότι τόσο το Massive MIMO όσο και το HetNets έχουν ταυτόχρονα ανώτερα πλεονεκτήματα απόδοσης, η μελέτη των HetNets με δυνατότητα Massive MIMO έχει θεωρηθεί βασικό ζήτημα.

Έχοντας κάνει την παραπάνω ανάλυση έχουμε ουσιαστικά κάνει εισαγωγή σε κάποιες βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος του αποδοτικού RA με χρήση τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning - ML). Νέες τεχνολογίες όπως το ML αλλά και η Θεωρία Παιγνίων (Game Theory - GT) εφαρμόζονται στα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών με σκοπό να βελτιώσουν αλγοριθμικά την απόδοση των δικτύων. Πριν παρουσιαστεί μια προτεινόμενη επίλυση του θέματος της παρούσας διπλωματικής, παρουσιάζουμε κάποια απαραίτητα θεωρητικά κεφάλαια των οποίων η μελέτη μας βοήθησε να επιλύσουμε το προαναφερθέν πρόβλημα.

Η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας είναι, συνεπώς η παρακάτω:

- Η ιστορία των γενιών των δικτύων από το 1G έως και το 5G παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2 μαζί με διάφορες εφαρμογές καθώς και τεχνολογίες τους.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η διαδικασία ανάθεσης πόρων στα δίκτυα 5G και αναγράφονται οι πιο καινοτόμες εργασίες, που έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη αλγορίθμων ώστε να αυξάνεται η απόδοση του RA.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται εμβάθυνση στις βασικές έννοιες του ML και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η παρούσα τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί στα δίκτυα επηρεάζοντας θετικά το RA.
- Στην συνέχεια, στο Κεφάλαιο 5, περιγράφουμε τον τρόπο λειτουργίας και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από έναν εξομοιωτή ενός δικτύου 5G που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιώντας την προγραμματιστική γλώσσα Python.
- Το Κεφάλαιο 6 δείχνει, πως μέσω χρήσης ενός αλγόριθμου για RA, ο οποίος είναι βασισμένος σε τεχνικές ML, εκτελείται συσχέτιση χρηστών με συγκεκριμένα BS.
- Τέλος, στα κεφάλαια 7 και 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και μελλοντική έρευνα που μπορεί να διεξαχθεί, αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2

Δίκτυα 5G

2.1 Προηγούμενες Γενιές Κινητών Δικτύων Επικοινωνιών

2.1.1 Η Γενιά 1G

Εφόσον αναλύθηκαν κάποιες βασικές έννοιες, σε αυτό το Κεφάλαιο αναλύονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά παλιότερων γενιών του 5G, ξεκινώντας με το 1G, το οποίο αποτελεί την πρώτη γενιά κινητών δικτύων. Δημιουργήθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1970, ενώ επίσημα ξεκίνησε να λειτουργεί στα τέλη του 1980. Με χρήση της αναλογικής τεχνολογίας, η συγκεκριμένη γενιά μπορούσε να παρέχει υπηρεσίας ομιλίας, με μέγιστη ταχύτητα τα 2.4 Kbps.

Το 1979, η NTT (Nippon Telegraph and Telephone) επέτρεψε στο κοινό ουσιαστικά, για πρώτη φορά, την χρήση του δικτύου 1G στο Τόκυο, ενώ μέσα σε ένα χρόνο μόλις, κατάφερε να καλύψει τηλεπικοινωνιακά όλη την Ιαπωνία. Το 1983, στις Η.Π.Α. κυκλοφόρησε το κινητό DynaTAC, γνωστό ως το πρώτο τηλέφωνο που ήταν συμβατό με το κινητό δίκτυο 1G. Στην Ευρώπη, χρησιμοποιούσαν το NMT, το οποίο ήταν το πρώτο κινητό δίκτυο με δυνατότητες περιαγωγής, σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι κινητές συσκευές, συνεπώς μπορούσαν να συνδεθούν σε κάποιο άλλο διαθέσιμο δίκτυο, ακόμα και όταν ήταν εκτός του εύρους του κεντρικού δικτύου τους.

Παρά το γεγονός ότι η χρήση του ήταν ευρεία, λόγω μερικών πρακτικών προβλημάτων που παρουσίαζε το δίκτυο, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης, μίας επόμενης γενιάς δικτύων. Μερικά από τα μειονεκτήματα του 1G συμπεριλάμβαναν, μεταξύ άλλων, το γεγονός ότι η μπαταρία των συσκευών διαρκούσε πολύ λίγο, η ποιότητα της κλήσης δεν ήταν τόσο καλή και κάποιες από τις κλήσεις κόβονταν. Παράλληλα, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κλήσεις ήταν αναλογικές, δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν πρωτόκολλα κρυπτογράφησης με αποτέλεσμα, να μην μπορεί να εξασφαλιστεί η ιδιωτικότητα των κλήσεων. Οι περιορισμοί αυτοί προκύπταν από το γεγονός ότι, δεν υπήρχαν κυψελωτοί BS ώστε να επιτευχθεί κάλυψη σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Τα παραπάνω προβλήματα οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη μιας νέας γενιάς δικτύων με αυξημένες δυνατότητες. Όπως είναι λογικό, με την δημιουργία του 2G, το 1G σταδιακά εγκαταλείφθηκε καθώς η απόδοση της γενιάς ήταν προφανώς αυξημένη.

2.1.2 Η Γενιά 2G

Το 2G δημιουργήθηκε το 1980 και τέθηκε στην κυκλοφορία μέχρι τα τέλη του 1991. Η κύρια διαφορά με την προηγούμενη γενιά, είναι ότι πλέον τα σήματα είναι ψηφιακά και όχι αναλογικά. Αυτό επέτρεψε την δημιουργία αλγορίθμων κρυπτογράφησης, εξασφαλίζοντας ότι οι συνομιλίες των χρηστών, θα ήταν πιο ασφαλείς. Παράλληλα, οι ίδιοι απολαμβάνουν καλύτερη ποιότητα κλήσεων, με αυξημένη αξιοπιστία και πλέον έχουν την δυνατότητα να στέλνουν Short Time Messages (SMS) και Multimedia Messages (MMS). Αξίζει να αναφερθεί πως, εξαιτίας της καλύτερης επεξεργασίας των σημάτων οι χρήστες απολαμβάνουν μειωμένο θόρυβο, ο οποίος οφείλεται αρχικά στην παρεμβολή μεταξύ συμβόλων. Τέλος, βελτιώνεται και η κατανάλωση ισχύος με αποτέλεσμα η μπαταρία των συσκευών να διαρκεί περισσότερο και να είναι μικρότερη σε μέγεθος.

Τα 2G δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών επιτυγχάνουν τα παραπάνω χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως CDMA και Διαίρεση Χρόνου Πολλαπλής Εισόδου (Time Division Multiple Access - TDMA). Οι χρήστες μοιράζονται διαφορετικές συχνοτικές ζώνες, ενώ επίσης αποστέλλουν ταυτόχρονα πληροφορία. Με την χρήση του TDMA χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων διαιρώντας το σήμα σε χρονικά διαστήματα.

Ένα από τα βασικά πρωτόκολλα στο οποίο βασίστηκε το 2G, είναι το GSM (Global System for Mobile), που αρχικά εφαρμόστηκε στην Φινλανδία το 1991. Το παρόν σύστημα υποστήριζε την περιαγωγή, αλλά και έδινε στους χρήστες την δυνατότητα να εξυπηρετούνται από κεραιές βάσης διαφορετικών σταθμών. Το GSM χρησιμοποιεί τις τεχνικές TDMA και CDMA και αποτελείται από 3 μέρη, τον κινητό σταθμό, το βασικό υποσύστημα σταθμού και βασικό σταθμό ελέγχου.

Μελλοντικά, δημιουργήθηκε προέκταση του GSM, η οποία είναι το General Packet Radio Services (GPRS), η επέκταση του οποίου είναι το Enhanced DATA GSM Environment (EDGE). Το GPRS χρησιμοποιεί την τεχνική μεταγωγής πακέτου και έχει μέγιστη ταχύτητα τα 50Kbps. Εξασφαλίζεται ακόμα πως οι πόροι του δικτύου δεσμεύονται αφού ζητηθούν από τον χρήστη. Το EDGE έχει μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς, το 1Mbps και απαιτεί βελτίωση του ήδη υπάρχοντος εξοπλισμού. Κάθε σύμβολο του κωδικοποιείται με 3 bit και κατά συνέπεια, η τεχνολογία που χρησιμοποιεί είναι η 8PSK. Λόγω του ότι αυξάνονται οι απαιτήσεις, αναγκαστικά πρέπει να μεταβούμε στην επόμενη γενιά.

2.1.3 Η Γενιά 3G

Η νέα αυτή γενιά των δικτύων εμφανίστηκε το 1998 και τέθηκε σε εφαρμογή μέχρι το 2001. Η δημιουργία του οφείλεται στις αυξημένες ανάγκες των χρηστών, όπως γρηγορότερη και πιο σταθερή σύνδεση στο διαδίκτυο, ταχύτερη μεταφορά δεδομένων, και τέλος κάλυψη κάθε συσκευής κινητής τηλεφωνίας σε οποιοδήποτε μέρος και στιγμή. Η τεχνολογία αυτή, ικανοποιούσε τις ανάγκες των χρηστών. Η εξέλιξη των smartphones, οφείλεται σε αυτή την γενιά, η οποία επίσης, επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τον κόσμο σήμερα. Πλέον οι χρήστες μπορούν να στέλνουν email, να κάνουν κλήσεις με κάμερα και να κατεβάζουν εικόνες και βίντεο στα κινητά τους.

Παράλληλα αυξάνεται και η ταχύτητα του δικτύου, με τον ελάχιστο ρυθμό πλέον να φτάνει τα 144 Kbps, όταν το δίκτυο πρέπει να εξυπηρετήσει πολύ κόσμο, ενώ το μέγιστο της γενιάς αυτής είναι 2 Gbps, όταν δεν υπάρχουν πολλοί χρήστες. Λόγω της αύξησης των χρηστών, ως συνέπεια αυξάνεται η χρήση, αλλά και το πλήθος των συχνοτικών ζωνών, έτσι ώστε να βελτιώνεται η εξυπηρέτηση όλων των χρηστών. Αξίζει να σημειωθεί, πως ο ρυθμός αυξάνεται κατά 10 φορές στο δίκτυο 3G σε σχέση με το δίκτυο 2G.

Προφανώς, αυτές τις αυξημένες δυνατότητες τις συνοδεύουν και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα, κάποια εκ των οποίων είναι το Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS), το Enhanced High Speed Packet Access (HSPA+) και το CDMA2000. Το UMTS αποτελεί εξέλιξη του GSM και εφαρμόζεται στην Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Κίνα. Ακόμα, το HSPA+ αποτελεί την βελτίωση του UMTS και παρέχει καλούς ρυθμούς μετάβασης στο DL ακόμα και στο UL. Τέλος, το CDMA2000 χρησιμοποιήθηκε το 2002 σε πολλές χώρες ανά την υφήλιο.

2.1.4 Η Γενιά 4G

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, έδωσε την δυνατότητα για ανάπτυξη μιας νέας γενιάς κυψελοειδών δικτύων, η οποία σηματοδοτεί την ενσωμάτωση ασύρματων τεχνολογιών, όπως Bluetooth. Η συγκεκριμένη γενιά, προσφέρει αυξημένη ταχύτητα, σε σχέση με την προηγούμενη, πολλές υπηρεσίες με μεγάλη ευκολία, καλό QoS με σχετικά μικρό κόστος. Ακόμα, αυτή η γενιά προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ευρυζωνικότητα, που πρακτικά σημαίνει πως οι χρήστες μπορούν να βρίσκονται σε απόσταση μέχρι των 35 χιλιομέτρων από τον BS και να εξυπηρετούνται χωρίς προβλήματα στην σύνδεση τους με καλό QoS.

Αυτή η γενιά δεν είναι απλά ένα πρωτόκολλο, αλλά αποτελεί ένα συνδυασμό πολλών. Οι τεχνολογίες υποδεικνύουν κριτήρια, τα οποία πρέπει να πληρούνται ώστε συγκεκριμένες να θεωρούνται 4G. Ένα από τα βασικότερα πρωτόκολλα είναι το Long Term Evolution – LTE. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 2008 και σχετίζεται με την ασύρματη διεπαφή και την αρχιτεκτονική του εκάστοτε δικτύου. Ανά διαστήματα το συγκεκριμένο πρωτόκολλο επεκτείνεται και ικανοποιεί περισσότερες απαιτήσεις των χρηστών. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί την συνέχεια του 3G και χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως MIMO και Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM). Οι τεχνολογίες που υπήρχαν ήδη, αναγκάστηκαν να εκσυγχρονιστούν, έτσι ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν τις πλέον μεγάλες ταχύτητες. Με αυτήν την γενιά οι χρήστες απολαμβάνουν τεράστια οφέλη, σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές, όπως: συγκριτικά μεγαλύτερες ταχύτητες, στα 100 Mbps.

Πολύ σημαντική τεχνολογία του 4G είναι και η Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), η οποία αποτελεί τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης και δουλεύει με παρεμφερή τρόπο με το Wireless Fidelity (Wi-Fi) εξασφαλίζοντας ωστόσο σημαντικά μεγαλύτερη εμβέλεια.

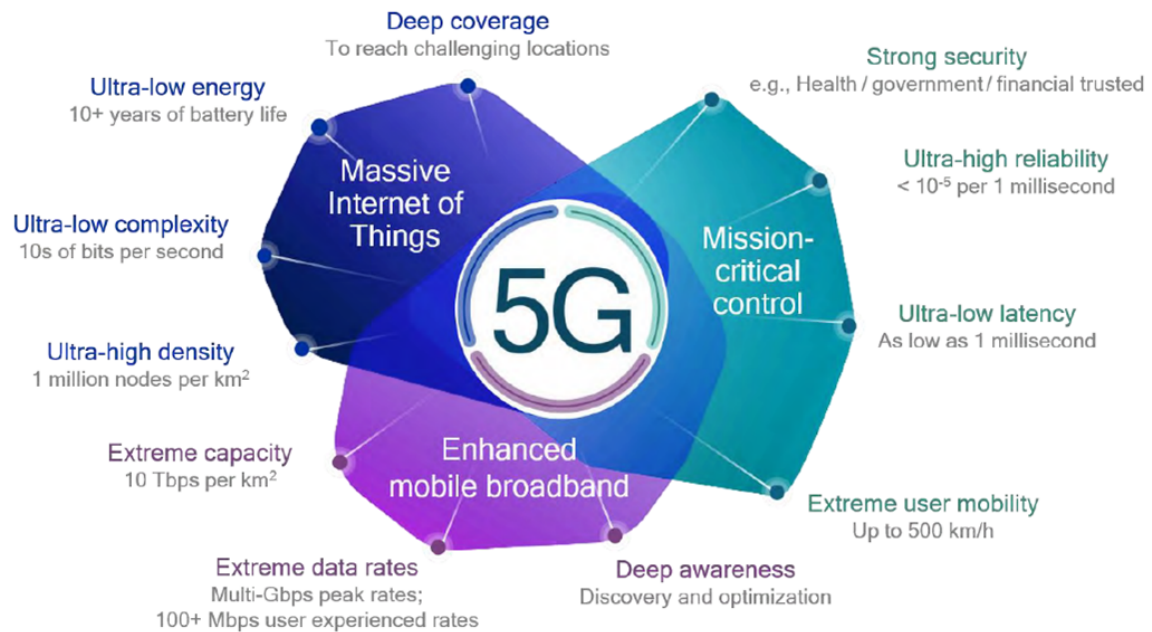
2.2 Η Γενιά 5G

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [5], τα οποία υπάρχουν εδώ και 40 χρόνια, όπως και το Διαδίκτυο, έχουν δει πολλές αλλαγές. Η φωνή και το κείμενο ήταν διαθέσιμα στις δύο πρώτες γενιές, με το 3G να σηματοδοτεί τη μετάβαση στη σύνδεση στο διαδίκτυο, με ταχύτητες που υπολογίζονται σε εκατοντάδες kbps. Η βιομηχανία αυτή τη στιγμή μεταβαίνει από το 4G (το οποίο υποστηρίζει ταχύτητες σε λίγα mbps) στο 5G, το οποίο υπόσχεται δεκαπλάσια ώθηση στους ρυθμούς δεδομένων.

Το 5G, από την άλλη πλευρά, είναι κάτι πολύ περισσότερο από απλώς αυξημένη χωρητικότητα και ταχύτητα. Το 5G, πρωτίστως, είναι μια ανακατασκευή της δικτυακής υποδομής που χρησιμοποιεί μια σειρά από βασικές τεχνολογικές εξελίξεις και οδηγείται σε μια κατεύθυνση, η οποία δίνει την δυνατότητα για πολύ μεγαλύτερη τεχνολογική ανάπτυξη. Η υπόσχεση του 5G είναι ουσιαστικά η μετάβαση από μια ενιαία πρόσβαση στο δίκτυο (ευρυζωνική συνδεσιμότητα) σε μια ευρύτερη σειρά συσκευών και υπηρεσιών αιχμής. Ένα παράδειγμα τόσο μεγάλης εξέλιξης σηματοδοτήθηκε με την μετάβαση από την ομιλία στην ευρυζωνική σύνδεση και έγινε πραγματικότητα στην γενιά 3G. Εξελιγμένες διεπαφές χρήστη (π.χ. Virtual Reality), εφαρμογές προσανατολισμένες στην εργασία (π.χ. δημόσια ασφάλεια, οχήματα χωρίς οδηγό) και το IoT αναμένεται να επωφεληθούν από το 5G. Δεδομένου ότι αυτά τα σενάρια θα περιλαμβάνουν οτιδήποτε, από οικιακές συσκευές και τεχνολογίες αυτοματισμού έως αυτοκίνητα που μετακινούνται χωρίς οδηγό, το 5G όχι μόνο θα επιτρέψει στους ανθρώπους που χρησιμοποιούν τα κινητά τους να έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο, αλλά και σε πληθώρα αυτόνομων αντικειμένων να λειτουργούν τα δικά τους συστήματα. Η υποστήριξη αυτών των υπηρεσιών συνεπάγεται κάτι περισσότερο από απλή αύξηση του εύρους ζώνης ή μείωση του λανθάνοντος χρόνου για μεμονωμένους καταναλωτές. Ένας ριζικά νέος σχεδιασμός δικτύου είναι απαραίτητος, όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Οι ανάγκες της αρχιτεκτονικής είναι φιλόδοξες καθώς το έργο είναι πολύ δύσκολο. Οι παρακάτω πυλώνες λειτουργιών δείχνουν τους βασικούς στόχους αυτής της νέας γενιάς και συνοψίζονται στους παρακάτω:

- Τεράστια υποστήριξη IoT, που μπορεί να περιλαμβάνει εξαιρετικά χαμηλή ισχύ (η μπαταρία διαρκεί 10+ χρόνια), εξαιρετικά χαμηλή πολυπλοκότητα (10 bit/s) και εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα συσκευής (1 m συσκευές ανά km^2).
- Εξαιρετικά υψηλή διαθεσιμότητα, χαμηλή καθυστέρηση (φθάνει το 1 ms) και δυνατότητα ευελιξία. Η ανάπτυξη του Mission-Critical Control αποτελεί αδήριτη ανάγκη καθώς συγκεκριμένες εφαρμογές και υπηρεσίες έχουν προτεραιότητα σε σχέση με άλλες. Η ανάπτυξη του παραπάνω επιτρέπει την ανάπτυξη του βιομηχανικού αυτοματισμού, ενός δύσκολου τομέα, που θέτει υποδομές για έξυπνες πόλεις, ρομπότ και drones, συστήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια και αυτόνομα σε οχήματα, ιατρικές διαδικασίες εξ αποστάσεως. Πιο αναλυτικά, αναφερόμαστε σε κλήσεις έκτακτης ανάγκης και υπηρεσίες στις οποίες δεν γίνεται να υπάρχει καθυστέρηση, όπως όποιες είναι σχετικές με αυτό-οδηγούμενα οχήματα.
- Εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων (πολλαπλά gigabit ανά δευτερόλεπτο, σταθερές ταχύτητες 100+ Mbps) και υψηλή χωρητικότητα (10 Tbps συνολικής απόδοσης ανά km^2), για Βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση κινητής τηλεφωνίας.

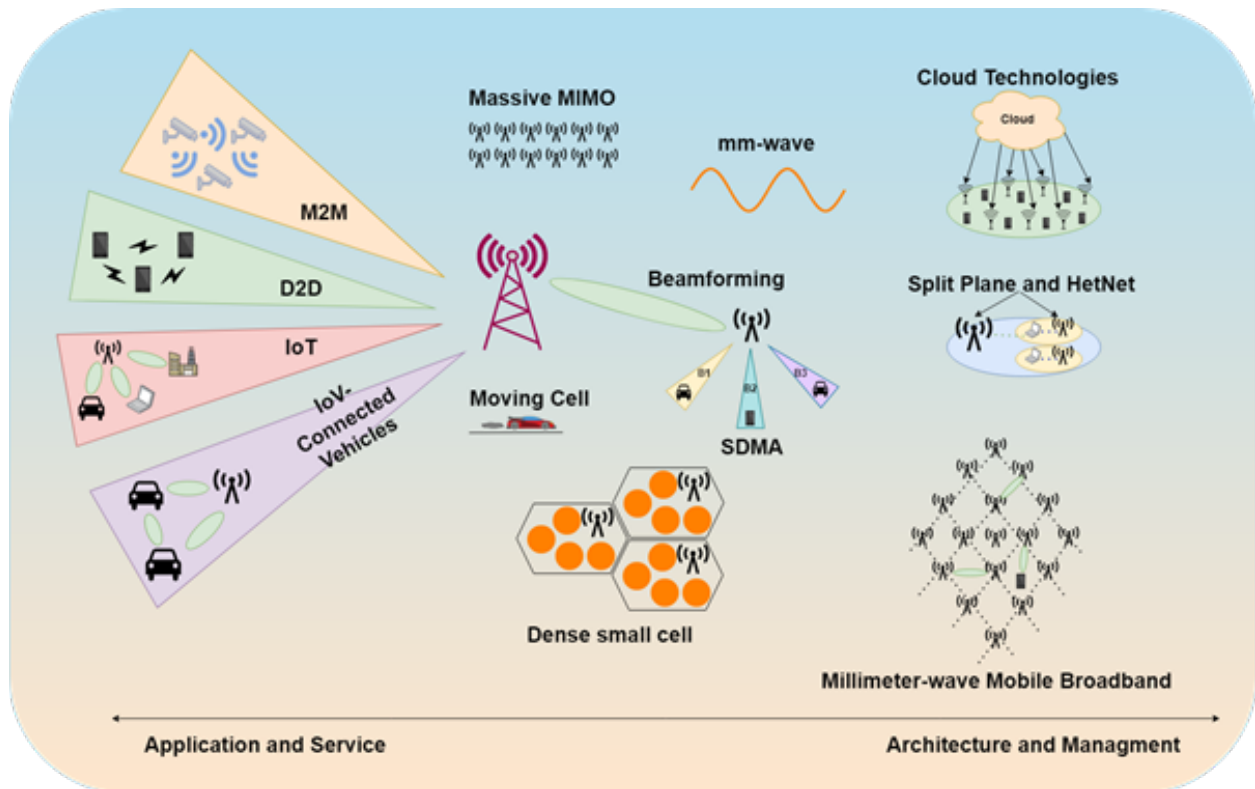


Σχήμα 2.1: Τα Πλεονεκτήματα του Δικτύου 5G [6]

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων δεν είναι εύκολη διαδικασία, δεδομένου ότι κάθε γενιά δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι ένα έργο δέκα ετών.

Εκτός από αυτές τις ποσοτικές βελτιώσεις στις δυνατότητες του δικτύου πρόσβασης, το 5G εξετάζεται ως ευκαιρία για τη δημιουργία μιας πλατφόρμας που θα ενθαρρύνει την καινοτομία. Τα δίκτυα πρόσβασης, στο παρελθόν, σχεδιάστηκαν κυρίως για να υποστηρίξουν καθιερωμένες υπηρεσίες (για παράδειγμα τηλεφωνικές κλήσεις και μηνύματα κειμένου), αλλά το Διαδίκτυο ήταν εξαιρετικά αποτελεσματικό, καθώς υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα χρήσεων που ποτέ δεν είχαν προβλεφθεί στην αρχή της αναπτύξεώς του. Το συγκεκριμένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας κατασκευάζεται με παρόμοιο σκοπό: να ενεργοποιήσει ένα ευρύ φάσμα μελλοντικών εφαρμογών που δεν έχουν ακόμη υλοποιηθεί πλήρως.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω δεν υπάρχει ενιαία, πλήρης περιγραφή του 5G, όπως ακριβώς, δεν υπάρχει ένας ενιαίος, ολοκληρωμένος ορισμός του Διαδικτύου. Είναι ένα περίπλοκο και δυναμικό σύστημα που διέπεται από ένα σύνολο κανόνων που προσφέρουν σε όλα τα μέρη πολλά περιθώρια.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα με τις υπηρεσίες του Δικτύου 5G.

Αναμένεται ότι θα χρησιμοποιηθούν πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων για το 5G [7]. Οι υπάρχουσες ζώνες με συχνότητες κάτω των 6 GHz (γνωστές ως ζώνες μικροκυμάτων), έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης λόγω του της αύξησης της χρήσης τους. Οι πρόσθετες ζώνες, για τις οποίες έχουν δοθεί επίσημες άδειες, παρέχουν σημαντική χωρητικότητα στο σύστημα. Στις ζώνες χωρίς άδεια (60 Hz), υπάρχουν πολλές ζώνες φάσματος που θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν σε συνεργασία με τις ζώνες με άδεια. Για το 5G, η προσεκτική ανάλυση μεταξύ ζωνών αναμένεται να είναι ζωτικής σημασίας. Κάποιες από τις πιθανές επιλογές είναι χαμηλότερες συχνότητες για ευρεία κάλυψη, δίκτυα μικροκυμάτων (millimeter Wave – mmWave) που επιτρέπουν τοπικές και εξατομικευμένες ζώνες επικοινωνίας και οικιακή συνδεσιμότητα μικρής εμβέλειας στο τμήμα φάσματος χωρίς άδεια των ζωνών κυμάτων mm.

- Η μεγάλη χωρητικότητα της περιοχής υποδηλώνει ότι θα χρησιμοποιηθούν small cells για την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου. Η ζήτηση για μειωμένη καθυστέρηση απαιτεί μικρότερα χρονικά διαστήματα μετάδοσης. Όταν δεν υπάρχουν δεδομένα για αποστολή, τονίζεται η ανάγκη για καλύτερη ΕΕ. Όλα αυτά υποδηλώνουν ότι ένα νέο κεντρικό δίκτυο και νέες τεχνολογίες ράδιο-πρόσβασης θα αναπτυχθούν μελλοντικά. Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της χωρητικότητας. Σήμερα, οι κινητές τηλεπικοινωνίες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στις ζώνες μικροκυμάτων (κάτω από 6 GHz), με την πλειονότητα των εγκαταστάσεων να πραγματοποιούνται σε συχνότητες κάτω των 3 GHz, η οποία είναι αρκετά πολυπληθής. Από την άλλη πλευρά, στις ζώνες κυμάτων cm και mm (28-300 GHz), υπάρχει άφθονο φάσμα προσβάσιμο και μεγάλα εύρη ζώνης που παρέχουν έως 1 GHz. Ορισμένα δίκτυα 5G, από την άλλη πλευρά, μπορεί να αποτελούνται από διπλά στρώματα: ένα στρώμα μακροεντολής για την κυκλοφορία επιπέδου χρήστη και τη σηματοδότηση επιπέδου ελέγχου στις περιοχές μικροκυμάτων και ένα μικρό στρώμα για την κίνηση τομέα χρήστη στη ζώνη

κυμάτων mm. Ο τομέας ελέγχου και των δύο επιπέδων μεταδίδεται στο μακροεπίπεδο.

- Τεράστιες ρυθμίσεις κεραιών MIMO στο BS. Οι αυξημένες συχνότητες επιτρέπουν την ανάπτυξη πρόσθετων κεραιών στο BS, που χρησιμοποιούνται, ώστε να δίνουν χωρητικότητα καναλιού, για μεγαλύτερη απώλεια διαδρομής και να προσφέρουν ώθηση για χωρική πολυπλεξία. Οι πολυάριθμες κεραιές που λαμβάνονται υπόψη για το BS σε συχνότητες κυμάτων mm κυμαίνονται από 256 έως 1024. Οι κεραιές αποτελούνται από μια δισδιάστατη (2D) συστοιχία διασταυρούμενων πολωμένων στοιχείων. Ο πίνακας μπορεί επίσης να αποτελείται από υπο-πίνακες. Για να επιτευχθεί το κατάλληλο κέρδος, τα εξαρτήματα της κεραιάς μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν ομάδες διπόλων ή κεραιές patch.
- Πρόοδος στο MIMO. Επιτρέπεται η χρήση δισδιάστατων πινάκων και η προ κωδικοποίηση πολλαπλών χρηστών της ταυτόχρονης μετάδοσης σε οντότητες δικτύου που διαχωρίζονται και από τις δύο συντεταγμένες. Ο αριθμός των ταυτόχρονων χρηστών συνδέεται άμεσα με την υψηλότερη ποσότητα χωρικών ροών πληροφορίας που θα μπορούσε να χειριστεί ο BS και το περιβάλλον του. Αυτό επηρεάζεται από την τοποθεσία του χρήστη καθώς και από τις τεχνικές επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται.
- Πύκνωση δικτύου. Μικρές κυψέλες (με έως και 10 μέτρα υπηρεσίας) θα χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη κατανομή του όγκου της πληροφορίας, ιδιαίτερα σε εσωτερικούς κόμβους και μικρό-κυψέλες υψηλής πυκνότητας. Για να μειωθεί ο κυκλοφοριακό φόρτος, συνιστάται η εγκατάσταση μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας, αλλά, η κυκλοφορία σε επίπεδο ελέγχου θα εξακολουθεί να απαιτεί υπηρεσία μακρό-κυψέλης (στις ζώνες μικροκυμάτων). Η υψηλότερη κυτταρική πυκνότητα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη ενδοκυτταρική παρεμβολή, μειώνοντας τυχόν κέρδη χωρητικότητας (capacity). Επιπλέον, ανάλογα με την απώλεια διαδρομής, μπορεί η άπειρη ανάπτυξη στην ποσότητα των μικρών κυψελών να αποδειχθεί αντιπαραγωγική λόγω της παρεμβολής άλλων κυττάρων (Order Cell Interference - OCI). Λύσεις μετριασμού των παρεμβολών, όπως ο συνεργατικός προγραμματισμός, το CoMP και άλλες, χρησιμοποιούνται για να καταπολεμήσουν το OCI και ως εκ τούτου θα συμβάλουν στην αυξημένη απόδοση του φάσματος, ιδιαίτερα στην άκρη της κυψέλης. Στα προηγμένα συστήματα, αυτές οι στρατηγικές χρησιμοποιούνται ήδη. Επιπλέον, τα δίκτυα 5G θα παράγουν σημαντικά μικρότερο εύρος δέσμης από τις σημερινές ζωνικές κεραιές, μειώνοντας ενδεχομένως το επίπεδο παρεμβολών.
- Νέες κυματομορφές. Η χρήση της Ορθοκανονικής Διαίρεσης Συχνοτήτων Ευρείας Εμβέλειας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA) σε LTE επιτρέπει τη μεταφορά ενός τεράστιου αριθμού δεδομένων. Το κόστος της ορθογώνιας επικοινωνίας, που περιλαμβάνει λογισμικό, πόρους σε εκκρεμότητα και χρονική ευθυγράμμιση μηνυμάτων, είναι σχετικά σημαντικό όταν συζητηθεί μεγάλος αριθμός συσκευών. Επιπλέον, λόγω της μεθόδου αίτησης και επιχορήγησης, η προγραμματισμένη μεταφορά δεδομένων συνεπάγεται γενικά σημαντική καθυστέρηση. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων, απαιτείται ένα καινοτόμο σύστημα πολλαπλής πρόσβασης.

Τα κανάλια διάδοσης στα οποία λειτουργούν τα συστήματα 5G περιορίζουν τελικά την απόδοσή τους. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά του καναλιού που έχουν σημασία για τα δίκτυα 5G, ειδικά εκείνα που δεν έχουν μελετηθεί σε προηγούμενες γενιές. Σε αυτή την ενότητα δίνουμε μια γρήγορη επισκόπηση των τεράστιων καναλιών MIMO (Massive MIMO), συσκευές δικτύωσης και μηχανισμούς mmWave. Λόγω περιορισμένου χώρου, άλλα βασικά συστατικά, όπως η επικοινωνία συσκευής με συσκευής (Device to Device - D2D),

τα οποία αποτελούνται επίσης από επικοινωνία οχήματος με όχημα (Vehicle to Vehicle - V2V) αλλά αυτή η περίπτωση αγνοείται.

1. Massive MIMO
2. Κανάλια για Κατανεμημένα Συστήματα
3. Κανάλια mmWave

Η αυξανόμενη σύγκλιση της διαθεσιμότητας φάσματος mmWave, της υπερ-συνδεδεμένης όρασης και των νέων αναγκών που προσανατολίζονται στις εφαρμογές θα οδηγήσουν στην επόμενη σημαντική εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών [8]. Οι ταχύτητες ασύρματων δεδομένων, η χωρητικότητα, η κάλυψη και η σύνδεση αναμένεται να εκτοξευθούν στα ύψη στο 5G, ενώ ο συνολικός χρόνος μετάδοσης (μετ' επιστροφής) και η κατανάλωση ενέργειας αναμένεται να πέσει κατακόρυφα. Το πρότυπο έχει ολοκληρωθεί από το 2020 και στο αποκορύφωμά του, που θα είναι περίπου το 2025, θα περιλαμβάνει τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων από 1 μέχρι 10 Gbps: Πρόκειται για μια αύξηση της τάξης του 1000%, από τον θεωρητικό μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των 150 Mbps για τυπικά δίκτυα LTE.
2. Καθυστέρηση μετ' επιστροφής 1 ms: Πρόκειται για μια δεκαπλάσια βελτίωση σε σχέση με την καθυστέρηση 10 ms μετ' επιστροφής του 4G.
3. Υψηλό εύρος ζώνης ανά περιοχή μονάδας: Θα υπάρχουν περισσότερες συνδεδεμένες μονάδες με μεγαλύτερα εύρη ζώνης για εκτεταμένες χρονικές περιόδους σε έναν συγκεκριμένο χώρο.
4. Τεράστιος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών: Ως στόχο την πραγματοποίηση του IoT, τα νέα δίκτυα 5G πρέπει να μπορούν να συνδέουν χιλιάδες συσκευές.
5. Προσβασιμότητα 99,999%: Το 5G αναμένεται να προσφέρει ένα δίκτυο που είναι σχεδόν συνεχώς προσβάσιμο.
6. Σχεδόν συνολική κάλυψη για συνδεσιμότητα «ανά πάσα στιγμή, οπουδήποτε»: Τα ασύρματα δίκτυα 5G πρέπει να παρέχουν ολοκληρωμένη κάλυψη ανεξάρτητα από την τοποθεσία των χρηστών.
7. Μείωση σχεδόν 90% στην κατανάλωση ενέργειας: η ανάπτυξη πράσινης τεχνολογίας εξετάζεται ήδη. Με τις υψηλές ταχύτητες δεδομένων του ασύρματου δικτύου 5G και την ευρεία σύνδεση, η τεχνολογία αυτή θα είναι ακόμη πιο κρίσιμη.
8. Μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας: Στα επόμενα δίκτυα 5G, η κατανάλωση ενέργειας της συσκευής πρέπει να μειωθεί.

Με τις παραπάνω οκτώ απαιτήσεις, η βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας, η ακαδημαϊκή κοινότητα και τα ερευνητικά ιδρύματα έχουν αρχίσει να συνεργάζονται σε διάφορες πτυχές των ασύρματων συστημάτων 5G. Η ανάπτυξη του 5G θα πρέπει να ξεκινήσει με την εξασφάλιση της

συμβατότητας με τα σημερινά ασύρματα συστήματα 4G LTE. Αυτό βοηθά στη διατήρηση της υπηρεσίας στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με τον συμβατικό εξοπλισμό.

Η ενιαία πλατφόρμα θα συμβάλει στην εξοικονόμηση κόστους και στην αύξηση της αποτελεσματικότητας, επιτρέποντας παράλληλα μια πληθώρα νέων πλεονεκτημάτων. Δύο βασικά μοτίβα έχουν παρατηρηθεί από το δίκτυο του NTT Docomo [8]: (i) ευρέως διαδεδομένη ασύρματη σύνδεση (ii) διανομή σημαντικά πλούσιου υλικού σε πραγματικό χρόνο. Υποδηλώνει ότι το κλειδί για την εφαρμογή του 5G είναι η συγχώνευση τόσο των χαμηλών όσο και των υψηλών συχνοτήτων. Οι βασικές υπηρεσίες καλύπτονται από τις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ αυξημένοι ρυθμοί δεδομένων θα παρέχονται από τις υψηλότερες συχνότητες. Η εφαρμογή κινητής τηλεφωνίας του δικτύου 5G της Nokia εστιάζει στη βελτιστοποίηση της φασματικής απόδοσης, στις πρωτοποριακές προόδους στο 5G, στις πυκνές μικρές κυψέλες και στη βελτιωμένη απόδοση. Η αυξημένη ζήτηση της ασύρματης βιομηχανίας οδήγησε σε μια μετατόπιση από την αρχική μακρό-εξαγωνική κάλυψη σε πολύ μικρότερες εγκαταστάσεις κυψελών. Οι ερευνητές έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειές τους στις μέρες μας στο πώς να αναπτύξουν την συνδεσιμότητα, με επίκεντρο τον χρήστη. Ο χρήστης καλείται να βοηθήσει στην αποθήκευση του δικτύου, την αναμετάδοση, τη διανομή περιεχομένου και την επεξεργασία, αντί να είναι ο απόλυτος δικαιούχος του ασύρματου δικτύου. Συνοπτικά, ο Εξοπλισμός του Χρήστη (User Equipment - UE), χρησιμοποιείται ως ένα κομμάτι του δικτύου, π.χ. ως ένας αναμεταδότης.

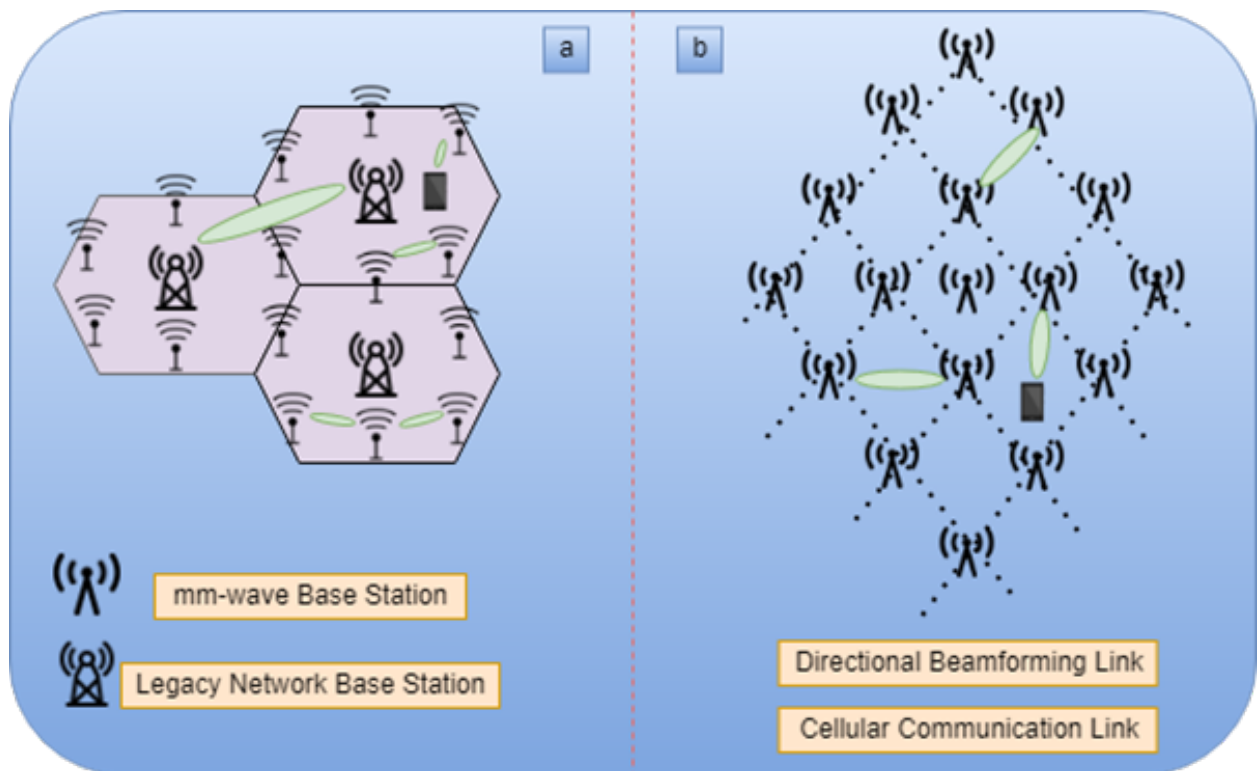
Τα μελλοντικά δίκτυα προβλέπεται να συνδέουν μια ποικιλία κόμβων που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση μεταξύ τους. Τα small, τα micro, τα pico και τα femto BSs έχουν ήδη εγκατασταθεί. Ως αποτέλεσμα, τα δίκτυα 5G, τα οποία έχουν υψηλή συμφόρηση, θα αντιμετωπίσουν σημαντική διαταραχή στο ίδιο κανάλι, καθιστώντας την τρέχουσα διεπαφή αέρα παρωχημένη. Αντί για τυπικές ευρυγώνιες κεραιές, υποστηρίζεται η χρήση BS συγκεκριμένης κατεύθυνσης και κατευθυνόμενης ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, η αποτελεσματική διαμόρφωση και η χρήση του Space Division Multiple Access (SDMA) είναι ζωτικής σημασίας. Η βάση για τα συστήματα 5G σχεδιάζεται να ενισχυθεί με την αποσύνδεση των επιπέδων χρήστη και ελέγχου, καθώς και την ομαλή σύνδεση μεταξύ πολλών καναλιών. Οι ανάγκες για αρχιτεκτονική δικτύου 5G, αναβαθμίσεις στην διεπαφή του αέρα και έξυπνο σχεδιασμό κεραιάς καλύπτονται σε αυτήν την ενότητα.

2.2.1 Οι Απαιτήσεις της Αρχιτεκτονικής των Δικτύων 5G

Αναβάθμιση του Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης

Η γενική αρχιτεκτονική των ασύρματων συνδέσεων 5G αψηφά τους κανόνες του κυψελοειδούς μοντέλου BS, ευνοώντας μια αρχιτεκτονική με επίκεντρο τη συσκευή του χρήστη. Το δίκτυο 5G απαιτεί τη χρήση καναλιών mmWave με δυνατότητες υψηλότερης μετάδοσης. Η μετάδοση και η διείσδυση ενός σήματος που μεταδίδεται με μικροκύματα, είναι περιορισμένες, κυρίως σε εξωτερικούς χώρους. Ως αποτέλεσμα, η αρχιτεκτονική δεν μπορεί να βασίζεται σε κλασικό κυψελοειδές σχέδιο ή σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο μοτίβο. Για την αρχιτεκτονική ενός Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης (Radio Access Network – RAN) 5G, παρουσιάζεται στο [13] μια συγκεκριμένη διαμόρφωση των BSs. Για παράδειγμα, η εξαιρετικά πυκνή τοποθέτηση είναι απαραίτητη σε μέρη που απαιτούν υψηλή απόδοση, όπως στάσεις μετρό, αγορές και επιχειρήσεις. Η μετάδοση χωρίς οπτική επαφή (Non Line of Sight - NLOS) είναι αναμφισβήτητα προτιμότερη

από την επικοινωνία LOS. Εναλλακτικά, όταν το LOS είναι εντελώς μπλοκαρισμένο, οι ανακλαστικές, διασκορπισμένες και μεταδόσεις διάθλασης μπορεί ωστόσο, να εξακολουθούν να έχουν επαρκή ισχύ, κάτι το οποίο θα πρέπει να διερευνηθεί. Η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G πρέπει να υποστηρίζει μεγάλο αριθμό χρηστών, ένα ευρύ φάσμα συσκευών και ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών. Ως αποτέλεσμα, το πρωταρχικό ζήτημα είναι η ενοποίηση 5G BS με υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (π.χ. 2G, 3G και 4G). Οι προτεινόμενες τοπολογίες περιλαμβάνουν τοπολογίες δικτύου mmWave BS, μικτή mmWave με συστήματα 4G και αυτόνομα δίκτυα mmWave. Σημαντικές εξελίξεις στη διαμόρφωση της δέσμης μετάδοσης, αυξάνουν την εμβέλεια ενώ μειώνουν τον θόρυβο και ενισχύουν την αξιοπιστία της σύνδεσης στην άκρη της κυψέλης. Ως αποτέλεσμα αυτής της δυνατότητας, τα πλέγματα mmWave BS μπορούν να παρέχουν αξιόπιστη επικοινωνία και εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους.

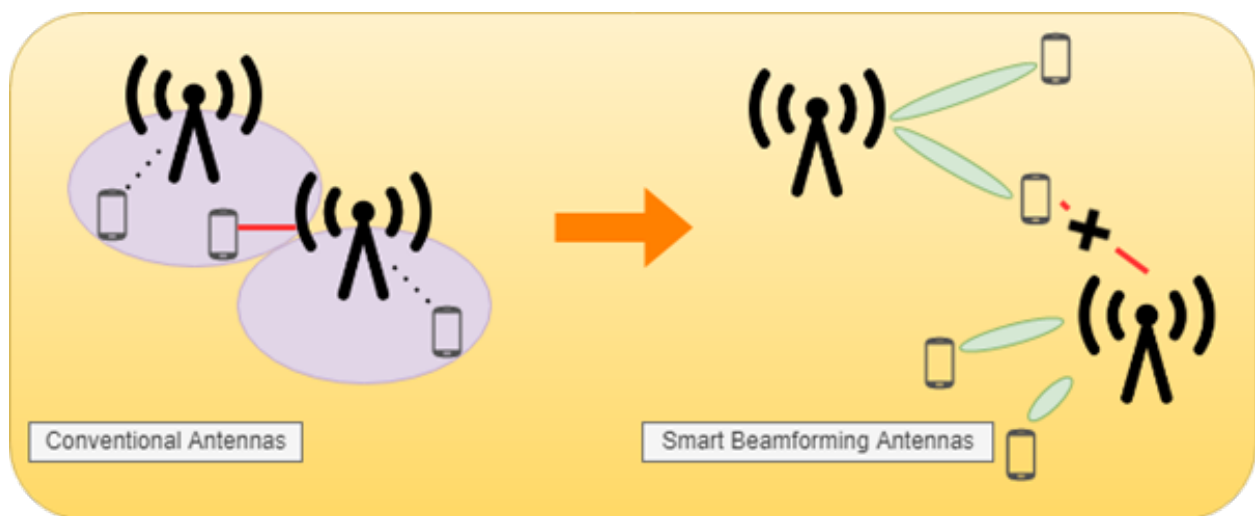


Σχήμα 2.3: Τυπική και υβριδική αρχιτεκτονική δικτύου mmWave.

Ένα υβριδικό mmWave 5G και παλαιότερο σύστημα 4G φαίνεται στο Σχήμα 2.3.a. Προτείνεται έναν δρομολογητή διπλής λειτουργίας που επιτρέπει στους συνδρομητές να μετακινούνται μεταξύ των οντοτήτων του δικτύου, με στόχο την βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Εναλλακτικά, το φάσμα των mmWave θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για μετάδοση δεδομένων, με δεδομένα ελέγχου και συστήματος να παρέχονται μέσω κανονικών δικτύων 4G. Τα αυτόνομα συστήματα 5G, από την άλλη πλευρά, λειτουργούν μόνο με κύματα mmWave, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.b. Οι γραμμές Backhaul και ασύρματης πρόσβασης θα χρησιμοποιούν και οι δύο το ίδιο φάσμα mmWave, ειδικά σε τέτοια συστήματα. Οι στενές δέσμες επιτρέπουν ελάχιστη φασματική σύγκρουση, ενώ παράλληλα ενισχύουν το σήμα μεταξύ των δικτύων BS και των μεγάλων ομάδων χρηστών. Ως αποτέλεσμα, η υπό-δικτύωση 5G προβλέπεται να είναι πολύ διαφορετική από τα παλαιότερα δίκτυα. Οι σχηματικές απεικονίσεις της διεπαφής αέρα, αλλάζουν όσο εξελίσσονται οι επικοινωνίες.

Προηγμένη Διεπαφή Αέρα

Λόγω του μικρού μήκους, των ασύρματων σημάτων μετάδοσης, mmWave, απαιτούνται διάμετροι κεραίας, μεσαίου μεγέθους. Άρα, η χρήση μιας σειράς σχετικά μικρών κεραιών επιτρέπεται. Είναι εφικτή η ενίσχυση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων με τον επιδιωκόμενο τρόπο, ενώ μπορούν να ακυρωθούν σε όλες τις άλλες θέσεις, χρησιμοποιώντας κεραίες συστοιχίας για τη ρύθμιση της φάσης και του πλάτους των σημάτων. Αυτό απαιτεί τη χρήση κατευθυνόμενων διεπαφών αέρα. Το Σχήμα 2.4 απεικονίζει τη μετάβαση από την ευρυγώνια στην κατευθυνόμενη μετάδοση με χρήση BS. Οι τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης δέσμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διασφάλιση μοτίβων υψηλής κατευθυνόμενης ακτινοβολίας, που οδηγούν στην εμφάνιση του SDMA. Η αποτελεσματική SDMA βελτιστοποιεί την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας για πομπούς διαμόρφωσης δέσμης τόσο στον δέκτη όσο και στον πομπό.



Σχήμα 2.4: Μετάβαση από ευρυγώνια σε κατευθυνόμενη διεπαφή αέρα.

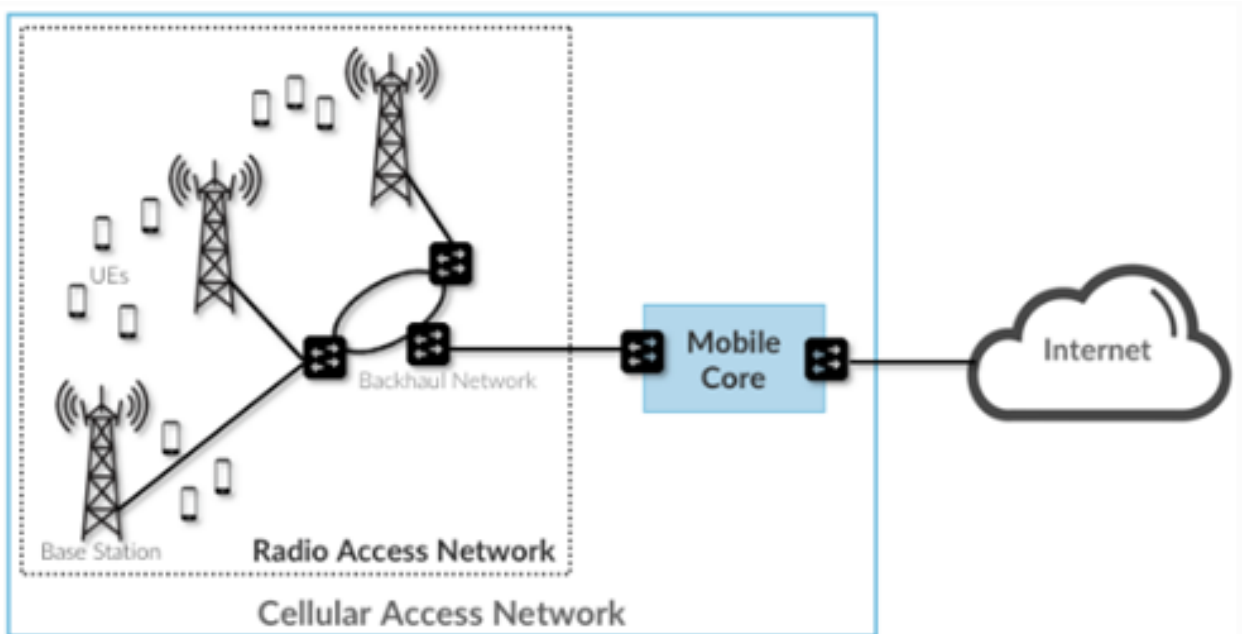
Ωστόσο, περιορισμοί υλικού, όπως η κατανάλωση υψηλής ισχύος των εξαρτημάτων μικτού σήματος, μπορεί να περιορίσουν τέτοια οφέλη. Δεν είναι πιθανό όλες οι κεραίες να είναι συμβατές με μετατροπείς Αναλογικού σε Ψηφιακό σήμα (Analog to Digital - ADC) και Ψηφιακού σε Αναλογικό σήμα (Digital to Analog - DAC), υψηλής ταχύτητας. Ο υβριδικός σχεδιασμός με κατάλληλα βάρη στην διαμόρφωση δέσμης, η οποία συνδυάζει αναλογική και ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης, μπορεί να είναι μια βιώσιμη προσέγγιση. Τα όρια υλικού διευκολύνονται επίσης με την κατάτμηση του BS σε διαφορετικούς τομείς. Ωστόσο, από αυτό απορρέουν νέες δυσκολίες συγχρονισμού και μετάδοσης δεδομένων, που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η απόδοση βελτιώνεται με τη χρήση των καλύτερων διατάξεων κεραίας για διάφορους αλγόριθμους διαμόρφωσης δέσμης. Για παράδειγμα, σε ένα πολύροφο αστικό περιβάλλον, οι κεραίες στον πομπό, οι κεραίες ενημερωμένης έκδοσης στον δέκτη και οι προσαρμοσμένες συστοιχίες κεραιών για κάθετη διεύθυνση δέσμης θα επέτρεπαν την αποτελεσματική επικοινωνία. Οι αναπτύξεις BS μεγάλης κλίμακας και η ανάγκη για επικοινωνία LOS μπορεί να ωφεληθούν από την αποσύνδεση του UL και του DL. Πολλοί κόμβοι συνήθως παρέχουν πολλαπλές εκπομπές, επιτρέποντας σε ξεχωριστές μεταδόσεις να χρησιμοποιούν διάφορα κανάλια επικοινωνίας σε διάφορες συνθήκες καναλιού. Η εκμάθηση των βασικών προσεγγίσεων ενός κατευθυνόμενου BS, καθώς και οι εξελίξεις τους, θα παρέχουν μια σταθερή βάση για αποτελεσματική επικοινωνία 5G.

Έξυπνη Κεραία Επόμενης Γενιάς

Ο σχεδιασμός ενός συνόλου αποδοτικών κεραιών είναι κρίσιμος για την επιτυχή ανάπτυξη των δικτύων 5G. Η τεχνική ανάπτυξης έξυπνων κεραιών, χρησιμοποιεί τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ανάπτυξη καλύτερης διεπαφής αέρα. Για να επιτευχθούν ακόμα περισσότερο οι δυνατότητες SDMA, πρέπει να αναπτυχθεί μια έξυπνη τοπολογία κεραιάς πολλαπλών δεσμών. Τόσο για κινητά τηλέφωνα, όσο και για BS, οι έξυπνες κεραιές βοηθούν στη διαχείριση παρεμβολών διατηρώντας παράλληλα τη βέλτιστη περιοχή εξυπηρέτησης και ελαχιστοποιώντας την ενέργεια μετάδοσης. Επιπλέον, για το ίδιο μέγεθος διαφράγματος, οι στενές δέσμες έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν περισσότερη ενέργεια σε υψηλότερη συχνότητα. Διαφορετικές δέσμες μπορούν να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι χάρη στην έξυπνη εγκατάσταση κεραιάς. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι παρεμβολές μεταξύ καναλιών (ένα από τα πιο σοβαρά ζητήματα στις ασύρματες επικοινωνίες) μειώνονται. Η χρήση κεραιών διαμόρφωσης δέσμης με συντελεστή κλασματικής φόρτισης μειώνει σημαντικά τον θόρυβο μεταξύ των καναλιών. Η καθολική χρήση κεραιών με συγκεκριμένη κατεύθυνση παρεμποδίζεται από το υψηλό κόστος υποδομής και τις περίπλοκες λειτουργίες.

Ακόμη και απλούστερες κεραιές, από την άλλη πλευρά, μπορούν να προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις χωρητικότητας. Ως αποτέλεσμα, για την ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών 5G, μια έξυπνη αρχιτεκτονική κεραιάς σχεδιάζεται για να έχει βέλτιστα κόστη και πολυπλοκότητα, χάρη της κατεύθυνσης της. Για την μετάδοση προς μια κατεύθυνση στο οριζόντιο επίπεδο, οι κάθετες επίπεδες συντεταγμένες αλλάζουν τις τιμές του πίνακα που συνδέονται με τα στοιχεία ενός διαφορετικού πίνακα. Για την μετάδοση με χρήση BS με κατεύθυνση, ο σχεδιασμός είναι κρίσιμος. Μια σειρά από κεραιές μπορεί να διαμορφωθεί με τρεις τρόπους: κυκλική, επίπεδη ή τμηματοποιημένη. Τα κυκλικά BS έχουν καλύτερη κάλυψη, καθιστώντας τα πιο ιδανικά για ασύρματη τεχνολογία. Ενώ η καμπί παρέχει ευρύτερο εύρος διαμόρφωσης δέσμης, οι γραμμικές λύσεις παρέχουν καλύτερη συγκέντρωση προς μια κατεύθυνση αλλά χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο εύρος. Απλές τμηματικές διατάξεις, αντί για κυκλικές ή γραμμικές, μπορούν να κατασκευαστούν προσεκτικά για να ληφθεί η κατάλληλη ποσότητα ποικιλίας και να υπάρχει εύρος αναζήτησης. Οι κεραιές κόρνας (Horn Antennas – HA), κατά μέσο όρο, παρουσιάζουν δυνατότητες για περισσότερα οφέλη από οποιαδήποτε άλλη κεραιά. Η απαραίτητη ισχύς μετάδοσης του BS παρέχεται από μια σειρά από HA. Για κάθε UE, ο χώρος, το μέγεθος και η ενέργεια είναι όλα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία περιγράφουν το συγκεκριμένο BS. Ως αποτέλεσμα, η εγκατάσταση προηγμένων έξυπνων κεραιών, οι οποίες είναι κατάλληλες για έξυπνες συσκευές, στο BS περιορίζεται γενικά από το χώρο και όχι από το μέγεθος.

Τα κύρια αρχιτεκτονικά στοιχεία των δικτύων κυψελοειδούς πρόσβασης παρουσιάζονται στο [5] και αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο. Επικεντρωνόμαστε στα στοιχεία που είναι παρόμοια στο 4G με το 5G, θέτοντας τις βάσεις για την κατανόηση των προηγμένων πτυχών του 5G που θα καλυφθούν στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 2.5: Κύρια Υποσυστήματα Κυψελοειδών Δικτύων [5].

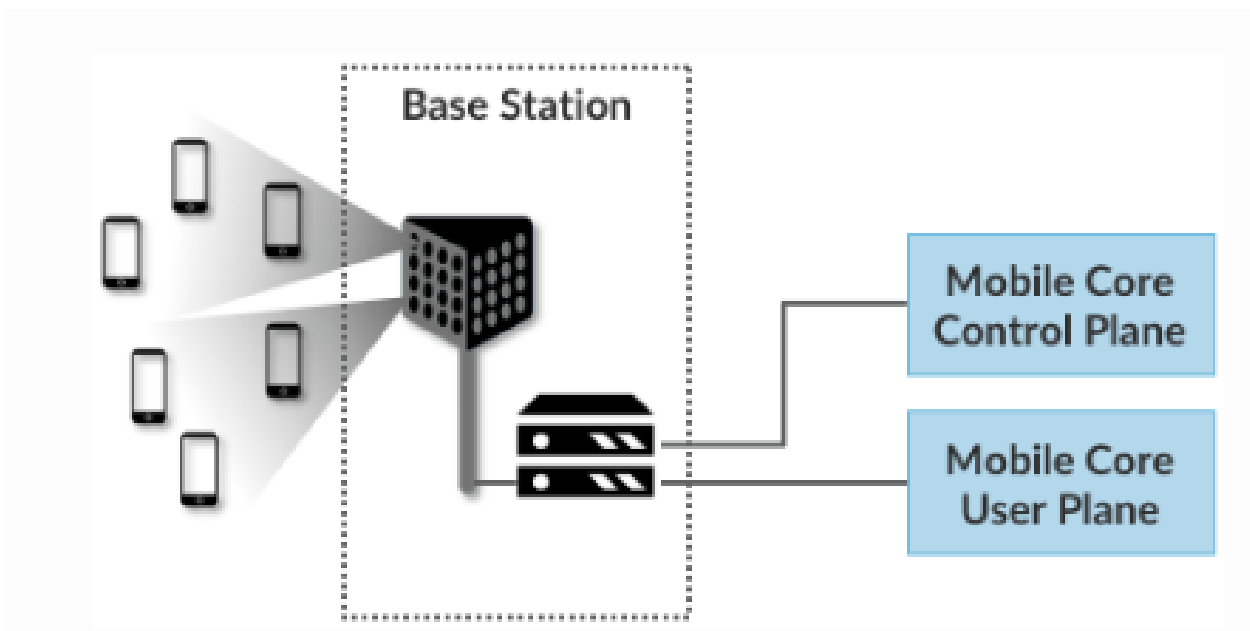
Η ασύρματη πρόσβαση για κινητές συσκευές παρέχεται μέσω του κυψελοειδούς δικτύου. Ως UE συνήθως περιγράφονται μέχρι στιγμής συσκευές όπως smartphone και tablet. Με την ανάπτυξη του 5G και του IoT, μέσα στο όρο UE θα περιλαμβάνονται πλέον και αυτοκίνητα, drones, βιομηχανικά και γεωργικά μηχανήματα, ρομπότ, οικιακές, ιατρικές και πολλές άλλες συσκευές. Το RAN και το Mobile Core είναι τα δύο θεμελιώδη υποσυστήματα του κυψελοειδούς δικτύου. Το RAN είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του φάσματος, διασφαλίζοντας ότι χρησιμοποιείται αποτελεσματικά και ότι ικανοποιούνται όλες οι ανάγκες ποιότητας εξυπηρέτησης των χρηστών. Το παραπάνω αναφέρεται συνήθως σε ένα δίκτυο BS που είναι διασκορπισμένο. Το Mobile Core είναι μια συλλογή λειτουργιών (και όχι συσκευών) που εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς:

1. Παρέχει υπηρεσίες δεδομένων και φωνής μέσω Διαδικτύου (Voice over Internet Protocol - VoIP).
2. Εξακριβώνει εάν ο σύνδεσμος πληροί τα υποσχόμενα πρότυπα QoS.
3. Παρακολουθεί την κίνηση των χρηστών για να διασφαλίσει ότι η υπηρεσία δεν διακόπτεται.
4. Παρακολουθεί τη χρήση των συνδρομητών, τους χρεώνει και αφού υπολογίσει την συνολική κατανάλωση εξασφαλίζει πως το αναγκαίο ποσό πληρώνεται.

Το Mobile Core είναι ένα άλλο παράδειγμα μιας γενικής φράσης και αναφέρεται ως ο πυρήνας επόμενης γενιάς στο 5G με την ορολογία NG-Core. Παρά τον όρο "Core" στο όνομά του, το Mobile Core εξακολουθεί να είναι μέρος του δικτύου πρόσβασης από την άποψη του Διαδικτύου, χρησιμεύοντας ως γέφυρα μεταξύ του RAN σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή και του μεγαλύτερου Διαδικτύου που βασίζεται σε IP. Αν και το 3GPP επιτρέπει μεγάλη ελευθερία στον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται γεωγραφικά το Mobile Core, για δική μας ευκολία, υποθέτουμε ότι κάθε παρουσία του Mobile Core εξυπηρετεί μια μητροπολιτική περιοχή. Πολλές

δεκάδες (ή ακόμα και εκατοντάδες) πύργοι κυψέλης θα καλύπτονταν έτσι από το αντίστοιχο RAN. Ένα δίκτυο Backhaul συνδέει τους BS που υλοποιούν το RAN με το Mobile Core, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Αυτό το δίκτυο είναι συνήθως ενσύρματο, μπορεί να έχει ή να μην έχει την τοπολογία δακτυλίου που απεικονίζεται στο σχήμα και συχνά αποτελείται από στοιχεία εμπορευμάτων που βρίσκονται αλλού στο Διαδίκτυο. Αν και το δίκτυο backhaul είναι προφανώς ένα σημαντικό στοιχείο του RAN, είναι μια απόφαση υλοποίησης ή μη, του προτύπου 3GPP.

Το Σχήμα 2.6 επανασχεδιάζει στοιχεία από το Σχήμα 5 για να απεικονίσει δύο μεγάλες αντιθέσεις πριν εμβαθύνει στις ιδιαιτερότητες. Το πρώτο είναι ότι ένας BS, που έχει και αναλογικό και ψηφιακό στοιχείο, το οποίο απεικονίζεται από μια κεραία. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι ο Mobile Core χωρίζεται σε ένα επίπεδο ελέγχου και ένα επίπεδο χρήστη, το οποίο είναι συγκρίσιμο με το διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου/δεδομένων που εμφανίζεται στο Διαδίκτυο. Στην συνέχεια, η σημασία αυτών των δύο ανισοτήτων θα γίνει εμφανής.



Σχήμα 2.6: Το Πεδίο Ελέγχου και το Πεδίο Χρήστη συνθέτουν τον Mobile Core [5].

Δίκτυο Ασύμαρματης Πρόσβασης

Κατά την ενεργοποίηση ή την παράδοση όταν το UE είναι ενεργό, κάθε BS δημιουργεί το ασύρματο κανάλι για το UE ενός συνδρομητή. Όταν το UE παραμένει ανενεργό για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, αυτό το κανάλι ελευθερώνεται. Το ασύρματο αυτό κανάλι περιγράφεται ως πάροχος υπηρεσίας φορέα, σύμφωνα με την ορολογία 3GPP. Η λέξη "φορέας" χρησιμοποιείται παραδοσιακά στις τηλεπικοινωνίες για να αναφέρεται σε ένα κανάλι δεδομένων και όχι σε ένα κανάλι σήματος (συμπεριλαμβανομένων των πρώιμων ενσύρματων συστημάτων όπως το ISDN).

Δεύτερον, κάθε BS δημιουργεί επικοινωνία "3GPP Control Plane" μεταξύ του UE και του στοιχείου Mobile Core Control Plane και μεταδίδει σήματα μεταξύ των δύο. Ο έλεγχος ταυτότητας του κάθε UE, η εγγραφή και η παρακολούθηση κινητικότητας είναι όλα ενεργοποιημένα μέσω αυτής της ροής σηματοδότησης. Τρίτον, το BS δημιουργεί μία ή περισσότερες σήραγγες μεταξύ

του στοιχείου Mobile Core User επιπέδου και κάθε ενεργού UE. Τέταρτον, μεταξύ του Mobile Core και του UE, το BS στέλνει πακέτα επιπέδου ελέγχου και χρήστη. Τα Stream Control Convey Protocol SCTP / Internet Protocol (IP) και General Packet Radio Service (GTP) / User Datagram Protocol (UDP) / IP, αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται για τη διοχέτευση αυτών των πακέτων. Το SCTP είναι μια ασφαλής εναλλακτική λύση στο TCP που έχει σχεδιαστεί για τη μεταφορά δεδομένων σήματος ελέγχου για τηλεφωνικές υπηρεσίες. Το GTP είναι ένα ειδικό πρωτόκολλο σήραγγας 3GPP που εκτελείται μέσω UDP. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επικοινωνία μεταξύ του RAN και του Mobile Core βασίζεται σε IP.

Πέμπτο, κάθε BS χρησιμοποιεί απευθείας επικοινωνίες από BS σε BS για να συντονίσει τις μεταδόσεις UE με το περιβάλλον BS. Αυτές οι γραμμές χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πακέτων επιπέδου ελέγχου (SCTP μέσω IP) και επιπέδου χρήστη (GTP μέσω UDP/IP), όπως ακριβώς φαίνεται η συνδεσιμότητα από σταθμό σε πυρήνα στο Σχήμα 2.6. Έκτο, οι BS συντονίζουν την ασύρματη μετάδοση πολλών σημείων σε ένα UE από πολλούς σταθμούς βάσης, οι οποίοι μπορεί να είναι ή να μην αποτελούν μέρος μιας μεταβίβασης UE από έναν BS σε έναν άλλο.

Το πιο σημαντικό σημείο είναι ότι ο BS μπορεί να λειτουργεί ως προσαρμοσμένος προωθητής. Κατακερματίζει τα εξερχόμενα πακέτα IP σε τμήματα φυσικού επιπέδου και τα προγραμματίζει για μετάδοση μέσω του διαθέσιμου φάσματος στην κατεύθυνση από το Internet προς το UE, και συγκεντρώνει τμήματα φυσικού επιπέδου σε πακέτα IP και τα προωθεί στο επίπεδο χρήστη του Mobile Core (μέσω GTP/UDP/IP tunnel) στην κατεύθυνση από το UE προς το Internet. Επιλέγει επίσης εάν (α) θα προωθηθούν τα εξερχόμενα πακέτα απευθείας στο UE, (β) θα αποσταλούν έμμεσα πακέτα στον UE μέσω ενός γειτονικού BS ή (γ) θα χρησιμοποιηθούν πολλαπλές διαδρομές για να υπάρχει κάλυψη στο UE ανάλογα με τις παρατηρήσεις της ποιότητας του ασύρματου καναλιού και κανονισμούς ανά συνδρομητή. Στην τρίτη περίπτωση, τα φυσικά ωφέλιμα φορτία μπορεί να είναι διάσπαρτα σε πολλές τοποθεσίες.

Ακόμη και όταν θεωρείται ως τοπική επιλογή σε έναν μόνο BS, ο προγραμματισμός είναι δύσκολος και πολύπλευρος. Αυτό που βλέπουμε σήμερα είναι ότι υπάρχει ένα παγκόσμιο στοιχείο, όπου η κίνηση μπορεί να αποστέλλεται σε διαφορετικό BS (ή πολλούς) έτσι ώστε, να γίνει πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος σε μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή. Με άλλα λόγια, το RAN στο σύνολό του (και όχι απλώς ένας ενιαίος BS) επιτρέπει όχι μόνο μεταβιβάσεις (μία προφανής ανάγκη για κινητικότητα), αλλά και συνάθροιση συνδέσεων και εξισορρόπηση φορτίου, που είναι και οι δύο γνωστές διαδικασίες Διαδικτύου.

Κεφάλαιο 3

Τεχνολογίες Δικτύων 5G

Το 5G εγκαινιάζει μια νέα εποχή συνδεσιμότητας που θα αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούμε και δραστηριοποιούμαστε σε παγκόσμιο επίπεδο. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η διασπαστική τεχνολογία του 5G έχει αλλάξει δραστικά το τι είναι ικανό το RAN – και τον τρόπο κατασκευής του ως αποτέλεσμα. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα δούμε μερικές από τις τεχνολογικές προόδους που κατέστησαν δυνατές από το 5G RAN και πώς αυτές επηρεάζουν τον έλεγχο του λανθάνοντος χρόνου και άλλων χαρακτηριστικών 5G. Οι τεχνολογίες MIMO και Αποσύνδεση Κατερχόμενης και Ανερχόμενης Ζεύξης (Downlink and Uplink Decoupling - DUDe) θα είναι οι τεχνολογίες στις οποίες θα επικεντρωθούμε.

Για το MIMO, οι κεραίες MIMO βοηθούν στην επέκταση της χωρητικότητας και της εμβέλειας των ραδιοφωνικών ροών 5G. Το MIMO και η διαμόρφωση δέσμης έχουν συζητηθεί εκτενώς, ωστόσο τίποτα από αυτά δεν θα μπορούσε να γίνει κατανοητό χωρίς τη σημερινή νέα γενιά κεραιών. Αυτά βελτιώνουν την απόδοση του δικτύου τόσο για συνδέσεις ανερχόμενης όσο και κατερχόμενης ζεύξης ενώ αυξάνουν την κάλυψη και τη χωρητικότητα κυψελών 5G. Για πολλά χρόνια, η MIMO χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες. Στο πλαίσιο του 5G, η MIMO αυτή τη στιγμή αλλάζει δραστικά τον τρόπο και το πότε χρησιμοποιούμε τις κινητές συσκευές μας. Δεν χρειάζεται να αναρωτιόμαστε αν βρισκόμαστε σε ευνοϊκό σημείο για να κατεβάσουμε ή να μεταδώσουμε πια τεράστια αρχεία. Η εμπειρία χρήστη είναι έτοιμη να κάνει ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός.

Για το DUDe, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια διείσδυσης και τόσο χειρότερη είναι η κάλυψη. Για παράδειγμα, το πρώτο εμπορικά χρησιμοποιούμενο φάσμα 5G, 3,5 GHz, έχει ανεπαρκή κάλυψη. Το κενό κάλυψης ανερχόμενης ζεύξης μεταξύ των ζωνών 3,5 GHz και 1,8 GHz είναι 13,7 dB και η συνήθης μέθοδος αύξησης του αριθμού των τοποθεσιών χρησιμοποιείται συνήθως για να βοηθήσει στη γεφύρωση αυτού του χάσματος. Ωστόσο, η απόκτηση ενός ιστότοπου είναι περίπλοκη και δαπανηρή. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται η τεχνολογία DUDe, για την αποτελεσματική επίλυση αυτού του περίπλοκου προβλήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα 3,5 GHz χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων στην κατερχόμενη ζεύξη, ενώ τα 1,8 GHz ή 3,5 GHz χρησιμοποιούνται για την παράδοση σημάτων στην πλευρά του τερματικού. Αυτό έχει την ίδια κάλυψη UL και DL με την έκδοση 1,8 GHz.

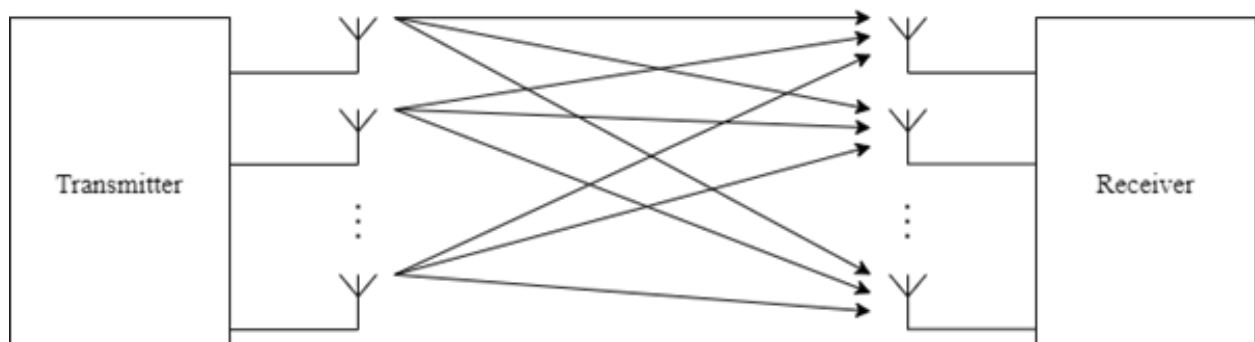
3.1 Η Τεχνολογία MIMO

3.1.1 Λειτουργία

Η τεχνολογία MIMO επιτρέπει την επικοινωνία με πολλαπλά κανάλια εισόδου, αλλά και πολλαπλά κανάλια εξόδου. Εκχωρεί πανομοιότυπα σύμβολα ως πολλά σήματα σε διάφορες κεραιές ταυτόχρονα ενώ χρησιμοποιείται μόνο ένα ραδιο-κανάλι. Η ποικιλία κεραιών είναι μια στρατηγική για το συνδυασμό πολλών κεραιών για τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος και της ισχύος μιας ζεύξης ραδιοσυχνότητας.

Τα σύμβολα διαχωρίζονται στο σημείο μετάδοσης δημιουργώντας πολλές ροές δεδομένων που επανασυναρμολογούνται στην πλευρά λήψης από ένα διαφορετικό σύστημα MIMO με πανομοιότυπες κεραιές. Ο δέκτης είναι προγραμματισμένος να προσαρμόζεται για μικρές χρονικές διαφορές μεταξύ λήψης σήματος, τυχόν πρόσθετου θορύβου ή παρεμβολών, καθώς και τυχόν μεταδόσεων που χάνονται. Το MIMO ειδοποιεί για τον πλεονασμό των δεδομένων που μεταδίδονται, κάτι που δεν μπορούν να παρέχουν οι παραδοσιακές διαμορφώσεις μιας κεραιάς (Single In Single Out - SISO). Τα συστήματα MIMO παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά σχέδια SISO ως αποτέλεσμα αυτού, όπως για παράδειγμα:

1. Τα συστήματα MIMO μπορούν να εκμεταλλευτούν ανακλώμενες και αναπηδημένες εκπομπές ραδιοσυχνότητας (γνωστές ως διάδοση πολλαπλών διαδρομών) για να ενισχύσουν την ισχύ του σήματος ακόμη και χωρίς σαφή οπτική επαφή, καθώς πολλαπλές ροές πανομοιότυπων δεδομένων, που λαμβάνονται σε ελαφρώς διαφορετικά χρονικά διαστήματα, συνδυάζονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πυκνοκατοικημένες τοποθεσίες, όπου η αποσύνδεση κεραιών χωρίς σαφή οπτική επαφή είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Σε ρυθμίσεις που μοιάζουν με την πόλη, υπάρχει ένας αριθμός διαδρομών ανάκλασης στα σήματα MIMO μεταξύ του πομπού και του δέκτη.
2. Η συνολική απόδοση μπορεί να αυξηθεί, και έτσι μπορεί να παραδοθεί περισσότερο περιεχόμενο και να βελτιωθεί τόσο σε ποσότητα όσο και σε ποιότητα σε όλο το δίκτυο.
3. Ζητήματα όπως το ξεθώριασμα λόγω απώλειας ή απώλειας πακέτων δεδομένων μπορούν να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας πολλές ροές δεδομένων, με αποτέλεσμα βελτιωμένη ποιότητα εικόνας ή ήχου.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα βασικού συστήματος MIMO.

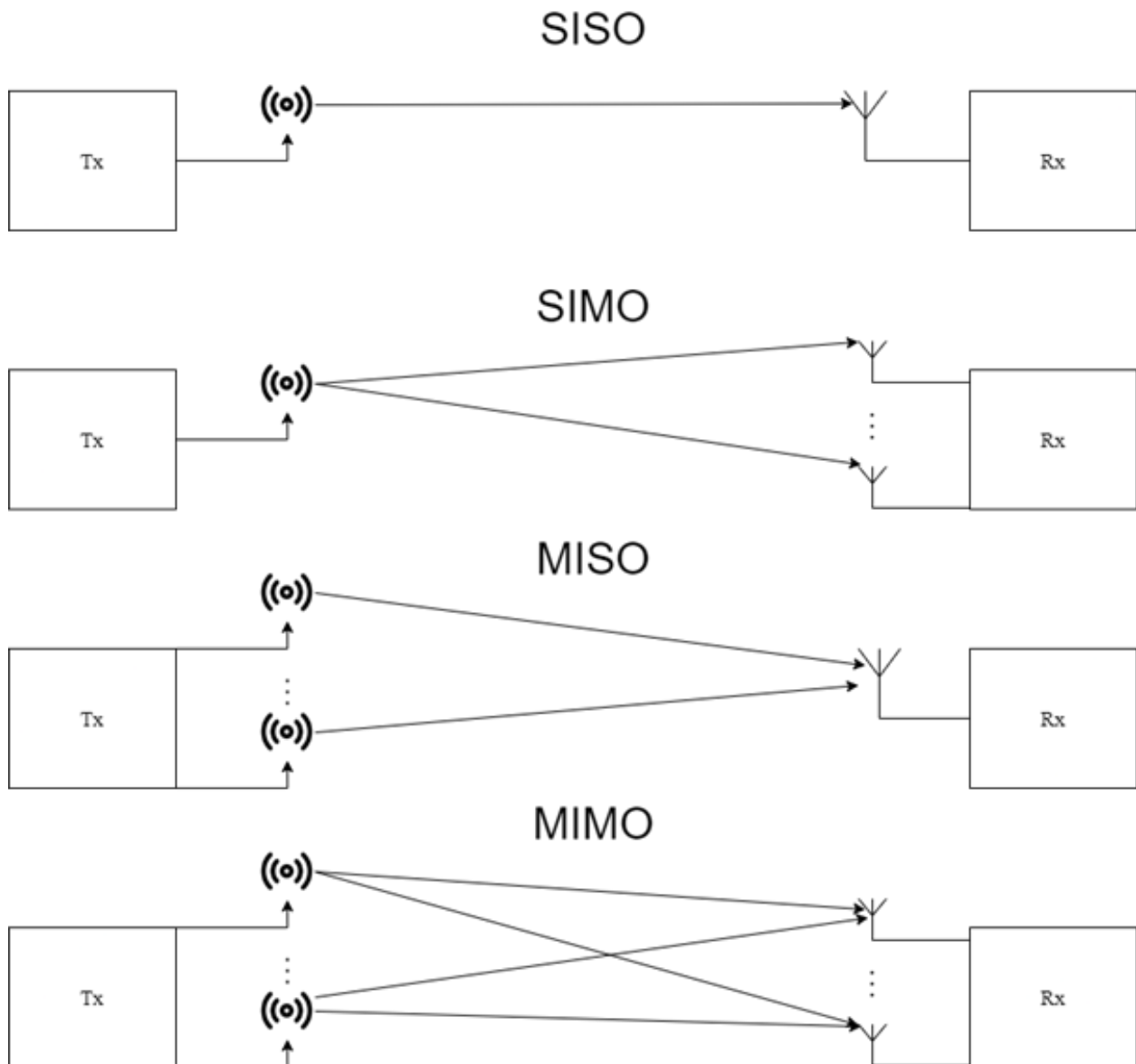
Οι μεμονωμένοι κόμβοι χρηστών μπορούν να συνδεθούν ή να αποσυνδεθούν από ένα δίκτυο MIMO όποτε θέλουν. Εάν συμβεί μια παράδοση (handover), όπου η παράδοση ορίζεται ως η αποσύνδεση από ένα BS και η σύνδεση σε άλλο, τα δεδομένα από άλλους χρήστες κόμβου προωθούνται αυτόματα μέσω του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την δημιουργία ενός αυτο-σχηματιζόμενου, αυτο-θεραπευόμενου δικτύου που, προκειμένου να λειτουργεί, δεν βασίζεται σε κάποια κεντρική αρχιτεκτονική. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν τα ραδιοσυστήματα με δυνατότητα κλιμάκωσης Mobile Ad hoc Network (MANET). Η δυνατότητα χρήσης αυτού του είδους δικτύωσης ανοίγει τα συστήματα MIMO σε νέους πελάτες που θέλουν αξιόπιστη, επεκτάσιμη κάλυψη δικτύου. Επειδή τα συστήματα MIMO εξακολουθούν να συρρικνώνονται σε μέγεθος και μπορεί να ομαδοποιούνται σε γνωστούς φορητούς παράγοντες ραδιοφώνου, αυτά τα συστήματα είναι πιο εφικτά από ποτέ. Χωρίς την ταλαιπωρία της μόνιμης εγκατάστασης, οι σταθμοί βάσης και οι αναμεταδότες δικτύου, μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα για βραχυπρόθεσμα συμβάντα που απαιτούν μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης.

Η επεξεργασία σήματος χωροχρόνου είναι μια θεμελιώδης έννοια στα ασύρματα συστήματα MIMO, στα οποία ο χρόνος (η εγγενής διάσταση των δεδομένων ψηφιακής επικοινωνίας) επαυξάνεται με τη χωρική διάσταση, η οποία κληρονομείται από τη χρήση πολλών γεωγραφικά διασκορπισμένων κεραιών. Ως αποτέλεσμα, τα ασύρματα συστήματα MIMO μπορεί να θεωρηθούν ως μια φυσική εξέλιξη από έξυπνες κεραιές, οι οποίες χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό σε ασύρματα δίκτυα. Το ασύρματο σύστημα MIMO αποτελείται από έναν δέκτη και έναν πομπό που επιτρέπουν στο σήμα να πάει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Τα μονοπάτια που χρησιμοποιούνται θα αλλάξουν εάν οι κεραιές μετακινηθούν σε μικρή απόσταση. Τα πράγματα που εμφανίζονται μεταξύ της άμεσης διαδρομής του πομπού και του δέκτη, επηρεάζουν τον αριθμό των δυνατών διαδρομών. Προηγουμένως, πολλά κανάλια χρησιμοποιούνταν μόνο για την παραγωγή παρεμβολών. Η αξιοποίηση των επιπλέον αυτών διαδρομών, μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω της χρήσης MIMO συστημάτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν τη χωρητικότητα δεδομένων σύνδεσης ή να αυξήσουν την SNR, καθιστώντας τη ραδιοζεύξη πιο αξιόπιστη. Τα Τεράστια Κανάλια MIMO (Massive MIMO) είναι μια καινοτομία που διευρύνει το MIMO και παρέχει σημαντικά οφέλη ενεργειακής οικονομίας, απόδοσης φάσματος, ανθεκτικότητας και αξιοπιστίας. Η χρήση υλικού χαμηλού κόστους, διευκολύνεται, μέσω της χρήσης Massive MIMO στο BS και στην κινητή μονάδα. Στο BS, ο εξοπλισμός, ο οποίος είναι ακριβός και ισχυρός αλλά αναποτελεσματικός, αντικαθίσταται από μια σειρά από εξαρτήματα χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης που λειτουργούν σε πόρους διαδοχικής συχνότητας. Η συχνότητα αυτή αναφέρεται ως “Massive” [9].

3.1.2 Αρχιτεκτονικά Χαρακτηριστικά

Το MIMO είναι ένας τρόπος για υπερδιπλασιασμό του εύρους ζώνης της σύνδεσης, με τη χρήση πολλαπλών διαδρομών διάδοσης με πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης. Το MIMO έχει αναδειχθεί ως κρίσιμο στοιχείο των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας όπως το IEEE 802.11n Wi-Fi, WiMAX, IEEE 802.11ac (WiFi), HSPA+ (3G), και Long-Term Evolution (LTE), σύμφωνα με τα Ινστιτούτα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institutes of Electrical and Electronics Engineers - IEEE). Το MIMO έχει πρόσφατα αναπτυχθεί σε επικοινωνιακές γραμμές ισχύος, σε ρυθμίσεις τριών συρμάτων ως μέρος του προτύπου International Telecommunications Union (ITU) Gigabit home network (G.hn), αλλά και της προδιαγραφής HomePlug AV2. Ο όρος MIMO αναφέρεται πλέον σε μια κοινή τεχνολογία που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα πολλαπλών

διαδρομών για τη μετάδοση και λήψη πολλών ροών δεδομένων, ταυτόχρονα και μέσω του ίδιου ραδιοκαναλιού. Η αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων αποδίδεται στη χρήση της ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας OFDM για την κωδικοποίηση καναλιών, παρά στο φαινόμενο “πολυδρομικής διαδρομής”. Τα έξυπνα συστήματα κεραιών διαφέρουν θεμελιωδώς από το MIMO, όπως η ποικιλομορφία και η διαμόρφωση δέσμης, τα οποία αναπτύχθηκαν για να βελτιώσουν την απόδοση μετάδοσης ενιαίας ροής δεδομένων. Λόγω των τεράστιων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών έναντι των συστημάτων που χρησιμοποιούν έναν πομποδέκτη κεραίας, πολλά τρέχοντα πρότυπα επικοινωνίας τα έχουν συμπεριλάβει, ιδιαίτερα στην καταναλωτική αγορά. Αυτό χρησιμοποιεί συστήματα SISO, τα οποία χρησιμοποιούν μία μόνο κεραία και στα δύο άκρα της ζεύξης με σύζευξη διαφοροποίησης στο άκρο λήψης, σε αντίθεση με τα συστήματα SIMO (Single-Input Multiple-Output), που χρησιμοποιούν μία κεραία και στα δύο άκρα της ζεύξης. Ορισμένες κεραιές εκπομπών και δεκτών που δεν αποτελούν μέρος του συστήματος SISO εισάγουν βαθμούς ελευθερίας σήματος. Επιπλέον, υπάρχει επίσης το MISO (Multiple-Input Single-Output), το οποίο είναι μια τεχνική κεραιάς ασύρματων επικοινωνιών που εξοπλίζει πολλές κεραιές στην πηγή (πομπός). Για τη μείωση των λαθών και την αύξηση της ταχύτητας δεδομένων, οι κεραιές συγχωνεύονται. Σε αντίθεση με το MIMO, υπάρχει μόνο μία κεραία στον προορισμό (δέκτης).

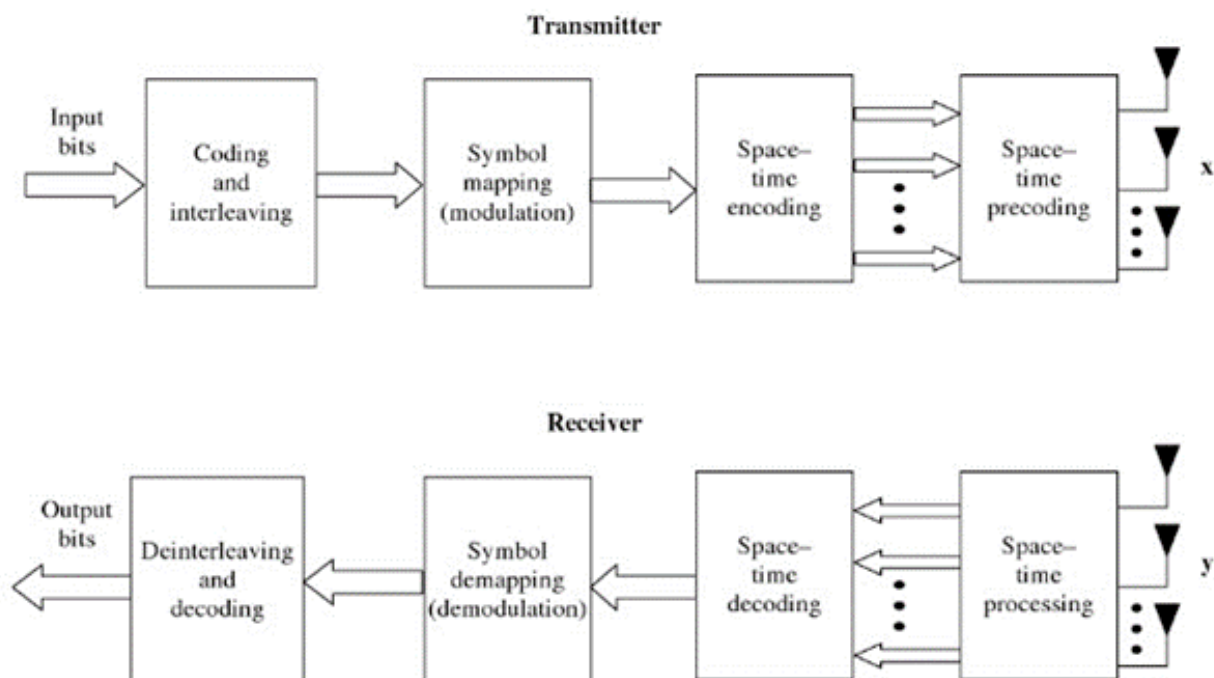


Σχήμα 3.2: Διαφορετικές μορφές κεραίας.

Το MIMO χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε ασύρματα τοπικά δίκτυα, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G και 4G αφού έχει γίνει πλέον και πρότυπο των δικτύων 5G, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 2. Το Airgo Networks δημιουργήθηκε για να παρέχει chipsets MIMO OFDM για ασύρματα Δίκτυα Τοπικής Περιοχής (Local Area Network - LAN). Το IEEE σχημάτισε μια ομάδα εργασίας για την παραγωγή ενός προτύπου LAN που ήταν ασύρματο με απόδοση δεδομένων χρήστη τουλάχιστον 100 Mbit/s. Οι κεραίες σε κάθε άκρο του φάσματος επικοινωνίας συγχωνεύονται για να ελαχιστοποιηθούν τα λάθη, να ενισχυθούν οι ταχύτητες δεδομένων και να επεκταθεί η ικανότητα μετάδοσης σήματος επιτρέποντας τη μετάδοση δεδομένων κατά μήκος πολλών διαδρομών σήματος ταυτόχρονα. Παρέχοντας στα δεδομένα πρόσθετες ευκαιρίες να φτάσουν στην κεραία λήψης χωρίς να επηρεάζονται από το ξεθώριασμα, πολλά αντίγραφα ενός σήματος ενισχύουν το SNR και το ποσοστό σφάλματος. Επεκτείνοντας τη χωρητικότητα των δικτύων ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency - RF), το MIMO επιτρέπει πιο αξιόπιστες συνδέσεις και μειώνει τη συμφόρηση. Πολλαπλοί τύποι κεραίων (MISO, SIMO, SISO, Bell Labs Layered Space-Time (BLAST), Επιλεκτικός έλεγχος ταχύτητας μονής κεραίας (Single

Antenna Selective Control Speed - SPARC), καθημερινός έλεγχος ταχύτητας γραμμής (Daily Line Speed Control - PARC)) και MIMO πολλαπλών χρηστών (Multi User MIMO - MU-MIMO) στο οποίο θα εστιάσουμε, δρομολόγηση MIMO, MIMO Τεράστιων Καναλιών) χωρίζονται στη φόρμα. Το φάσμα και η ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency – EE) του σταθμού βάσης μπορεί να αυξηθούν σημαντικά με την παροχή πολλών κεραιών [10].

Η επικοινωνία σε ένα σύστημα MIMO απεικονίζεται ως ένα μητρώο που αποστέλλεται, και όχι ως ένα μεμονωμένο διάνυσμα. Έτσι, επιτρέπει τη διάδοση μιας παράλληλης ροής δεδομένων σε πολλαπλούς δέκτες. Το σύστημα κωδικοποιεί τα δεδομένα που πρέπει να σταλούν και η ροή μεταδίδεται χρησιμοποιώντας πολυάριθμους πομπούς (έστω M , ο αριθμός). Τα συστήματα MIMO διαθέτουν αρκετές εκατοντάδες κεραιές που εκπέμπουν σε πολλά ασύρματα τερματικά ταυτόχρονα. Μέσω της χρήσης διαμόρφωσης δέσμης (beamforming) καταφέρνουν να εξυπηρετούν πολλαπλούς χρήστες αδιάκοπα. Επιπλέον, η διαμόρφωση δέσμης αυξάνει το SNR και ταυτόχρονα μειώνει την καθυστέρηση [11]. Στο [12], απαριθμούν πέντε βασικά στοιχεία: Πιλότος πομπός (Pilot Transmitter), Κωδικοποιητής (Encoder), Αποκωδικοποιητής & Ανιχνευτής (Decoder & Detection), Διαμόρφωση δέσμης (Beamforming), Προκωδικοποιητής (Precoder). Κάθε ένα από τα συστατικά είναι υπεύθυνο για μια διαφορετική εργασία. Ο πομπός και ο δέκτης είναι τα πιο βασικά στοιχεία κάθε συστήματος MIMO. Είναι υπεύθυνα για τη λήψη και την παράδοση σημάτων κατά τη διαδικασία επικοινωνίας, όπως υποδηλώνουν τα ονόματά τους. Ακολουθεί η γενική δομή ενός συστήματος MIMO. Τα σήματα εκπομπής και λήψης αντιπροσωπεύονται με x και y , αντίστοιχα. Τα μεταδιδόμενα δεδομένα κωδικοποιούνται πρώτα και παρεμβάλλονται και στη συνέχεια ο αντιστοιχιστής συμβόλων μετατρέπει τα κωδικοποιημένα δεδομένα σε σύμβολα δεδομένων. Στη συνέχεια, τα σύμβολα δεδομένων μεταδίδονται σε έναν χωροχρονικό κωδικοποιητή, ο οποίος δημιουργεί μια ροή χωρικών δεδομένων. Αυτή η τροφοδοσία μεταδίδεται μέσω πολλών κεραιών.



Σχήμα 3.3: Βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος MIMO.

Ενώ ο αναλυτής (parser) του κωδικοποιητή πολυπλέκει τα δυαδικά ψηφία (bits) έτσι ώστε να κωδικοποιούνται, ο αναμεταδότης λειτουργεί ως υποκατάστατο μηδενικών και μονάδων

στα δεδομένα που λαμβάνονται ή αποστέλλονται. Στη συνέχεια, τα δεδομένα κρυπτογραφούνται χρησιμοποιώντας έναν κωδικοποιητή Προώθησης Συνένωσης Σφαλμάτων (Forward Error Concatenation - FEC) για να επιτρέπεται η συμφωνία σφαλμάτων. Ο αναλυτής ροής διαιρεί την έξοδο του κωδικοποιητή, σε χωρικές ροές και τις στέλνει σε διαφορετικούς παρεμβολείς και συσκευές χαρτογράφησης ως είσοδο. Στη συνέχεια, ο παρεμβολέας τυλίγει τα bit σε κάθε χωρική ροή και τα στέλνει ως μια μεγάλη σειρά από bits θορύβου στον αποκωδικοποιητή FEC. Η χαρτογράφηση Διαμόρφωση Πλάτους Τετραγώνου (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) απεικονίζει τα bit στην ακολουθία κάθε χωρικού ρεύματος σε διάφορα σχέδια, ενώ ο Κώδικας Αποκλεισμού Χωροχρόνου (Space-Time Blocking Code - STBC) σχεδιάζει τη χωρική ροή στο χωροχρόνο. Σε όλο το τμήμα υψηλής απόδοσης του προοιμίου, επιδιώκεται η εφαρμογή της κυκλικής μετατόπισης, για την πρόληψη της διαμόρφωσης δέσμης όταν αποστέλλονται συγκρίσιμα σήματα, σε πολλά χωρικά ρεύματα. Η ίδια κυκλική μετατόπιση εφαρμόζεται σε αυτές τις ροές σε όλη τη φάση δεδομένων της μετάδοσης του πακέτου. Τέτοια χωρικά ρεύματα χαρτογραφούνται σε πολλαπλά δίκτυα μεταφορών μέσω χωρικής χαρτογράφησης. Η απευθείας χαρτογράφηση, στην οποία κάθε ροή χωροχρόνου μεταφέρεται απευθείας σε μια άλλη αλυσίδα μεταφοράς ή η χωρική επέκταση, στην οποία το χωροχρονικό ρεύμα πολλαπλασιάζεται με έναν πίνακα και αποστέλλεται μέσω μιας άλλης αλυσίδας μεταφοράς, είναι οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι. Το μπλοκ σημείου αστερισμού, στη συνέχεια μετασχηματίζεται σε μπλοκ πεδίου χρόνου χρησιμοποιώντας έναν Αντίστροφο Γρήγορο Μετασχηματισμό Φουριέ (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT), ακολουθούμενο από μια άλλη κυκλική μετατόπιση. Τέλος, χρησιμοποιούνται διαστήματα προστασίας (Guard Intervals - GIs) και παράθυρα για να απαλυνθούν οι άκρες κάθε συμβόλου και να ενισχυθεί η απόσβεση του φάσματος. Για να ληφθούν τα αρχικά δεδομένα που αποστέλλονται από τον πομπό, όλες οι διαδικασίες αντιστρέφονται στην πλευρά λήψης.

Το MIMO θέτει τον στόχο των ασύρματων και κινητών δικτύων, να βελτιώσουν πρωτίστως, τους ρυθμούς δεδομένων και να μειώσουν τον λανθάνοντα χρόνο. Για τη μείωση των σφαλμάτων και την αύξηση της ταχύτητας, η τεχνολογία έξυπνης κεραιάς είναι ενσωματωμένη στα ηλεκτρονικά MIMO. Είναι μια πολύ γνωστή τεχνολογία, που ενσωματώνεται στους BSs και αυτή τη στιγμή χρησιμοποιείται στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 4ης γενιάς MIMO, αν και έχει μια εντελώς ξεχωριστή πτυχή. Τέσσερις, οκτώ και δεκαέξι κεραιές στην πλευρά του πομποδέκτη και του δέκτη είναι κοινές παραλλαγές του βασικού MIMO. Αυτός ο αριθμός μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αν βρίσκεστε στην πλευρά του πομπού ή του δέκτη. Αντίθετα, το Massive MIMO είναι μια μέθοδος στην οποία κάθε πομποδέκτης ή δέκτης έχει πολλές κεραιές, όπως 128 ή 256, και υπόσχεται να είναι από τις πιο βασικές τεχνικές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G, διασφαλίζοντας όλα τα βασικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω.

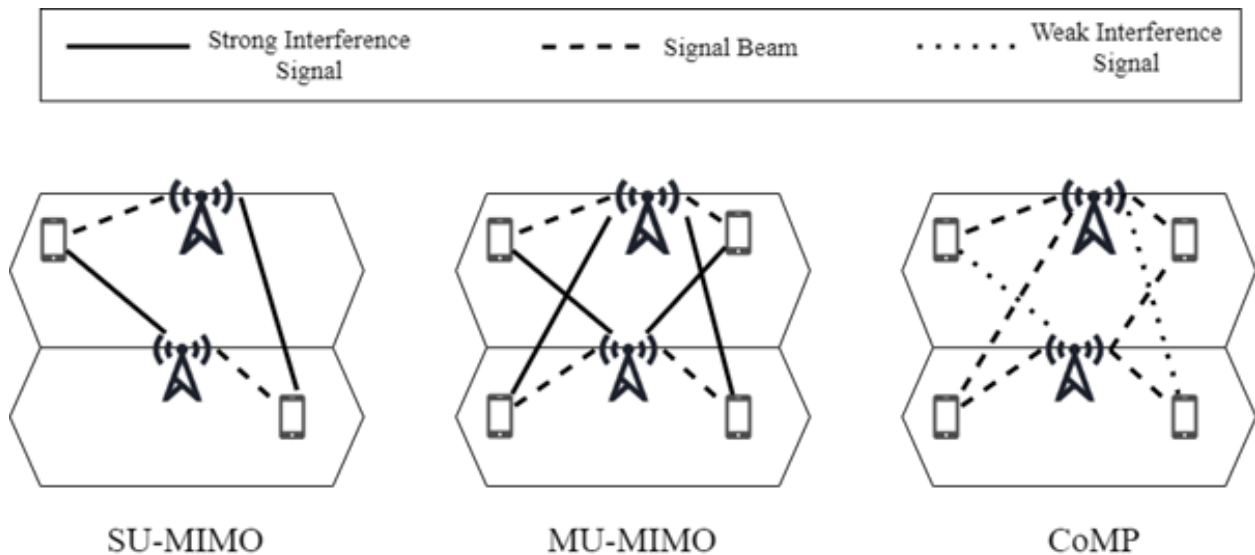
Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στην καθημερινή μας ζωή. Το Wi-Fi είναι ένα ασύρματο δίκτυο που μπορεί να υποστηρίξει συστήματα προσαρμοστικής συστοιχίας και μεταδίδεται μέσω μικρών συσκευών σε εσωτερικό περιβάλλον. Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης MIMO για Wi-Fi είναι η αυξημένη εμβέλεια, η διόρθωση παρεμβολών και η σταθερή κάλυψη. Η συνεπής κάλυψη είναι ευεργετική για μια ποικιλία εφαρμογών Voice over Internet Protocol (VoIP), οι οποίες χρειάζονται υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας υπηρεσιών. Επειδή η ίδια συχνότητα χρησιμοποιείται συνεχώς, ένα σημείο πρόσβασης ή ένα κινητό πελάτη μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλές κεραιές. Παρέχει τα ίδια πλεονεκτήματα με τους ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων. Το WiMax χρησιμοποιεί επίσης το MIMO, με κεραιές πολλαπλών ακτίνων από το σταθμό βάσης και προσαρμοστικές συστοιχίες από τους πελάτες. Η χρήση του MIMO από έναν σταθμό βάσης επεκτείνει την εμβέλεια και ενισχύει τη χωρητικότητα με την επαναχρησιμοποίηση του χώρου. Οι προσαρμοστικές συστοιχίες, από την πλευρά του πελάτη

μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση της εξασθένησης του σήματος που προκαλείται από τα κτίρια. Το WiMax μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί εντός του κτιρίου, έναντι μόνο σε εξωτερικούς χώρους, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία MIMO. Οι κεραιές πολλαπλών δεσμών χρησιμοποιούνται επίσης σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για τη λήψη μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων κατά τη μετάδοση δεδομένων, ενώ παράλληλα ενισχύουν την κάλυψη και τη χωρητικότητα, παρόμοια με το WiMax. Η αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification -RFID) και το Ultra-wideband είναι δύο άλλες εφαρμογές όπου το MIMO χρησιμοποιείται για την επέκταση της εμβέλειας. Επιπλέον, το MIMO έχει επιτρέψει τη μετάδοση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων σε Συστήματα Ψηφιακής Τηλεόρασης, συμπεριλαμβανομένων τόσο του ψηφιακού ήχου όσο και του βίντεο. Το MIMO γίνεται επίσης όλο και πιο σημαντικό στις δορυφορικές επικοινωνίες. Χρησιμοποιείται στη δορυφορική παρακολούθηση, όπου πολλές κεραιές είναι τοποθετημένες στις στέγες κινούμενων αυτοκινήτων, για να επιτρέπουν την παρακολούθηση οχημάτων, και σε δορυφόρους για να προσφέρει ακόμη μεγαλύτερη κάλυψη σε δορυφορικούς ραδιοφωνικούς δέκτες, βελτιώνοντας παράλληλα την εσωτερική λήψη.

3.1.3 Η Τεχνολογία MU-MIMO

Η τεχνολογία MIMO μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των παρεμβολών, τη χωρική πολυπλεξία και την ποικιλομορφία [13]. Ως αποτέλεσμα, θεωρείται ως μια κρίσιμη στρατηγική για την ενίσχυση της φασματικής απόδοσης των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Το βελτιωμένο MIMO έχει χρησιμοποιηθεί στο LTE (Long Term Evolution) για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων, σε σχέση ρυθμού μετάδοσης, των Εξελιγμένων Διεθνών Κινητών Τηλεπικοινωνιών (IMT-advanced), που περιλαμβάνουν τόσο παραδοσιακές τεχνικές όπως η προκωδικοποίηση, η χωρική ποικιλομορφία και η πολυπλεξία, όσο και προηγμένες τεχνικές όπως το MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO), Beamforming και λήψη/μετάδοσης Συντονισμένων Πολυσημείων (Coordinated MultiPoint – CoMP) [14], [15]. Πολλαπλοί χρήστες από διάφορες τοποθεσίες βρίσκονται στον ίδιο πόρο χρόνου-συχνότητας με τους υπόλοιπους, σε ένα δίκτυο MU-MIMO, έτσι ώστε, να επωφεληθούν από το κέρδος χωρικής πολυπλεξίας. Το MIMO ενός χρήστη (Single User MIMO - SU-MIMO), MU-MIMO και CoMP είναι οι τρεις μορφές βελτιωμένου MIMO στο LTE, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.

- SU-MIMO: Επιλέγεται αυτή η προσέγγιση, για την υποστήριξη του μέγιστου ρυθμού δεδομένων ενός χρήστη. Χρησιμοποιεί ποικιλομορφία μετάδοσης, χωρική πολυπλεξία και διαμόρφωση δέσμης.
- MU-MIMO: Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη διανομή χωριστών ροών δεδομένων σε πολλούς καταναλωτές για την ενίσχυση του μέσου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων μιας κυψέλης. Το MIMO μιας κυψέλης αναφέρεται τόσο στο SU όσο και στο MU-MIMO, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές χρήσης μιας κυψέλης.
- CoMP: Για να αντιμετωπίσουν τις παρεμβολές μεταξύ κυψελών γνωστές και ως Inter-Cell Interference (ICI) και να ενισχύσουν τους ρυθμούς δεδομένων στο όριο της κυψέλης, διαφορετικά BS στέλνουν και/ή ανιχνεύουν σήματα συντονισμένα. Είναι επίσης γνωστό ως MIMO δικτύου ή συνεργατικό MIMO.



Σχήμα 3.4: SU-MIMO, MU-MIMO και CoMP.

Στο [16], οι ρυθμίσεις έχουν οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν νέες ασύρματες τεχνολογίες, με σκοπό την βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, η μέγιστη απόδοση φάσματος, η μέση απόδοση φάσματος χρήστη, η απόδοση φάσματος κυψέλης, η απόδοση φάσματος χρήστη άκρων κυψέλης και το εύρος ζώνης είναι μεταξύ των πλεονεκτημάτων. Μόνο με την εφαρμογή διευρυμένων υπηρεσιών MIMO μπορούν να επιτευχθούν αυτά τα κριτήρια. Παρόλο που το MU-MIMO έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι του SU-MIMO, έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Η παρεμβολή μεταξύ κυψελών είναι ένα τέτοιο παράδειγμα, το οποίο μπορεί να είναι καταστροφικό σε περιπτώσεις όπου η χωρητικότητα είναι περιορισμένη. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη φασματική απόδοση, είναι επίσης μια πιο δύσκολη πρόκληση να επιλυθεί. Για να λυθεί αυτό, οι συγγραφείς του [17] παρουσίασαν μια προσέγγιση συντονισμού δικτύου που μετατρέπει το MU-MIMO σε ένα MIMO πολλαπλών τοποθεσιών. Εισάγει μια συγχρονισμένη μετάδοση BS-to-BS. Δυστυχώς, απαιτούνται σχεδόν ιδανικές συνθήκες, όπως οι πλήρεις πληροφορίες καναλιού, για να αποκομιστούν τα πλήρη οφέλη ενός πλήρως συντονισμένου MIMO. Τα οφέλη, ωστόσο, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες δεν είναι βέλτιστες, εξακολουθούν να είναι σημαντικά. Το Massive MIMO είναι μια άλλη χρήση της βασικής τεχνολογίας MIMO. Το Massive MIMO επεκτείνει ουσιαστικά τη θεμελιώδη σχεδίαση MIMO πολλαπλά. Χρησιμοποιώντας πολλές εκατοντάδες κεραιές ταυτόχρονα για να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες ή τερματικά, ανοίγει το δρόμο για την πρόοδο μελλοντικών ευρυζωνικών τεχνολογιών που είναι ενεργειακά αποδοτικές και ασφαλείς. Για να αξιοποιηθεί, στο έπακρο το Massive MIMO, θα χρειαστεί μια πλήρη κατανόηση του καναλιού, όπως ακριβώς γινόταν στο παρελθόν. Τόσο στο UL, όσο και στο DL, αυτό είναι απαραίτητο. Συνολικά, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν των μειονεκτημάτων. Το Massive MIMO ενισχύει τη χωρητικότητα του δικτύου κατά δέκα φορές, ενώ παράλληλα του επιτρέπει να αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας εξαρτήματα χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης. Επιπλέον, μειώνει την καθυστέρηση και αυξάνει την ευρωστία.

Η διαθεσιμότητα και η αυθεντικότητα των πληροφοριών κατάστασης καναλιού (Channel State Information - CSI) καθορίζει την αποτελεσματικότητα των μεθόδων MIMO. Το CSI παρέχεται σιωπηρά από την άποψη του δείκτη κατάταξης (Rank Index - RI), του δείκτη προκωδικοποίησης μήτρας (Precoding Matrix Index - PMI) και του δείκτη ποιότητας καναλιού (Channel Quality Indicator - CQI) στο πρότυπο LTE [14]. Η απόδοση του MIMO επηρεάζεται σαφώς από

την περιορισμένη είσοδο του CSI. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το MIMO στο LTE να διαφοροποιείται από το MIMO γενικά, και αυτοί οι λειτουργικοί περιορισμοί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Επιπλέον, για να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος, είναι ζωτικής σημασίας η ευέλικτη εναλλαγή από SU-MIMO σε MU-MIMO όταν αλλάζουν οι συνθήκες του καναλιού και της κυκλοφορίας. Για την ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος, το MU-MIMO συνιστάται ως μέθοδος αξιοποίησης των χωρικών πληροφοριών [18]. Πολλές συσκευές μπορούν να έχουν πρόσβαση στους ίδιους πόρους χρόνου-συχνότητας στο MU-MIMO, αποφεύγοντας την ανεπαρκή διάταξη καναλιών MIMO στη χωρική πολυπλεξία επιλέγοντας χρήστες. Έτσι, στο τέλος, η χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται σημαντικά.

Ο αριθμός των κεραιών που εκπέμπουν και λαμβάνουν επίσης μπορεί να αυξηθεί με το τρέχον πρότυπο LTE. Για τον υψηλότερο ρυθμό αιχμής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεγαλύτερη διάταξη ενός MIMO 8x8. Σε αυτήν την περίπτωση, το MU-MIMO [16], το οποίο εκχωρεί πολλές ταυτόχρονες συνδέσεις για τις ίδιες πηγές εύρους ζώνης, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Οι ενδοκυψελωτές παρεμβολές είναι ένα σημαντικό στοιχείο που περιορίζει τη λειτουργικότητα του δικτύου σε παρόμοιες καταστάσεις. Για τη μείωση της παρεμβολής εντός των κυψελών, έχει προταθεί μια ποικιλία προσεγγίσεων διαμόρφωσης/προκωδικοποίησης δέσμης. Το MU-MIMO μπορεί να προγραμματίσει πολλές συσκευές στον ίδιο πόρο χρόνου-συχνότητας ταυτόχρονα για να προσφέρει κέρδος χωρικής πολυπλεξίας, αλλά η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια του CSI εξόδου, που συνδέεται με την ανάδραση. Το CSI ποσοτικοποιείται σε CQI, PMI και RI με βάση τη μέθοδο SU-MIMO στο LTE-A για να εξισορροπηθεί η απόδοση του συστήματος και να διασφαλιστεί ότι η ανάδραση δεν υπερφορτώνεται. Σε αυτήν την περίπτωση, οι πληροφορίες ανάδρασης θα αγνοήσουν τη διακοπή εντός κυψελών στα δίκτυα MU-MIMO και θα έχουν άμεση επίδραση στο κέρδος πολυπλεξίας MU-MIMO [19] και στον προσδιορισμό του CQI ανάδρασης. Για να μεγιστοποιήσει την απόδοση του συστήματος, ο χρονοπρογραμματιστής στο BS θα χρησιμοποιήσει τα καταγεγραμμένα RI, PMI και CQI από διακριτά UE για τη διεξαγωγή προγραμματισμού πολλών χρηστών, την επιλογή προκωδικοποίησης μητρώου και τη δέσμευση στο σχέδιο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme – MCS). Επειδή το UE δεν κάνει διακρίσεις μεταξύ MU-MIMO και SU-MIMO, ο προγραμματισμός των χρηστών στο MU-MIMO και η επιλογή τρόπου μετάδοσης πρέπει να γίνεται χρησιμοποιώντας ένα CSI ανάδρασης σύμφωνα με τη διαμόρφωση SU-MIMO.

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G και 6G εστιάζουν σε νέες τεχνολογίες για τη βελτίωση της απόδοσης μετά τη μετάδοση, όπως η ταχύτητα δεδομένων, η καθυστέρηση και η κατανάλωση μπαταρίας. Η επικοινωνία μέσω ενός εξαιρετικά πυκνού ετερογενούς δικτύου, τα mmWave, MIMO, OFDM και Μη Ορθογώνια MultiAccess (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA) είναι παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών [20], [21]. Το MU-MIMO απομονώνει την κίνηση κάθε συνδρομητή και επιτρέπει τη μετάδοση και λήψη δεδομένων από πολλούς συμμετέχοντες ταυτόχρονα. Μόνο μία δέσμη μπορούσε να δημιουργηθεί ανά σετ στοιχείων κεραιάς προηγουμένως, αλλά χρησιμοποιούνται πολλές περισσότερες δέσμες (επτά). Το MIMO αποτελείται από μια σειρά τεχνικών που χρησιμοποιούν τις φάσεις κατεύθυνσης x και y των ραδιοκυμάτων για να αυξήσουν την απόδοση μιας ασύρματης σύνδεσης χωρίς να απαιτείται επιπλέον φάσμα. Επειδή οι δύο φάσεις πολικότητας είναι κάθετες μεταξύ τους, η καθεμία φέρει τη δική της ροή δεδομένων για αποστολή και αποδοχή δεδομένων. Το SNR, η εκτιμώμενη ακρίβεια του καναλιού [22], η χωρική σύνδεση στο κανάλι διάδοσης [23] και η θεωρητική χωρητικότητα [24] είναι όλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη φασματική απόδοση ενός συστήματος. Πρόσφατα, η ερευνητική κοινότητα έχει επικεντρωθεί στην τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας MU-MIMO. Τα δίκτυα

MU-MIMO δεν έχουν περιορισμούς διάδοσης. Ορισμένα από αυτά, όπως η συσχέτιση κεραίας ή η απώλεια κατάταξης φορέα, καθιστούν την τεχνολογία MU-MIMO μια εξαιρετική επιλογή για μελλοντικά κυψελωτά συστήματα και πρότυπα [25]. Οι διαθέσιμοι πόροι (ισχύς, εύρος ζώνης, κεραίες, κωδικοί ή χρονοθυρίδες) στα συστήματα MU-MIMO θα πρέπει να διανέμονται μεταξύ των ενεργών χρηστών K. Το κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, που ονομάζεται κανάλι εκπομπής (BC), είναι όπου ένας πομπός εκπέμπει διάφορα σήματα σε πολλούς δέκτες. ενώ το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης, που αναφέρεται ως κανάλι πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Channel - MAC), είναι όπου συνδέονται πολλές κεραίες εκπομπής σε έναν δέκτη.

3.2 Η Τεχνολογία DUDe

3.2.1 Λειτουργία

Το DL και το UL μιας συγκεκριμένης συνόδου επικοινωνίας συνδέθηκαν σε όλη την ιστορία των κινητών επικοινωνιών: Τόσο στο DL όσο και στο UL, το κινητό UE πρέπει να συνδέεται με συγκεκριμένο, πανομοιότυπο BS. Επειδή η ισχυρότερη συσχέτιση μεταξύ ενός BS και ενός UE ήταν πανομοιότυπη και στους δύο προσανατολισμούς, αυτή ήταν παραδοσιακά μια σχεδόν βέλτιστη τεχνική. Ωστόσο, λόγω της αποσύνδεσης της σχέσης σχετικά με ένα ετερογενές κυψελοειδές δίκτυο, το οποίο είναι επίσης πυκνό, μπορεί να οδηγήσει σε πιθανά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι δυνάμεις μετάδοσης και οι τοπολογίες ανάπτυξης διαφορετικών BS μπορεί να διαφέρουν. Αυτή η παραδοσιακή προσέγγιση πρόσφατα [63] τέθηκε υπό έλεγχο. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που υποστηρίζουν το ζευγαρωμένο status quo. Είναι απλούστερη η κατασκευή και η λειτουργία λογικών, μεταφορών και φυσικών καναλιών, από καθαρά σχεδιαστική άποψη δικτύου. Αυτό ισχύει για συγχρονισμό αναγνώρισης (ACK/NAK), αποδοχή κλήσεων και πρωτοκόλλων παράδοσης, διαχείριση πόρων ραδιοφώνου DL/UL και έλεγχο ισχύος, μεταξύ άλλων. Για την αποσύνδεση και των δύο συνδέσμων, απαιτείται επίσης ισχυρός συγχρονισμός και μετάδοση δεδομένων μεταξύ των BS. Από την άποψη της ανάπτυξης και της τοπολογίας, η ιδέα ενός ομοιογενούς δικτύου με μεγάλες κυψέλες που εκπέμπουν με περίπου παρόμοια ισχύ έχει χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την κατασκευή κυψελοειδών δικτύων. Στα δίκτυα 2G και στα πρώτα δίκτυα 3G, όπου η εστίαση είναι κυρίως φωνητική, το φορτίο και στις δύο κατευθύνσεις ήταν περίπου ίσο. Επιπλέον, η κίνηση κατερχόμενης ζεύξης κυριαρχεί στα συστήματα 3.5G και 4G, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση τεχνικών συσχέτισης με επίκεντρο DL και όχι UL ή αποσυνδεδεμένη σύνδεση, και αυτές οι απαιτήσεις είναι ίδιες και στα δίκτυα 5G. Μια συνδεδεμένη ένωση, από την άλλη πλευρά, είναι μια περιορισμένη παραλλαγή μιας ευρύτερης πολιτικής συσχέτισης που δεν επιβάλλει απαίτηση σύζευξης. Ως αποτέλεσμα, είναι προφανές ότι μια καλά σχεδιασμένη στρατηγική συσχέτισης Downlink/Uplink Decoupling (DUDe) μπορεί να ξεπεράσει μια συνδεδεμένη σχέση θεωρητικά.

Επειδή η κίνηση δικτύου είναι συνήθως ασύμμετρη, η απαιτούμενη διεκπεραίωση κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται στην ανοδική ζεύξη, τα κυψελωτά δίκτυα συχνά σχεδιάζονται με γνώμονα το DL. Ωστόσο, κατά την έλευση του IoT και του MTC, όπου η κυκλοφορία είναι συνήθως κεντρική στο UL και η αυξανόμενη επιρροή συμμετρικών υπηρεσιών κυκλοφορίας όπως τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης, οι συνομιλίες βίντεο, τα παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο κ.λπ., η ανοδική σύνδεση γίνεται ολοένα και πιο σημαντική. Ως αποτέλεσμα, η βελτιστοποίηση ανοδικής ζεύξης γίνεται όλο και πιο κρίσιμη. Στα

περισσότερα κυψελωτά δίκτυα, η συσχέτιση κυψελών καθορίζεται αποκλειστικά από την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης [64]. Αυτή η στρατηγική λειτουργήσει καλά σε ένα ομοιογενές δίκτυο στο οποίο όλα τα BS εκπέμπουν με τα ίδια ή συγκρίσιμα συνολικά επίπεδα ισχύος, παρά τις διαφορές στις ισχύς μετάδοσης UL και DL και στις απαιτήσεις παρεμβολών. Ωστόσο, στα HetNets, όπου η ισχύς της μετάδοσης σε πολλαπλά επίπεδα ποικίλλει πολύ, η προαναφερθείσα στρατηγική είναι σπάταλη όσον αφορά το UL. Για να εκτιμήσετε περαιτέρω αυτόν τον ισχυρισμό, σκεφτείτε μια τυπική κατάσταση HetNet, η οποία αποτελείται από μακροεντολές και μικρά κελιά, με τα μικρά κελιά να βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους. Λόγω της τεράστιας διαφοράς στις δυνάμεις μετάδοσης μεταξύ των δύο τύπων BS, η κάλυψη DL της μακροκυτταρικής κυψέλης είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της μικρής κυψέλης. Όλοι οι πομποί στο UL, οι οποίοι είναι φορτισμένες συσκευές χειρός, με παρόμοια ισχύ μετάδοσης και ως εκ τούτου εμβέλειας. Κατά συνέπεια, ένα UE που συνδέεται με ένα κελί μακροεντολής στο DL και λαμβάνει το μέγιστο επίπεδο πληροφοριών θα προτιμούσε να συνδεθεί με ένα μικρό κελί στο UL με χαμηλότερη παθολογία. Η διαφορά στην ισχύ μετάδοσης, μεταξύ μακρο και μικρών κυψελών αυξάνεται καθώς τα HetNets γίνονται όλο και πιο πυκνά και τα μικρά κελιά, ακόμη μικρότερα, και ως αποτέλεσμα, το χάσμα μεταξύ των ιδανικών ορίων κελιών DL και UL διευρύνεται. Αυτό απαιτεί μια νέα τεχνική σχεδίασης γνωστή ως DUDe, στην οποία το UL και το DL θεωρούνται βασικά ως ανεξάρτητες συσκευές δικτύου και ένα UE μπορεί να συνδεθεί σε πολλούς κόμβους υπηρεσίας στο UL και στο DL για βέλτιστη λειτουργία του δικτύου.

Η συνήθης στρατηγική αποσύνδεσης ενός πυκνού και διαφορετικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας έχει πρόσφατα αμφισβητηθεί ως προς τα πιθανά πλεονεκτήματα. Οι τοπολογίες ισχύος μετάδοσης και ανάπτυξης άλλων BS μπορεί να ποικίλλουν αρκετά. Οι λόγοι που υποστηρίζουν τη διατήρηση της σύζευξης ως έχει, είναι διαφορετικοί. Όσον αφορά την καθαρή αρχιτεκτονική δικτύου, τα φυσικά, τα κανάλια προώθησης και τα λογικά κανάλια είναι απλά στην κατασκευή και εκτέλεση. Αυτό περιλαμβάνει συγχρονισμό εξουσιοδότησης (ACK/NAK), διαδικασίες παράδοσης και έγκρισης, αναμονή ελέγχου ισχύος και διαχείριση πόρων ραδιοφώνου DL/UL, για να αναφέρουμε μερικά. Και οι δύο συνδέσεις πρέπει να αφαιρεθούν, γεγονός που απαιτεί έναν ισχυρό συγχρονισμό με το BS καθώς και μια σύνδεση δεδομένων (π.χ. μέσω οπτικών ινών).

3.2.2 Αρχιτεκτονικά Χαρακτηριστικά

Το DUDe επιτρέπει στο UE να συνδεθεί σε διαφορετικό BS για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες DL, και σε διαφορετικό BS για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες UL. Σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί την τεχνολογία DUDe, δύο λίστες (μία για διευθύνσεις DL και μία για διευθύνσεις UL) που αποτελούνται από BS που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συσχέτιση, δημιουργούνται για κάθε UE. Κάθε λίστα ταξινομείται σύμφωνα με δείκτες όπως το Λόγο Σήματος-προς-Θόρυβου-συν-Παρεμβολή (Signal-to-Noise-plus-Interference - SINR) ή η απώλεια διαδρομής (Path Loss - PL). Μετά την προετοιμασία της λίστας, κάθε UE προσπαθεί να συνδεθεί στο προτιμώμενο BS. Εάν το BS μπορεί να παραδώσει το ζητούμενο Μπλοκ Πόρων (Resource Block - RB), δημιουργείται μια σύνδεση μεταξύ των δύο. Εάν δεν υπάρχουν αρκετά RBs, το UE προσπαθεί να συνδεθεί στο επόμενο προτιμώμενο BS. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται και προς τις δύο κατευθύνσεις έως ότου κάθε UE συνδεθεί σε ένα BS. Η κύρια ιδέα του DUDe είναι ότι αντιμετωπίζει τις διευθύνσεις DL και UL ως δύο διαφορετικές εργασίες, οδηγώντας σε ταχύτερες συσχετίσεις και καλύτερη εμπειρία χρήστη.

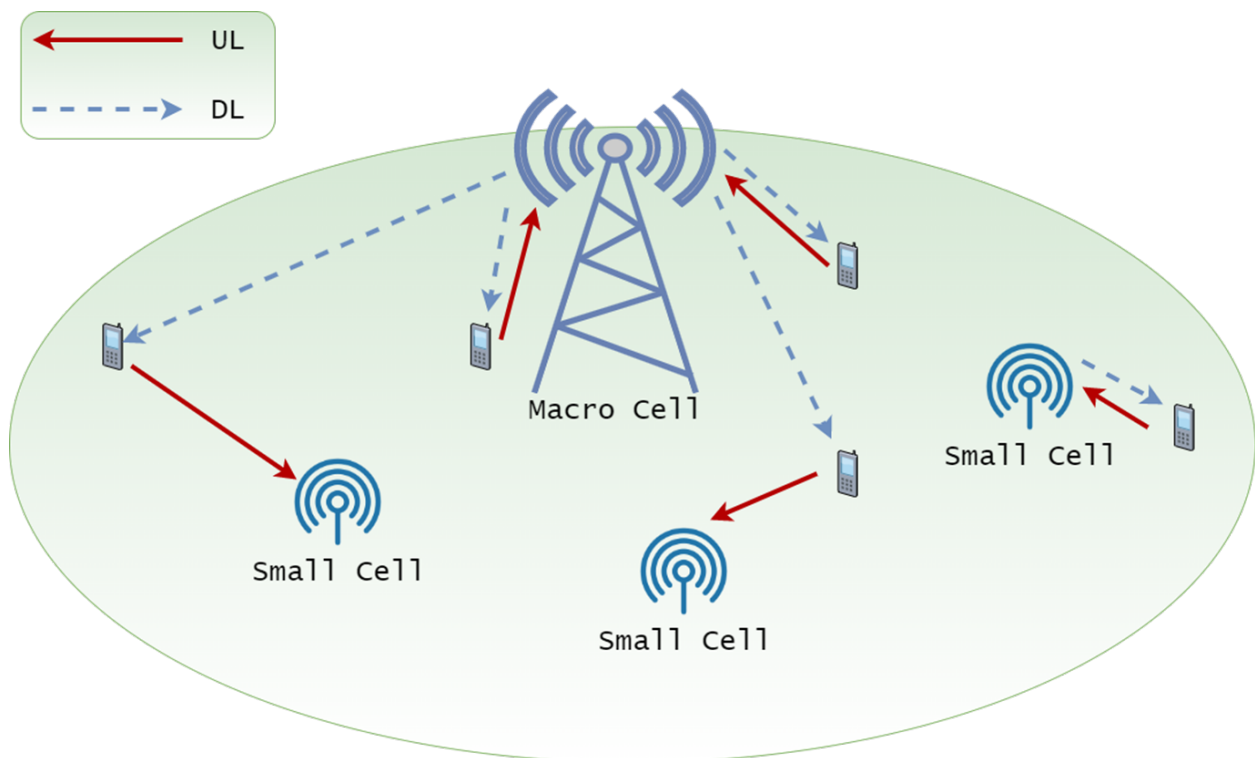
Απαιτείται αξιόπιστη σύνδεση και συνεργασία μεταξύ πολλαπλών BS προκειμένου να εφαρμοστεί μια αποσυνδεδεμένη σύνδεση κυψελών στα σημερινά συστήματα δικτύου. Οι κύριες απαιτήσεις που χρειάζεται το DUDe είναι μια σύνδεση χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των BSs και για τις δύο κατευθύνσεις, έτσι ώστε τα μηνύματα ελέγχου να μπορούν να ανταλλάσσονται γρήγορα. Τονίζουμε ότι, σε αντίθεση με τις πιο προηγμένες παραλλαγές του CoMP, στις οποίες είναι απαραίτητο ένα δίκτυο backhaul υψηλού εύρους ζώνης για την επίτευξη γρήγορης ροής δεδομένων, το DUDe δεν θέτει αυστηρό όριο στη χωρητικότητα backhaul. Επιπλέον, το DUDe επιτυγχάνει βελτιώσεις συγκρίσιμες με την κοινή επεξεργασία UL (περίπου 100% αιχμή και μέση απόδοση), αλλά με μειωμένο κόστος ανάπτυξης. Σε αντίθεση με το MIMO ή σύγκριση με απλή χρήση νέου φάσματος για την αύξηση της απόδοσης, το DUDe είναι ακόμη πιο οικονομικό. Ανάλογα με το σενάριο ανάπτυξης και τις ιδιότητες backhaul, οι υπάρχουσες προδιαγραφές LTE/LTE-Advanced (LTE-A) ενδέχεται να επιτρέπουν ήδη το DUDe. Στην περίπτωση μας, υπάρχουν τρία πιθανά σενάρια, τα οποία όταν χρησιμοποιηθούν σωστά μπορούν να επιτρέψουν στο DUDe να χρησιμοποιηθεί στο LTE-A. Αυτά είναι ένα κεντρικό σύστημα επεξεργασίας, το οποίο όπως υποδηλώνει το όνομα χρησιμοποιείται ένας κεντρικός κόμβος. Το δεύτερο είναι ένα κοινό αναγνωριστικό κυψέλης και επίσης διπλή συνδεσιμότητα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, χωρίς περαιτέρω υποστήριξη προτύπων, το DUDe είναι δυνατό σε LTE-A μόνο όταν υπάρχουν διάφοροι πομποί με διακριτά cell-ID, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε μια κεντρική οντότητα (π.χ. Central RAN). Το BS που χρησιμοποιείται για μετάδοση κατά τη διάρκεια DL, σε ένα συγκεκριμένο UE επιλέγεται με βάση τις παραδοσιακές μεθόδους, συνήθως σύμφωνα με εκτιμήσεις της ισχύος του σήματος DL (πιθανώς με πόλωση). Ο κόμβος λήψης δεν καθορίζεται από τις απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, τα σήματα UL δεν λαμβάνονται από κανέναν. Η αποκωδικοποίηση UL μπορεί να γίνει στη μονάδα ραδιοφώνου ή μέσω μιας διεπαφής Common Public Radio Link (CPRI), τα δειγματοληπτικά αναλογικά δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν σε μια κεντρική μονάδα για επεξεργασία. Ο κόμβος DL πρέπει να στέλνει σήματα Access-Stratum (AS) που σχετίζονται με το UL, δηλαδή μηνύματα ελέγχου επιπέδου 1, επιπέδου 2 και RRC που συνδέονται με τη μετάδοση κατά τη διάρκεια του UL που παραδίδεται στο κινητό τερματικό από τη μονάδα ασύρματου. Ομοίως, τα σήματα AS κατά το UL που συνδέονται με το DL πρέπει να λαμβάνονται από τον κόμβο UL. Μεταξύ της Οντότητας Διαχείρισης Κίνησης (Mobility Management Entity - MME) και του τερματικού κινητής τηλεφωνίας, τα μηνύματα ελέγχου που μεταδίδονται μπορούν επίσης να αντιμετωπιστούν με τον ίδιο τρόπο. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί καθυστέρησης για τη σηματοδότηση NAS είναι λιγότερο αυστηροί.

Η λεγόμενη τεχνική κοινής ταυτότητας κυψέλης [65] είναι μια ενδιαφέρουσα εξέλιξη της προσέγγισης που περιγράφηκε παραπάνω, στην οποία οι μονάδες ραδιοφώνου αποτελούν όλες μέρος της ίδιας κυψέλης. Οι αναβαθμίσεις CSI και οι τεχνολογίες συντοποθεσίας που αναπτύχθηκαν ως μέρος της προσπάθειας CoMP, χρησιμοποιούνται για την ανταλλαγή των τοποθεσιών στις οποίες μεταδίδονται και λαμβάνονται πληροφορίες για ένα συγκεκριμένο τερματικό γρήγορα, ανεξάρτητα και με διαφάνεια από την άποψη του τερματικού. Αυτή είναι μια απόκλιση από τη συνήθη προσέγγιση με επίκεντρο την κυψέλη, στην οποία τα σημεία κεραίας θεωρούνται ως πόροι που πρέπει να χρησιμοποιηθούν με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο, έτσι ώστε να βελτιώνεται η απόδοση. Επιπλέον, οι ιδιότητες (μη τυποποιημένες) λύσεις χειρίζονται τη συσχέτιση και την κινητικότητα κόμβων καλύτερα, τα οποία προβάλλονται από το κινητό τερματικό, και αυξάνουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα της κινητικότητας σε πολυσύχναστα δίκτυα, περισσότερο από τεχνικές που βασίζονται σε μέτρα με επίκεντρο την UE. Μπορεί να φαίνεται απλό, αλλά τα συστήματα κεντρικής επεξεργασίας και κοινής ταυτότητας απαιτούν

ένα backhaul με χαμηλή καθυστέρηση για την εκπλήρωση των απαιτήσεων του επιπέδου δεδομένων σχετικά με το χρονοδιάγραμμα. Σε μια πρακτική ανάπτυξη LTE-A, οι απομακρυσμένες μονάδες ραδιοφώνου που συνδέονται με έναν κεντρικό επεξεργαστή ζώνης βάσης είναι επομένως περιορισμένες.

Ένα backhaul με χαμηλή καθυστέρηση, συνήθως επιτυγχάνεται με τη σύνδεση πομπών σε ένα συγκεκριμένο κεντρικό διανομέα. Ένα τερματικό επιτρέπεται να συνδέεται με δύο κελιά ταυτόχρονα για τη συγκέντρωση ροών δεδομένων ή την αποσύνδεση DL και UL, χάρη στη Διπλή Συνδεσιμότητα. Σε αντίθεση με τη λύση της κεντρικής ζώνης βάσης, οι δύο κυψέλες λειτουργούν ανεξάρτητα, μειώνοντας σημαντικά τις ανάγκες backhaul. Το κύριο BS (γνωστό και ως eNodeB) επιβλέπει τα δεδομένα DL καθώς και τη σηματοδότηση Non-Access Stratum (NAS), η οποία περιλαμβάνει σηματοδότηση που σχετίζεται με RRC και MME, ενώ το δευτερεύον eNodeB είναι υπεύθυνο για τα δεδομένα UL. Αυτή η μέθοδος προσφέρει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Αφενός, επειδή η σηματοδότηση AS διακόπτεται σε κάθε κόμβο, δεν απαιτείται σύνδεση backhaul με χαμηλή καθυστέρηση για τη σηματοδότηση AS. Ωστόσο, επειδή το MME είναι το σημείο αγκύρωσης για τη σηματοδότηση NAS, η συσχέτιση και η μετακίνηση κόμβων πρέπει να διαχειρίζονται με καθιερωμένες μεθόδους στο άκρο MME και δεν είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτές προσαρμοσμένες βελτιώσεις.



Σχήμα 3.5: Το DUDe στην πράξη.

3.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Σε ένα τυπικό σενάριο HetNet, η περιοχή κάλυψης DL μιας κυψέλης μακροεντολής είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με ένα BS με προδιαγραφές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Η διακύμανση στην περιοχή κάλυψης οφείλεται κυρίως σε διαφορές στις δυνάμεις μετάδοσης DL, καθώς και σε αλλαγές στα υψόμετρα των BS και στην απόδοση της κεραίας τους. Η μέγιστη ισχύς εκπομπής όλων των πομπών UL, από την άλλη πλευρά, είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Ως αποτέλεσμα, κατά τη διάρκεια του DL, όταν συνδέεται με ένα Macrocell μια συσκευή μπορεί να επιλέξει ότι κατά τη διάρκεια του UL μπορεί να αποδειχθεί πιο ωφέλιμο να συνδεθεί με ένα Smallcell, για να επιτευχθεί μία μικρότερη απώλεια διαδρομής [66]. Υπάρχουν δύο ευεργετικές συνέπειες. Ένας σύνδεσμος σε ένα κοντινό BS παρέχει καλύτερο SNR για UE που εκπέμπουν σε πλήρη ισχύ. Η περιοχή κάλυψης DL ενός BS χαμηλής κατανάλωσης, σε ένα τυπικό HetNet είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή ενός Macrocell. Σε αντίθεση με το DL, η ισχύς αντίστροφης μετάδοσης είναι περίπου η ίδια. Για να αποκομιστούν τα οφέλη της μειωμένης απώλειας διαδρομής, ένας UE που είναι συνδεδεμένος σε ένα Macrocell προς την κατεύθυνση DL μπορεί να συνδεθεί σε ένα Small cell στο UL. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα μεγαλύτερο SNR βελτιώνει το περιβάλλον (λιγότερες παρεμβολές) όσο πιο κοντά είναι η σύνδεση BS. Επομένως, αυτό το όφελος είναι σημαντικό για την ισχύ αποστολής UE. Επιπλέον, η χαμηλότερη απώλεια διαδρομής επιτρέπει τη μείωση της ισχύος μετάδοσης μέσω διαχείρισης ισχύος για ένα καθορισμένο στόχο SNR. Λόγω πολλών συμπληρωματικών εφέ, το DUDe μειώνει επίσης τις παρεμβολές UL. Αρχικά, η παρεμβολή UL που προκαλείται από διαφορετικά BS μειώνεται κατά περίπου 2-3 dB ως αποτέλεσμα της μειωμένης ισχύος κατά τη μετάδοση που υποδεικνύεται στο [67]. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για UE που εμφανίζουν χαμηλό SINR κατά τη διάρκεια του UL, επειδή σε ένα γεμάτο δίκτυο, η παρεμβολή μειώνεται κατά 3dB, διπλασιάζοντας έτσι τη ροή δεδομένων. Η ευδιάκριτη εξισορρόπηση φορτίου στα UL και DL είναι ένα άλλο τεράστιο πλεονέκτημα του DUDe. Μπορεί να υπάρχουν διαφορετικά φορτία για τις κατευθύνσεις DL και UL σε ορισμένα BS. Δηλαδή, δεν συνιστάται η σύνδεση των ίδιων ζευγών UE και BS, και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ως αποτέλεσμα, ορισμένες από αυτές τις UE θα πρέπει να βασίζονται αναγκαστικά στο DUDe. Το DUDe βελτιστοποιεί επίσης την τοποθέτηση Smallcells μεταξύ Microcells και Macrocells επιτρέποντας τη σύνδεση UE σε Smallcells που δεν χρησιμοποιούνται συχνά [68].

Επιπλέον, το DUDe μειώνει τις παρεμβολές τόσο στο BS όσο και στο UE, επιτρέποντάς σας να επιλέξετε την κατάλληλη συσχέτιση. Η παρεμβολή κατά τη διάρκεια του UL σε ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων είναι ένα άθροισμα πολλών ξεχωριστών σημάτων που λαμβάνει ο UE από ένα συγκεκριμένο BS, ή από πολλαπλές κυψέλες (και ίσως τομείς της ίδιας κυψέλης). Το επίπεδο ελέγχου ισχύος, η απόσταση από το BS και τα βάρη προκωδικοποίησης UL επηρεάζουν όλες τις παρεμβολές που δημιουργούνται από καθένα από αυτά τα UE. Από την άλλη πλευρά, η παρεμβολή κατά τη διάρκεια του DL σε ένα συγκεκριμένο UE, σχετίζεται στενά με το μήκος του χώρου μεταξύ των BS, την ισχύ εκπομπής των BS και τα βάρη σχηματισμού δέσμης DL. Επιπλέον, ο σχεδόν πλήρης έλεγχος της φόρτωσης και του προγραμματισμού σε καθεμία από τις διαδικασίες προσθέτει στην απρόβλεπτη λειτουργία της παρεμβολής. Εξαιτίας όλων αυτών των παραγόντων, τα μέσα επίπεδα παρεμβολής στους πόρους DL και UL μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικά. Ως αποτέλεσμα, μια αποσυνδεδεμένη σύνδεση, που επιτρέπει στο UE (ή το δίκτυο) να αναζητά μεμονωμένα το βέλτιστο περιβάλλον παρεμβολών σε καθεμία από τις δύο συνδέσεις θα πρέπει να ξεπερνά έναν συζευγμένο συσχετισμό. Επιπλέον, το DUDe θα βοηθήσει πολύ την επικοινωνία Device-2-Device (D2D), η οποία θα πραγματοποιείται πλέον στις συχνότητες του φάσματος UL από το 3GPP Rel. 12. Το DUDe παρέχει μια καλύτερη ατμόσφαιρα για τους δέκτες D2D μειώνοντας την ισχύ μετάδοσης κατά τη διάρκεια του UL και μειώνοντας τις παρεμβολές, επιτρέποντας περισσότερες μεταδόσεις D2D.

Το DUDe είναι επίσης λιγότερο ακριβό, στην ανάπτυξη, από άλλες τεχνολογίες. Τα μόνα κριτήρια για τη χρήση του DUDe για τη δημιουργία δικτύου είναι μια σύνδεση με χαμηλή κα-

θυστέρηση (μεταξύ των BS) και η δυνατότητα αποστολής μηνυμάτων ελέγχου, υψηλής ταχύτητας, μεταξύ του DL BS και του UL BS. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες τεχνολογίες, η υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων του DUDe δεν χρειάζεται τεράστια χωρητικότητα σύνδεσης. Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι το DUDe δίνει την ίδια ταχύτητα UL με άλλες τεχνολογίες, ενώ έχει φθινό κόστος υλοποίησης. Η κάλυψη DL από Macrocells σε ένα τυπικό σενάριο HetNet, είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με ένα BS με απαιτήσεις χαμηλής ισχύος. Η διακύμανση στην εμβέλεια οφείλεται κυρίως στα κενά στην ισχύ μετάδοσης DL, καθώς και στις διαφορές στο ύψος του BS και στο κέρδος της κεραίας. Στο UL, από την άλλη, η μέγιστη ισχύς εκπομπής όλων των πομπών είναι περίπου ίση. Για να υπάρξει όφελος, από τη μειωμένη απώλεια διαδρομής, οι συσκευές που συνδέονται με Macrocells στο DL μπορούν να αντιστοιχιστούν με Smallcells στο UL. Το πιο σημαντικό, ο σχεδόν ανεξάρτητος προγραμματισμός σε DL και UL βελτιώνεται και οι τυχαίες παρεμβολές λόγω του φορτίου μειώνονται.

Μεγαλύτερο SINR, ταχύτερη φασματική απόδοση (Spectral Efficiency - SE) και υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων προκύπτουν από την αύξηση της απαιτούμενης λαμβανόμενης ισχύος και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, όπως προβλέπεται. Άλλες σκέψεις, ωστόσο, κάνουν πιο περίπλοκη την επίδραση του DUDe στην ταχύτητα UL. Θεωρούμε ένα HetNet που χρησιμοποιεί LTE και έχει μια μικρή επέκταση εύρους κελιών. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποστολή του UE σε ένα small cell, πράγμα που σημαίνει ότι συνδέεται με το SCBS, παρόλο που το επίπεδο ισχύος είναι χαμηλότερο από την ισχύ του MCBS. Η ιδανική πόλωση DL είναι περίπου 510 dB κατά μέσο όρο, ωστόσο με μείωση ή αποφυγή παρεμβολών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως και 1820 dB σε ορισμένες περιπτώσεις. Ακόμη και όταν πρόκειται για σύζευξη, η πόλωση DL μπορεί να παρέχει ανώτερες αμφίδρομες αλληλεπιδράσεις. Το φορτίο UL σε ένα συγκεκριμένο BS μπορεί να διαφέρει από το φορτίο DL στο συγκεκριμένο BS. Ως αποτέλεσμα, τουλάχιστον ορισμένοι UE θα πρέπει να χρησιμοποιούν απομονωμένη πρόσβαση, καθώς η σύνδεση UE στην ίδια ομάδα με το συγκεκριμένο BS στο DL και το UL δεν είναι η ιδανική επιλογή. Το UL μπορεί επίσης να ωθήσει περισσότερα UE από small cells χαμηλής χρήσης, καθώς το DUDe δεν περιορίζεται από παρεμβολές όπως το DL. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πιο αποτελεσματική χρήση πόρων και μεγαλύτερες ταχύτητες UL λόγω της βελτιωμένης κατανομής UE μεταξύ macro και small cells. Η δημιουργία ξεχωριστής σύνδεσης κινητού τηλεφώνου από το πραγματικό δίκτυο απαιτεί επαρκή συνδεσιμότητα και συνεργασία με άλλο BS. Η βασική απαίτηση του DUDe είναι τα DL και UL BS να έχουν σύνδεση χαμηλής καθυστέρησης, έτσι ώστε τα μηνύματα ελέγχου να μπορούν να αποστέλλονται γρήγορα. Το DUDe έχει αυστηρούς περιορισμούς χωρητικότητας backhaul, σε αντίθεση με τα πιο περίπλοκα CoMPs σχήματος, τα οποία απαιτούν BS και σύνδεση backhaul υψηλής απόδοσης για τη διευκόλυνση της γρήγορης ανταλλαγής δεδομένων. Με λίγα λόγια, το DUDe παρέχει τα ίδια οφέλη με τη συλλογική επεξεργασία UL με μειωμένο κόστος εγκατάστασης. Η σύγκριση κόστους ευνοεί το DUDe σε σύγκριση με τη χρήση MIMO ή πρόσθετου φάσματος για αύξηση της απόδοσης.

3.2.4 Υπηρεσίες και Εφαρμογές

Καθώς τα σήματα κατευθύνονται σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας μέσω συνδέσεων χαμηλής καθυστέρησης, η τρέχουσα τάση ανάπτυξης μερικώς ή πλήρως κεντρικών RAN προωθεί την αποσύνδεση DL και UL. Αναφέρεται σε μια τοπική υλοποίηση (για παράδειγμα, στο εσωτερικό) στην οποία όλα τα σημεία μετάδοσης που προσφέρουν υπηρεσίες μικρής εμβέλειας, όπως η μερική συγκέντρωση, να συνδέονται με μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας βασικής ζώνης.

Αυτή η προσέγγιση επεκτείνεται σε μια μεγαλύτερη περιοχή από μια εντελώς συγκεντρωτική, που μερικές φορές αναφέρεται ως CloudRAN. Πολλαπλές μονάδες που εκπέμπουν ραδιοσυχνότητες συνδεδεμένες με ένα συγκεκριμένο κεντρικό σύστημα επεξεργασίας βασικής ζώνης σε αυτήν την περιοχή.

Η σημασία του DUDe αναμένεται να εκτοξευθεί στα ύψη στο εγγύς μέλλον, καθώς το 5G μπορεί να έχει υπερ-πυκνές αναπτύξεις, με στόχο να ικανοποιήσει τις ανάγκες υψηλότερου ρυθμού. Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι το DUDe θα έχει ως αποτέλεσμα μειωμένα οφέλη σε απίστευτα υψηλές πυκνότητες κυψελών, επειδή σχεδόν όλες οι μονάδες θα προσπαθούσαν να συνδεθούν με τον πλησιέστερο SCBS τόσο για UL όσο και για DL. Αυτό είναι ακριβές μόνο με την προϋπόθεση ότι όλα τα small cells θα παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά ανάπτυξης, ισχύος και κυκλοφορίας. Οι μελλοντικές κυψελωτές εγκαταστάσεις θα οριστούν από έναν συνδυασμό κυψελών, εξοπλισμών, καταναλωτών και χειριστών, με διαφορετικά επίπεδα ισχύος, χρησιμοποιώντας συχνότητες που κυμαίνονται από κάτω από 1 GHz έως δεκάδες GHz. Θα παρέχουν υπηρεσίες για διάφορους τύπους κίνησης και βοηθώντας εγγενώς τις επικοινωνίες D2D, αποδεικνύοντας ότι αυτή η υπόθεση είναι μη ρεαλιστική, εννοώντας ότι δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλα τα small cells θα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά.

Για το 5G, θα αυξηθεί πολύ η έρευνα που θα γίνεται στον τομέα αυτό, και ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη του τομέα. Η ITU αρχίζει να εργάζεται με πρότυπα, ενώ οι πρώτες λειτουργίες 3GPP για την τυποποίηση 5G, ξεκίνησαν το τέλος του 2015, με ένα πείραμα μεγάλων διαστάσεων το 2018 και, είχαν ως απώτερο στόχο, τις εμπορικές επιχειρήσεις το 2020. Παρά το γεγονός ότι οποιαδήποτε αναφορά του 5G είναι υποθετική, σχετικά με τις ανάγκες ρυθμού δεδομένων, υπάρχει μια αυξανόμενη συναίνεση και αναμένονται σημαντικά τεχνολογικά στοιχεία του 5G, συμπεριλαμβανομένων των εξαιρετικά πυκνών BS, των μαζικών MIMO, της εισαγωγής φάσματος mmWave και μιας αρχιτεκτονικής που δεν περιστρέφονται γύρω από κύτταρα όπως αναφέρεται στο [69] και τονίζεται περαιτέρω στο [70].

Μια βασική πρόκληση είναι εάν μια απλή εξέλιξη των σημερινών αρχιτεκτονικών σχεδίων 3GPP, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα επιτρέψει την εισαγωγή της τεχνολογίας DUDe σε μελλοντικές διαφορετικές αναπτύξεις 5G, αποτελεσματικά. Επισημάναμε τι μπορεί να κάνει επί του παρόντος η αρχιτεκτονική LTE-A για να επιτρέψει την εγκατάσταση του DUDe, όταν πολλά BS συνδέονται σε μια συγκεκριμένη μονάδα ραδιοφώνου μέσω οπτικών ινών. Καλύψαμε ότι η υποστήριξη DUDe σε προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας περιορίζεται σε ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων σε περίπτωση που χωριστά BS συνδέονται σε ξεχωριστές ραδιοφωνικές μονάδες. Οι μελλοντικές εκδόσεις 3GPP 5G πρέπει να επιτρέπουν τη διπλή σύνδεση στην ίδια συχνότητα, η οποία – παρά τις συνέπειες για τον έλεγχο πόρων και παρεμβολών – θα πρέπει να είναι απλή στην εφαρμογή και δεν θεωρείται σημαντική αναβάθμιση.

Κεφάλαιο 4

Μηχανική Μάθηση

4.1 Ιστορική Αναδρομή

Το ML είναι βασικό συστατικό της τεχνολογίας τεχνητής νοημοσύνης (AI). Παρά το γεγονός ότι αποτελεί υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης, το ML αναφέρεται συνήθως ως τεχνητή νοημοσύνη λόγω των ικανοτήτων εκπαίδευσης και κρίσης της. Λαμβάνοντας υπόψη τις υπηρεσίες cloud και το ηλεκτρονικό εμπόριο, καθώς και πολλές άλλες τεχνολογίες της τωρινής γενιάς, η μηχανική μάθηση έχει αναδειχθεί ως μια ζωτική απάντηση. Τα μοντέλα ML αναπτύσσουν ένα μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στα διαθέσιμα δεδομένα (επίσης γνωστά ως "δεδομένα εκπαίδευσης") για να κάνει συγκεκριμένες επιλογές ή/και πράξεις, χωρίς να χρειάζεται να λένε στο μοντέλο τι να κάνει, εκ των προτέρων. Σε κάποιο βαθμό, το ML αναπτύσσεται από μια δομή μοντέλου εγκεφαλικών κυττάρων. Ο Donald Hebb καθιέρωσε το παράδειγμα σε μια δημοσίευση του 1949 [26]. Όταν εφαρμόζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τεχνητούς νευρώνες, η προσέγγιση του Hebb θεωρείται ως μια μέθοδος αλλαγής των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των perceptrons (γνωστά και ως κόμβοι) και των προσαρμογών στα αισθητήρια κύτταρα. Όταν δύο νευρώνες/κόμβοι διεγείρονται ταυτόχρονα, ο δεσμός τους ενισχύεται, ενώ όταν ενεργοποιούνται ξεχωριστά, εξασθενεί. Ο όρος «βάρος» χαρακτηρίζει αλληλεπιδράσεις όπως αυτές και οι κόμβοι/νευρώνες με σημαντικά θετικά βάρη έχουν τόσο θετικές όσο και αρνητικές τάσεις.

Ο Άρθουρ Σάμουελ της IBM (International Business Machines) κατασκεύασε λογισμικό υπολογιστή που έπαιζε πούλια τη δεκαετία του 1950 [27]. Επειδή το πρόγραμμα είχε μόνο λίγη ποσότητα μνήμης υπολογιστή, ο Samuel χρησιμοποίησε μια τεχνική γνωστή και ως pruning, και συγκεκριμένα την τεχνική άλφα-βήτα pruning. Στο σχέδιό του συμπεριέλαβε ένα σύστημα βαθμολογίας ανάλογα με την τοποθέτηση των εξαρτημάτων στο τραπέζι στο σχέδιό του. Μια προσέγγιση ελαχίστου - μεγίστου (min - max), η οποία τελικά εξελίχθηκε στον αλγόριθμο minimax, χρησιμοποιείται από το λογισμικό για να καθορίσει την επακόλουθη δράση του. Ο όρος «μηχανική μάθηση» επινοήθηκε από τον Άρθουρ Σάμουελ το 1959 [28]. Ο Frank Rosenblatt του Cornell Aeronautical Laboratory [29] επινόησε το perceptron το 1957, συνδυάζοντας τη θεωρία του Donald Hebb για την επαφή των νευρώνων με τις τεχνικές ML του Arthur Samuel. Αρχικά, το perceptron θεωρήθηκε ως ένας μηχανισμός και όχι ως ένα κομμάτι λογισμικού. Το πρόγραμμα τοποθετήθηκε σε ένα εξατομικευμένο μηχάνημα που ονομάζεται Perceptron Mark 1, το οποίο προοριζόταν για μηχανική όραση και σχεδιάστηκε αρχικά για το IBM 704. Ο «πρώτος επιτυ-

χημένος νευροϋπολογιστής», το perceptron Mark I, είχε προκαλέσει σοβαρές ανησυχίες αλλά επίσης, άφησε και στόχους που δεν επιτεύχθηκαν. Η μέθοδος του πλησιέστερου γείτονα, που ήταν η αρχή της στοιχειώδους αναγνώρισης προτύπων, δημιουργήθηκε το 1967 [30]. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για τη χάραξη μονοπατιών και ήταν από τα παλαιότερα προγράμματα, για την αντιμετώπιση του προβλήματος του προσδιορισμού της βέλτιστης διαδρομής, για τους ταξιδιώτες πωλητές. Ο «κανόνας του πλησιέστερου γείτονα» λέγεται ότι επινοήθηκε από τον Marcello Pelillo [31]. Αυτός, με τη σειρά του, αποδίδει τα εύσημα στο έγγραφο Cover and Hart του 1967 [30].

Στη δεκαετία του 1960, η ανακάλυψη και η εφαρμογή πολύ-επίπεδων στην έρευνα νευρωνικών δικτύων εγκαινίασε μια νέα εποχή. Ανακαλύφθηκε ότι ένα perceptron με δύο ή περισσότερα στρώματα είχε σημαντικά μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ από ένα perceptron μονής στρώσης. Άλλες μορφές νευρωνικών δικτύων αναπτύχθηκαν αφού το perceptron άνοιξε την πόρτα στα «στρώματα» (layers) στα δίκτυα και ο αριθμός των νευρωνικών δικτύων εξακολουθεί να αυξάνεται. Η χρήση πολλών επιπέδων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νευρωνικών δικτύων με προς τα εμπρός διάδοση (feedforward), αλλά και αντίστροφης, προς τα πίσω δηλαδή, διάδοσης (backpropagation). Η προς τα πίσω διάδοση [32] είναι μια προσέγγιση της δεκαετίας του 1970 που επιτρέπει σε ένα δίκτυο να προσαρμοστεί στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον τροποποιώντας τα κρυφά στρώματα νευρώνων/κόμβων του. Περιλαμβάνει "αντίστροφη διάδοση σφαλμάτων", η οποία περιλαμβάνει τον χειρισμό ενός λάθους στην έξοδο και στη συνέχεια τη διάδοσή του προς τα πίσω, μέσω των επιπέδων του δικτύου, για μαθησιακούς σκοπούς. Η backpropagation χρησιμοποιείται τώρα για την εκπαίδευση των βαθιών νευρωνικών δικτύων (Deep Neural Networks -DNNs). Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (Artificial Neural Network - ANN) έχει κρυφά στρώματα που του επιτρέπουν να ανταποκρίνεται σε πιο σύνθετες εργασίες, από τα perceptrons. Στα νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιούνται επίπεδα εισόδου και εξόδου και συχνά προστίθεται ένα κρυφό στρώμα (ή στρώματα) για να μετατραπεί η είσοδος σε δεδομένα που μπορεί να χρησιμοποιήσει το επίπεδο εξόδου. Τα κρυφά επίπεδα είναι εξαιρετικά για τον εντοπισμό μοτίβων που είναι πολύ περίπλοκα για να τα παρατηρήσει ένας άνθρωπος προγραμματιστής. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η έρευνα για την τεχνητή νοημοσύνη επικεντρώθηκε σε λογικές στρατηγικές βασισμένες στη γνώση και όχι σε αλγόριθμους. Επιπλέον, η έρευνα νευρωνικών δικτύων είχε εγκαταλειφθεί από επαγγελματίες της επιστήμης των υπολογιστών και της τεχνητής νοημοσύνης. Ως αποτέλεσμα, δημιουργήθηκε ένα ρήγμα μεταξύ AI και ML. Το ML, το οποίο απασχολούσε μεγάλο αριθμό ερευνητών και τεχνικών, χωρίστηκε στο δικό της πεδίο και πολεμούσε για περισσότερο από μια δεκαετία. Η εστίαση του κλάδου έχει μετατοπιστεί από την εκπαίδευση τεχνητής νοημοσύνης στις πρακτικές προκλήσεις παροχής υπηρεσιών. Μετατόπισε την προσοχή του από έννοιες εμπνευσμένες από την τεχνητή νοημοσύνη στη θεωρία πιθανοτήτων και τις στατιστικές προσεγγίσεις και στρατηγικές. Το "boosting", γνωστό και ως αλγόριθμοι ενίσχυσης, ήταν ένα σημαντικό ορόσημο στην πρόοδο της ML. Κατά τη διάρκεια της εποπτευόμενης μάθησης, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι ενίσχυσης, οι οποίοι περιλαμβάνουν τεχνικές ML που μετατρέπουν τους αδύναμους μαθητές σε δυνατούς μαθητές, για την ελαχιστοποίηση της προκατάληψης. Στην εργασία του το 1990 «The Strength of Weak Learnability», ο Robert Schapire παρουσίασε για πρώτη φορά την έννοια της ενίσχυσης. «Μια ομάδα αδύναμων μαθητών μπορεί να αναπτύξει έναν μόνο σπουδαίο μαθητή», λέει ο Schapire.

Η πλειοψηφία των αλγορίθμων ενίσχυσης αποτελείται από μια ακολουθία αδύναμων ταξινομητών, που διδάσκονται επανειλημμένα, προτού συνδυαστούν σε έναν τελικό ισχυρό ταξινομητή. Γενικά, σταθμίζονται με τρόπο που καθορίζει πόσο ακριβείς είναι οι αδύναμοι μαθητές μετά την εισαγωγή τους. Στη συνέχεια, τα βάρη των δεδομένων "ξανασταθμίζονται". Τα δεδο-

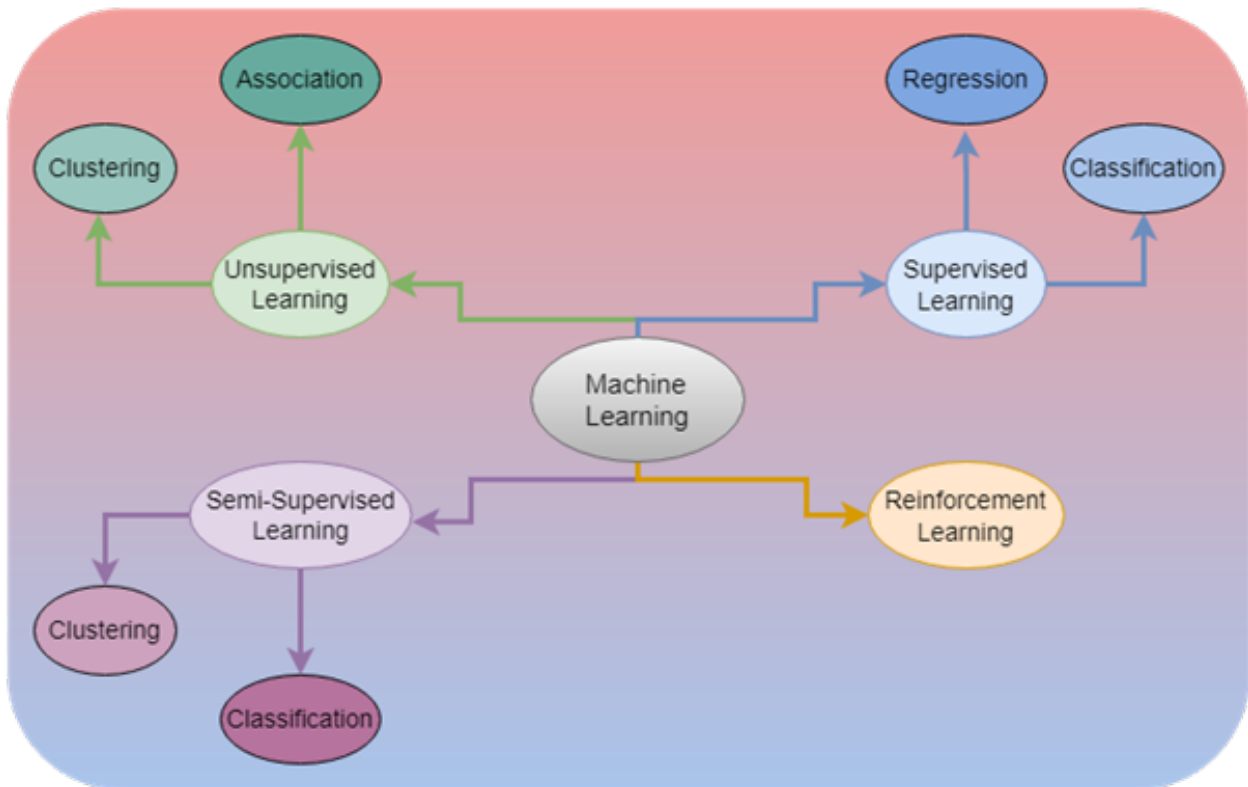
μένα εισόδου που κατηγοριοποιούνται λανθασμένα αποκτούν βάρος, ενώ τα δεδομένα εισόδου που ταξινομούνται σωστά, χάνουν βάρος. Η “μέθοδος” που χρησιμοποιείται στη στάθμιση των σημείων δεδομένων εκπαίδευσης είναι η θεμελιώδης διάκριση μεταξύ των διαφόρων μορφών αλγορίθμων ενίσχυσης. Ο AdaBoost είναι ένας πολύ γνωστός αλγόριθμος ML που έχει ιστορική σημασία και είναι ο πρώτος αλγόριθμος που λειτουργεί με αδύναμους μαθητές. Οι BrownBoost, LPBoost, MadaBoost, TotalBoost, XGBoost και LogitBoost είναι μερικοί από τους πιο σύγχρονους αλγόριθμους. Χρησιμοποιώντας τον όρο μακροπρόθεσμη βραχυπρόθεσμη μνήμη (Long Short Term Memory - LSTM), αναφερόμαστε σε ένα μοντέλο νευρωνικών δικτύων που εισήχθη από τους Jürgen Schmidhuber και Sepp Hochreiter το 1997, και χρησιμοποιείται στη βαθιά μάθηση. Το LSTM μπορεί να μάθει εργασίες που απαιτούν ανάκληση χιλιάδων διακριτών βημάτων στο παρελθόν, κάτι που είναι κρίσιμο για την αναγνώριση φωνής. Η μακροπρόθεσμη βραχυπρόθεσμη μνήμη άρχισε να ξεπερνά τα πιο τυπικά συστήματα αναγνώρισης φωνής περίπου το 2007. Το 2006, το Facial Recognition Grand Challenge του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογίας, αξιολόγησε δημοφιλείς αλγόριθμους αναγνώρισης προσώπου. Σαρώσεις προσώπου σε τρεις διαστάσεις, φωτογραφίες ίριδας και φωτογραφίες προσώπου υψηλής ανάλυσης τέθηκαν όλα σε δοκιμή. Σύμφωνα με τα ευρήματά τους, οι νέοι αλγόριθμοι ήταν δέκα φορές πιο ακριβείς από εκείνους του 2002 και 100 φορές πιο ακριβείς από εκείνους του 1995. Στην αναγνώριση προσώπου, αρκετοί από τους υπολογιστές ξεπέρασαν τις επιδόσεις των ανθρώπων και ήταν σε θέση να διακρίνουν πανομοιότυπα δίδυμα. Το DeepFace, ένας αλγόριθμος του Facebook ικανός να ανιχνεύει ή να επαληθεύει πρόσωπα σε εικόνες με την ίδια ακρίβεια με τους ανθρώπους, δημιουργήθηκε το 2014. Μερικές από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις τεχνολογίας τροφοδοτούνται επί του παρόντος από το ML. Το ML έχει δημιουργήσει μια πληθώρα νέων εννοιών και τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένης της εποπτευόμενης και χωρίς επίβλεψη μάθησης, νέων αλγορίθμων ρομπότ, του Ίντερνερτ των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), εργαλείων ανάλυσης, chatbots και πολλά άλλα. Στη συνεχή εκμάθησή τους, τα μοντέλα ML έχουν γίνει απίστευτα ευέλικτα, πράγμα που σημαίνει ότι όσο περισσότερο τρέχουν, τόσο πιο ακριβή γίνονται. Ο συνδυασμός μεθόδων ML με τη σύγχρονη τεχνολογία υπολογιστών βελτιώνει την επεκτασιμότητα και την αποτελεσματικότητα.

4.2 Προσεγγίσεις

Υπάρχει μια πληθώρα προκλήσεων που μπορούμε να αντιμετωπίσουμε χρησιμοποιώντας μια ποικιλία προσεγγίσεων. Η τεχνογνωσία ενός έμπειρου επιστήμονα τεχνητής νοημοσύνης που ειδικεύεται σε ένα θέμα μπορεί να είναι σε μεγάλο βαθμό άχρηστη σε ένα άλλο. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη δομή των διαφόρων προκλήσεων μηχανικής μάθησης. Παρά το γεγονός ότι το εύρος των προκλήσεων μηχανικής μάθησης είναι πολύ εκτεταμένο για να καλυφθεί σε μία μόνο παράγραφο, μπορούμε να τις κατηγοριοποιήσουμε σε τέσσερις κύριες μεθόδους εκμάθησης:

1. Μη-εποπτευόμενη Μάθηση
2. Εποπτευόμενη Μάθηση
3. Ημι-εποπτευόμενη Μάθηση
4. Ενισχυτική Μάθηση

Ο τύπος του μηχανισμού ανάδρασης για εκπαίδευση, χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των καλύτερων τεχνικών μηχανικής εκμάθησης. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των περισσότερων προκλήσεων μηχανικής μάθησης. Ωστόσο, πολύπλοκες προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης, οι οποίες δεν ανήκουν σε καμία από τις προαναφερθείσες μεθοδολογίες, ενδέχεται να εξακολουθούν να αντιμετωπίζονται. Αυτή η ταξινόμηση είναι σημαντική γιατί δίνει τη δυνατότητα στους επαγγελματίες να κατανοήσουν αμέσως τα χαρακτηριστικά ενός ζητήματος που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν στο μέλλον, να εξετάσουν τις πηγές τους και να επινοήσουν μια βιώσιμη λύση.



Σχήμα 4.1: Οι κύριες προσεγγίσεις της Μηχανικής Μάθησης.

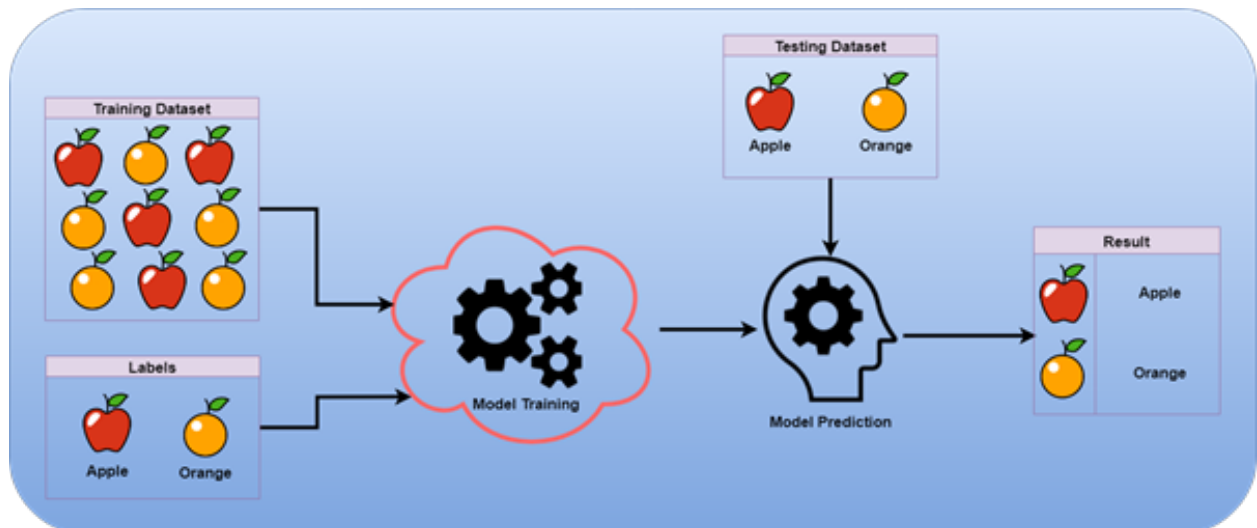
4.2.1 Εποπτευόμενη Μάθηση

Η διαδικασία ML της εκπαίδευσης ενός προγράμματος που μεταφράζει μια είσοδο σε μια έξοδο που βασίζεται σε ζεύγη δειγμάτων εισόδου-εξόδου είναι γνωστή ως εποπτευόμενη μάθηση (Supervised Learning - SL) [32]. Χρησιμοποιεί επισημασμένα δεδομένα εκπαίδευσης και ένα σύνολο περιπτώσεων εκπαίδευσης για την εξαγωγή μιας συνάρτησης. Όταν ένα σύνολο δεδομένων περιέχει δείγματα των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εποπτευόμενη μέθοδος εκμάθησης. Αυτό το επισημασμένο σύνολο δεδομένων είναι γνωστό ως "δεδομένα με ετικέτα" ή "δεδομένα εκπαίδευσης" με βάση τις περιστάσεις. Για να το θέσουμε σε μια μαθηματική προοπτική, σύμφωνα με το [33], δεδομένου ενός εκπαιδευτικού συνόλου ζευγών, ο στόχος είναι να ανακαλύψουμε μια αντιστοιχία από το x στο y , (x_i, y_i) . Οι ετικέτες ή οι στόχοι των δειγμάτων x_i αναφέρονται ως $y_i \in Y$. Εάν οι ετικέτες είναι αριθμητικές τιμές, το διάνυσμα στήλης των ετικετών είναι $y = (y_i)_{i \in [n]}^T$. Ένα κοινό κριτήριο είναι ότι τα ζεύγη (x_i, y_i) επιλέγονται ανεξάρτητα και κατανομούνται πανομοιότυπα από μια κατανομή που εκτείνεται στην

περιοχή μεταξύ $X \times Y$. Επειδή η ακρίβεια πρόβλεψης μιας χαρτογράφησης σε παραδείγματα δοκιμής μπορεί να εξεταστεί, ο στόχος είναι καλά καθορισμένος. Η προσέγγιση ονομάζεται παλινδρόμηση εάν $y = \mathbb{R}$ (ή, ευρύτερα, όταν οι ετικέτες είναι συνεχείς). Από την άλλη πλευρά, όταν το y παίρνει τιμές από ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών, αναφερόμαστε σε μια ρύθμιση ταξινόμησης (διακριτές ετικέτες). Για το SL, υπάρχουν δύο τύποι αλγορίθμων. Οι γενικές μέθοδοι χρησιμοποιούν μια διαδικασία εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη για να προσπαθήσουν να μιμηθούν την πυκνότητα τάξης $p(x|y)$. Το θεώρημα Bayes μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί μια πυκνότητα πρόβλεψης: $p(y|x) = \frac{p(x|y)p(y)}{\int_y p(x|y)p(y)dy}$. Η κοινή πυκνότητα του συνόλου δεδομένων είναι $p(x|y)p(y) = p(x,y)$, από την οποία μπορούν να σχηματιστούν ζεύγη (x_i, y_i) . Οι διακριτικοί αλγόριθμοι επικεντρώνονται στον υπολογισμό του $p(y|x)$ αντί να προσπαθούν να προβλέψουν πώς σχηματίστηκαν τα x_i . Το SVM είναι ένα παράδειγμα μιας διακριτικής μεθόδου που περιορίζεται στην προσομοίωση εάν το $p(y|x)$ είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από 0,5. Τα μοντέλα διάκρισης, έχει προταθεί, συνδέονται στενότερα με τον στόχο της εποπτευόμενης μάθησης και, ως εκ τούτου, είναι πιο αποτελεσματικά.

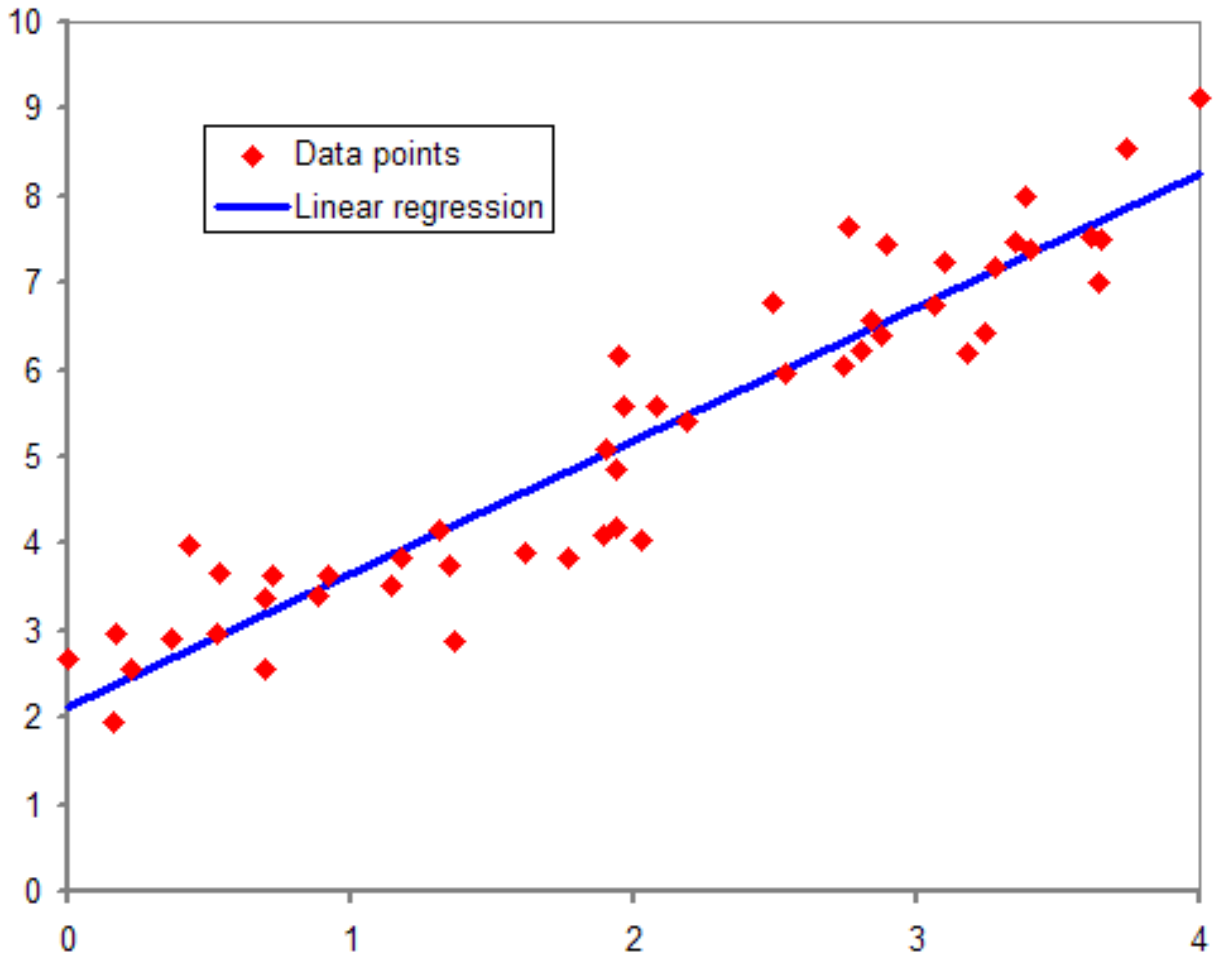
Δύο είναι τα βασικά προβλήματα, που για την επίλυσή τους εφαρμόζεται γενικά η εποπτευόμενη μάθηση. Αυτά είναι:

1. Προβλήματα ταξινόμησης: Τα μοντέλα εκπαιδεύονται για να προβλέψουν την κλάση από την οποία προκύπτει ένα στιγμιότυπο από τις μεταβλητές εισόδου του. Το μοντέλο παρουσιάζεται με πλήθος περιπτώσεων επισημασμένων δεδομένων, κατά το στάδιο της εκπαίδευσης. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει αποτελεσματικά το βιολογικό φύλο ενός δυνητικού πελάτη σύμφωνα με τον τρόπο που επιλέγει να ξοδέψει τα χρήματά του, όταν δει εκατοντάδες πελάτες με τις συνήθειες δαπανών τους και λεπτομέρειες για το φύλο τους. Ο όρος «Διαδική Ταξινόμηση» περιλαμβάνει τη διαίρεση μιας συλλογής δεδομένων, σε μια ή την άλλη κατηγορία, π.χ. τη διαίρεση των ανθρώπων σε γυναίκες ή άνδρες. Ένα άλλο παράδειγμα μπορεί να φανεί στο Σχήμα 4.2, όπου ένα μοντέλο φαίνεται να εκπαιδεύεται, χρησιμοποιώντας, για να κατηγοριοποιήσει μια δεδομένη εικόνα ενός φρούτου, σε μία από τις δύο κατηγορίες, είτε μήλα είτε πορτοκάλια. Το μοντέλο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων με διάφορες μορφές της επιθυμητής εξόδου, μαζί με μια ετικέτα για κάθε παρουσία του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης. Η ταξινόμηση πολλαπλών κλάσεων, αντίθετα, χρησιμοποιείται εάν υπάρχουν περισσότερες από δύο κατηγορίες, για την επιλογή των περιπτώσεων εισαγωγής. Η ταξινόμηση πολλαπλών ετικετών θα χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, για την αναγνώριση και τον εντοπισμό χειρόγραφων χαρακτήρων και αριθμών που εμφανίζονται χρησιμοποιώντας μια εικόνα. Η ταξινόμηση πολλαπλών κλάσεων, αντίθετα, χρησιμοποιείται για την επιλογή περιπτώσεων εισόδου όταν υπάρχουν περισσότερες από δύο κατηγορίες. Ο σκοπός της ταξινόμησης πολλαπλών ετικετών θα μπορούσε να είναι ο εντοπισμός και ο εντοπισμός χειρόγραφων χαρακτήρων και αριθμών που εμφανίζονται χρησιμοποιώντας μια εικόνα.



Σχήμα 4.2: Πρόβλημα ταξινόμησης στην εποπτευόμενη μάθηση.

2. Προβλήματα παλινδρόμησης: Τα ζητήματα παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται για να ληφθεί ένα αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ πολλών μεταβλητών εισόδου και της επιδιωκόμενης εξόδου. Ο βαθμός σχέσης μεταξύ, των ετικετών της τάξης και των άλλων παραγόντων είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στην τιμή πρόβλεψης. Ως αποτέλεσμα πρόβλεψης, η παλινδρόμηση χρησιμοποιείται συνήθως με συνεχείς μεταβλητές. Ο συνολικός σκοπός του αλγόριθμου παλινδρόμησης είναι να σχεδιάσει την καλύτερη γραμμή ή καμπύλη μεταξύ των εισόδων. Η διακύμανση, η μεροληψία και το σφάλμα είναι οι τρεις κύριοι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του εκπαιδευμένου μοντέλου παλινδρόμησης. Η υπερπροσαρμογή συμβαίνει όταν η απόκλιση είναι μεγάλη και η υποπροσαρμογή συμβαίνει όταν η μεροληψία είναι ισχυρή. Μια πρόκληση παλινδρόμησης, για παράδειγμα, θα μπορούσε να περιλαμβάνει την πρόβλεψη, του ποσού των κεφαλαίων που θα ξοδέψει ένας πελάτης, με βάση την προηγούμενη γνώση. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Τυπικό παράδειγμα παλινδρόμησης.

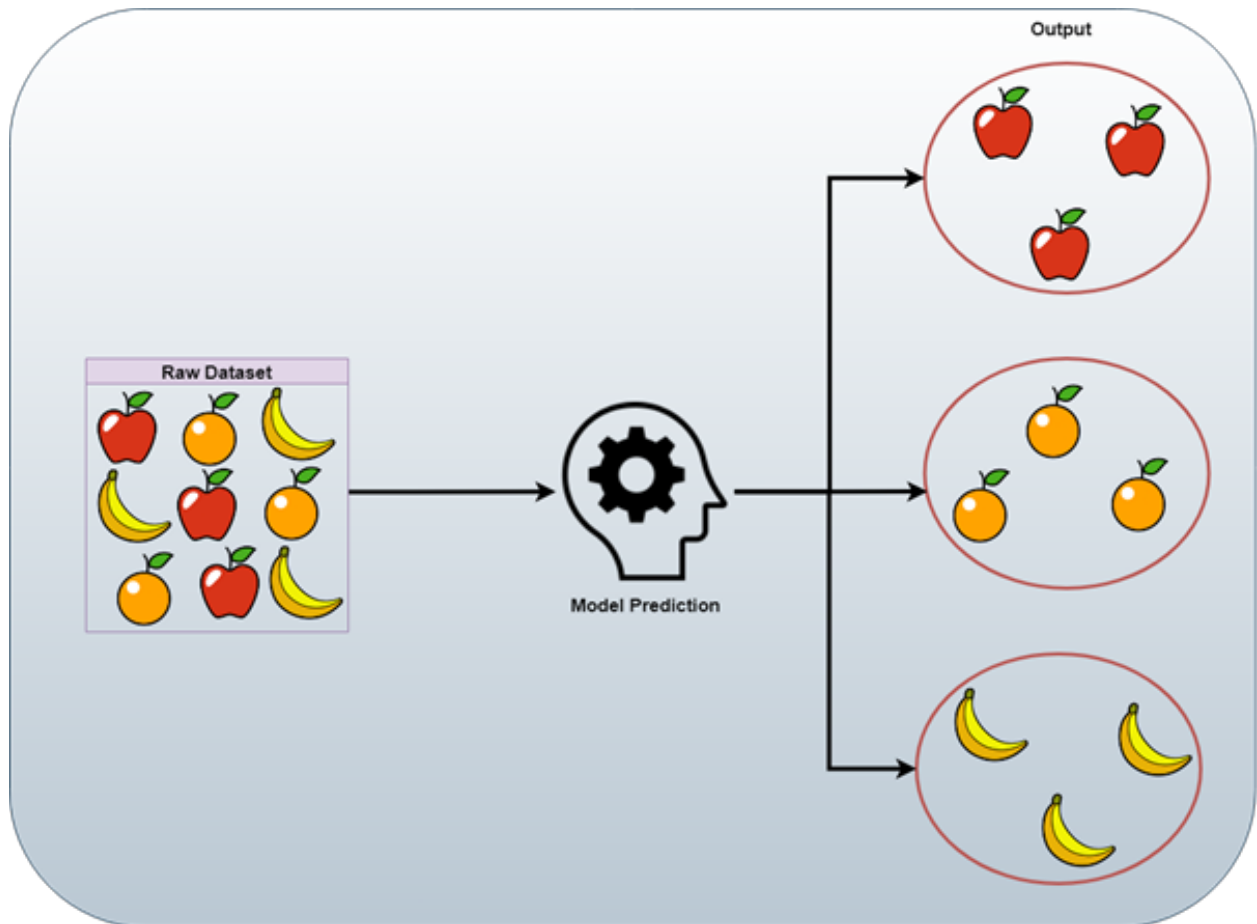
4.2.2 Μη-Εποπτευόμενη Μάθηση

Η μη εποπτευόμενη μάθηση (Unsupervised Learning - UL) είναι ένα είδος ML που αναζητά μια συλλογή δεδομένων για προηγούμενα παρατηρήσιμα μοτίβα χωρίς προϋπάρχουσες ετικέτες και μικρή ανθρώπινη επίβλεψη. Τα δεδομένα εκπαίδευσης σε ορισμένες εργασίες αναγνώρισης προτύπων, αποτελούνται από μια συλλογή μεταβλητών εισόδου x χωρίς αντίστοιχες τιμές στόχου. Ο σκοπός προβλημάτων UL όπως αυτά θα μπορούσε να είναι, η εύρεση ομάδων συγκρίσιμων περιπτώσεων στο σύνολο δεδομένων ή ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο τα δεδομένα διαδίδονται στο διάστημα [33]. Με απλούστερους όρους, οι αληθινές ετικέτες τάξης δεν δίνονται για κάθε περίπτωση σε ένα χώρο n -δειγματοληψίας x_1 έως x_n , με αποτέλεσμα αυτό που είναι γνωστό ως: μάθηση χωρίς δάσκαλο. Με πιο μαθηματικούς όρους όπως αναφέρεται στο [33], έστω ότι το $X = (x_1, \dots, x_n)$ αντιπροσωπεύει μια συλλογή από n δείγματα (ή σημεία), με $x_i \in X$ για όλα τα $i \in [n] := 1, \dots, n$. Τα σημεία συνήθως θεωρούνται ότι σχεδιάζονται ανεξάρτητα και κατανομούνται πανομοιότυπα από μια κοινή κατανομή στο X . Το $(n \times d)$ -μητρώο $X = (x_i^T)_{i \in [n]}^T$ που έχει τις πληροφορίες καθώς οι σειρές του είναι συνήθως κατάλληλες για αναγνώριση. Η μη εποπτευόμενη μάθηση στοχεύει στην ανακάλυψη ουσιαστικού μοτίβου στα

δεδομένα X . Η μη εποπτευόμενη μάθηση, έχει προταθεί, αφορά κυρίως τον υπολογισμό μιας κατανομής που είναι πιθανό να παρήγαγε το X .

Δύο είναι τα βασικά προβλήματα, που για την επίλυσή τους εφαρμόζεται γενικά η μη-εποπτευόμενη μάθηση. Αυτά είναι:

1. Προβλήματα Ομαδοποίησης: Το UL χρησιμοποιείται συνήθως στον αλγόριθμο συσταδιοποίησης (clustering). Η συσταδιοποίηση είναι ένας τρόπος ομαδοποίησης ατόμων, που παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά, σε κάτι που αναφέρεται ως συστάδα (cluster). Τα μέλη που ανήκουν σε ένα cluster μοιάζουν προφανώς περισσότερο μεταξύ τους παρά με μέλη άλλων συστάδων. Ως αποτέλεσμα, ένα cluster είναι μια συλλογή πραγμάτων που είναι «παρόμοια» μεταξύ τους αλλά «ανόμοια» με αντικείμενα από άλλες συστάδες. Υπάρχουν πολλές τεχνικές συσταδιοποίησης. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι η συσταδιοποίηση είναι: «Η πράξη της ομαδοποίησης αντικειμένων σε ομάδες των οποίων οι συμμετέχοντες σχετίζονται με κάποιο τρόπο», σύμφωνα με έναν ευρύ ορισμό της. Και λέγοντας το παραπάνω, κατά κάποιο τρόπο, αυτό στο οποίο αναφερόμαστε είναι μια μορφή μέτρησης ομοιότητας που βασίζεται σε συγκεκριμένα κριτήρια, συμπεριλαμβανομένης μιας τέτοιας Ευκλείδειας ή πιθανολογικής απόστασης. Το UL μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση βιοπληροφορικής ανάλυσης αλληλουχίας, γενετικής ομαδοποίησης, εξόρυξης προτύπων και όρασης υπολογιστή, μεταξύ άλλων προβλημάτων ομαδοποίησης. Αλλά πώς ξέρουμε ότι εκτελέσαμε, μια καλή ομαδοποίηση; Μπορεί να αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει σαφές κριτήριο «καλύτερου» που να μην σχετίζεται με τον τελικό στόχο της ομαδοποίησης. Ως εκ τούτου, είναι ευθύνη του χρήστη να παρέχει αυτήν την προϋπόθεση προκειμένου η έξοδος ομαδοποίησης να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του. Ένα παράδειγμα συσταδιοποίησης, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Συσταδιοποίηση στη Μηχανική Μάθηση.

2. Κανόνας Συσχέτισης: Ο κανόνας συσχέτισης είναι μια περιγραφική στρατηγική, όχι μια προγνωστική, που χρησιμοποιείται συνήθως για την εύρεση ενδιαφέρουσες σχέσεις σε τεράστια δεδομένα. Ο συσχετισμός αναπαρίσταται συνήθως ως μια ακολουθία κανόνων ή μια ομάδα από συχνά εμφανιζόμενες πλειάδες. Η εξόρυξη κανόνων συσχέτισης είναι μια τεχνική για την ανακάλυψη νέων και συναρπαστικών συνδέσεων μεταξύ στοιχείων σε μια ομάδα, όπως ένα κοινό μοτίβο σε δεδομένα συναλλαγών ή μια σχεσιακή βάση δεδομένων. Η Ανάλυση Καλαθιού Αγοράς (ποια προϊόντα αγοράζονται από κοινού), η Ομαδοποίηση πελατών στη Λιανική (σε ποια μαγαζιά, οι άνθρωποι τείνουν να ψωνίζουν μεταξύ τους), η ομαδοποίηση τιμών, οι αποφάσεις ποικιλίας, οι πολλαπλές πωλήσεις και άλλες εφαρμογές είναι δημοφιλείς. Αυτή θεωρείται μια πιο περίπλοκη εκδοχή της κατάστασης «αν αυτό, τότε εκείνο».

4.2.3 Ημι-Εποπτευόμενη Μάθηση

Η ημι-εποπτευόμενη μάθηση (Semi-Supervised Learning - SSL) είναι ένας τύπος ML που παρέχει έναν συνδυασμό SL και UL. Όταν έχουμε περιορισμένο αριθμό δεδομένων με ετικέτα, αλλά έναν τεράστιο αριθμό δεδομένων χωρίς ετικέτα για εκπαίδευση, μια στρατηγική SSL είναι χρήσιμη. Ο μικρός αριθμός δεδομένων ετικετών μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη βοήθεια εποπτευόμενων λειτουργιών εκμάθησης. Οι ιδιότητες UL, από την άλλη πλευρά, μπορούν να επιτρέψουν στον χρήστη να χρησιμοποιήσει έναν σημαντικό αριθμό δεδομένων χωρίς ετικέτα. Το SSL είναι

μια τεχνική ML που περιλαμβάνει εκπαίδευση χρησιμοποιώντας μια μικρή ποσότητα δεδομένων με ετικέτα και μια μεγάλη ποσότητα δεδομένων χωρίς ετικέτα. Πολλοί αναρωτιούνται εάν το SSL έχει πρακτικές χρήσεις. Ενώ το SL είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος εκπαίδευσης μοντέλων, η κατηγοριοποίηση δεδομένων για SL είναι μια χρονοβόρα και δαπανηρή μέθοδος. Ένας μεγάλος όγκος δεδομένων, από την άλλη πλευρά, μπορεί να είναι πολύτιμος ακόμα κι αν δεν είναι ταξινομημένος. Το SSL μπορεί έτσι να γίνει μια από τις πιο κατάλληλες και γόνιμες στρατηγικές ML στην πραγματική ζωή, εάν γίνει σωστά. Συνήθως ξεκινά με τη συλλογή δεδομένων χωρίς ετικέτα. Στη συνέχεια, το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση των πρόσφατα ομαδοποιημένων δεδομένων χωρίς ετικέτα. Τέλος, οι αλγόριθμοι ML αξιολογούνται με ένα μεγάλο ποσοστό δεδομένων που έχουν πλέον επισημανθεί. Τα μοντέλα SSL μπορεί να είναι αρκετά τρομερά, καθώς μπορούν να επωφεληθούν από τεράστιες ποσότητες δεδομένων. Τα μοντέλα είναι συνήθως ένας συνδυασμός τροποποιημένων και τροποποιημένων εκδόσεων των αρχικών προσεγγίσεων μηχανικής εκμάθησης. Και πάλι, με πιο μαθηματικούς όρους, το [33] δηλώνει ότι, το σύνολο δεδομένων $X = (x_i) (i \in [n])$ μπορεί να διαχωριστεί σε δύο συνιστώσες στην ημι-εποπτευόμενη μάθηση: τα σημεία $X_l := (x_1, \dots, x_l)$, για τις οποίες παρέχονται ετικέτες $Y_l := (y_1, \dots, y_l)$ και τα σημεία $X_u := (x_{l+1}, \dots, x_{l+u})$, για τα οποία οι ετικέτες είναι άγνωστες. Αυτό είναι ένα παράδειγμα τυπικού ημι-εποπτευόμενου μαθησιακού περιβάλλοντος. Αυτή η προσέγγιση βοήθησε στην αναγνώριση φωνής, στην ταξινόμηση πληροφοριών και στην ταξινόμηση της αλληλουχίας πρωτεϊνών. Και οι δύο αυτές ομάδες διαθέτουν πολλές πληροφορίες χωρίς ετικέτα και λίγη ποσότητα πληροφοριών με ετικέτα, επομένως είναι ισοδύναμες.

4.2.4 Ενισχυτική Μάθηση

Η Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning – RL) είναι μια από τις πιο κοινές προσεγγίσεις στη μηχανική μάθηση που εστιάζει στον καθορισμό των καλύτερων ενεργειών που πρέπει να κάνει ένας πράκτορας, με κίνητρο τη βελτιστοποίηση, σε ένα δεδομένο περιβάλλον. Η μηχανή μαθαίνει να βελτιώνει τις δραστηριότητές της προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη συνολική ανταμοιβή. Με απλούστερους όρους, το RL είναι ένας κλάδος της μηχανικής μάθησης που μελετά πώς οι πράκτορες λογισμικού πρέπει να λειτουργούν σε ένα δεδομένο περιβάλλον για να βελτιστοποιήσουν την έννοια της αθροιστικής ανταμοιβής.

Το RL έχει τέσσερα κύρια στοιχεία:

1. Πράκτορας (Agent): Ένα προγραμματιζόμενο λογισμικό που εκτελεί τις εργασίες που του έχουν ανατεθεί.
2. Περιβάλλον (Environment): Η φυσική ή ψηφιακή πραγματικότητα στην οποία ο πράκτορας εκτελεί τις ευθύνες του.
3. Δράση (Action): Μια κίνηση του πράκτορα που προκαλεί αλλαγή στην κατάσταση του περιβάλλοντος.
4. Ανταμοιβή (Reward): Μια πληρωμή που είναι είτε αρνητική είτε θετική ανάλογα με την ενέργεια.

Το RL μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στον φυσικό όσο και στον ψηφιακό κόσμο. Ας εξετάσουμε τα ακόλουθα παραδείγματα:

1. Παράδειγμα 1: Μπορείτε να σχεδιάσετε ένα προσαρμοστικό σύστημα στοχευμένης διαφήμισης που καθορίζει τον αριθμό των διαφημίσεων που θα εμφανίζονται σε έναν ιστότοπο με βάση τα έσοδα από διαφημίσεις που δημιουργούνται σε διάφορες διαμορφώσεις.
2. Παράδειγμα 2: Από την άλλη πλευρά, το RL μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκπαιδεύσει έναν πράκτορα σε ένα παιχνίδι υπολογιστή για να πολεμήσει ενάντια σε άλλους παίκτες, συχνά γνωστούς ως bots.
3. Παράδειγμα 3: Τέλος, το RL χρησιμοποιείται για τη διδασκαλία εικονικών και πραγματικών μηχανών σχετικά με την κίνησή τους.

Ακολουθούν μερικά παραδείγματα γνωστών μοντέλων ενισχυτικής μάθησης:

1. Q-Learning
2. State-Action-Reward-State-Action (SARSA)
3. Deep Q-Learning (DQL)
4. Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)

Το Deep RL είναι δυνατό μόνο με εξειδικευμένες βιβλιοθήκες RL όπως η Open AI Baselines και Stable Baselines ή πακέτα επεκτάσεων που στοιβάζονται πάνω από υπάρχοντα πλαίσια βαθιάς εκμάθησης όπως Keras-RL, TF.Agents και Tensorforce.

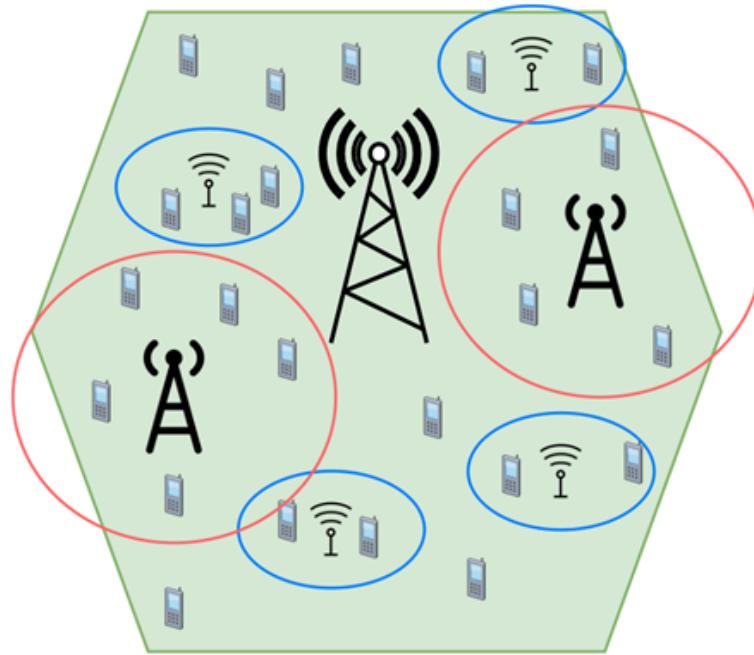
Κεφάλαιο 5

Ανάπτυξη Εξομοιωτή

5.1 Περιγραφή

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, έχει αναπτυχθεί ένας προσομοιωτής, ο οποίος προσομοιώνει τον τρόπο λειτουργίας ενός ετερογενούς δικτύου Πέμπτης Γενιάς, καθώς εισερχόμενες υπηρεσίες ζητούνται από τον Εξοπλισμό του Χρήστη. Οι υπηρεσίες και οι απαιτήσεις σε Mbps της κάθε υπηρεσίας εξηγούνται λεπτομερώς, σε παρακάτω σημείο του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Το HetNet αποτελείται από Macrocells, Microcells και Pico-cells. Οι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν είτε από τα Macrocells είτε από τα Small Cells. Τα Macrocells χρησιμοποιούνται επίσης, και για τη συνδεσιμότητα δικτύου backhaul. Τα Small Cells χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ορισμένων νεκρών ζωνών που ενδέχεται να προκύψουν ή ακόμη και για την παροχή περαιτέρω κάλυψης εάν τα Macrocells εξαντλήσουν τους πόρους που κατέχουν για κατανομή. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια σύντομη περιγραφή της συνδεσιμότητας που μπορεί να παρέχει ο εξομοιωτής, καθώς επίσης και τους αλγόριθμους που χρησιμοποιεί ο εξομοιωτής για τον έλεγχο της ροής κυκλοφορίας. Περαιτέρω, αναλύεται το σκεπτικό πίσω από την ανάπτυξη του συστήματος, όπως και μερικά παραδείγματα λειτουργίας του εξομοιωτή. Τέλος, η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος και οι έξοδοι του συστήματος θα συζητηθούν και θα δοθούν λεπτομερώς.

Το παρακάτω Σχήμα αναφέρει την αρχιτεκτονική που εξετάζεται στα πλαίσια της διπλωματικής. Στο εικονιζόμενο σενάριο, οι Εξοπλισμοί των Χρηστών (UEs) μπορούν να συνδεθούν σε διάφορους Σταθμούς Βάσης (Base Stations- BSs) γνωστά και ως σημεία πρόσβασης (Access Points - APs) διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης ραδιοσύνδεσης (Radio Access Technologies - RATs).



Σχήμα 5.1: Η αρχιτεκτονική που ακολουθεί ο εξομοιωτής.

Αυτή η λύση για την παροχή υπηρεσιών παίρνει το όνομα πολυσυνδεσιμότητα, ένα πλαίσιο στο οποίο οι ροές κυκλοφορίας μπορούν να δρομολογηθούν ή να κατευθύνονται, σε ένα σύνολο ετερογενών RAT και AP για να ανταποκριθούν σε μια ποικιλία απαιτήσεων Ποιότητας Υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) που εκτείνονται από την ποιότητα της σύνδεσης έως την απόδοση, αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Όσον αφορά την πολυσυνδεσιμότητα, τρεις κύριες διαδικασίες για τον έλεγχο της ροής κυκλοφορίας εντοπίστηκαν από το 3GPP για συμπερίληψη στην Έκδοσή 16 [34]. Συγκεκριμένα:

- Διεύθυνση κυκλοφορίας, η οποία συνίσταται στο πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής δικτύου για την παροχή σύνδεσης.
- Εναλλαγή κυκλοφορίας, η οποία ασχολείται με την απρόσκοπτη παράδοση μεταξύ δύο διαφορετικών BS ως δυναμική απόκριση σε μια νέα κατάσταση δικτύου (π.χ. έλλειψη πόρων, διακοπή υπηρεσίας, μετακίνηση UE, κ.α.).
- Διαχωρισμός κυκλοφορίας, ο οποίος είναι η δυνατότητα αντιγραφής μιας υπηρεσίας σε δύο ή περισσότερους διαφορετικούς BSs για τη βελτίωση της ποιότητας ανταλλαγής πληροφοριών.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής, επιλέγουμε να επικεντρωθούμε και να προσομοιώσουμε την πρώτη κύρια διαδικασία, η οποία αποτελεί και την κύρια λειτουργία του εξομοιωτή μας.

5.2 Θεωρητικό Υπόβραθρο

Οι αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια θα επικυρωθούν και θα αξιολογηθούν χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο αλλά και πάλι ρεαλιστικό και σχετικό σενάριο προσομοίωσης. Στο [35], μπορεί να βρεθεί μια περιγραφή υψηλού επιπέδου για τα σενάρια ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένης της συχνότητας φορέα (carrier frequency), του συγκεντρωτικού εύρους ζώνης συστήματος (bandwidth), της διάταξης δικτύου (network layout), των στοιχείων κεραίας (BS/UE), της διανομής/ταχύτητας UE και των προφίλ υπηρεσίας. Στην συνέχεια, θα αναλυθούν οι τιμές που λαμβάνουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σε κάθε σενάριο ανάπτυξης.

Τα ενδιαφέροντα σενάρια ανάπτυξης αναπτύσσονται για να καλύψουν τις τρεις κύριες οικогένειες υπηρεσιών: Βελτιωμένη Ευρυζωνική Ζώνη Κινητής Τηλεφωνίας (enhanced Mobile BroadBand - eMBB), Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής (massive Machine Type Communications - mMTC) και Επικοινωνίες Εξαιρετικά Αξιόπιστες και Χαμηλής Καθυστέρησης (Ultra-Reliable and Low Latency Communications - URLLC). Η επιλογή του σεναρίου για ανάπτυξη, θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τον συγκεκριμένο στόχο του αλγορίθμου. Μερικά ενδιαφέροντα σενάρια ανάπτυξης είναι:

- Το σενάριο ανάπτυξης **εσωτερικών hotspot**, εστιάζει στη μικρή κάλυψη ανά τοποθεσία και σε υψηλές αποδόσεις επικοινωνίας χρηστών ή σε σημεία υψηλής πυκνότητας χρηστών, όπως κοινά κτίρια και γραφεία. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου ανάπτυξης είναι η υψηλή χωρητικότητα, η υψηλή πυκνότητα χρήστη και η συνεπής εμπειρία χρήστη σε εσωτερικούς χώρους.
- Το σενάριο **πυκνής ανάπτυξης μικροκυψελοειδών** εστιάζει σε Macrocells με ή χωρίς Micro-cells και υψηλές πυκνότητες χρηστών και φορτία κυκλοφορίας στα κέντρα των πόλεων και στις πυκνές αστικές περιοχές. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου ανάπτυξης είναι τα υψηλά φορτία κυκλοφορίας, η κάλυψη σε εξωτερικούς χώρους και από εξωτερικούς χώρους σε εσωτερικούς χώρους. Αυτό το σενάριο θα είναι περιορισμένο σε παρεμβολές, χρησιμοποιώντας Macrocells με ή χωρίς Microcells. Πρέπει επίσης να θεωρηθεί μια συνεχής κυψελοειδής διάταξη με τις σχετικές παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν.
- Το σενάριο **αγροτικής ανάπτυξης** εστιάζει σε μεγαλύτερη και συνεχή κάλυψη. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου είναι η συνεχής κάλυψη ευρείας περιοχής που υποστηρίζει οχήματα υψηλής ταχύτητας. Αυτό το σενάριο θα είναι περιορισμένο σε θόρυβο ή/και περιορισμένο σε παρεμβολές, χρησιμοποιώντας Macrocells.
- Το σενάριο **προαστιακής μακροκυψελωτής ανάπτυξης** εστιάζει σε μεγάλες κυψέλες και συνεχή κάλυψη. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου είναι η συνεχής και πανταχού κάλυψη σε αστικές περιοχές. Αυτό το σενάριο θα είναι περιορισμένο σε παρεμβολές, χρησιμοποιώντας Macrocells αλλά και Small Cells.
- Το σενάριο ανάπτυξης **υψηλής ταχύτητας** εστιάζει στη συνεχή κάλυψη κατά μήκος της γραμμής σε τρένα υψηλής ταχύτητας. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου είναι η συνεπής εμπειρία χρήστη των επιβατών και η κρίσιμη αξιοπιστία της επικοινωνίας με πολύ υψηλή κινητικότητα.

- Το σενάριο ανάπτυξης **μεγάλης εμβέλειας** ορίζεται για να επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών για πολύ μεγάλες περιοχές με χαμηλή πυκνότητα χρηστών είτε είναι άνθρωποι είτε μηχανές. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου είναι Macrocells με πολύ μεγάλη κάλυψη περιοχής που υποστηρίζουν βασικές ταχύτητες δεδομένων και φωνητικές υπηρεσίες, με χαμηλή έως μέτρια απόδοση χρήστη και χαμηλή πυκνότητα χρήστη.
- Η **αστική κάλυψη για μαζική σύνδεση** εστιάζει σε Macrocells και συνεχή κάλυψη για την παροχή mMTC. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σεναρίου είναι η συνεχής και πανταχού παρούσα κάλυψη σε αστικές περιοχές, με πολύ υψηλή πυκνότητα σύνδεσης συσκευών mMTC.
- Το σενάριο ανάπτυξης **αυτοκινητόδρομου** εστιάζει σε ένα σενάριο οχημάτων που τοποθετούνται σε αυτοκινητόδρομους με υψηλές ταχύτητες. Οι Κύριοι Δείκτες Αξιολόγησης της Επίδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) σύμφωνα με αυτό το σενάριο θα είναι η αξιοπιστία/διαθεσιμότητα υπό υψηλές ταχύτητες/κινητικότητα (και επομένως συχνές λειτουργίες παράδοσης).

Επιπλέον, στο [35] περιγράφονται οι πιθανοί KPIs, ένα υποσύνολο αυτών των KPIs μπορεί να αναλυθεί στις προσομοιώσεις. Η επιλογή του υποσυνόλου KPIs θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τον στόχο του αλγορίθμου υπό διερεύνηση. Οι πιθανοί KPI είναι:

- Μέγιστος ρυθμός δεδομένων.
- Μέγιστη φασματική απόδοση.
- Εύρος ζώνης.
- Αναμονή επιπέδου ελέγχου.
- Καθυστέρηση επιπέδου χρήστη.
- Καθυστέρηση για σπάνια μικρά πακέτα.
- Χρόνος διακοπής κινητικότητας.
- Διασυστημική κινητικότητα;
- Αξιοπιστία.
- Κάλυψη.
- Διάρκεια μπαταρίας UE.
- Ενεργειακή απόδοση UE.
- Φασματική απόδοση κυψέλης/σημείου μετάδοσης.
- Δυνατότητα κυκλοφορίας περιοχής.
- Ρυθμός δεδομένων με εμπειρία χρήστη.
- 5η εκατοστιαία απόδοση φάσματος χρήστη.

- Πυκνότητα σύνδεσης.
- Κινητικότητα.
- Ενεργειακή απόδοση δικτύου.

Μετά τον καθορισμό του σεναρίου ανάπτυξης και των KPI, οι τελευταίες παράμετροι που θα επιλεγούν σχετίζονται με το μοντέλο του καναλιού και τα χαρακτηριστικά του πομπού και του δέκτη. Στο [36], παρουσιάζεται το μοντέλο καναλιού για διαφορετικές συχνότητες και σε διαφορετικές συνθήκες. Το έγγραφο παρουσιάζει διαφορετικά σενάρια, μοντέλα κεραίας, απώλειας διαδρομής και εξασθένησης που μπορούν να επιλεγούν λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον ενδιαφέροντος. Τέλος, στο [37] περιγράφονται οι παράμετροι για τους πομπούς και τους δέκτες.

5.3 Περιγραφή Μηχανισμού

Η διαδικασία που ακολουθούν οι UE για τη δημιουργία μιας σύνδεσης είναι η εξής: Πρώτον, κάθε UE υπολογίζει την Ελήφθη Ισχύς Σήματος Αναφοράς (Reference Signal Received Power - RSRP) που λαμβάνει από κάθε κοντινό BS και δημιουργεί μια λίστα υποψηφίων BS, με τα οποία μπορεί να συνδεθεί το UE. Στη συνέχεια, ξεκινά μια συνεχής διαδικασία, η οποία τελειώνει όταν έχει γίνει μια επιτυχημένη σύνδεση ή όταν δεν υπάρχουν άλλα BS, μέσα στη λίστα υποψηφίων BS, στην οποία μπορεί να συνδεθεί το UE. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας εξάγεται το BS, από τη λίστα υποψηφίων, από την οποία λαμβάνεται το σήμα με το μέγιστο RSRP. Στη συνέχεια, η UE υποβάλλει αίτημα σύνδεσης στο εν λόγω BS. Εάν το BS μπορεί να ολοκληρώσει τη σύνδεση, τότε επιστρέφεται ο ρυθμός δεδομένων που θα λάβει ο χρήστης. Εάν η σύνδεση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, τότε ο ρυθμός δεδομένων είναι μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση, το συγκεκριμένο BS διαγράφεται από τη λίστα υποψηφίων, και η διαδικασία ξεκινά ξανά. Σε περίπτωση που μπορεί να γίνει η σύνδεση, τότε εκτελούνται οι κατάλληλες διαδικασίες για την πραγματοποίηση της σύνδεσης και ο UE εξέρχεται από τη διαδικασία.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη διαδικασία, που μόλις περιγράψαμε με λόγια, θεωρήσαμε σοφό να γράψουμε τον αλγόριθμο για τη δημιουργία της σύνδεσης μεταξύ των UE και των BS μέσα στο δίκτυό μας, με τη μορφή ψευδοκώδικα. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται παρακάτω:

Algorithm 1 Διαδικασία ένωσης UE με BS

```

for all  $ue \in UE$  do
  RSRPs  $\leftarrow$  env.calculateRSRP(ue)
  repeat
    BS  $\leftarrow$  max(RSRPs)
    dataRate  $\leftarrow$  BS.requestConnection(ue)
    if dataRate  $\neq$  0 then
      BS.establishConnection(ue)
      break
    else
      RSRPs.delete(BS)
    end if
  until RSRPs =  $\emptyset$ 
end for

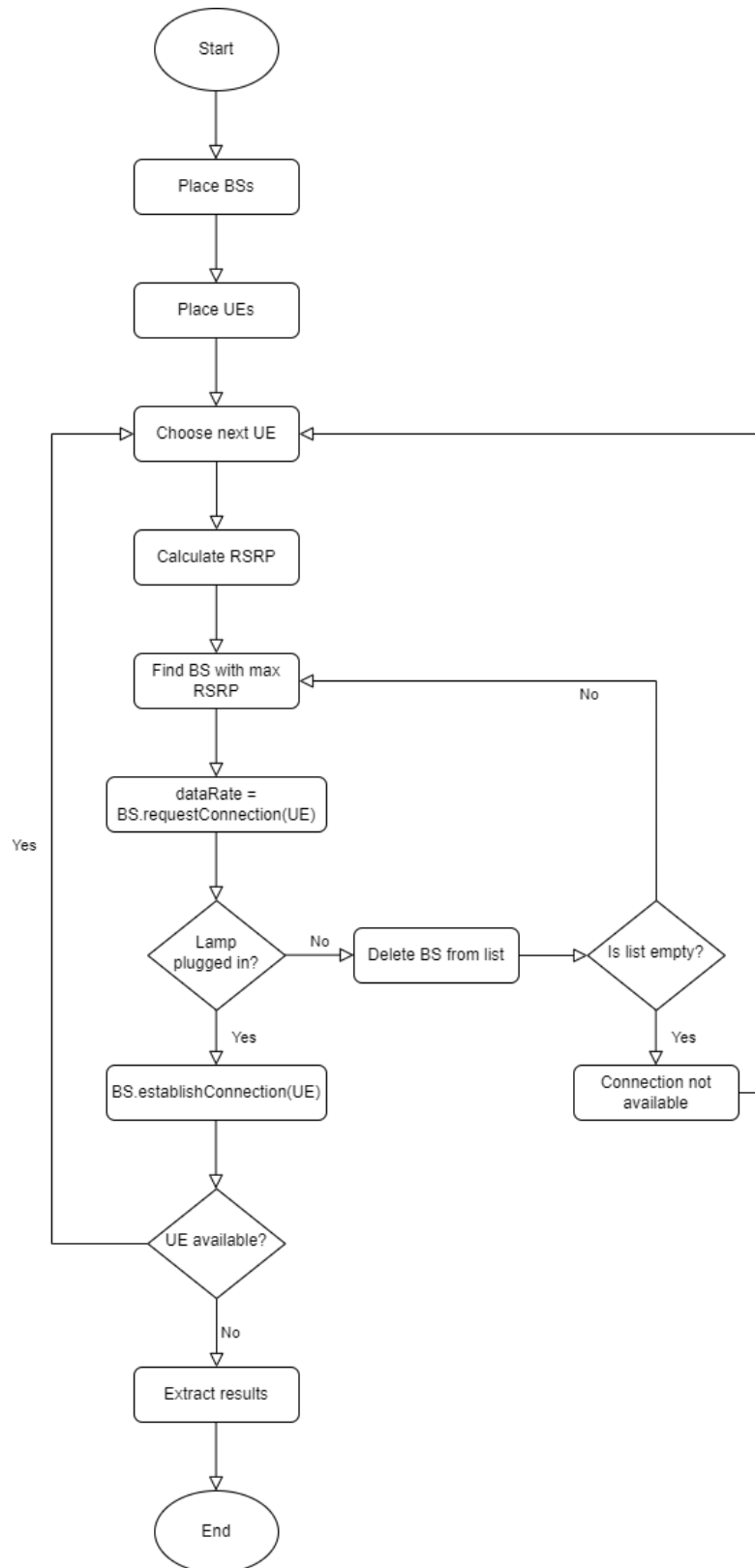
```

Ένα υποδειγματικό σενάριο προσομοίωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, συνοψίζεται στον παρακάτω Πίνακα. Ο στόχος είναι η επαλήθευση της ικανότητας του αλγορίθμου να συσχετίζει/καταναείμει τους χρήστες στις τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (Macro, Micro και Pico), μεγιστοποιώντας τον ρυθμό δεδομένων UEs κατά το downlink (DL) και ελαχιστοποιώντας τη μετάδοση ισχύος BS, λαμβάνοντας υπόψη ένα προαστιακό περιβάλλον.

Χαρακτηριστικά	Περιγραφή Σεναρίου		
	Macrocells	Microcells	Picocells
Φέρουσα συχνότητα (MHz)	2100	2400	2600
Εύρος ζώνης συστήματος (MHz)	5	5	5
Μέγιστη ισχύς DL (W)	1	0.25	0.1
Μέγιστη ισχύς BS (dB)	20	2	1
Κέρδος κεραίας BS (dB)	16	5	5
Απώλεια διαδρομής (dB)	3	2	2
Κέρδος κεραίας UE (dB)	0	0	0

Πίνακας 5.1: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για ένα σενάριο

Η διάταξη των Macrocells είναι ένα εξαγωνικό πλέγμα με ακτίνα κυψέλης 200 μέτρα, ενώ τα Microcells, Picocells και τα UEs είναι ομοιόμορφα κατανομημένα εντός της ακτίνας του Macrocell. Επιπλέον, προστίθεται θόρυβος, ακολουθώντας μια κανονική κατανομή, στα σήματα, που μεταδίδονται από τα BS στους UE. Τέλος, ως KPIs, ορίζουμε το QoS, το συνολικό bitrate των δικτύων και την ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Περιγράφηκε η διαδικασία που ακολουθεί ο προσομοιωτής μας από την αρχή μέχρι τη στιγμή που βγάζει τα αποτελέσματα. Ο κύριος παράγοντας αυτής της διαδικασίας είναι ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται η σύνδεση μεταξύ των UE και των BS και για τον οποίο ο αλγόριθμος παρουσιάστηκε σε ψευδοκώδικα. Τέλος, το Σχήμα 5.2 συνοψίζει την όλη διαδικασία του προσομοιωτή.



Σχήμα 5.2: Η διαδικασία που ακολουθεί ο εξομοιωτής.

5.4 Μοντέλο Συστήματος

Η προκαταρκτική ανάλυση των προτεινόμενων αλγορίθμων κατανομής πόρων που πραγματοποιείται σε επόμενο κεφάλαιο επικεντρώθηκε στα μαθηματικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους, καθώς ο σχεδιασμός τους απαιτούσε τη χρήση θεωρητικών αποτελεσμάτων από διάφορους ερευνητικούς τομείς, από τη μηχανική μάθηση έως τη θεωρία παιγνίων.

Για να επιτραπεί μια καλύτερη σύγκριση μεταξύ της απόδοσης των αλγορίθμων σε πιο ρεαλιστικές ρυθμίσεις, με στόχο την επιλογή των καταλληλότερων αλγορίθμων για αυτό, αναπτύξαμε σε αυτή τη διπλωματικής εργασία έναν προσομοιωτή δικτύου που παρέχεται στο κοινό (επί του παρόντος διαθέσιμος στο github στη διεύθυνση: <https://github.com/foivos-all/Simulation>)

Ο εξομοιωτής περιλαμβάνει μοντέλα παρεμβολών, ρεαλιστική χρήση πόρων δικτύου, δυνατότητα συμπερίληψης κινούμενων BS, την δυνατότητα εισαγωγής κινητικότητας χρηστών, διαφορετικά προφίλ, ανάλογα με τους χρήστες και τις υπηρεσίες σύνδεσης. Όλες αυτές οι λειτουργίες προσφέρονται με ευέλικτο τρόπο που επιτρέπει την ενσωμάτωση με ένα ευρύ φάσμα αλγορίθμων, ξεκινώντας από λύσεις επιλογής δικτύου έως λύσεις δυναμικής διαχείρισης κυκλοφορίας, με λογικές ελέγχου που μπορούν να αναπτυχθούν με διάφορους τρόπους.

Οι BS Πέμπτης Γενιάς έχουν περιορισμένο σύνολο πόρων, τόσο όσον αφορά το εύρος ζώνης συχνοτήτων όσο και τον χρόνο για την κατανομή των αιτημάτων UE. Ο στόχος του αλγορίθμου που θα σχεδιαστεί έχει ως στόχο τον βέλτιστο έλεγχο τέτοιων πόρων για να καταστεί δυνατή μια αποτελεσματική και ανθεκτική λύση για συνδεσιμότητας των χρηστών στο δίκτυο, ενσωματώνοντας επίσης πόρους που σχετίζονται όλα τα είδη κυψελών που παρέχει το σύστημα μας.

Η ελάχιστη μονάδα κατανομής για ένα 5G AP είναι το Μπλοκ Φυσικών Πόρων (Physical Resource Block - PRB), το καθένα που αποτελείται από 12 υποφορείς συχνότητας με εύρος ζώνης $2 \cdot 15$ kHz και χρονική διάρκεια 2^{-4} ms, όπου $\nu \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ είναι η παράμετρος που ονομάζεται αριθμολογία και ορίζεται από τα πρότυπα 5G. Ο αριθμός των διαθέσιμων PRB στο AP p εξαρτάται από το διαθέσιμο συνολικό εύρος ζώνης στο AP και από την αριθμολογία του, όπως ορίζεται από τα πρότυπα 5G NR [38].

Η ισχύς λήψης, ή Ισχύς λήψης σήματος αναφοράς (Reference Signal Received Power – RSRP), $P_{i,p}$ αντιπροσωπεύει την ισχύ μετάδοσης που μετράται από το UE $i \in I$ μεταξύ του ίδιου και του BS $p \in P$. Υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{i,p} = P_p + G_p - L_p - L_{i,p} \quad (5.1)$$

όπου P_p είναι η ισχύς κεραίας του BS, G_p είναι το κέρδος κεραίας του BS, L_p είναι οι απώλειες του τροφοδότη του BS και $L_{i,p}$ είναι η απώλεια διαδρομής μεταξύ UE i και AP p . Η ισχύς κεραίας του BS ορίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$P_p = \frac{1000 \cdot BS_{power}}{\frac{BS_{PRB}}{10 \cdot 2} \cdot BS_{subcarriers}} \quad (5.2)$$

Στον εξομοιωτή μας, η απώλεια διαδρομής $L_{i,p}$ υπολογίζεται μέσω του μοντέλου COST-HATA

[39], [40], που είναι ένα στατιστικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη πολλούς παράγοντες όπως η πυκνότητα των κτιρίων (αγροτική, προαστιακή, αστική), η συχνότητα φορέα που χρησιμοποιείται για τις επικοινωνίες και τα σχετικά ύψη UE και BS. Ο υπολογισμός της απώλειας διαδρομής έχει ως εξής:

$$L_{i,p} = 46.3 + 33.9 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_r, f) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} d + C_m \quad (5.3)$$

όπου f είναι η φέρουσα συχνότητα, h_b είναι το ύψος του BS, d είναι η απόσταση μεταξύ του UE και του BS και h_r είναι το υψόμετρο της UE, από το έδαφος. Ο συντελεστής ρύθμισης ύψους κεραιάς του μοντέλου COST HATA για κινητούς σταθμούς σε αστικές περιοχές σημειώνεται ως $a(h_r, f)$ και για αστικά ή αγροτικά σενάρια, όπως αυτό που προσομοιώνουμε, υπολογίζεται ως:

$$a(h_r, f) = (1.1 \log_{10} f - 0.7) h_r - (1.56 \log_{10} f - 0.8) \quad (5.4)$$

Τέλος, το C_m θεωρείται ως σταθερή μετατόπιση και ορίζεται όπως φαίνεται παρακάτω, εκ των οποίων εξετάζουμε την περίπτωση για προαστιακές περιοχές:

$$C_m = \begin{cases} 0 \text{ dB, για προαστιακές περιοχές} \\ 3 \text{ dB, για μητροπολιτικές περιοχές} \end{cases} \quad (5.5)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί ο αριθμός των μπλοκ φυσικών πόρων που θα εκχωρηθούν από το BS $p \in P$ για την επικοινωνία με το UE $i \in I$, πρέπει να υπολογιστεί ο λόγος σήματος-υπό-παρέμβασης-συν-θορύβου (Signal-to-Inference-Plus-Noise-Ratio - SINR). Το τμήμα θερμικού θορύβου μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με:

$$N_p = k_b T^{env} B_p \Theta_p \quad (5.6)$$

$$\Theta_p = \frac{\sum_{\tau \in (t-T, t)} \sum_{j \in J \setminus i} C_{j,p}(\tau) N_{j,p}(\tau)}{T \cdot \#R_p} \quad (5.7)$$

όπου $\Theta_p(t)$ είναι ο λόγος χρήσης μπλοκ πόρων (Resource Blocks Utilization Ratio - RBUR) του BS p τη χρονική στιγμή t , k_b είναι η σταθερά Boltzmann, T^{env} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, B_p είναι το συνολικό εύρος ζώνης για τον BS p , T είναι το μήκος του κινητού μέσου όρου, $C_{j,p}(t)$ ισούται με 1 εάν το UE j είναι συνδεδεμένο στο BS p τη χρονική στιγμή t και 0 διαφορετικά και $N_{j,p}(t)$ συνολικός αριθμός μπλοκ πόρων του BS p .

Το τμήμα παρεμβολής υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{i,p} = \sum_{p' \neq p} F_{p,p'} \cdot P_{i,p'} \cdot p(t) \quad (5.8)$$

όπου το $F_{p,p'}$ είναι 1 εάν ο BS p και p' μοιράζονται την ίδια συχνότητα φορέα και 0 διαφορετικά.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για το θόρυβο και τις παρεμβολές είναι δυνατός ο υπολογισμός του SINR, και έτσι είναι δυνατός ο υπολογισμός του ρυθμού δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί εκχωρώντας ένα PRB στο UE i χρησιμοποιώντας τον τύπο Shannon. Οι δύο εξισώσεις εμφανίζονται παρακάτω:

$$SINR_{i,p} = \frac{P_{i,p}}{I_{i,p} + N_p} \quad (5.9)$$

$$r_{i,p} = 2^{-\mu} \cdot 10^{-3} B_{PRB} \log_2(1 + SINR_{i,p}) \quad (5.10)$$

όπου B_{PRB} είναι το εύρος ζώνης ενός μεμονωμένου PRB και μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$B_{PRB} = 12 \cdot 2^\mu 15kHz \quad (5.11)$$

Τώρα, με δεδομένο ένα συγκεκριμένο αίτημα ρυθμού bit b_p^i από το UE i , είναι δυνατό να υπολογιστεί ο αριθμός των μπλοκ φυσικών πόρων και το bitrate που θα εκχωρηθούν από το BS p για να ικανοποιηθεί το αίτημα, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$n_{i,p}^{PRB} = \left\lceil \frac{b_p^i}{r_{i,p}} \right\rceil \quad (5.12)$$

$$ab_p^i = n_{i,p}^{PRB} \cdot r_{i,p} \quad (5.13)$$

Ο εξομοιωτής παρέχει επίσης διάφορες μετρήσεις για τα BS, τα UE και το Δίκτυο. Συγκεκριμένα, ο εξομοιωτής εξάγει αποτελέσματα για την κατανάλωση της ενέργειας κάθε BS, για την συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και για το QoS κάθε UE, μεταξύ άλλων. Η συνολική κατανάλωση κάθε BS j μετριέται πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα ενέργειας που χρειάζεται ένας BS για να μεταφέρει ένα μόνο PRB, με τον συνολικό αριθμό PRB που κατανέμει στους χρήστες. Ο τύπος φαίνεται παρακάτω:

$$E_p = \sum_{i \in I} n_{i,p}^{PRB} \cdot \frac{P_p}{12 \cdot BS_{PRB}} \quad (5.14)$$

Είναι λοιπόν προφανές ότι για να ανακτήσουμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, πρέπει απλώς να ανακτήσουμε το άθροισμα της κατανάλωσης ισχύος κάθε BS, καταλήγοντας έτσι στο:

$$E_{net} = \sum_{p \in P} E_p \quad (5.15)$$

Ως QoS, ο εξομοιωτής, ορίζει δύο εκδόσεις του όρου, μία για κάθε μεμονωμένο χρήστη και μία για ολόκληρο το δίκτυο. Για κάθε UE, ορίζουμε το QoS όπως φαίνεται παρακάτω:

$$QoS_{UE}^i = \frac{ab_i^p}{b_i^p} \quad (5.16)$$

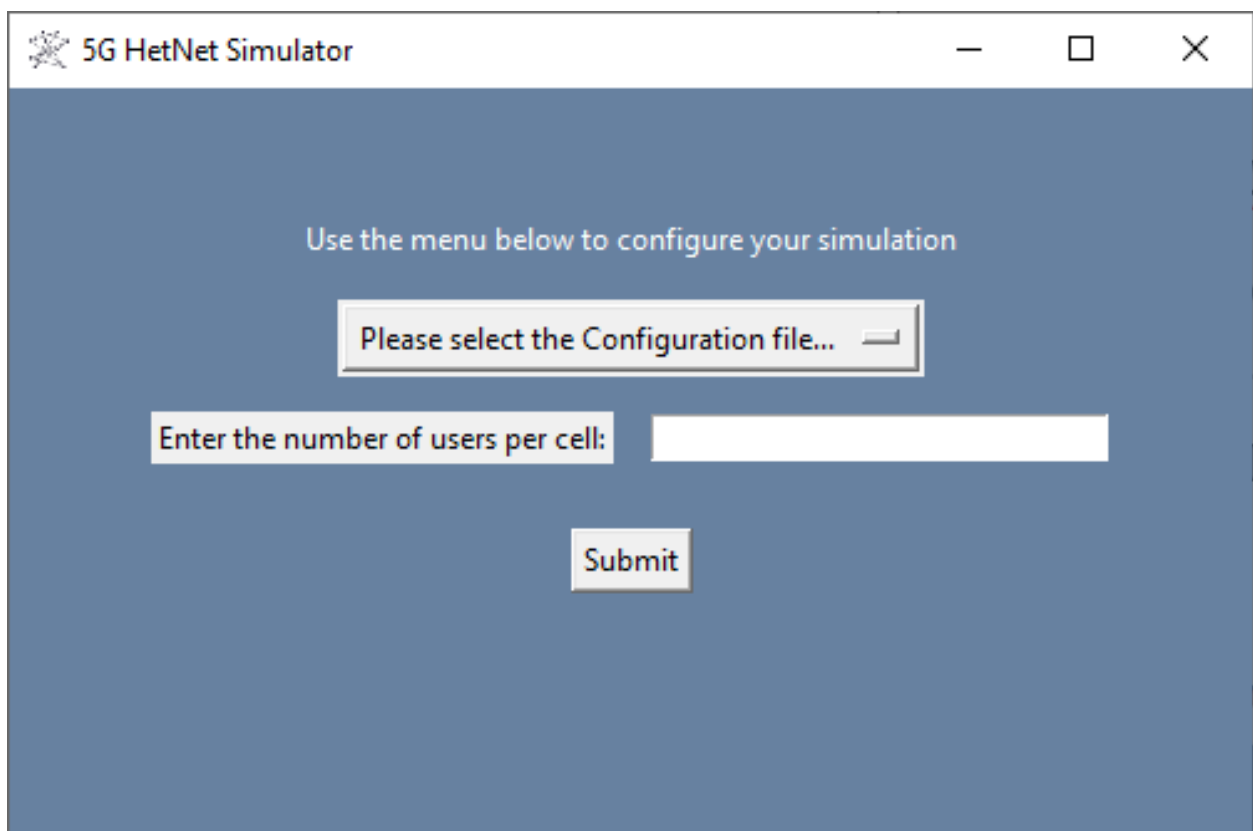
ενώ για το δίκτυο, το QoS αντικατοπτρίζει κυρίως το ποσοστό του συνολικού αριθμού των

χρηστών που εξυπηρετούνται από το δίκτυο και ως εκ τούτου υπολογίζεται ως:

$$QoS_{net} = \frac{UE_{connected}}{UE_{total}} \quad (5.17)$$

5.5 Εξόδοι και Παραδείγματα Χρήσης

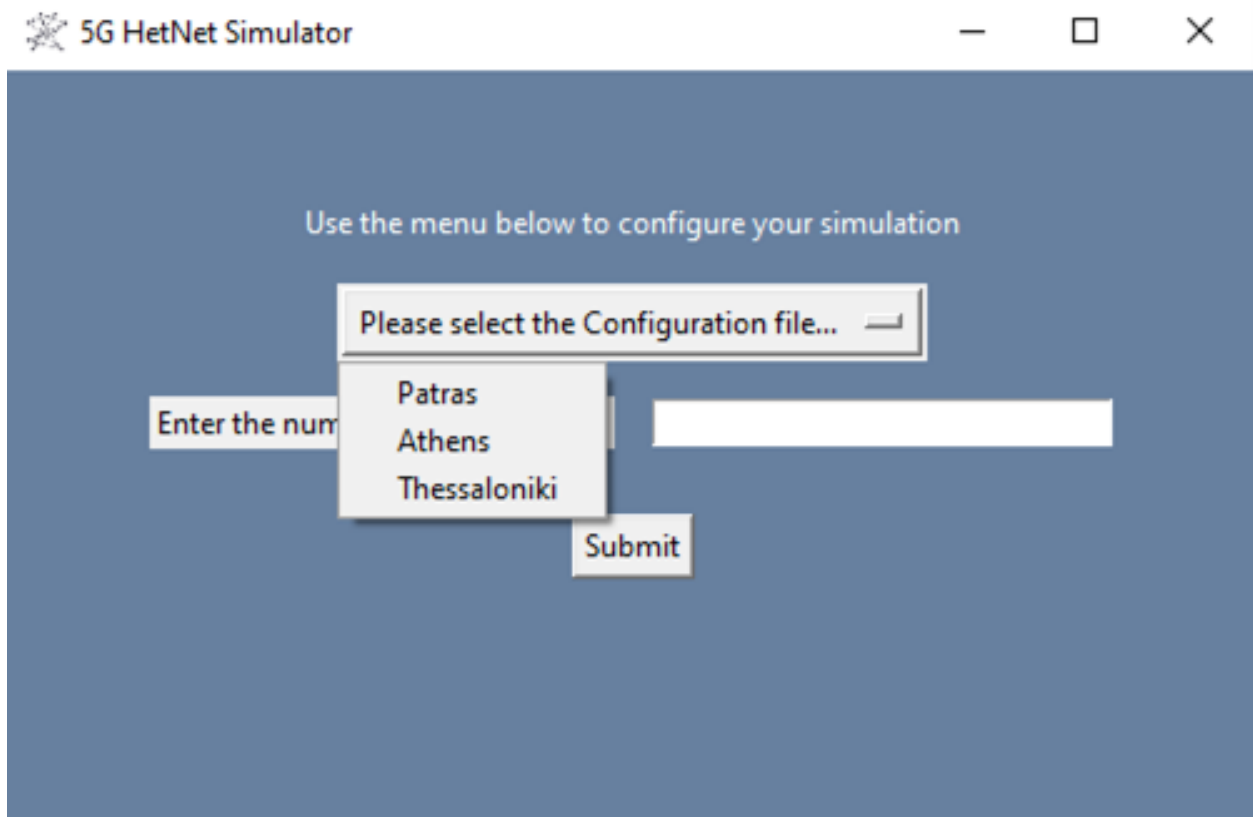
Το σύστημα που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής, αφού τελειώσει την εκτέλεση της εξομοίωσης, εξάγει τα αποτελέσματα σε μορφή αρχείων csv (Comma Separated Values). Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα χρήσης του εξομοιωτή, καθώς και μερικές προσθήκες που θα γίνουν σε μελλοντικές εκδόσεις.



Σχήμα 5.3: Η αρχική οθόνη του εξομοιωτή.

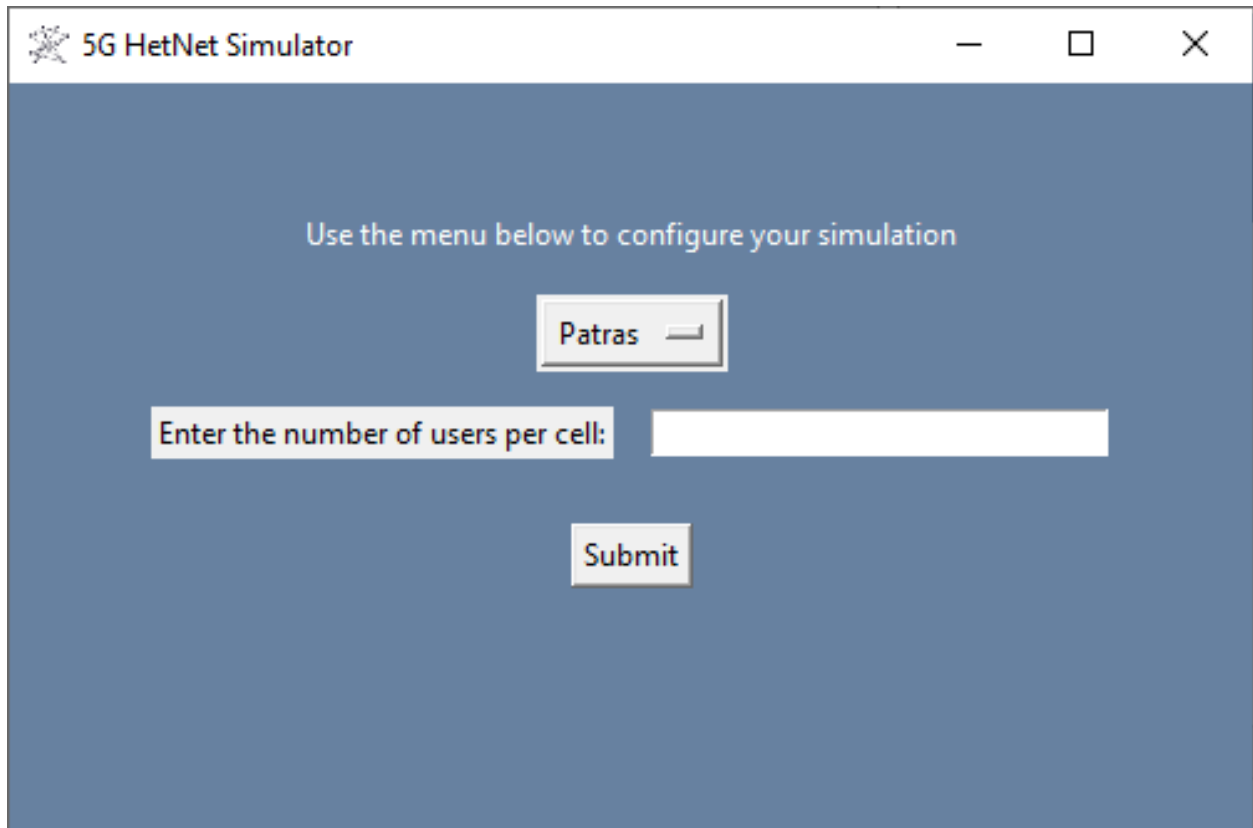
Στην παραπάνω εικόνα, μπορούμε να δούμε τι εμφανίζεται την πρώτη φορά που τρέχει ο εξομοιωτής μας. Ουσιαστικά ο χρήστης καλείται, αρχικά να επιλέξει το σενάριο (σε μορφή πόλης), στο οποίο θα στηθεί το δίκτυο Πέμπτης Γενιάς. Κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε διαφορετική πόλη, ενώ κάθε πόλη έχει διαφορετική τοπολογία δικτύου. Η διαφορά σε κάθε πόλη αφορά κυρίως το πλήθος των BSs, αλλά και τις θέσεις τους. Οι τοπολογίες έχουν δημιουργηθεί εκ του προοιμίου και έχουν τοποθετηθεί σε ειδικό φάκελο, ο οποίος τις κατάλληλες πληροφορίες για την κάθε τοπολογία ξεχωριστά. Μέσα στο φάκελο, βρίσκονται τέσσερα αρχεία csv. Το πρώτο αρχείο csv ονομάζεται “center.csv” και κρατάει την κεντρική τοποθεσία του δικτύου, σε μορφή συντεταγμένων του χάρτη, γύρω από την οποία αναπτύσσονται τα Macrocells. Το δεύτερο αρχείο ονομάζεται “macrocells.csv” και κρατάει τις θέσεις των Macrocells. Ακολούθως, τα υπόλοιπα

δύο αρχεία ονομάζονται “microcells.csv” και “picocells.csv”, τα οποία κρατάνε τις θέσεις των Microcells και Picocells αντίστοιχα. Οι πόλεις για τις οποίες έχουν φτιαχτεί τοπολογίες, είναι η Πάτρα, η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη. Σε νεότερη έκδοση του εξομοιωτή, αρχικά θα προστεθούν και άλλες γνωστές πόλεις του κόσμου, η δυνατότητα ένωσης του εξομοιωτή με χάρτη, αλλά και η επιλογή περισσότερων παραμέτρων για την δημιουργία της εξομοίωσης.



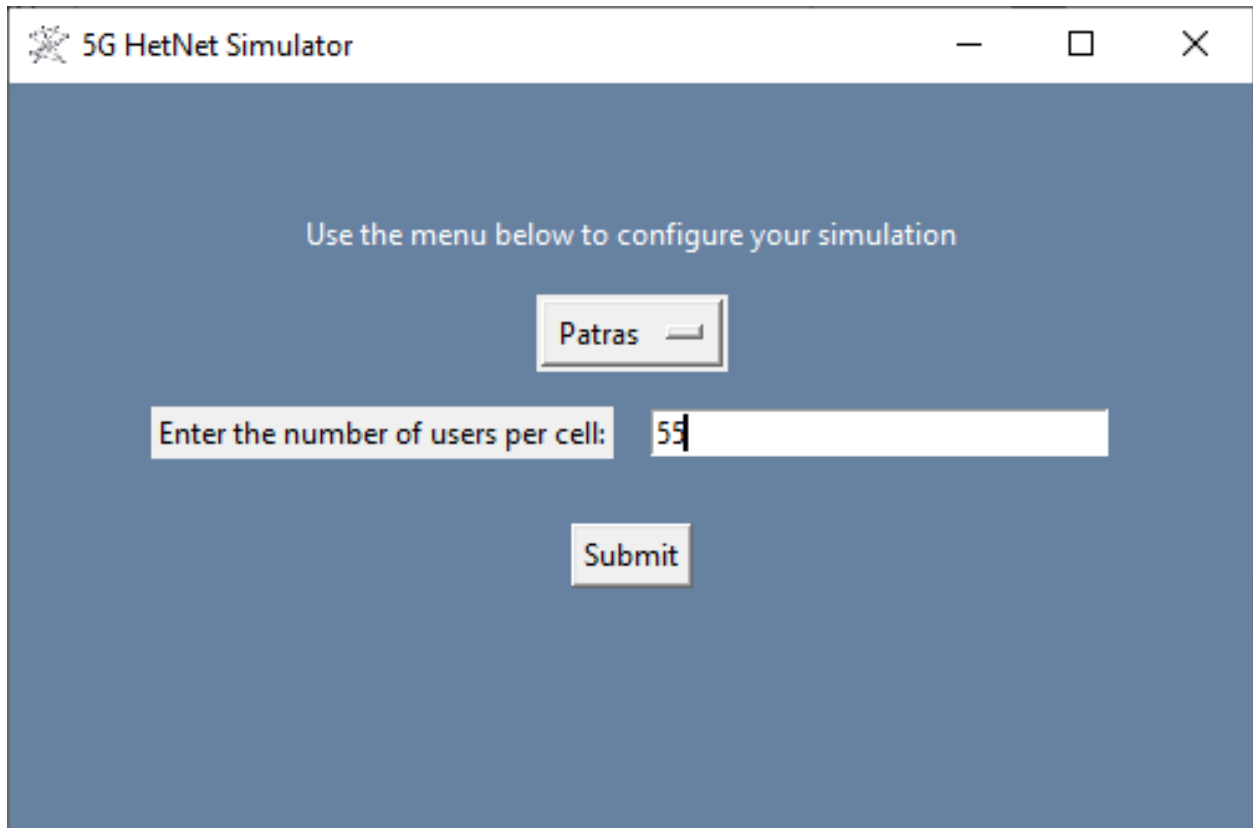
Σχήμα 5.4: Οι διάφορες επιλογές σεναρίων του εξομοιωτή.

Αφού επιλεγθεί το σενάριο, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, το μόνο που απομένει από τον χρήστη είναι να εισάγει το πλήθος των χρηστών ανά Macrocell.



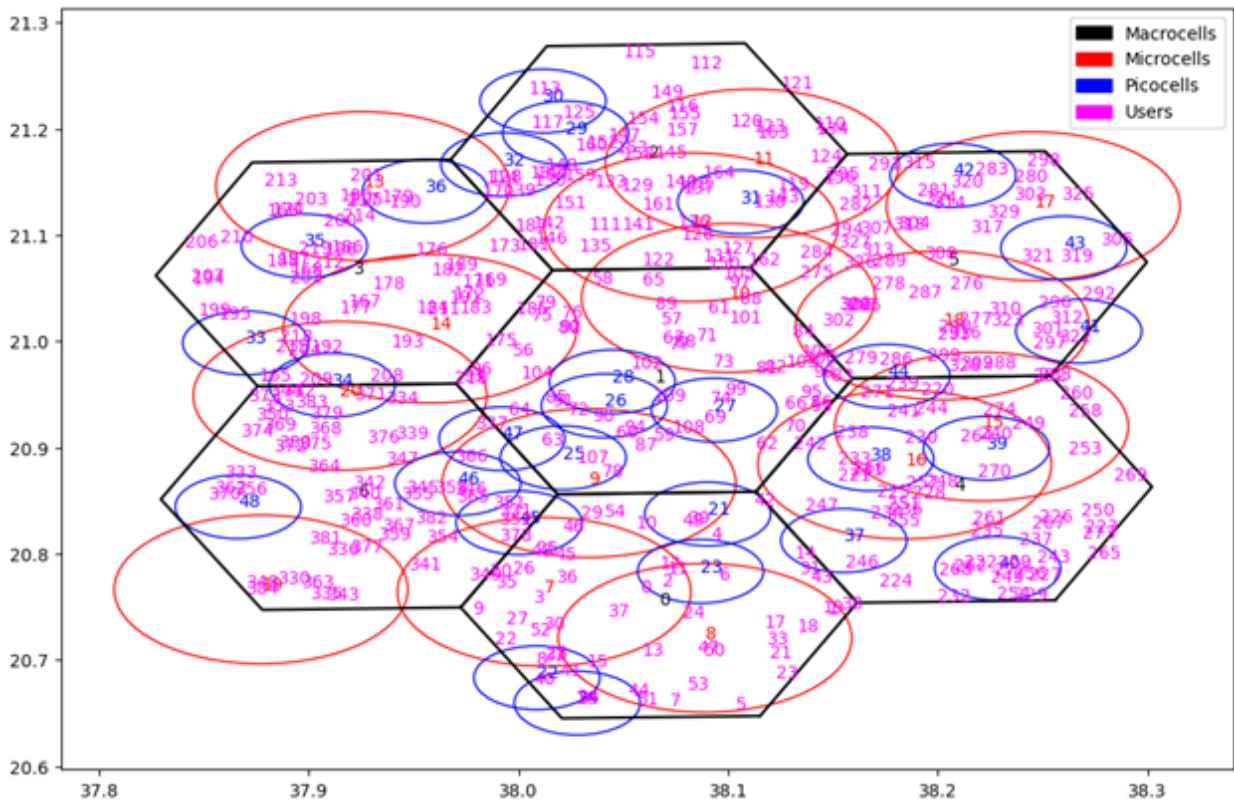
Σχήμα 5.5: Ο εξομοιωτής αφού επιλεχθεί το σενάριο.

Το πλήθος των χρηστών εισάγεται στο πλαίσιο κειμένου που φαίνεται στην πιο πάνω εικόνα. Αναφέρθηκε ότι σε νεότερες εκδόσεις, θα δοθεί η ικανότητα στον χρήστη να εισάγει περισσότερες παραμέτρους, έτσι ώστε να μπορεί να παραμετροποιήσει την εξομοίωση με τρόπο ο οποίος θα είναι πιο προσαρμοσμένος στις ανάγκες του χρήστη. Συγκεκριμένα, θα εισαχθεί η ικανότητα επιλογής της απόστασης μεταξύ των υποφορέων, καθώς και επιπλέον χαρακτηριστικών των BSs, όπως την ισχύ μετάδοσης, την συχνότητα του φορέα, το εύρος ζώνης, το κέρδος κεραίας, την απώλεια τροφοδότη αλλά και του ρυθμού μετάδοσης.



Σχήμα 5.6: Η τελική οθόνη πριν την εκτέλεση του εξομοιωτή.

Αφού εισαχθεί το πλήθος των χρηστών, η μορφή του εξομοιωτή είναι αυτή της παραπάνω εικόνας, όπου το μόνο που χρειάζεται είναι ο χρήστης να πατήσει το κουμπί “Submit” και η εξομοίωση θα τρέξει. Αφού τρέξει, το αποτέλεσμα του εξομοιωτή, αποτελεί το δίκτυο, και το παρουσιάζουμε σε μορφή γραφήματος. Ένα παράδειγμα του Γραφικού Περιβάλλοντος Διεπαφής Χρήστη (Graphical User Interface – GUI) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.7: GUI Εξομοιωτή. Σενάριο με 7 Macrocells, 14 Microcells, 28 Picocells και 385 Χρήστες.

Τα αποτελέσματα, και κατά συνέπεια το δίκτυο προσομοιωτή, φαίνονται στο Σχήμα 5.7. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελείται από Macro-cells, Microcells και Picocells. Τα Macrocells είναι τα μαύρα εξάγωνα. Στο κέντρο του Macrocell εμφανίζεται το ID του BS. Η ακτίνα του Μακροκυττάρου, είναι ίση με την ακτίνα του Εξαγώνου. Οι κόκκινοι κύκλοι χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν την ακτίνα του Microcell και, για άλλη μια φορά, στο κέντρο του κύκλου, εμφανίζεται το ID του BS. Το ίδιο ισχύει και για τους μπλε κύκλους, που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των Picocells, με το ID του BS, στο κέντρο του κύκλου. Τέλος, οι αριθμοί σε χρώμα ματζέντα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του αναγνωριστικού των χρηστών.

Τέλος, θα αποθηκευτούν σε μορφή csv τα αποτελέσματα του δικτύου. Τα αποτελέσματα αφορούν τα UEs, τους BSs αλλά και το ίδιο το δίκτυο. Συγκεκριμένα, για το καθένα υπολογίζονται οι εξής πληροφορίες:

- UEs:
 1. ID
 2. Ληφθέν RSRP.
 3. Ληφθέν SINR.
 4. Απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων.
 5. Ληφθέν ρυθμός δεδομένων.
 6. ID του BS.

7. Το είδος του BS.
 8. QoS.
- BSs:
 1. ID.
 2. Είδος.
 3. Πλήθος χρηστών.
 4. Καταναλωθέν ενέργεια.
 - Δίκτυο:
 1. Πλήθος χρηστών.
 2. Συνολικός δοθέν ρυθμός δεδομένων.
 3. Καταναλωθέν ενέργεια.
 4. QoS.

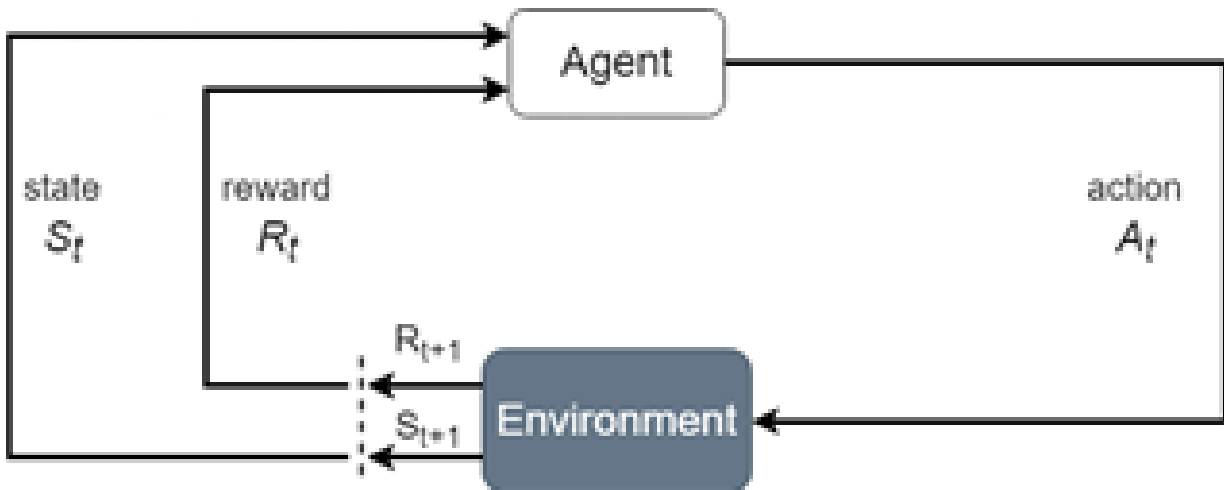
Κεφάλαιο 6

Προτεινόμενος Αλγόριθμος

6.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται σε πολλές λεπτομέρειες σχετικά με τις προκλήσεις ενισχυτικής μάθησης [41]. Η μακροπρόθεσμη αυτοματοποιημένη λήψη βέλτιστων αποφάσεων είναι μια διαχρονική πρόκληση που τα επιστημονικά και τεχνολογικά πεδία είναι επιφορτισμένα να επιλύσουν προκειμένου να βελτιώσουν τη μάθηση. Η μάθηση είναι «μια γενικά συνεχής αλλαγή σε ένα δυναμικό συμπεριφοράς που προκύπτει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερης εξάσκησης», σύμφωνα με τον Kimble. Μέσα από τις αλληλεπιδράσεις του με τον κόσμο, το άτομο υιοθετεί και επαναπροσδιορίζει τη συμπεριφορά του σε όλη του τη ζωή. Η βασική μορφή πληροφοριών των ατόμων είναι οι σχέσεις αντίδρασης-δράσης, που τους επιτρέπουν να επιβιώσουν στο περιβάλλον τους.

Είτε το σκηνικό είναι η οδήγηση αυτοκινήτου είτε η συμμετοχή σε μια συζήτηση, το άτομο γνωρίζει τις πιθανές συνέπειες των πράξεών του με βάση την εμπειρία του. Η ίδια ακριβώς διαδικασία αποτελεί αντικείμενο έρευνας στον τομέα της ενίσχυσης της μάθησης από αλγοριθμική σκοπιά. Κάθε υποστηρικτικό μαθησιακό ζήτημα έχει δύο βασικές οντότητες: το περιβάλλον και τον πράκτορα, καθώς και τρία κανάλια επικοινωνίας: ανταμοιβή, ενέργειες και καταστάσεις. Ο κύκλος της ενισχυτικής μάθησης φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε την ορολογία για τον εντοπισμό προβλημάτων ενίσχυσης μάθησης και τις διαφορές τους.



Σχήμα 6.1: Ο Κύκλος Ενισχυτικής Μάθησης.

6.1.1 Περιβάλλον

Οτιδήποτε περιβάλλει μια οντότητα, σε αυτήν την περίπτωση τον πράκτορα, αναφέρεται ως περιβάλλον της [32]. Ο σχεδιασμός του περιβάλλοντος υπαγορεύεται από το πρόβλημα που προσπαθούμε να λύσουμε και έχει σημαντικό αντίκτυπο στον σχεδιασμό του προγράμματος πρακτόρων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλα έχουν ξεχωριστές ιδιότητες.

Πλήρως ή εν μέρει παρατηρήσιμο

Ένα περιβάλλον μπορεί να παρατηρηθεί πλήρως ή εν μέρει. Πλήρως παρατηρήσιμο σημαίνει ότι ο πράκτορας μπορεί να δει όλη την κατάστασή του ανά πάσα στιγμή. Όταν υπάρχει κάποια διαταραχή στο κανάλι επικοινωνίας μεταξύ του πράκτορα και της κατάστασης του περιβάλλοντος, η πρώτη γίνεται εν μέρει ορατή.

Στοχαστικό ή αιτιατό

Το περιβάλλον στο οποίο η επερχόμενη θέση του πράκτορα διέπεται πλήρως από την τρέχουσα κατάστασή του και η συμπεριφορά του πράκτορα περιγράφεται ως αιτιατό. Το περιβάλλον είναι στοχαστικό ελλείψει αυτής της νομοθετικής σχέσης μεταξύ καταστάσεων και συμπεριφορών. Μια βλάβη σε αυτή τη σύνδεση μπορεί επίσης να συμβεί μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας, όπως ενός καναλιού δράσης, με αποτέλεσμα το περιβάλλον να ερμηνεύεται διαφορετικά από την πραγματική δράση του πράκτορα, με αποτέλεσμα ένα σενάριο που διαφέρει από το αναμενόμενο.

Στατικό ή δυναμικό

Είναι δυναμικό εάν η αλλαγή συμβαίνει ενώ ο πράκτορας λειτουργεί. Πέρα από αυτό, είναι στατικό.

Διακριτό ή συνεχές

Η αντίληψη του πράκτορα για το χρόνο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζει εάν το περιβάλλον είναι διακριτό ή συνεχές. Το σκάκι, για παράδειγμα, είναι ένα διαφορετικό περιβάλλον επειδή αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών καταστάσεων. Το περιβάλλον πλοήγησης ρομπότ, από την άλλη πλευρά, είναι συνεχές. Η ταχύτητα και η τρέχουσα θέση του οχήματος καταγράφονται ως συνεχείς ενδείξεις εντός ενός συγκεκριμένου εύρους.

Μονοπρακτορικό ή πολυπρακτορικό

Ταξινομείται ως μονοπρακτορικό ή πολυπρακτορικό με βάση τον αριθμό των πρακτόρων που δραστηριοποιούνται στο περιβάλλον. Επειδή οι ενέργειες ενός πράκτορα επηρεάζουν την κατάσταση του περιβάλλοντος, οι άλλοι πράκτορες πρέπει να προσαρμόσουν τη συμπεριφορά τους στις νέες πληροφορίες.

6.1.2 Πράκτορας

Ένας πράκτορας είναι κάποιος που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον κάνοντας ενέργειες, παρατηρώντας το και περιστασιακά λαμβάνοντας μια ανταμοιβή από αυτό. Διαφορετικοί τύποι πρακτόρων μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζονται πληροφορίες από το περιβάλλον τους και τον τρόπο με τον οποίο επιλέγουν να ενεργήσουν.

6.1.3 Κανάλια Επικοινωνίας

Ανταμοιβή

Ο στόχος του πράκτορα καθορίζεται από αυτόν τον παράγοντα. Το περιβάλλον του πράκτορα παράγει ένα αποτέλεσμα, την ανταμοιβή, για κάθε ενέργεια που κάνει. Αυτός είναι ένας αριθμός, μικροσκοπικός ή τεράστιος, αρνητικός ή θετικός. Ο κύριος στόχος του πράκτορα είναι να μεγιστοποιήσει τη συνολική του ανταμοιβή με την πάροδο του χρόνου. Σε γενικές γραμμές, η ανταμοιβή δείχνει αν ο πράκτορας είναι σωστός ή λάθος. Η διαδικασία επιστροφής της ανταμοιβής δεν μπορεί να τροποποιηθεί. μπορεί να επηρεαστεί μόνο από τη συμπεριφορά του πράκτορα. Ως αποτέλεσμα, η τροποποίηση της κατάστασης του περιβάλλοντος μπορεί να ανταμείψει τον πράκτορα άμεσα ή έμμεσα.

Δράση πράκτορα

Αναφέρεται στη συλλογή πράξεων για τις οποίες είναι ικανός ο πράκτορας. Με βάση το εάν υπάρχει ένας πεπερασμένος διακριτός αριθμός βημάτων ή όχι, οι ενέργειες μπορεί να είναι διακριτές ή συνεχείς. Μια διαδικασία διακριτοποίησης χρησιμοποιείται συχνά όταν το εύρος κόστους των δραστηριοτήτων είναι συνεχές. Ως αποτέλεσμα, η διάσταση του προβλήματος μειώνεται σημαντικά, καθιστώντας ευκολότερο για τον πράκτορα να επιλέξει τη βέλτιστη πορεία δράσης σε κάθε περίπτωση. Όταν ένα συνεχές πεδίο μειώνεται σε περιορισμένο αριθμό πεπερασμένων λειτουργιών, είναι δυνατό να δημιουργηθούν πρόσθετες δυσκολίες λόγω έλλειψης ακρίβειας. Ως αποτέλεσμα, για την αποφυγή ανεπιθύμητων συμπεριφορών, η γνωστοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη την απαιτούμενη ακρίβεια στην τιμολόγηση των δραστηριοτήτων.

Κατάσταση περιβάλλοντος

Είναι η συλλογή δεδομένων που λαμβάνει ο πράκτορας από το περιβάλλον ανά πάσα στιγμή. Στην πιο βασική του μορφή, η κατάσταση είναι η αντίληψη του πράκτορα για το περιβάλλον. Οι παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν είτε σε ψηφιακή είτε σε αναλογική μορφή, με αποτέλεσμα ένα ξεχωριστό ή ψηφιακό περιβάλλον από την οπτική γωνία του πράκτορα. Μια περιορισμένη συλλογή σεναρίων δημιουργείται από παρατηρήσεις με τη μορφή εικόνων με συγκεκριμένο αριθμό pixels και χρωμάτων. Όταν οι παρατηρήσεις έχουν τη μορφή αναλογικών δεικτών, με τις αντίστοιχες τιμές να ανήκουν σε συνεχές εύρος τιμών, δεν ισχύει το ίδιο. Σε αυτό το παράδειγμα, ο πράκτορας μπορεί να βρίσκεται σε ατελείωτο αριθμό πιθανών περιστάσεων. Ακολουθείται μια διαδικασία για να μειωθεί η διάσταση της διακριτοποίησης του θέματος, όπως ακριβώς συμβαίνει στην περίπτωση ενεργειών με συνεχές εύρος τιμών.

6.2 Επίλυση Μαρκοβιανής Διαδικασίας Απόφασης με RL

Η Μαρκοβιανή Διαδικασία Απόφασης (Markov Decision Process - MDP) είναι μια διαδικασία ανάλυσης διακριτού χρόνου, όπως ορίζεται στον τομέα των μαθηματικών. Παρέχει ένα πλαίσιο για τη μοντελοποίηση της λήψης αποφάσεων ενός πράκτορα σε περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα είναι εν μέρει τυχαία και εν μέρει υπό τον έλεγχο του πράκτορα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πράκτορα και του περιβάλλοντος συμβαίνει σε μια σειρά από διακριτά χρονικά σημεία, $t = 0, 1, 2, 3, \dots$. Κάθε χρονική στιγμή t , ο πράκτορας παίρνει την κατάσταση $S_t \in S$ από το περιβάλλον, όπου S είναι μια συλλογή από διάφορες καταστάσεις, και επιλέγει την ενέργεια $A_t \in A(S_t)$, όπου $A(S_t)$ είναι μια λίστα με τις πιθανές ενέργειες που μπορεί να κάνει ο πράκτορας, ενώ βρίσκεται στην κατάσταση S_t . Η ανταμοιβή $R_{t+1} \in R$ δίνεται την επόμενη χρονική στιγμή $t + 1$ ως αποτέλεσμα της ενέργειας και ο πράκτορας βρίσκεται στη νέα κατάσταση. Επομένως, $\{S, A, T, R, \Sigma, \gamma\}$ είναι ο ορισμός της πλειάδας μίας MDP, όπου:

- S είναι η πεπερασμένη κατάσταση (συνεχής ή διακριτή)
- A είναι το σύνολο ενεργειών

- T είναι η συνάρτηση $T : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$, που υπολογίζει την πιθανότητα να συμβεί μια μετάβαση με $T(s, a, s') = 1$ να δηλώνει την πιθανότητα ότι η επόμενη ενέργεια είναι s' όταν η τρέχουσα κατάσταση είναι s και η επιλεγμένη ενέργεια είναι a , και με $\sum_{s' \in S} T(s, a, s')$
- R είναι συνάρτηση ανταμοιβής για ένα μόνο βήμα $R : S \times A \times S \rightarrow \mathbb{R}$
- Σ είναι η αρχική κατανομή των καταστάσεων
- $\gamma \in (0, 1)$ διασφαλίζει ότι τα μελλοντικά κίνητρα σταθμίζονται έναντι των παρόντων ανταμοιβών με έναν συντελεστή έκπτωσης γ .

Επειδή δεν είναι όλες οι ενέργειες διαθέσιμες σε κάθε στάδιο, η συλλογή των ενεργειών μπορεί να εξαρτάται από την κατάσταση. Το $A(s) \subseteq A$ αντιπροσωπεύει τη συλλογή ενεργειών που είναι προσβάσιμες σε μια δεδομένη κατάσταση $s \in S$.

6.2.1 Βασικές Έννοιες MDP

Πολιτική

Ο πράκτορας χρησιμοποιεί ένα σύνολο κανόνων που ονομάζονται πολιτική του πράκτορα [42] για να λαμβάνει μια απόφαση δράσης κάθε φορά που t . Είναι πιθανό αυτή η στρατηγική να είναι είτε ντετερμινιστική είτε στοχαστική. Συμβολίζεται ως $a_t = (s_t)$ στο πρώτο παράδειγμα, και ο πράκτορας πρέπει να επιλέξει ακριβώς το ίδιο, ανεξάρτητα από το πόσες φορές θα κληθεί να αποφασίσει την επόμενη ενέργειά του σε κάθε συνθήκη.

Στο δεύτερο παράδειγμα, από την άλλη πλευρά, η πολιτική εκτελεί μια αντιστοίχιση, στην οποία σε κάθε μια από τις πιθανές ενέργειες κάθε ρύθμισης πράκτορα εκχωρείται μια τιμή πιθανότητας. Η πολιτική συμβολίζεται με το $\pi_t(a|s)$ και αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ότι ένα θα ενεργήσει ενώ βρίσκεται στην κατάσταση s . Οι κατηγορίες κατηγοριών και οι πολιτικές διαγωνίας Gauss είναι οι δύο πιο γνωστές πολιτικές αυτής της κατηγορίας και χρησιμοποιούνται σε ζητήματα που έχουν ένα διακριτό και συνεχές εύρος τιμών ενεργειών, αντίστοιχα. Εάν ο πράκτορας δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη πολιτική, θα πρέπει να ενημερώνεται ανά πάσα στιγμή για τα μελλοντικά του βήματα.

Επεισόδιο

Μια σειρά περιβαλλοντικών συνθηκών και ενεργειών του πράκτορα ονομάζεται επεισόδιο και ορίζεται ως $\tau = \{(s_0, a_0), (s_1, a_1), (s_2, a_2), \dots, (s_T, a_T)\}$. Οι ενέργειες επιλέγονται διαδοχικά από την αρχική κατάσταση s_0 έως την τελική κατάσταση s_T .

Αναμενόμενη συσσωρευμένη ανταμοιβή κατάστασης

Ορισμένες πτυχές της σωρευτικής ανταμοιβής του πράκτορα θα πρέπει να εξηγηθούν αυτήν τη στιγμή, καθώς είναι το κύριο εργαλείο για την εκπαίδευση και την αξιολόγησή του. Ο πράκτορας επιδιώκει να μεγιστοποιήσει την αναμενόμενη ανταμοιβή G_t εάν η ακολουθία ανταμοιβών μετά από κάποιο χρονικό διάστημα t και το περιβάλλον είναι $R_{t+1}, R_{t+2}, R_{t+3}, \dots, R_T$. Αυτή η τιμή καθορίζεται από τη σειρά με την οποία δίνονται οι ανταμοιβές. Ανάλογα με τη φύση της κατάστασης, μπορεί να έχει δύο μορφές. Ο ακόλουθος τύπος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής στην πιο βασική της μορφή:

$$G_t = R_{t+1} + R_{t+2} + R_{t+3} + \dots + R_T \quad (6.1)$$

όπου το T είναι η τελική χρονική στιγμή. Σε εφαρμογές που ορίζουν έναν χρονικό ορίζοντα, όπως τα επεισοδιακά περιβάλλοντα, χρησιμοποιείται αυτός ο τύπος μεταβλητής. Κάθε επεισόδιο έχει μια κορυφαία στιγμή που επηρεάζει το αποτέλεσμα. Για να αποφευχθεί η ύπαρξη του πράκτορα σε αυτό το σενάριο, διαγράφεται συχνά από όλους τους ισχυρισμούς S . Ωστόσο, σε έναν αριθμό εφαρμογών, ιδιαίτερα σε αυτές που διεξάγουν ατελείωτες πράξεις, η ίδια εξίσωση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς, για $T = \infty$, το κέρδος μπορεί να πλησιάσει στο άπειρο εάν ο πράκτορας είναι κλειδωμένος σε έναν άπειρο κύκλο δραστηριοτήτων. Η χρήση ενός συντελεστή έκπτωσης είναι μια λύση σε αυτό το πρόβλημα. Αυτό το στοιχείο έχει τιμή 0 έως 1. Ο ενημερωμένος τύπος για τον υπολογισμό της συνολικής ανταμοιβής έχει ως εξής:

$$G_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} \quad (6.2)$$

Ο συντελεστής έκπτωσης, στην ουσία, καθορίζει τις παρούσες τιμές των μελλοντικών ανταμοιβών, δηλαδή το κέρδος τη στιγμή k στο μέλλον είναι ίσο με την τιμή κέρδους εάν το έλαβαν στο παρόν, επί τον παράγοντα γ^{k-1} . Όταν η τιμή του είναι κοντά στο 0, ο πράκτορας αγνοεί τα μελλοντικά οφέλη και επικεντρώνεται αποκλειστικά στο παρόν κέρδος. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του γ στη μονάδα, τόσο μεγαλύτερη αξία δίνεται στις μελλοντικές ανταμοιβές και ο πράκτορας γίνεται πιο εύστροφος. Η προσπάθεια του πράκτορα να κατασκευάσει μια πιο περίπλοκη στρατηγική είναι υπεύθυνη για την τελευταία παρατήρηση.

Ο ακόλουθος είναι ένας γενικός τύπος για τον υπολογισμό του σωρευτικού κέρδους:

$$G_t = \sum_{k=0}^{T-t-1} \gamma^k R_{t+k+1} \quad (6.3)$$

όπου $T = \infty$ ή $\gamma = 1$, κάτι το οποίο αποκλείεται να συμβαίνει ταυτοχρόνως.

Συνάρτηση αξίας κατάστασης

Όταν ακολουθείται η πολιτική για τα βήματα και εφαρμόζεται ο συντελεστής έκπτωσης γ , η αναμενόμενη Ε αθροιστική ανταμοιβή της κατάστασης S τη στιγμή t ορίζεται ως συνάρτηση της τιμής κατάστασης $V : S \rightarrow R$. Είναι μια κλίμακα χρησιμότητας για κάθε κατάσταση και

καθορίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$V_{\pi}(s) = E_{\pi}\{G_t | S_t = s\} = E_{\pi}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s\right\} \quad (6.4)$$

Εξίσωση Bellman

Η τιμή μιας κατάστασης, σύμφωνα με αυτήν, είναι η άμεση ανταμοιβή για αυτό το σενάριο συν την προβλεπόμενη τιμή του επόμενου γεγονότος με την προϋπόθεση ότι ακολουθείται η πολιτική π :

$$\begin{aligned} V_{\pi}(s) &= E_{\pi}\{G_t | S_t = s\} = E_{\pi}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s\right\} \\ &= E_{\pi}\left\{R_{t+1} + \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+2} | S_t = s'\right\} \\ &= \sum_a \pi(a|s) \sum_{s'} \sum_r p(s', r|s, a) \{r + \gamma E_{\pi}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+2} | S_{t+1} = s'\right\}\} \\ &= \sum_a \pi(a|s) \sum_{s', r} p(s', r|s, a) \{r + \gamma V_{\pi}(s')\} \end{aligned} \quad (6.5)$$

και τελικά έχουμε:

$$V_{\pi}(s) = R(s, \pi(s)) + \gamma \sum_{s'} p(s'|s, \pi(s)) V_{\pi}(s') \quad (6.6)$$

Συνάρτηση τιμής δράσης-κατάστασης

Η συνάρτηση τιμής δράσης-κατάστασης, γνωστή και ως συνάρτηση Q , αντιστοιχεί στη συνάρτηση τιμής κατάστασης και ορίζεται ως η τιμή μιας ενέργειας που βρίσκεται στην κατάσταση s και ακολουθεί την πολιτική π . Υποδεικνύεται ως $Q_{\pi}(s, a)$ και είναι πανομοιότυπο με την προβλεπόμενη αθροιστική ανταμοιβή στην κατάσταση s , όπου πρώτα πραγματοποιείται η ενέργεια a και μετά ακολουθείται η πολιτική π . Ο τύπος έχει ως εξής:

$$Q_{\pi}(s, a) = E_{\pi}\{G_t | S_t = s, A_t = a\} = E_{\pi}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s, A_t = a\right\} \quad (6.7)$$

Βέλτιστη συνάρτηση τιμής κατάστασης

Η πολιτική του πράκτορα καθορίζεται κυρίως από τις συναρτήσεις τιμής κατάστασης. Μόνο όταν μία πολιτική π' αποφέρει μεγαλύτερη ή ίση συνολική απόδοση είναι καλύτερη ή ισοδύναμη με μία άλλη πολιτική π . Για να το θέσω αλλιώς, δηλώνει ότι: $\pi' \geq \pi$ εάν και μόνο εάν $V_{\pi'}(s) \geq V_{\pi}(s)$, για οποιαδήποτε κατάσταση $s \in S$. Τουλάχιστον μία πολιτική, η βέλτιστη, είναι πάντα ανώτερη ή συγκρίσιμη με τις άλλες. Υποδεικνύεται ως π^* ενώ η σχετική συνάρτηση τιμής ιδανικής κατάστασης V_{π^*} , η οποία ορίζεται ως $V_{\pi^*}(s) = \max_{\pi} V_{\pi}(s)$.

Η τιμή της συνάρτησης δράσης-κατάστασης είναι κοινή από όλες τις βέλτιστες πολιτικές Q_{π^*} , και ορίζεται ως $Q_{\pi^*} = \max_{\pi} Q_{\pi}(s, a) \forall s \in S, a \in A$, και συναρτήση του V_{π^*} ορίζεται ως $Q_{\pi^*}(s, a) = E\{R_{t+1} + \gamma V_{\pi^*}(S_{t+1}) | S_t = s, A_t = a\}$.

Οι τύποι V_{π^*} , Q_{π^*} λαμβάνουν την ακόλουθη μορφή όταν χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις Bellman:

$$\begin{aligned}
 V_{\pi^*} &= \max_{a \in A(s)} Q_{\pi^*}(s, a) \\
 &= \max_a E_{\pi^*} \{G_t | S_t = a, A_t = a\} \\
 &= \max_a E_{\pi^*} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s, A_t = a \right\} \\
 &= \max_a E_{\pi^*} \left\{ R_{t+1} + \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1} | S_t = s, A_t = a \right\} \\
 &= \max_{a \in A(s)} \sum_{s', r} p(s', r | s, a) (r + \gamma V_{\pi^*}(s'))
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

και

$$\begin{aligned}
 Q_{\pi^*}(s, a) &= E\{R_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q_{\pi^*}(S_{t+1}, s') | S_t = s, A_t = a\} \\
 &= \sum_{s', r} p(s', r | s, a) \left\{ r + \gamma \max_{a'} Q_{\pi^*}(s', a') \right\}
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Η MDP επιλύεται με τον προσδιορισμό της καλύτερης πολιτικής π^* που μεγιστοποιεί την αναμενόμενη σωρευτική ανταμοιβή με έκπτωση. Οι τεχνικές RL, όπως η Q-learning, από την άλλη πλευρά, επιδιώκουν να προβλέψουν την ιδανική συνάρτηση κατάστασης-δράσης-τιμής Q_{π^*} με βάση την εμπειρία του ελεγκτή που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον.

6.2.2 Q-Learning

Η οικογένεια αλγορίθμων Q-learning, από την άλλη πλευρά, μαθαίνει μια συνάρτηση τιμής κατάστασης δράσης με βάση τη μέθοδο της εξίσωσης Bellman. Σε αυτούς τους αλγόριθμους, η μάθηση γίνεται σε δύο φάσεις: εντός πολιτικής και εκτός πολιτικής. Στην πρώτη φάση, συλλέγονται δεδομένα από τις αλληλεπιδράσεις του πράκτορα με το περιβάλλον, ανεξάρτητα από

το πώς επιλέχθηκαν οι ενέργειες, δηλαδή ποια πολιτική ακολουθούσε ο πράκτορας εκείνη τη στιγμή. Όλες αυτές οι μεταβάσεις αναλύονται στη δεύτερη φάση και οι τιμές της συνάρτησης Q αλλάζουν, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$Q(S_t, A_t) \leftarrow Q(S_t, A_t) + a(R_{t+1} + \gamma Q(S_{t+1}, A_{t+1}) - Q(S_t, A_t)) \quad (6.10)$$

Συχνά επινοούνται αλγόριθμοι για τη συγχώνευση αλγορίθμων Q-Learning και αλγορίθμων βελτιστοποίησης, αξιοποιώντας ο ένας τα δυνατά σημεία και τα μειονεκτήματα του άλλου. Από τη μία πλευρά, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης ενημερώνουν άμεσα την πολιτική του πράκτορα, διασφαλίζοντας ότι η συμπεριφορά του παραμένει σταθερή και βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου. Οι αλγόριθμοι Q-learning, από την άλλη πλευρά, βελτιστοποιούν μια συνάρτηση Q άμεσα, ενώ επίσης βελτιστοποιούν έμμεσα την πολιτική πρακτόρων. Αν και αυτό το χαρακτηριστικό προκαλεί αστάθεια στον αλγόριθμο και αυξάνει την πιθανότητα να αποτύχει να συγκλίνει, είναι πιο αποτελεσματικό στην περίπτωση που το κάνει, αφού μεμονωμένες μεταβάσεις χρησιμοποιούνται ξανά για εκπαίδευση. Ο συνδυασμός των δύο εγγυάται ότι η εκπαίδευση του πράκτορα είναι σταθερή και αποτελεσματική.

Το δίλημμα εξερεύνηση-αξιοποίηση

Επειδή ο πράκτορας δεν έχει επιλέξει μια πολιτική δράσης, ιδιαίτερα στα αρχικά του βήματα αναγνώρισης στο περιβάλλον, είναι απαραίτητη η εξερεύνηση [43]. Μια επιλογή είναι να κάνει τυχαίες κινήσεις μέχρι να έχει αρκετά δεδομένα για την εκπαίδευσή του. Ωστόσο, υπάρχει πιθανότητα ο πράκτορας να μην έχει μια αξιοπρεπή εικόνα του μοντέλου λόγω αυτών των τυχαίων κινήσεων. Ως αποτέλεσμα, αυτή η μέθοδος είναι αποδεκτή μόνο κατά τα πρώτα επεισόδια της εκπαίδευσης, ενώ ο πράκτορας την εξερευνά ως επί το πλείστον. Η φιλαργυρία του πράκτορα γίνεται αντικείμενο εκμετάλλευσης στα επόμενα επεισόδια και η στρατηγική που έχει καθιερώσει για την επιλογή της βέλτιστης δράσης σύμφωνα με αυτήν καταλαμβάνεται. Ακόμα και αυτή η απάντηση, όμως, είναι ανεπαρκής, γιατί η πολιτική του θα τον ανάγκαζε να κάνει την ίδια ενέργεια σε κάθε περίπτωση, καθιστώντας τον «άπληστο» πράκτορα. Ως αποτέλεσμα, δεν δημιουργούνται νέα επεισόδια και η ασφάλιση του πράκτορα δεν ανανεώνεται. Η καταλληλότερη λύση θεωρείται ότι είναι ο συνδυασμός των δύο ενεργειακών επιλογών.

ϵ -greedy policy

Σύμφωνα με αυτή τη συνάρτηση επιλογής ενέργειας, ένας πράκτορας επιλέγει την ενέργεια που εξουσιοδοτείται για το παρόν σενάριο που ορίζεται από την πολιτική που έχει επινοήσει με πιθανότητα $1-\epsilon$ και μερικές από όλες τις άλλες ενέργειές του, συμπεριλαμβανομένης αυτής που ορίζεται από το συμβόλαιό του, με πιθανότητα ϵ τυχαία και εξίσου πιθανή. Ως αποτέλεσμα, ο παράγοντας πολιτικής χρησιμοποιεί τον ακόλουθο τύπο δύο μερών για να επιλέξει την επόμενη ενέργεια ενός $a \in A(s)$, όπου το $A(s)$ είναι η συλλογή πιθανών ενεργειών σε κάθε κατάσταση του περιβάλλοντος $s \in \mathcal{S}$:

$$\pi(a|s) \leftarrow \left\{ \begin{array}{ll} 1 - \epsilon + \epsilon/|A(s)|, & \text{αν μεγιστοποιεί την } Q(s, a) \\ \epsilon/|A(s)|, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{array} \right\} \forall s \in \mathcal{S}, a \in A(s) \quad (6.11)$$

όπου η πιθανότητα ϵ παίρνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$.

Η πιθανότητα ϵ

Σύμφωνα με τον προηγούμενο τύπο, η μηδενική τιμή της μονάδας τιμής πιθανότητας προκαλεί τον πράκτορα να ενεργεί απολύτως τυχαία, αλλά η της τιμής σε ένα, κάνει τον πράκτορα να ενεργεί "άπληστα". Η τιμή, ωστόσο, μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου. Η μονάδα καθορίζεται ως η αρχική τιμή στις αρχικές φάσεις, όταν ισχύει η εξερεύνηση του περιβάλλοντος. Αντίθετα, όσο περισσότερα επεισόδια εκτελούνται, τόσο περισσότερο κατανοείται η πολιτική του πράκτορα και δοκιμάζεται η επιλογή μετακίνησης. Ο ρυθμός με τον οποίο πέφτει η τιμή πιθανότητας είναι γενικά γραμμικός ή εκθετικός και καθορίζεται από τον αριθμό των γεγονότων και των εναλλακτικών ενεργειών. Σε κάθε περίπτωση, σύμφωνα με την τεχνική της απληστίας σε άπειρο χρονικό ορίζοντα, η τιμή πρέπει να πληροί τις ακόλουθες δύο προϋποθέσεις:

- $\epsilon_i > 0$, για όλα τα χρονικά βήματα i και
- ϵ_i , συγκλίνει προς το μηδέν όσο το χρονικό βήμα i τείνει στο άπειρο ή αλλιώς $\log_{i \rightarrow \infty} \epsilon_i = 0$

Θεωρητικά, η στρατηγική του πράκτορα θα αντιστοιχεί στην ιδανική μετά από αόριστο χρόνο εκπαίδευσης. Ως αποτέλεσμα, δεν συνιστάται περιβαλλοντική διερεύνηση. Η τιμή δεν τείνει ποτέ στο μηδέν σε ζητήματα εκμάθησης πραγματικού κόσμου όταν ο πράκτορας εκπαιδεύεται για έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων. Αντίθετα, δίνεται ένα χαμηλότερο όριο, συνήθως 0,01 για να διασφαλιστεί ότι ο πράκτορας δεν θα σταματήσει ποτέ την εξερεύνηση επειδή η πολιτική του βελτιώνεται συνεχώς.

Μία από τις πιο διαχρονικές δυσκολίες στον τομέα είναι ο καθορισμός της αρχικής, τελικής τιμής πιθανότητας και του ρυθμού με τον οποίο μειώνεται, αφού η εκπαιδευτική διαδικασία έχει εντελώς αλλοιωθεί.

Ο αλγόριθμος σε μορφή ψευδοκώδικα έχει την εξής μορφή:

Algorithm 2 Αλγόριθμος Q-Learning

```

Initialize  $Q(s_t, a_t)$  arbitrarily
for all episodes do
  Initialize  $s_t$ 
  for all steps of episode do
    Choose  $a_t$  from set of actions
    Act  $a_t$ , observe  $R_t, s_{t+1}$ 
    Perform Eq. 6.10
     $s_t \leftarrow s_{t+1}$ 
  end for
end for

```

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η συνάρτηση Q προσαρμόζεται μόνο στις παραδοσιακές τεχνικές RL για τα εξεταζόμενα ζεύγη κατάστασης-δράσης. Για να αποκτήσετε μια λεπτομερή προσέγγιση της βέλτιστης συνάρτησης Q , είναι απαραίτητο να επισκεφτείτε κάθε συνδυασμό κατάστασης-ενέργειας τουλάχιστον μία φορά. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος κατάστασης και ο

χώρος δράσης A πρέπει να είναι περιορισμένος και διακριτός, και οι αλγόριθμοι RL υποφέρουν από το λεγόμενο πρόβλημα διαστάσεων καθώς οι διαστάσεις τους αυξάνονται.

6.2.3 Deep Q-Learning

Ο αλγόριθμος DQN [44] κυκλοφόρησε από το Deepmind της Google το 2015, καθιστώντας τον έτος προόδου βαθιάς μάθησης. Αυτός ο πράκτορας βοήθειας μάθησης χρησιμοποιεί ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο που μπορεί να διδαχθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις μεγάλης κλίμακας και διαδοχική ενισχυτική μάθηση. Σε περιβάλλοντα παιχνιδιού Atari2600, ο πράκτορας DQN κατασκευάστηκε, εκπαιδεύτηκε και αξιολογήθηκε. Επειδή ο πράκτορας μπόρεσε να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ θεμάτων μεγάλης κλίμακας και χρήσης ενισχυμένων τεχνικών μάθησης, τα ευρήματα ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακά και τράβηξαν το ενδιαφέρον των επιστημόνων του πεδίου. Ο αλγόριθμος DQN βασίστηκε στη μέθοδο Q-learning. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα νευρωνικό δίκτυο που θα λαμβάνει τις καταστάσεις του πράκτορα ως είσοδο και θα παράγει την τιμή της κατάστασης δράσης $Q(s, a)$ για κάθε ενέργεια $a \in A(s)$. Ο συνολικός αριθμός των πιθανών ενεργειών για τον παράγοντα είναι ίσος με τον αριθμό των νευρώνων εξόδου. Σε αυτή την προσέγγιση, η τιμή Q υπολογίζεται παράλληλα για κάθε είσοδο.

Σύμφωνα με τη θεωρία του κεφαλαίου, η βέλτιστη συνάρτηση τιμής κατάστασης δράσης $Q^*(s, a)$ ορίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bellman, η οποία αντιστοιχεί στη βέλτιστη πολιτική. Η κύρια ιδέα πίσω από τη μέθοδο είναι να συνεχίσουμε να επαναλαμβάνουμε την εξίσωση Bellman:

$$Q_{i+1}(s, a) = E_{s'} \{r + \gamma \max_a Q_i(s', a) | s, a\} \quad (6.12)$$

μέχρι να είναι συγκρίσιμα με το ιδανικό Q^* , όπου $Q_i \rightarrow Q^*$ καθώς $i \rightarrow \infty$. Η γραμμικότητα της συνάρτησης εκτίμησης Q-value είναι χαρακτηριστική στις παραδοσιακές εφαρμογές των μεθόδων Q-learning. Οι σύγχρονες τεχνικές, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιούν μη γραμμικά μαθηματικά μοντέλα $Q(s, a; \theta) \approx Q^*(s, a)$. Q-Network είναι το όνομα αυτού του νευρωνικού εκτιμητή με βάρη. Σε κάθε επανάληψη i το δίκτυο Q εκπαιδεύεται στις παραμέτρους θ_i .

Προβλήματα αστάθειας του Q-learning

Η χρήση μιας μη γραμμικής συνάρτησης εκτίμησης τιμής Q έχει αναφερθεί ότι εμφανίζει περιστασιακά ασταθή και μη συγκλίνουσα συμπεριφορά. Πολλά πράγματα συμβάλλουν σε αυτήν την ανασφάλεια:

- Υπάρχουν σχέσεις μεταξύ των ακολουθιών παρατήρησης.
- Μικρές αλλαγές στα βάρη του δικτύου έχουν μεγάλο αντίκτυπο στη συμπεριφορά του πράκτορα.
- Οι σύνδεσμοι μεταξύ των τιμών στόχου $r + \gamma \max_a Q(s', a')$ και των τιμών ενέργειας κατάστασης Q .

Για την αντιμετώπιση της αστάθειας χρησιμοποιήθηκαν δύο τεχνικές:

Experience buffer Ο πρώτος μηχανισμός, που ονομάστηκε επανάληψη εμπειρίας, είναι επισημονικά εμπνευσμένος από τη μνήμη των ζωντανών όντων. Στην εκπαίδευση, αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται την επανάληψη της εμπειρίας. Για να γίνει αυτό, πρέπει να δημιουργηθεί μια μνήμη, το *experience buffer*, προκειμένου να αποθηκεύονται οι εμπειρίες $e_t = (s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$, κάθε χρονικής στιγμής t , ενός συνόλου $D_t = \{e_1, \dots, e_t\}$ οι οποίες έχουν παραχθεί από ένα πλήθος επεισοδίων. Ανά πάσα στιγμή, οι τελευταίες N μεταβάσεις σε περιορισμένου μεγέθους N μνήμη αποθηκεύονται. Τα βάρη του δικτύου Q ανανεώνονται κατά τη διάρκεια της προπόνησης χρησιμοποιώντας δείγματα (minibatches) από τη μνήμη $(s, a, r, s') \sim U(D)$, τα οποία επιλέγονται τυχαία. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια σειρά από οφέλη [20]. Πρώτον, οι μεμονωμένες μεταβάσεις συχνά εμπλέκονται στην ανανέωση των βαρών του δικτύου Q , επιτρέποντας μεγαλύτερη χρήση των δεδομένων τους. Δεύτερον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά τη διάρκεια της τυχαίας δειγματοληψίας, οι συσχετίσεις μεταξύ των επόμενων δεδομένων διαγράφονται. Τρίτον, σε αντίθεση με την συγκρίσιμη τεχνική *live Q-learning*, οι παράμετροι του δικτύου δεν αλλάζουν κάθε φορά από την επόμενη μετάβαση. Ως αποτέλεσμα, η μάθηση κανονικοποιείται από τη σταθμισμένη συμπεριφορά που υιοθετείται μέσω επαναλαμβανόμενης εκπαίδευσης από προηγούμενα σενάρια, ελαχιστοποιώντας τις ταλαντώσεις ή τις διακυμάνσεις στις παραμέτρους.

Q-Target Network Η δεύτερη τεχνική χρησιμοποιεί ένα δίκτυο με παρόμοια δομή, το δίκτυο προορισμού, για να ανανεώσει τα βάρη του δικτύου Q (*Q-target*). Αυτή τη φορά, ωστόσο, οι τιμές Q αλλάζουν για τις τιμές στόχου δικτύου και όχι για την ιδανική πολιτική Q^* . Ως αποτέλεσμα, οι βέλτιστες τιμές του στόχου, $r + \gamma \max_a Q^*(s', a')$ αντικαθίστανται από τις κατά προσέγγιση τιμές του στόχου, $y = r + \gamma \max_a Q^*(s', a'; \theta_i^-)$, όπου τα βάρη θ_i^- αντιστοιχούν σε τα βάρη του δικτύου Q σε προηγούμενη επανάληψη και είναι ο συντελεστής έκπτωσης που καθορίζει τον χρονικό ορίζοντα του πράκτορα. Ως αποτέλεσμα, σχηματίζεται μια σειρά από συναρτήσεις σφάλματος $L_i(\theta_i)$, οι οποίες αυξομειώνονται με κάθε επανάληψη i και γράφονται ως:

$$\begin{aligned} L_i(\theta_i) &= E_{s,a,r}[(E_{s'}[y|s,a] - Q(s,a;\theta_i))^2] \\ &= E_{s,a,r,s'}[(y - Q(s,a;\theta_i))^2] + E_{s,a,r}[V_{s'}[y]] \end{aligned} \quad (6.13)$$

Οι παράμετροι βάρους i δεν επηρεάζουν τον τελικό παράγοντα της εξίσωσης 6.13. Ταυτόχρονα, ορίζεται η παράγωγος της συνάρτησης σφάλματος ως προς τα βάρη i :

$$\nabla_{\theta_i} L(\theta_i) = E_{s,a,r,s'}[(r + \max_{a'} Q(s', a'; \theta_i^-) - Q(s', a'; \theta_i)) \nabla_{\theta_i} Q(s', a'; \theta_i)] \quad (6.14)$$

όπου θ_i τα βάρη του δικτύου Q στην επανάληψη i και θ_i^- τα βάρη του δικτύου στόχου.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το δίκτυο-στόχος ενημερώνεται σε τακτική βάση, οπότε τα βάρη του δικτύου Q αντιγράφονται. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε C βήματα, με τα βάρη των στόχων να παραμένουν σταθερά σε όλη την περίοδο. Επειδή οι στόχοι δεν κινούνται ανά πάσα στιγμή, όπως συμβαίνει με τον παραδοσιακό αλγόριθμο *Q-learning*, το κινούμενο δίκτυο στόχου βελτιώνει σημαντικά την προσπάθεια ελαχιστοποίησης της αστάθειας. Ωστόσο, η πολιτική του πράκτορα είναι ϵ -greedy πολιτική. Η μεγαλύτερη τιμή εξόδου για κάθε κατάσταση εισόδου του νευρωνικού δικτύου του πράκτορα αναφέρεται στην άπληστη επιλογή δράσης.

Ο πλήρης αλγόριθμος DQL έχει ως εξής:

Algorithm 3 Ο αλγόριθμος DQL με χρήστη Experience buffer

Initialize replay memory D to capacity N

Initialize action-value function Q with random weights θ

for all episodes **do**

Initialize state s_t

for all steps of episode **do**

With ϵ select a random action a_t otherwise select $a_t = \max_a Q^*(s_t, a; \theta)$

Execute action a_t , observe reward R_t and state s_{t+1}

Store transition (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) in D

$s_t \leftarrow s_{t+1}$

Sample random minibatch of transitions (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) from D

$$y_j = \begin{cases} r_j, & \text{for terminal } s_{t+1} \\ r_j + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a'; \theta), & \text{for non-terminal } s_{t+1} \end{cases}$$

Perform a gradient descent step on $(y_j - Q(s_t, a_j; \theta))^2$

end for

end for

6.3 Περιγραφή

Χρειάζεται πολύς χρόνος και πολλή προσπάθεια για να εκπαιδευτεί ένας πράκτορας βαθιάς μάθησης. Απαιτείται η δημιουργία ενός προγράμματος που να πληροί τον εκπαιδευτικό αλγόριθμο και, ευρύτερα, την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, καθώς και τις σχετικές υπολογιστικές μονάδες για την εκτέλεση του προγράμματος. Σε αυτή την ενότητα, ορίζουμε όλα τα απαραίτητα κομμάτια του μηχανισμού μας. Αυτά είναι το περιβάλλον του, ο χώρος καταστάσεων, ο χώρος ενεργειών, η συνάρτηση ανταμοιβής αλλά και την πιθανότητα ϵ και ο ρυθμός εκμάθησης a .

6.3.1 Περιβάλλον

Ως περιβάλλον ορίζεται ο εξομοιωτής που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας. Η λειτουργία του αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Σε γενικές γραμμές, ο εξομοιωτής θα τρέχει για όλα τα επεισόδια. Θα τοποθετεί τους χρήστες μέσα στο δίκτυο χωρίς να κάνει την συσχέτιση των χρηστών με τους BSs και χωρίς να κάνει την ανάθεση των πόρων των BSs. Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος θα τρέχει και θα εκτελεί την συσχέτιση των χρηστών και την ιδανική κατανομή των πόρων. Στο τέλος κάθε επεισοδίου, θα υπολογίζεται η ανταμοιβή από το περιβάλλον, της οποίας η συνάρτηση, αναλύεται στην παρακάτω, και βάση της ανταμοιβής ο πράκτορας μαθαίνει από το περιβάλλον του.

6.3.2 Χώρος Καταστάσεων

Πρέπει πρώτα να ορίσουμε τον πολιτειακό μας χώρο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε BS προσδιορίζεται από την ποσότητα των PRB που είναι διαθέσιμα για κατανομή, W_p . Η κατάσταση του δικτύου θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες σχετικά με: 1) το φορτίο των PRB στους διάφορους BSs και 2) την ποιότητα κάλυψης που παρέχει ο BS στον UE, για να επιτρέψει στον πράκτορα να λάβει αποτελεσματικές αποφάσεις σχετικά με την κατανομή των PRBs για υπάρχοντα ή ακόμα και νέα εισερχόμενα αιτήματα από διαφορετικούς UE.

Αντιπροσωπεύουμε το ποσό των PRB που κατανέμεται κάθε χρονική στιγμή t για τη διατήρηση των υπηρεσιών που έχει αναλάβει ο BS (για την υποστήριξη του ελάχιστου επιπέδου ρυθμού bit κάθε υπηρεσίας), ως $NPRB_k(t)$. Στη συνέχεια προκύπτει ότι:

$$NPRB_k(t) = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} w_{pk}^m \quad (6.15)$$

όπου w_{pk}^m ορίζεται ως το πλήθος των PRBs που παρέχει ο BS $k \in K$ στο UE $m \in M$.

Έπειτα, έστω $L_p^k(t)$ το επίπεδο φορτίου ενός BS $k \in K$ στη χρονική στιγμή t , το οποίο ορίζεται ως ο λόγος των εκχωρημένων PRBs προς την ποσότητα των διαθέσιμων PRBs. Έχουμε εξ ορισμού:

$$L_p^k(t) = \frac{NPRB_k(t)}{W_p} \quad (6.16)$$

Έτσι, η παρατηρούμενη κατάσταση S_m για ένα UE $m \in M$ που αναζητά υπηρεσία περιγράφεται από τις ακόλουθες δύο συνιστώσες: 1) Το επίπεδο φορτίου κάθε BS, από το οποίο το UE λαμβάνει ένα σήμα, και 2) Η τιμή των RSRP των σημάτων που λαμβάνει ο UE από κάθε BS που βρίσκεται κοντά του, όπως αυτό μετρείται από το UE. Έτσι, ο χώρος κατάστασης ορίζεται ως:

$$S_m(t) = \{s_m^k(t) = \{L_p^k(t), RSRP_m^k\}\} \quad (6.17)$$

6.3.3 Χώρος ενεργειών

Επιπλέον, πρέπει επίσης να ορίσουμε τον χώρο δράσης για τον πράκτορά μας. Κάθε φορά που λαμβάνεται ένα νέο αίτημα σύνδεσης από τον ελεγκτή δικτύου, μπορεί να συμβεί ένα από δύο πράγματα: 1) Ο ελεγκτής επεξεργάζεται το αίτημα και το εκχωρεί σε ένα συγκεκριμένο BS. 2) Λόγω έλλειψης πόρων, η σύνδεση απορρίπτεται καθώς κανένας BS δεν μπορεί να το χειριστεί. Τώρα ορίζουμε το σύνολο ενεργειών. Έστω A_m διάνυσμα μεγέθους K και ίδιας διάστασης με το $s_m^k \in S_m$. Το διάνυσμα αρχικοποιείται στην τιμή MIN_{RSRP} που είναι ίση με -140 . Κάθε θέση διατηρεί την τιμή RSRP που λαμβάνει ο χρήστης από το BS k στην περιοχή του UE m .

Πιο συγκεκριμένα, η θέση k του διανύσματος $A_m(s)$ περιέχει το μετρούμενο RSRP που λαμβάνει το UE m από το BS k . Εάν χορηγηθεί το νέο αίτημα σύνδεσης, το μεγαλύτερο στοιχείο στο A_m αντικατοπτρίζει το BS από το οποίο το UE m λαμβάνει το καλύτερο σήμα. Ως αποτέλεσμα, μια αιτούμενη υπηρεσία μπορεί να εκχωρηθεί στο BS k σε κάθε κατάσταση s_m^k εάν και μόνο εάν $s_m^k \in S_m$, που σημαίνει ότι με την ανάθεση της νέας αίτησης στο BS, η κατάσταση που

δημιουργήθηκε πρόσφατα παραμένει στο S_m . Έτσι, το σύνολο ενεργειών που είναι διαθέσιμο σε μια κατάσταση $s \in S$ ορίζεται στη συνέχεια ως:

$$A_m(s) = \{RSRP_1, RSRP_2, \dots, RSRP_k\} \quad (6.18)$$

Με βάση τα παραπάνω, όσον αφορά τον χώρο ενεργειών, οι ασυνήθιστες καταστάσεις αυτού του $a_i = 0$ υποδηλώνουν ότι το αίτημα σύνδεσης πρέπει να απορριφθεί λόγω έλλειψης πόρων δικτύου, καθώς κανένας BS δεν μπορεί να εκχωρήσει την εισερχόμενη αίτηση με τον ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης bit.

6.3.4 Συνάρτηση ανταμοιβής

Τέλος, πρέπει να περιγράψουμε τη συνάρτηση ανταμοιβής. Για να το πετύχουμε αυτό, πρέπει πρώτα να ορίσουμε το b_m^k, b_{pk} ως το bitrate που λαμβάνει το UE m από το BS k και το επιπλέον bitrate που μπορεί να προσφέρει ο BS k στη σύνδεση χρησιμοποιώντας ένα τμήμα των πόρων του που απομένουν, αντίστοιχα. Επιπλέον, ορίζουμε το b_{req} ως το bitrate που ζητά το UE m . Το προφίλ QoS που συνδέεται με τη σύνδεση συνδέεται άμεσα με αυτό το ποσό. Στη συνέχεια, η συνάρτηση ανταμοιβής πρέπει να λαμβάνει υπόψη τέσσερα σενάρια:

1. Η σύνδεση εκχωρείται σε ένα BS και το UE λαμβάνει την κατάλληλη ποσότητα πόρων.
2. Η σύνδεση εκχωρείται σε ένα BS και το UE λαμβάνει έναν επιπλέον αριθμό πόρων.
3. Η σύνδεση εκχωρείται σε ένα BS με περιορισμένους πόρους, επομένως το UE δεν διαθέτει τους πόρους.
4. Το αίτημα για σύνδεση απορρίπτεται (δηλαδή, κανένα BS δεν αποδέχεται τη σύνδεση).

Για να ληφθούν υπόψη και τα τέσσερα σενάρια, η συνάρτηση ανταμοιβής του πράκτορα $R_t(s_t, a_t, s_{t+1})$ κατά την εκχώρηση μιας υπηρεσίας i σε ένα BS k θα καθοριστεί ως:

$$R_t = \begin{cases} \frac{b_m^k}{L_p^k(t)}, & b_m^k > b_{req} \\ (b_m^k)^2 b_{pk} L_p^k(t), & b_{pk} > b_m^k \\ (b_m^k)^2 b_{pk}, & b_{req} > b_m^k \\ -p, & A_m(s) = \emptyset \end{cases} \quad (6.19)$$

Η αρνητική ανταμοιβή είναι μια ποινή, που αντιπροσωπεύεται από $-p$, που παρέχεται στον πράκτορα εάν η κατανομή απορριφθεί. Εάν η εκχώρηση απορριφθεί, τότε το διάνυσμα δράσης θα γεμίσει με μηδενικά. Σκοπός είναι να βοηθήσει τον πράκτορα να μάθει, ότι εάν μια σύνδεση απορριφθεί, τότε ο πράκτορας πρέπει να αναζητήσει γειτονικά κελιά, για να συνδέσει τουλάχιστον το UE σε ένα BS. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά έχουν ως εξής:

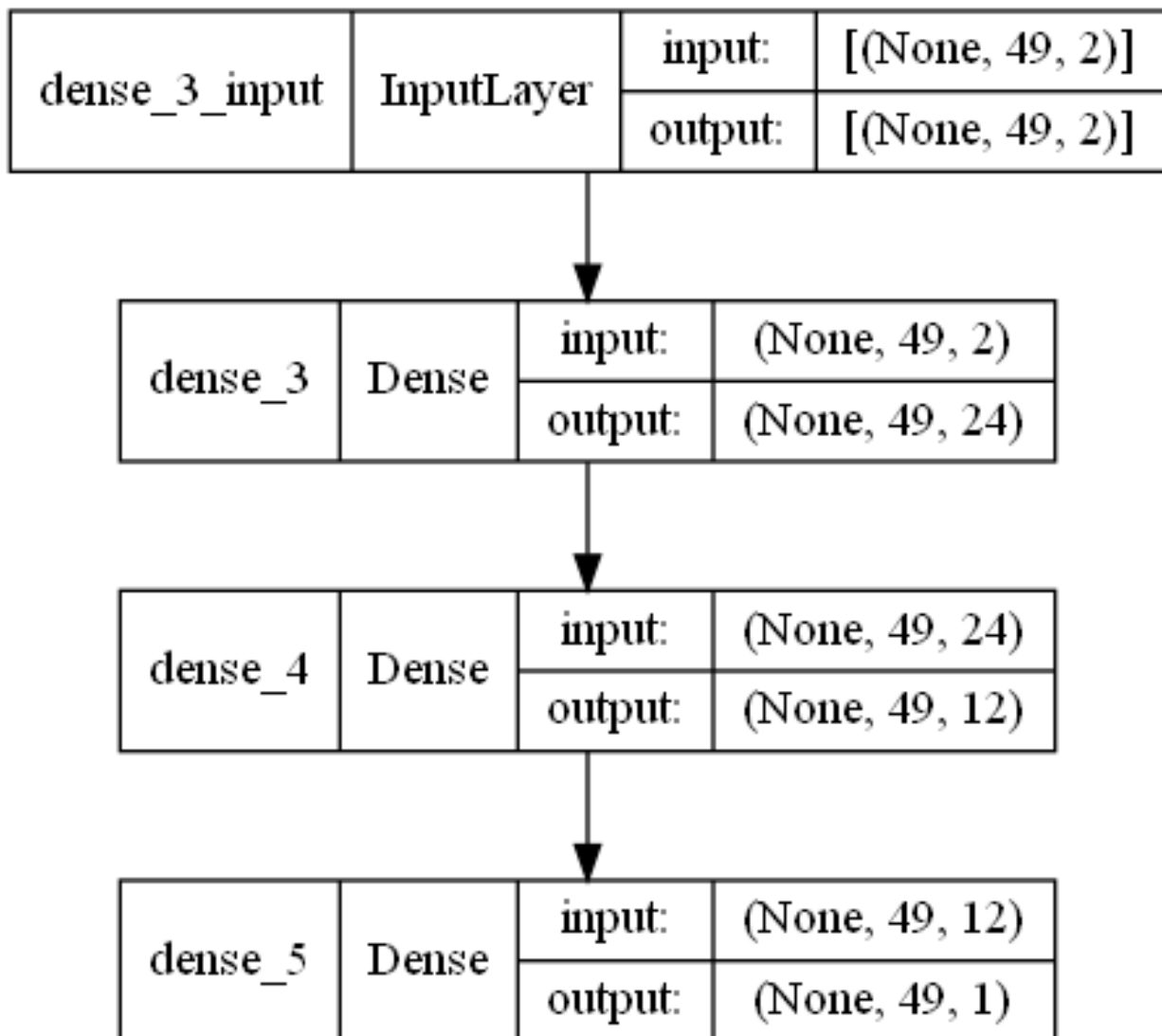
Χαρακτηριστικά	Τιμή
Ρυθμός Εκμάθησης	0.7
Συντελεστής Εκπτώσης	0.618
Αρχική τιμή ϵ	1
ϵ_{max}	1
ϵ_{min}	0.01
Ποσοστό Μείωσης ϵ	0.01
Επεισόδια	500

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά του Deep Q-Learner

6.3.5 Πράκτορας

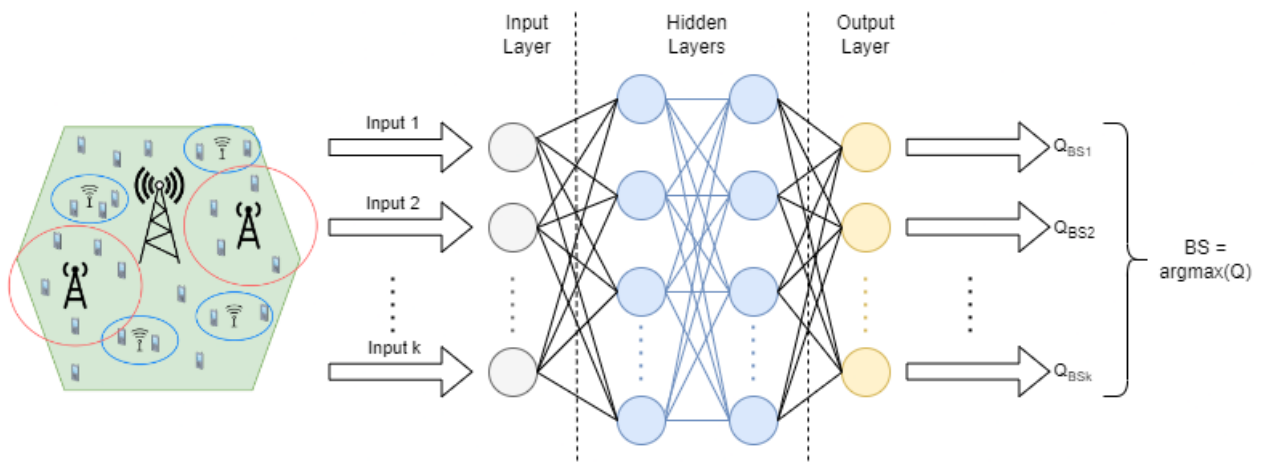
Όπως είχαμε αναφέρει προηγουμένως, ο πράκτορας λειτουργεί ως ένας network controller, υπεύθυνος για τον συσχετισμό των χρηστών σε BS, αλλά επίσης, καθορίζει και πόσα PRBs, θα λάβει ο κάθε χρήστης. Στην περίπτωση μας, προσομοιώνεται ως ένα νευρωνικό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από ένα Input Layer και 3 Dense Layer, τα οποία χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την τιμή της συνάρτησης Q, για κάθε BS.

Με πιο απλά λόγια, το νευρωνικό παίρνει ως είσοδο το διάνυσμα που ορίσαμε στην εξίσωση 6.17, και, για κάθε BS υπολογίζει το κέρδος που θα έχει στην τιμή της ανταμοιβής. Στην συνέχεια, ο BS που αποφέρει το μέγιστο κέρδος, επιλέγεται ως ο BS στον οποίο θα ενωθεί ο χρήστης. Η εξίσωση 6.17, δείχνει ότι το νευρωνικό θα λάβει υπόψη το φόρτο που έχει ο BS στον οποίο πρόκειται να ενωθεί ο χρήστης, αλλά επίσης και την ποιότητα του σήματος που λαμβάνει ο χρήστης. Λόγω, της ρύθμισης των PRBs που λαμβάνει ο κάθε χρήστης, μπορούμε να πούμε ότι ο μηχανισμός μας είναι ενεργειακά αποδοτικός, καθώς η συνολική κατανάλωση της ενέργειας σε ένα δίκτυο, είναι άμεσα συνδεδεμένο με το πλήθος των PRBs που μεταδίδονται μέσα στο δίκτυο. Το νευρωνικό, έχει ως εξής:



Σχήμα 6.2: Το νευρωνικό δίκτυο που αποτελεί τον πράκτορα.

Τέλος, παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα, για καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού. Όπως φαίνεται, παίρνουμε σαν είσοδο μια παρατήρηση της κατάστασης του δικτύου, την οποία και διοχετεύουμε στο νευρωνικό μας δίκτυο. Για κάθε UE, για τον οποίο έγινε η παρατήρηση της κατάστασης, το νευρωνικό δίκτυο με την σειρά του, θα προβλέψει το κέρδος που θα προστεθεί στο συνολικό κέρδος, αν ο UE προσπαθήσει να ενωθεί σε κάθε BS από τον οποίο λαμβάνει σήμα. Ο BS στον οποίο θα ενωθεί, μπορεί να βρεθεί από την θέση του μέγιστου κέρδους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Παράδειγμα λειτουργίας του Μηχανισμού.

Κεφάλαιο 7

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

7.1 Επεξήγηση Μεθοδολογίας

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκε ένας αριθμός δοκιμών προκειμένου να αξιολογηθούν οι διαφορετικές εφαρμογές ως προς την ομαλή λειτουργία, την εγκυρότητα και την απόδοση. Τόσο κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσής του όσο και κατά την αξιολόγησή του, ανακαλύφθηκε η αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου ενισχυτικής εκμάθησης. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εκπαιδεύτηκε για περιορισμένη διάρκεια χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες παραμέτρους και υπερπαραμέτρους. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις στο χρόνο εκτέλεσης, η εκπαίδευση περιορίστηκε στις 8 ώρες με ελάχιστες διακυμάνσεις.

Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι δείκτες για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας κάθε αλγορίθμου τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά την προπόνηση. Κάθε διακόσμια επεισόδια, εκτυπώνονταν ο αριθμός των συνολικών βημάτων τη δεδομένη στιγμή, η συνολική ανταμοιβή και η μέγιστη ανταμοιβή στα προηγούμενα εκατό επεισόδια, καθώς και ο συνολικός χρόνος εκπαίδευσης για κάθε βήμα. Αυτές οι τιμές ήταν ένα πρώτο παράδειγμα πολιτικής σύγκλισης κάθε αλγορίθμου σε μια ιδανική. Ταυτόχρονα, τα σφάλματα στον εκπαιδευμένο αλγόριθμο που προκάλεσαν αστάθεια θα μπορούσαν να εντοπιστούν αμέσως. Οι αστοχίες χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: αλγοριθμικές και προγραμματιστικές, με την πρώτη να προκύπτει από αλλαγές στην αρχική μέθοδο και τη δεύτερη από σφάλματα στην ανάπτυξη κώδικα. Ακολουθεί μια λίστα με πολυάριθμες μετρήσεις, καθώς και αυτή που χρησιμοποιήθηκε:

- **Μετρική μέσης συνολικής ανταμοιβής:** Είναι το πιο αξιόπιστο στατιστικό στοιχείο για την ομαλή λειτουργία του αλγορίθμου. Η μέση συνολική ανταμοιβή για τα τελευταία N επεισόδια, σε αυτήν την περίπτωση $N = 100$, αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή. Η ανοδική τάση της μέτρησης καθώς αυξάνεται ο αριθμός των βημάτων του πράκτορα στα πρώτα στάδια της εκπαίδευσης δείχνει ότι η πολιτική βελτιώνεται. Ταυτόχρονα, η σύγκλιση της μέτρησης σε μεταγενέστερες φάσεις εκπαίδευσης αντανακλά τη σταθερότητα του αλγορίθμου.
- **Μετρική ανταμοιβής επεισοδίου:** Αυτό το μέτρο χρησιμοποιείται για την καταγραφή της συνολικής ανταμοιβής για ένα συγκεκριμένο επεισόδιο.

- **Μετρική ταχύτητας βημάτων ανά δευτερόλεπτα:** Αυτό το στατιστικό χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του ρυθμού με τον οποίο εκπαιδεύεται κάθε αλγόριθμος. Ο χρόνος που απαιτείται για κάθε στάδιο της εκπαίδευσης εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Έτσι, στο ίδιο χρονικό διάστημα, έχουν διδαχθεί δύο εναλλακτικοί αλγόριθμοι με διαφορετικό αριθμό βημάτων.
- **Μετρική αθροιστικού σφάλματος κατά τη διάρκεια επεισοδίου:** Υπάρχει ένας καθορισμένος αριθμός βημάτων σε κάθε επεισόδιο. Το δίκτυο πρακτόρων ενημερώνεται κάθε τέσσερα βήματα με βάση την τιμή της συνάρτησης σφάλματος. Για να τονιστεί η διάκριση μεταξύ βαθιάς ενισχυτικής μάθησης και βαθιάς μηχανικής μάθησης, καταγράφεται το σύνολο αυτών των τιμών για κάθε επεισόδιο. Ο κύριος σκοπός της δεύτερης ομάδας είναι να ελαχιστοποιήσει το σωρευτικό σφάλμα με την πάροδο του χρόνου, ενώ το σωρευτικό σφάλμα δεν εγγυάται την επιτυχία του αλγορίθμου, δηλαδή τη βελτίωση της πολιτικής πρακτόρων, στην πρώτη κατηγορία. Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι τα σε βάθος επεισόδια με μεγάλο αριθμό ολοκληρωμένων βημάτων τείνουν να συνεχίζονται περισσότερο, ενώ το βήμα εκπαίδευσης επαναλαμβάνεται κάθε τέσσερα βήματα. Ως αποτέλεσμα, εφόσον το σωρευτικό μέτρο σφάλματος είναι σταθερό, το ατομικό σφάλμα σε κάθε προπονητική φάση μειώνεται.
- **Μετρική σφάλματος κατά τη διάρκεια επεισοδίου:** Αυτό το μέτρο παρακολουθεί το λάθος ενός βήματος της διαδικασίας εκπαίδευσης.

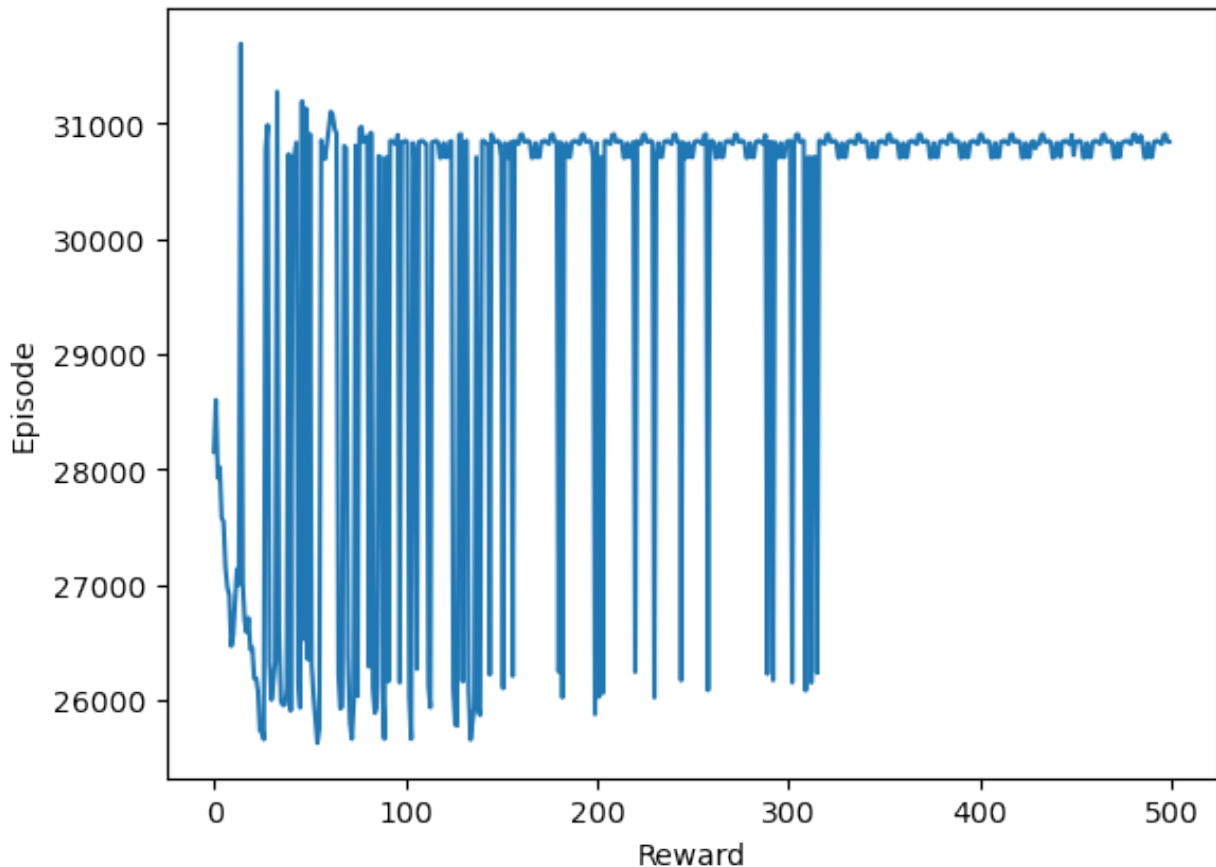
Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει ένα παράδειγμα σεναρίου προσομοίωσης που βασίζεται στον εξομωτή που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5. Ο στόχος είναι να δοκιμαστεί η ικανότητα του αλγορίθμου να συσχετίζει/διανέμει τους χρήστες σε τρεις διακριτές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (Macro, Micro και Pico), βελτιστοποιώντας παράλληλα τον ρυθμό δεδομένων UE downlink (DL) και μειώνοντας τη μετάδοση ισχύος BS σε ένα ενιαίο περιβάλλον. Τέλος, ως KPIs, ορίζουμε το QoS, το συνολικό bitrate των δικτύων και την ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Έχουν δημιουργηθεί διάφορα σενάρια για τον έλεγχο της εγκυρότητας του μηχανισμού μας. Τα σενάρια αυτά διαφέρουν μεταξύ τους μόνο στο πλήθος των χρηστών, όπου ξεκινάει στους 5000 και καταλήγει στους 35000, με μία αύξηση 5000 χρήστες ανά σενάριο.

Μια τυπική προσέγγιση κατανομής πόρων χρησιμοποιείται για τη σύγκριση του αλγορίθμου Deep Q-Learning. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη αποκλειστικά το RSRP που λαμβάνεται από τους BS στην άμεση περιοχή των χρηστών. Ακολουθεί το BS με το υψηλότερο RSRP και, κατά συνέπεια, το ισχυρότερο σήμα. Στη συνέχεια, ο χρήστης εκχωρείται στο καθορισμένο BS. Ο αριθμός των PRB που εκχωρούνται σε έναν χρήστη καθορίζεται από τις απαιτήσεις υπηρεσίας του χρήστη καθώς και από το RSRP που λαμβάνει ο χρήστης. Για να συγκρίνουμε τους δύο αλγόριθμους, εξετάζουμε τρεις μετρήσεις: (1) τη συνολική απόδοση του δικτύου, (2) την κατανάλωση ενέργειας και (3) το QoS του δικτύου.

7.2 Αποτελέσματα Μηχανισμού

Όπως αναφέρθηκε, ο πράκτορας μαθαίνει ανάλογα με την ανταμοιβή που λαμβάνει. Η ανταμοιβή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση που ορίσαμε στο Κεφάλαιο 6. Το δίκτυο

εκτελείται κάθε φορά. Σε κάθε προσομοιωμένη περίπτωση, οι χρήστες εκχωρούνται και ο αριθμός των PRB που λαμβάνει κάθε χρήστης προσαρμόζεται ταυτόχρονα. Για κάθε προσομοιωμένο δίκτυο, η ανταμοιβή που θα λάβει ο πράκτορας υπολογίζεται εκ νέου. Ο πράκτορας στοχεύει να αυξήσει την ανταμοιβή που λαμβάνει, έτσι σε κάθε βήμα μαθαίνει να κάνει τη βέλτιστη εκχώρηση χρηστών σε BS, αλλά και τη βέλτιστη κατανομή των PRB στους εκχωρημένους χρήστες. Η εκπαίδευση πραγματοποιήθηκε, σε διάστημα 500 επεισοδίων. Η ανταμοιβή που λαμβάνει ο πράκτορας για κάθε επεισόδιο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1:

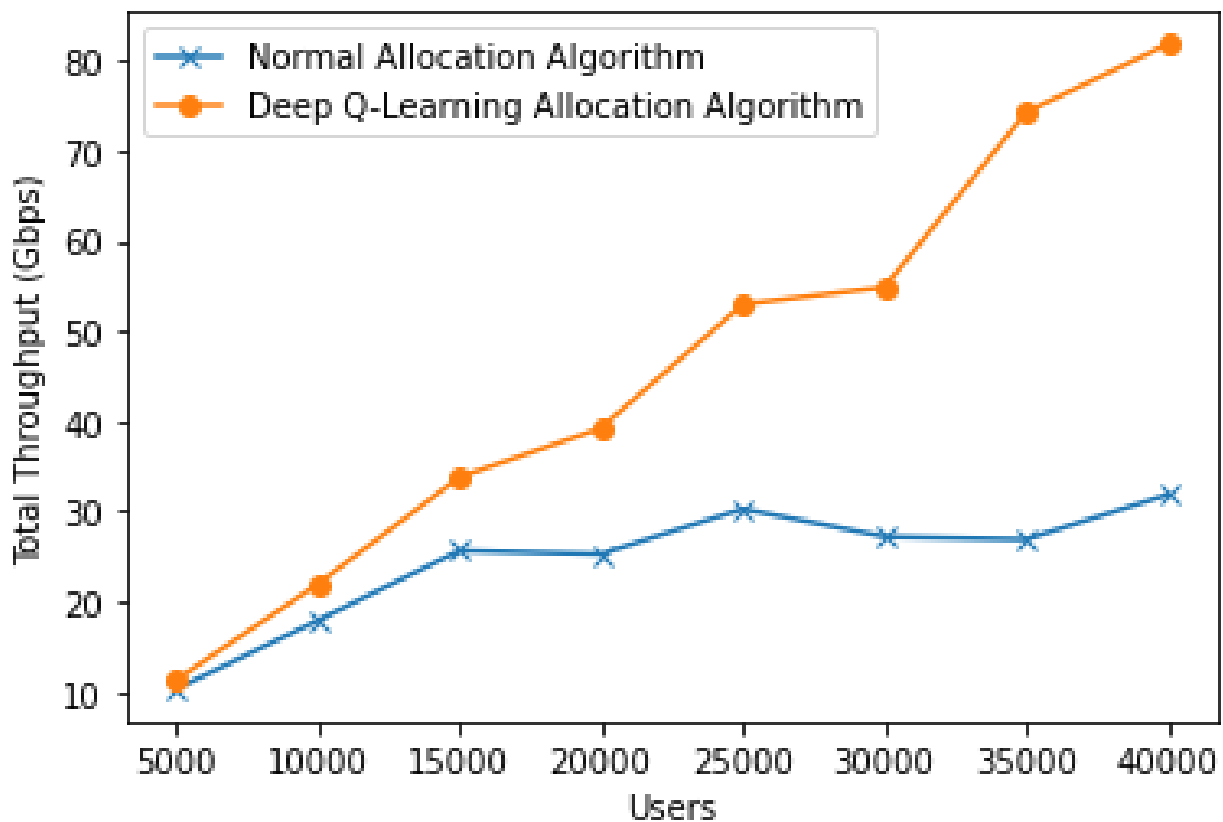


Σχήμα 7.1: Οι ανταμοιβές που ελήφθησαν κατά τα επεισόδια εκπαίδευσης.

Όπως μπορούμε να δούμε, το ποσό ανταμοιβής, που λαμβάνει ο πράκτορας, κυμαίνεται στον αριθμό των επεισοδίων, φτάνοντας από 25500 έως και 31500. Τα πολλά ανερχόμενα και πτωτικά άκρα της συνάρτησης ανταμοιβής μπορούν να ερμηνευθούν ως ο πράκτορας που εξερευνά το περιβάλλον. Όταν οι ανταμοιβές είναι χαμηλές, συμπεραίνουμε ότι ο πράκτορας κάνει τυχαίες αναθέσεις. Αυτό το μοτίβο συνεχίζεται, μέχρι τα πρώτα 300 επεισόδια. Από εκεί μπορούμε να δούμε ότι η ανταμοιβή είναι περίπου 31000, κάτι που είναι ένδειξη ότι ο πράκτορας δεν εξερευνά πλέον το περιβάλλον του. Μάλλον, κάνει υπολογισμένες και βέλτιστες εκχωρήσεις χρηστών στο BS, καθώς και βέλτιστες κατανομές PRB στους χρήστες.

7.3 Επιρροή Μηχανισμού στο Δίκτυο

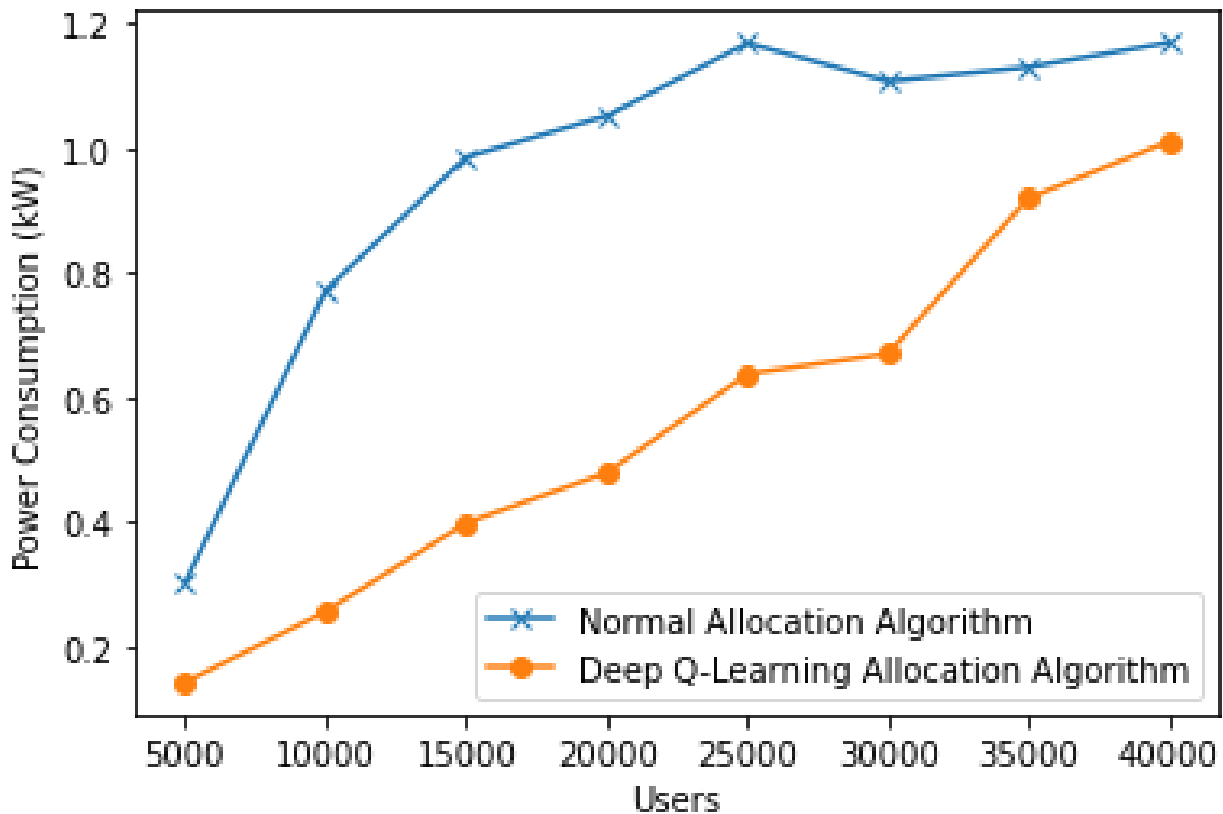
Είναι προφανές, από το Σχήμα 7.2, ότι ο αλγόριθμός μας Deep Q-Learning ξεπερνά σε μεγάλο βαθμό τον κανονικό αλγόριθμο κατανομής, ο οποίος βασίζεται στις τιμές RSRP που λαμβάνονται από το BS. Ο αλγόριθμος Deep Q-Learning, ξεπερνά κατά πολύ τον άλλον, σε όλες τις περιπτώσεις, και, μετά από έναν ορισμένο αριθμό χρηστών, αρχίζει να διπλασιάζει ή ακόμη και σχεδόν να τριπλασιάζει τη συνολική απόδοση του προσομοιωμένου δικτύου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μηχανισμός μας, διασφαλίζει ότι σχεδόν όλοι οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο, όπως θα φανεί στα επόμενα αποτελέσματα. Έτσι, όλοι οι χρήστες λαμβάνουν ένα συγκεκριμένο ποσό bitrate, αντί να έχουν μόνο ένα κλάσμα των χρηστών που λαμβάνουν περιττές ποσότητες PRB.



Σχήμα 7.2: Η συνολική απόδοση του δικτύου, μετρημένη σε Gbps.

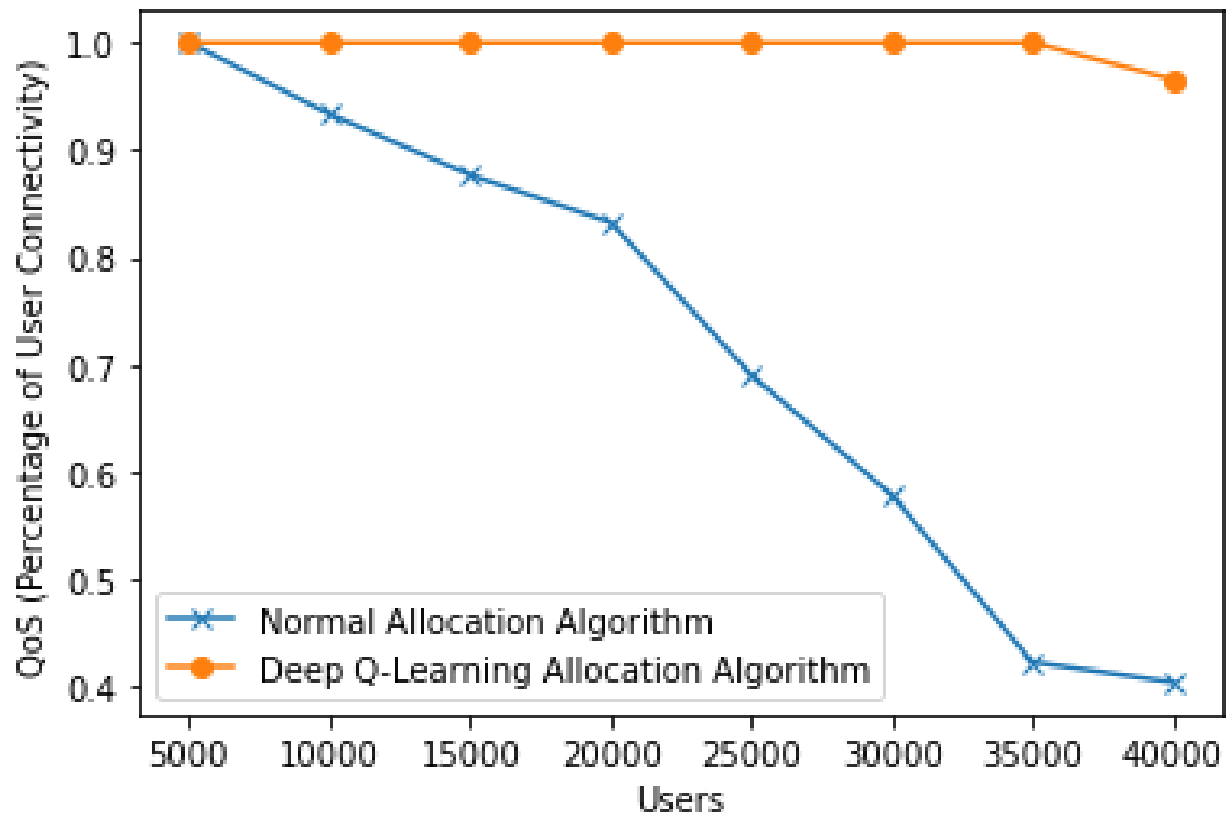
Το Σχήμα 7.3 δείχνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας εντός του προσομοιωμένου δικτύου μας. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, ο μηχανισμός μας διασφαλίζει ότι η ενέργεια κατανέμεται σε αποδεκτά επίπεδα, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν περισσότεροι χρήστες συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Η κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται από το άθροισμα της κατανάλωσης ισχύος κάθε BS. Είναι συνάρτηση του αριθμού των PRB που κατανέμονται σε όλο το δίκτυο. Για να βρούμε πόση ενέργεια καταναλώνει κάθε BS, υπολογίζουμε πόση ισχύ χρειάζεται για να μεταδώσει ένα μόνο PRB και το πολλαπλασιάζουμε με τον αριθμό των PRB που εκχωρεί το συγκεκριμένο BS στους χρήστες. Λόγω του γεγονότος ότι ο μηχανισμός μας διασφαλίζει ότι ο αριθμός των PRB δεν είναι ούτε περισσότερος ούτε λιγότερος από αυτόν που απαιτεί ο κάθε χρήστης, διατηρεί την κατανάλωση ενέργειας χαμηλότερη από έναν κλασικό αλγόριθμο που

εκχωρεί περισσότερα PRB από αυτά που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη.



Σχήμα 7.3: Η συνολική κατανάλωση ισχύος του δικτύου, μετρημένη σε kW.

Τέλος, το Σχήμα 7.4 δείχνει πώς αλλάζει το QoS του δικτύου καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών. Το πρώτο πράγμα που μπορούμε να διακρίνουμε είναι πόσο επηρεάζεται ο κλασικός αλγόριθμος από τις αυξήσεις των χρηστών. Με κάθε αύξηση, το QoS που παράγεται από αυτόν τον αλγόριθμο μειώνεται από 10% -20%. Αντίθετα, ο μηχανισμός μας διατηρεί το QoS σταθερό, σε όλες εκτός από μία περίπτωση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όλοι οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Στην περίπτωση που το QoS πέφτει ελαφρά, κατά 4%, είναι η περίπτωση που θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί προσθέτοντας περισσότερο SCBS, δηλαδή υπερβαίνοντας τις δυνατότητες του μηχανισμού.



Σχήμα 7.4: Το QoS του δικτύου, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

8.1 Σύνοψη

Ο κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας, ήταν να δημιουργηθεί και να εκπαιδευτεί έναν αλγόριθμο εκμάθησης σε βάθος που θα επιτύχει τη μέγιστη συνολική ανταμοιβή στο συντομότερο χρονικό διάστημα, ενώ αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του. Στα πλαίσια της διπλωματικής, αναπτύχθηκε επίσης ένας εξομοιωτής, ο οποίος μιμήθηκε τη λειτουργία ενός ετερογενούς δικτύου πέμπτης γενιάς. Το προσομοιωμένο δίκτυο χρησιμοποιήθηκε για να αναπαραστήσει το περιβάλλον αλληλεπίδρασης του πράκτορα. Ο πράκτορας, με τη σειρά του, αναλαμβάνει τη δουλειά του ελεγκτή δικτύου και είναι υπεύθυνος όχι μόνο για τη σύνδεση των χρηστών με τους BSs, αλλά και για τη σωστή κατανομή των PRBs.

Επιπλέον, έγινε μια εισαγωγή στην θεωρία πίσω από τα δίκτυα 5G, καθώς και μια αναδρομή σε προηγούμενες γενιές δικτύων. Αναφέρθηκε επίσης η αναγκαιότητα ενός νέου σχεδιασμού, καθώς η παρούσα αρχιτεκτονική δικτύου κινητής τηλεφωνίας δεν θα επιτρέψει σε αυτό το νέο δίκτυο να λειτουργήσει σωστά και να εκπληρώσει τους καθορισμένους στόχους. Εξετάστηκαν επίσης οι τρέχουσες τεχνολογίες δικτύου 5G, με στοιχεία των οποίων είναι ενσωματωμένα στον εξομοιωτή και ορατά μέσω της μεθόδου που κατασκευάστηκε. Οι τεχνολογίες MIMO και DUDe επισημάνθηκαν επειδή θεωρήθηκε ότι έχουν την καλύτερη ανάπτυξη σε δίκτυα 5G.

Παρακάτω, το χρονοδιάγραμμα, της Μηχανικής Μάθησης, από την έναρξή της μέχρι σήμερα περιγράφηκε λεπτομερώς, καθώς και η εξέλιξη του κλάδου κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το πεδίο στην συνέχεια, χωρίστηκε στις κύριες κατηγορίες του και εξετάστηκαν οι πιο διαδεδομένες και ενεργές προσεγγίσεις από κάθε περιοχή. Επιλέχθηκε μία από τις συγκεκριμένες κατηγορίες, στην οποία θα ανήκει ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του βασικού μηχανισμού της διατριβής. Η κατηγορία αυτή ήταν η Ενισχυτική Εκμάθηση, και ο αλγόριθμος ήταν ο Q-Learning, και συγκεκριμένα η παραλλαγή του που περιλαμβάνει και Βαθιά Μάθηση.

Ο εξομοιωτής που κατασκευάστηκε για να χρησιμεύσει ως περιβάλλον αλληλεπίδρασης του πράκτορα εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Έχουν δημιουργηθεί οι δυνατότητες του εξομοιωτή, καθώς και οι πηγές από τις οποίες συγκεντρώθηκαν πληροφορίες για να διασφαλιστεί ότι συμμορφώνεται με τα πρότυπα δικτύου 5G. Εξετάστηκαν επίσης όλες οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία. Αυτές οι εξισώσεις είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό της χρήσης ενέργειας, του αριθμού των PRB που αποθηκεύονται από κάθε BS, της ισχύος και της ποιότητας του σήματος που λαμβάνουν οι χρήστες κ.λπ. Τέλος, παρουσιάστηκε το σενάριο του προσομοιωτή, μαζί με ορισμένες περιπτώσεις της διαδικασίας και τα αποτελέσματα που παράγει.

Εξετάστηκε επίσης διεξοδικά η θεωρία του μηχανισμού για την κατηγορία του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του. Όλα τα επιμέρους κομμάτια, καθώς και η θεωρία, εξετάστηκαν αναλυτικά. Επιπλέον, επισημάνθηκαν ορισμένα ζητήματα που μπορεί να παρουσιάσει ο αλγόριθμος. Συζητήθηκαν συγκεκριμένα τα ζητήματα που προκύπτουν όταν οι διαστάσεις των χώρων καταστάσεων και δράσεων μεγαλώνουν, όπως το λεγόμενο πρόβλημα διάστασης, το πρόβλημα αστάθειας Deep Q-Learning και η σύγκρουση εξερεύνησης-αξιοποίησης. Η προσαρμογή του αλγορίθμου στα δεδομένα μας, επίσης αναφέρθηκε λεπτομερώς, συμπεριλαμβανομένων των βασικών τμημάτων όπως οι χώροι κατάστασης και δράσης, καθώς και η συνάρτηση ανταμοιβής.

Τέλος, συζητήθηκε η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Αφού ολοκληρώθηκε το περιβάλλον και ο μηχανισμός του εξομοιωτή, διεξήχθη ένας αριθμός δοκιμών για την επικύρωση της ακριβούς λειτουργίας του μηχανισμού καθώς και των πλεονεκτημάτων που μπορεί να παρέχει στα δίκτυα 5G. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν αρκετά γραφήματα, που αναφέρονται σε πτυχές της μεθόδου καθώς και στην επίδραση του μηχανισμού στο προσομοιωμένο δίκτυο. Ο συνολικός ρυθμός δεδομένων σε όλο το δίκτυο αυξήθηκε, αλλά η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε και το QoS των χρηστών παρέμεινε σταθερό.

8.2 Συμπεράσματα

Διάφορες εκδόσεις τόσο του περιβάλλοντος όσο και των πρακτόρων, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, μελετήθηκαν, τουλάχιστον σε επίπεδο κώδικα, καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης της εργασίας και, ειδικότερα, της εκπαίδευσης του αλγορίθμου. Αυτό έγινε προκειμένου να βελτιωθεί ο υπάρχων αλγόριθμος και να ανακαλυφθεί η πιο αποτελεσματική παραλλαγή στην οποία διεξήχθη το πείραμα. Προσδιορίστηκε η αστάθεια που χαρακτηρίζει τους αλγόριθμους αυτούς γενικά, καθώς και τα μεγάλα περιθώρια βελτίωσης. Η βελτίωση της συμπεριφοράς του πράκτορα επιταχύνθηκε πολύ από μικροσκοπικές προσαρμογές στη δομή των πρακτόρων. Συνήθως, η μέση συνολική ανταμοιβή αυξήθηκε με σημαντικά ταχύτερο ρυθμό σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Ταυτόχρονα, λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών πόρων που διατίθενται λόγω των χρονικών περιορισμών, οι παραλλαγές με το υψηλότερο ποσοστό κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν πλήρως. Εξετάζοντας το γράφημα εκπαίδευσης, φαίνεται ότι ο προηγούμενος ισχυρισμός δεν υποστηρίζεται, καθώς η ανταμοιβή του πράκτορα έχει συγκλίνει λόγω της πτώσης των ανταμοιβών. Η ομαλή λειτουργία της εκπαίδευσης του πράκτορα ενημερώθηκε, ωστόσο, από την τιμή του μέσου αριθμού βημάτων ανά επεισόδιο που εκτυπώθηκε κατά τη διάρκεια

της εκπαίδευσης. Αυτό μπορεί επίσης να παρατηρηθεί στο διάγραμμα αξιολόγησης, Σχήμα 7.1, όπου ο πράκτορας έμαθε να προσαρμόζεται καλύτερα στο περιβάλλον του με την πάροδο του χρόνου, αλλά δεν λαμβάνει υψηλότερη συνολική ανταμοιβή. Μπόρεσε να ενισχύσει τη συνολική ανταμοιβή εφαρμόζοντας μια καλύτερη πολιτική, η οποία βασίζεται στην ιδανική σχέση χρήστη με τα BS και την κατανομή πόρων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.2 μπορούμε να δούμε πόσο πολύ αυξάνεται ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης των bits, φτάνοντας σε σημείο όπου τριπλασιάζεται, σε σχέση με τον παραδοσιακό αλγόριθμο ανάθεσης πόρων. Επίσης, σε θέματα ενέργειας, συμπεραίνουμε από το Σχήμα 7.3, μια σημαντική μείωση, ακόμα και στις ακραίες περιπτώσεις, δηλαδή με το μέγιστο πλήθος χρηστών στο δίκτυο. Τέλος, σε θέμα του QoS, μπορούμε να δούμε ότι ο αλγόριθμος μας προσφέρει μια πολύ αναγκαία σταθερότητα, εκτός πάλι σε ακραίες περιπτώσεις, όπου η μόνη λύση πλέον αποτελεί την αύξηση των BSs, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4. Εν ολίγης, σε σύγκριση με την άλλη τεχνική που εξετάστηκε, ο προτεινόμενος ελεγκτής αύξησε την απόδοση του δικτύου αυξάνοντας τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και προσφέροντας καλύτερη διαχείριση πόρων. Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου μειώθηκε ενώ η συνολική απόδοση του δικτύου βελτιώθηκε.

Συνοψίζοντας, η Μηχανική Μάθηση, ειδικά η Ενισχυτική Μάθηση, εισάγεται στο σύστημα, με αποτέλεσμα μια κατανοητή και μακροχρόνια διαδικασία που επιλύει μια ποικιλία ζητημάτων, συμπεριλαμβανομένου αυτού που περιγράφεται σε αυτήν τη διπλωματική εργασία. Τα ευρήματα είναι ενθαρρυντικά και υποδεικνύουν ότι, λαμβάνοντας υπόψη τις σωστές παραμέτρους εισόδου, το προτεινόμενο μοντέλο προσαρμόζεται αποτελεσματικά στο διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, ενώ παράλληλα παρέχει ένα σταθερό σύστημα δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

8.3 Μελλοντική Έρευνα

Σε αυτό το στάδιο γίνονται ορισμένες συστάσεις με στόχο τη δημιουργία ενός πιο αποτελεσματικού συστήματος εκπαίδευσης πρακτόρων για σύντομο χρονικό διάστημα. Ο αλγόριθμος DQN, καθώς και ορισμένες άλλες παραλλαγές της μεθόδου, πρέπει πρώτα να συνδυαστούν. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα κάθε επιλογής προς το κοινό καλό. Παρά το γεγονός ότι αυτοί οι πράκτορες απαιτούσαν μεγάλη υπολογιστική ισχύ, μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής διαθέσιμης ισχύος χρησιμοποιήθηκε. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη σειριακή φύση των αλγορίθμων. Ως αποτέλεσμα, προτείνεται οι αλγόριθμοι να παραλληλιζονται όσο είναι εφικτό. Πιο συγκεκριμένα, ο ίδιος παράγοντας χρησιμοποιείται σε πολλές ρυθμίσεις ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων σε κάθε φάση. Προκειμένου να επιλυθεί το δίλημμα εξερεύνηση ή εκμετάλλευση, είναι επίσης κατανοητό να υιοθετηθεί μια χωριστή πολιτική εξερεύνησης σε κάθε έναν από τα περιβάλλοντα. Τέλος, είναι εφικτό να γίνει διάκριση της αλληλεπίδρασης από την εκπαίδευση του πράκτορα. Αυτές οι δύο διαδικασίες μπορούν να εκτελεστούν με καθυστερημένο τρόπο, επιτρέποντας την πλήρη χρήση της διαθέσιμης επεξεργαστικής ισχύος. Ο τελικός στόχος παραμένει ο ίδιος: να δημιουργηθεί ένας πράκτορας ικανός να επιτύχει τη μέγιστη πιθανή συνολική ανταμοιβή σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η μελλοντική έρευνα με πιο ισχυρά μηχανήματα και περισσότερες δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων για ένα σύνολο δεδομένων με πολλές χιλιάδες παραδείγματα θα ήταν μια σημαντική βελτίωση, αλλά στην πράξη, το πρόβλημα που μελετήθηκε στην τρέχουσα εργασία

περιλαμβάνει επίσης τον παράγοντα της προσπάθειας εξαγωγής ενός ικανοποιητικού αποτελέσματος με περιορισμένα δεδομένα. Ωστόσο, λόγω της φύσης της συλλογής δεδομένων αυτού του προβλήματος, η παραγωγή των «σωστών» περιπτώσεων με χρήση κλασικών μεθόδων θα ήταν μάλλον εύκολη σε πειραματικό επίπεδο, απαιτώντας μόνο μια μικρή ποσότητα χώρου αποθήκευσης και πόρων υπολογιστή. Ομοίως, συγκρίσιμα δεδομένα θα ληφθούν μέσω συστοιχιών κεραιών σε αστικές περιοχές στον πραγματικό κόσμο.

Συνιστάται να μελετηθούν πιο περίπλοκες τοπολογίες για να δοκιμαστεί η ικανότητα των δικτύων να τις «μάθουν», καθώς αυτή η μελέτη χρησιμοποιεί μια απλή τοπολογία με λίγα, βασισμένη σε δεδομένα του πραγματικού κόσμου και σε αυστηρά αστικό περιβάλλον. Υποτίθεται ότι θα απαιτηθούν πρόσθετα βάρη, και ως εκ τούτου νευρώνες. Είναι επίσης σημαντικό να συγκρίνουμε τους παραδοσιακούς αλγόριθμους με τα νευρωνικά δίκτυα, επειδή ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών προβλέπεται να έχει πολύ χειρότερη απόδοση, ευνοώντας τη συγκριτικά χαμηλή πολυπλοκότητα των δικτύων.

Τέλος, με την αύξηση της χωρητικότητας, μια μελλοντική εφαρμογή αυτής της τεχνικής μπορεί να προσθέσει περισσότερα δεδομένα και μεταβλητές για την εκπαίδευση του μοντέλου, αυξάνοντας το ποσό της ανταμοιβής που λαμβάνει ο πράκτορας και επιτρέποντας ακόμη καλύτερη κατανομή πόρων και συσχέτιση χρηστών. Η τεχνική υλοποιείται έχοντας υπόψη τρεις αρχές: πώς να ενισχύσετε τη συνολική απόδοση, πώς να εξοικονομήσετε τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και πώς να διατηρήσετε το QoS σε αποδεκτό επίπεδο. Τα ευρήματα είναι ενθαρρυντικά, υποδεικνύοντας ότι η συνολική απόδοση του δικτύου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Επιπλέον, καταδεικνύει ότι η αυξημένη απόδοση δεν συνεπάγεται πάντα υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και ότι μια μέθοδος που εκχωρεί αποτελεσματικά PRB μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση σημαντικού ποσού χρημάτων στην πλευρά BS του δικτύου. Όλα τα παραπάνω οφέλη επιτυγχάνονται διασφαλίζοντας παράλληλα ότι το QoS δεν πέφτει κάτω από τα καθορισμένα όρια. Εάν το κάνει, είναι συνήθως ένα σημάδι ότι πρέπει να προστεθούν περισσότερα BS στο δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] *Widelity/FCC Report*.
- [2] Zhu Han και KJ Ray Liu. *Resource allocation for wireless networks: basics, techniques, and applications*. Cambridge university press, 2008.
- [3] User Equipment UE conformance specification Radio. ``3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification Radio transmission and reception". Στο: (2011).
- [4] Vikram Chandrasekhar, Jeffrey G Andrews και Alan Gatherer. ``Femtocell networks: a survey". Στο: *IEEE Communications magazine* 46.9 (2008), σσ. 59–67.
- [5] Larry L. Peterson και Sunay Oğuz. *5G mobile networks: A systems approach*. Morgan & Claypool Publishers, 2020.
- [6] Peter Orosz κ.ά. ``QoS Guarantees for Industrial IoT Applications over LTE-a Feasibility Study". Στο: *2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS)*. IEEE. 2019, σσ. 667–672.
- [7] Mansoor Shafi κ.ά. ``5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice". Στο: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.6 (2017), σσ. 1201–1221. DOI: [10.1109/JSAC.2017.2692307](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307).
- [8] Mamta Agiwal, Abhishek Roy και Navrati Saxena. ``Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey". Στο: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18.3 (2016), σσ. 1617–1655. DOI: [10.1109/COMST.2016.2532458](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458).
- [9] Ove Edfors και Fredrik Tufvesson. ``Massive MIMO for next generation wireless systems". Στο: (2015).
- [10] Lu Lu κ.ά. ``An overview of massive MIMO: Benefits and challenges". Στο: *IEEE journal of selected topics in signal processing* 8.5 (2014), σσ. 742–758.
- [11] A Gupta και RK Jha. *A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies*,, *IEEE Access* 2015, t. 3. 2015.
- [12] Noha Hassan και Xavier Fernando. ``Massive MIMO wireless networks: An overview". Στο: *Electronics* 6.3 (2017), σ. 63.
- [13] Arogyaswami J Paulraj κ.ά. ``An overview of MIMO communications-a key to gigabit wireless". Στο: *Proceedings of the IEEE* 92.2 (2004), σσ. 198–218.
- [14] Lingjia Liu κ.ά. ``Downlink mimo in lte-advanced: Su-mimo vs. mu-mimo". Στο: *IEEE Communications Magazine* 50.2 (2012), σσ. 140–147.

- [15] Mamoru Sawahashi κ.ά. ``Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced [Coordinated and Distributed MIMO]". Στο: *IEEE Wireless Communications* 17.3 (2010), σσ. 26–34.
- [16] 3GPP. *Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE Advanced)*. Technical Specification (TS) 36.913. 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- [17] M Karakayali και G Foschini. `` & Valenzuela, R.(2006). Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems". Στο: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 13.4 ().
- [18] David Gesbert κ.ά. ``Shifting the MIMO paradigm". Στο: *IEEE signal processing magazine* 24.5 (2007), σσ. 36–46.
- [19] Taesang Yoo, Nihar Jindal και Andrea Goldsmith. ``Finite-rate feedback MIMO broadcast channels with a large number of users". Στο: *2006 IEEE International Symposium on Information Theory*. IEEE. 2006, σσ. 1214–1218.
- [20] M Giordani κ.ά. ``Towards 6G networks: Use cases and technologies. arXiv 2019". Στο: *arXiv preprint arXiv:1903.12216* ().
- [21] Michele Polese κ.ά. ``Integrated access and backhaul in 5G mmWave networks: Potential and challenges". Στο: *IEEE Communications Magazine* 58.3 (2020), σσ. 62–68.
- [22] Fredrik Rusek κ.ά. ``Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays". Στο: *IEEE signal processing magazine* 30.1 (2012), σσ. 40–60.
- [23] Giuseppe Caire κ.ά. ``Multiuser MIMO achievable rates with downlink training and channel state feedback". Στο: *IEEE Transactions on Information Theory* 56.6 (2010), σσ. 2845–2866.
- [24] Hien Quoc Ngo, Erik G Larsson και Thomas L Marzetta. ``Uplink power efficiency of multiuser MIMO with very large antenna arrays". Στο: *2011 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*. IEEE. 2011, σσ. 1272–1279.
- [25] Parag Aggarwal και Vivek Ashok Bohara. ``A nonlinear downlink multiuser MIMO-OFDM systems". Στο: *IEEE Wireless Communications Letters* 6.3 (2017), σσ. 414–417.
- [26] Helm Stierlin. ``Hebb, DO: Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory. New York (John Wiley & Sons, Inc.) und London (Chapman & Ha". Στο: *Psyche* 7.8 (1953), σσ. 143–144.
- [27] URL: https://www.ibm.com/ibm/history/exhibits/701/701_1415bx01.html.
- [28] A. L. Samuel. ``Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers". Στο: *IBM Journal of Research and Development* 3.3 (1959), σσ. 210–229. DOI: [10.1147/rd.33.0210](https://doi.org/10.1147/rd.33.0210).
- [29] F. Rosenblatt. ``The perceptron - A perceiving and recognizing automaton". Στο: 85-460-1 (1957).
- [30] T. Cover και P. Hart. ``Nearest neighbor pattern classification". Στο: *IEEE Transactions on Information Theory* 13.1 (1967), σσ. 21–27. DOI: [10.1109/TIT.1967.1053964](https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964).
- [31] Marcello Pelillo. ``Alhazen and the Nearest Neighbor Rule". Στο: *Pattern Recogn. Lett.* 38 (2014), σσ. 34–37. ISSN: 0167-8655. DOI: [10.1016/j.patrec.2013.10.022](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2013.10.022). URL: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2013.10.022>.
- [32] Stuart Russell και Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3η έκδοση. Prentice Hall, 2010.

- [33] Olivier Chapelle, Bernhard Scholkopf και Alexander Zien. *Semi-supervised learning*. MIT Press, 2006.
- [34] *3GPP Release 16*.
- [35] *3GPP TR 38.913, Study on scenarios and requirements for next generation access technologies*.
- [36] *3GPP TR 38.901 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*.
- [37] *3GPP TR 25.942 Radio Frequency (RF) system scenarios*.
- [38] *3GPP TR 38.104, Table 5.3.3-1: Minimum guardband [kHz] (FR1) and Table: 5.3.3-2: Minimum guardband [kHz] (FR2)*.
- [39] URL: http://www.cost.eu/domains_actions/ict/Actions/231.
- [40] URL: http://www.lx.it.pt/cost231/final_report.htm.
- [41] Richard S Sutton και Andrew G Barto. *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press, 2018.
- [42] *Part 1: Key concepts in RL*. URL: https://spinningup.openai.com/en/latest/spinningup/rl_intro.html#the-rlproblem.
- [43] Oded Berger-Tal κ.ά. ``The exploration-exploitation dilemma: a multidisciplinary framework''. Στο: *PloS one* 9.4 (2014), e95693.
- [44] Volodymyr Mnih κ.ά. ``Playing atari with deep reinforcement learning''. Στο: *arXiv preprint arXiv:1312.5602* (2013).