

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Μηχανικών Υπολογιστών και Πληροφορικής



UNIVERSITY OF
PATRAS
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Τεχνικές Game Theory για τη βελτίωση της ανάθεσης
πόρων σε Δίκτυα 5G

Κουκουβέλα Ασπασία

1059617

Τριμελής Επιτροπή:

Μπούρας Χρήστος, Επιβλέπων Καθηγητής

Γαροφαλάκης Ιωάννης, Καθηγητής

Παπαιωάννου Εύη, Επ. Καθηγήτρια

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2022

Η παρούσα εργασία έχει πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων μου στο ερευνητικό εργαστήριο Κατανεμημένων Δικτύων και Τηλεματικής και στα πλαίσια των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών.



Lab of Distributed System and Telematics

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

Copyright ©–All rights reserved Ασπασία Κουκουβέλα, 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,
Ασπασία Κουκουβέλα

Από την θέση αυτή θα ήθελα κατά κύριο λόγο και προπαντός να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα διπλωματικής καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στο εργαστήριο Κατανεμημένων Συστημάτων και Τηλεματικής. Η συνεργασία μας υπήρξε εποικοδομητική και η συμβολή του καθοριστική καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου. Επιπλέον, ευχαριστώ τον Δρ. Βασίλειο Κόκκινο και τον Δρ. Απόστολο Γκάμα για την καθοδήγησή τους και την συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια της εργασίας μου. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον συνάδελφο μου Φοίβο Αλλαγιώτη, για την μεγάλη βοήθεια και την δυνατότητα ανταλλαγής απόψεων σε σημαντικά μέρη της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδελφό μου για την υποστήριξη και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

--Ασπασία Κουκουβέλα

Περίληψη

Τα ετερογενή δίκτυα (HetNets), τα οποία επιτρέπουν τη γρήγορη ανάπτυξη της κίνησης από κινητά, έχουν επαινεθεί ως βασική τεχνολογία για τις επικοινωνίες 5G. Τα HetNets επεκτείνουν τις δυνατότητες του δικτύου και του επιτρέπουν να φιλοξενεί περισσότερους χρήστες. Ωστόσο, η παρεμβολή μεταξύ ξεχωριστών κυψελών καθιστά την Ποιότητα Παρεχόμενης Υπηρεσίας (QoS) πιο δύσκολη, επομένως θα πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι αιχμής και νέες τάσεις για την παροχή αποτελεσματικής Κατανομής Πόρων (Resource Allocation - RA). Βασικές έννοιες της Θεωρίας Παιγνίων (Game Theory - GT) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την επίλυση ενός μεγάλου φάσματος ζητημάτων όπου οι ενέργειες ενός ατόμου μπορεί να έχουν αντίκτυπο ή ακόμη και να έρχονται σε σύγκρουση με αυτές άλλων. Για την ανακάλυψη μιας σταθερής λύσης για όλους τους παίκτες, χρησιμοποιούνται συνθέσεις παιχνιδιών και εφαρμόζεται η έννοια της ισορροπίας (equilibrium). Σε αυτήν την διπλωματική, αντιπαραθέτουμε δύο αλγόριθμους RA, ο πρώτος είναι ένας παραδοσιακός αλγόριθμος, ενώ ο δεύτερος βασίζεται σε έναν αλγόριθμο GT και εισάγει με τον τρόπο αυτό μια καινοτόμα τεχνολογία ώστε να αυξήσει την απόδοση του RA. Το όνομα του παιχνιδιού στο οποίο βασίστηκε η υλοποίηση ονομάζεται "Tragedy of the Commons" και χρησιμοποιείται σε ένα μη συνεργατικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος GT αλγόριθμος καταφέρνει να βελτιστοποιεί το RA και παρέχει καλύτερη ΕΕ μέσω της σωστής διαμοίρασης των PRBs.

Λέξεις Κλειδιά - 5G, Θεωρία Παιγνίων, Δίκτυα, Κατανομή Πόρων, Τραγωδία των Κοινών

Abstract

Heterogeneous Networks (HetNets), which allow for quick growth in mobile traffic, have been praised as a key technology for 5G communications. HetNets could expand the network's capability and allow it to accommodate more users. However, interference between separate cells makes Quality of Service (QoS) more difficult and thus cutting-edge methods and new trends should be implemented to provide efficient Resource Allocation (RA). Concepts from game theory (GT) have been widely used to solve a wide range of issues where one person's actions may have an impact on, or even clash with, those of others. To discover a stable solution for all players, game formulations are used and the concept of equilibrium is applied. In this thesis, we contrast two RA algorithms, the first being a traditional RA algorithm, while the second one being a game-theoretic technique. The name of the game that the implementation is based on is called "Tragedy of the Commons" and it is used in a non-cooperative network. Results show that the proposed GT algorithm manages to optimize RA and provides better EE through the better allocation of PRBs.

Keywords - 5G, Game Theory, Networks, Resource Allocation, Tragedy of the Commons

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	6
Αρτικόλεξα	13
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
1 Εισαγωγή	16
1.1 Σημασία του Προβλήματος	16
1.2 Στόχοι της εργασίας	18
1.3 Διάρθρωση της εργασίας	21
2 Εισαγωγή στα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών	23
2.1 Η γενιά 1G	23
2.2 Η γενιά 2G	24
2.3 Η γενιά 3G	25
2.4 Η γενιά 4G	26
2.5 Η γενιά 5G	27

3 Κατανομή Πόρων στα Δίκτυα	35
3.1 Η τεχνολογία MIMO	35
3.1.1 Λειτουργία	35
3.1.2 Χαρακτηριστικά Αρχιτεκτονικής	37
3.1.3 Η τεχνολογία MU - MIMO	42
3.2 Η λειτουργία DUDE	46
3.2.1 Λειτουργία	46
3.2.2 Χαρακτηριστικά Αρχιτεκτονικής	48
3.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	51
3.2.4 Εφαρμογές	53
4 Θεωρία Παιγνίων	55
4.1 Επισκόπηση	55
4.2 Σύνδεση GT και Δικτύων	58
4.3 Είδη παιχνιδιών	61
4.4 Εφαρμογές του GT	65
5 Περιβάλλον Εξομοίωσης	69
5.1 Θεωρία	71
5.2 Ανάλυση Μοντέλου και Περιγραφή Μηχανισμού	74
5.3 Σύστημα Μοντέλου	78
5.4 Έξοδοι και Παραδείγματα Χρήσης	82

6	Προτεινόμενος Μηχανισμός	85
6.1	Ανάλυση αλγορίθμου που υλοποιείται	85
7	Αποτελέσματα	88
8	Συμπεράσματα	93
8.1	Ανακεφαλαίωση	93
8.2	Συμπεράσματα	94
9	Μελλοντική Εργασία	96
	Βιβλιογραφία	98

Αρτικόλεξα

IoT	Internet of Things
RA	Resource Allocation
BS	Base Station
QoS	Quality of Service
EE	Energy Efficiency
TPO	Transmit Power Output
SNR	Signal to Noise Ratio
BER	Bit Error Rate
AMC	Adaptive Modulation and Coding
CDMA	Code Division Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
HetNet	Heterogeneous Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
Comp	Coordinated Multi-Point
NC	Network Centric
UC	User Centric
UL	Uplink
DL	Downlink
UE	User Equipment
SCBS	Small cell Base Station
GT	Game Theory
ML	Machine Learning
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
NMT	Nordic Mobile Telephone
SMS	Short Time Messages
MMS	Multimedia Messages
TDMA	Time Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile
GPRS	General Packet Radio Services

EDGE	Enhanced DATA GSM Environment
PSK	Phase Shift Keying
bps	bits per second
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
HSPA+	Enhanced High Speed Packet Access
LTE	Long Term Evolution
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
mmWave	millimeter Wave
Hz	Hertz
2D	2 dimensions
OCI	Order Cell Interference
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
D2D	Device to Device
V2V	Vehicle to Vehicle
SDMA	Space Division Multiple Access
SISO	Single Input Single Output
SIMO	Single Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
RF	Radio Frequency
FEC	Forward Error Concatenation
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
STBC	Space Time Blocking Code
GIs	Guard Intervals
VoIP	Voice over Internet Protocol
RFID	Radio Frequency Identification
Mu-MIMO	Multi User MIMO
Su-MIMO	Single User MIMO
ICI	Inter Cell Interference
CSI	Channel State Information
NOMA	Non Orthogonal Multi Access
MAC0	Multiple Access Channel
DUDe	Downlink Uplink Decoupling
PL	Path Loss
RB	Resource Block
CPRI	Common Public Radio Link
AS	Access Stratum
MME	Mobility Management Entity
SE	Spectral Efficiency
3GPP	Third Generation Partnership Program

UF	Utility Function
UEs	User Equipment
APs	Access Points
RATs	Radio Access Technologies
URLLC	Ultra Reliable and Low Latency Communications
mMTC	massive Machine Type Communications
eMBB	enhanced Mobile Broadband
KPIs	Key Performance Indicators
RSRP	Reference Signal Received Power
SINR	Signal to Interference Plus Noise Ratio
RBUR	Resource Blocks Utilization Ratio
csv	Comma Separated Values
GUI	Graphical User Interface
NE	Nash Equilibrium

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Τα πλεονεκτήματα της δικτύου 5G [6].	28
2.2	Λειτουργίες του 5G.	29
3.1	Παράδειγμα MIMO συστήματος.	36
3.2	Διαφορετικές μορφές κεραίας.	38
3.3	Δομικά στοιχεία συστήματος MIMO.	40
3.4	Βελτιωμένες Μορφές MIMO.	42
3.5	Η πρακτική εφαρμογή του DUDe.	50
4.1	Είδη Παιχνιδιών	61
4.2	Εκτεταμένη μορφή παιχνιδιού.	64
4.3	Εφαρμογές του GT στα διάφορα επίπεδα ενός δικτύου	67
5.1	Τοπολογία αρχιτεκτονικής εξομοιωτή.	70
5.2	Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε.	75
5.3	Ο αλγόριθμος λειτουργίας της προσομοίωσης.	77
5.4	Τοπολογία εξομοιωτή.	83

7.1	Σύγκριση του κέρδους για τον κάθε αλγόριθμο.	89
7.2	Συνολικό κέρδος σε σχέση με ομάδες.	89
7.3	Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας.	91
7.4	Σύγκριση του QoS.	92

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Utility Table του Διλήματος του Φυλακισμένου	63
4.2	Utility Table του παιχνιδιού Πόλεμος των Φύλων	64
5.1	Παράμετροι Προσομοίωσης	76
6.1	Utility Table προτεινόμενου αλγόριθμου.	86

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σημασία του Προβλήματος

Η δημοτικότητα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, φέρνοντας επανάσταση στους υπολογιστές δικτύου και ταυτόχρονα προσφέροντας μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών και υπηρεσιών που διατίθενται σε καθημερινούς χρήστες. Ο όγκος των συνδεδεμένων συσκευών αυτή τη δεκαετία αναμένεται να αυξηθεί εκθετικά, και σύμφωνα με προβλέψεις, έως το 2025, το δίκτυο IoT θα εξυπηρετεί περισσότερες από 75 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές. Πρόκειται για μια περίπου τριπλάσια αύξηση σε σύγκριση με τον αριθμό των χρηστών του IoT το 2019. Για την όσο το δυνατόν καλύτερη αντιμετώπιση δυσκολιών που μπορεί να προκύψουν εξαιτίας του αριθμού των συσκευών, απαιτείται βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων (Resource Allocation - RA) για τη σωστή διαχείριση των φυσικών πόρων των σταθμών βάσης του δικτύου (Base Station - BSs).

Η εξυπηρέτηση των χρηστών κινητής τηλεφωνίας δυσχεραίνεται λόγω της ραγδαίας αύξησης των διαδυνδεδεμένων συσκευών και εξαιτίας της αύξησης των δεδομένων που διακινούνται. Οι πάροχοι μπορούν μακροπρόθεσμα να αυξήσουν τα BS, ώστε να παρέχονται καλύτερες υπηρεσίες ωστόσο αφενός υπάρχει όριο στα BS που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αφετέρου υπάρχει περιθώριο ώστε αλγοριθμικά να αξιοποιούνται καλύτερα οι διαθέσιμοι πόροι. Υποθέτοντας ότι τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα στοχεύουν να έχουν ως βάση τις ήδη υπάρχουσες δικτυακές υποδομές αντί να τις αντικαταστήσουν, το έργο της βέλτιστης διαμοίρασης των

σημερινών πόρων δικτύου, για την παροχή υπηρεσιών σε όσους περισσότερους χρήστες είναι ένα απαιτητικό αλλά και εφικτό έργο.

Όσον αφορά τα συστήματα επικοινωνίας, υπάρχει η ανάγκη παροχής υπηρεσιών υψηλού επιπέδου σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα ανεξαρτήτως της θέσης τους. Αυτό συχνά οδηγεί σε προβλήματα στη βελτιστοποίηση της διαμοίρασης των διαθέσιμων πόρων ενός δεδομένου συστήματος. Ο στόχος παραμένει πάντοτε ο ίδιος και είναι η κάλυψη των αναγκών όλων των χρηστών, όσο το δυνατόν πληρέστερα και αποτελεσματικότερα. Τα προβλήματα αυτά περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, κάποια εκ των οποίων είναι:

- Κατανομή της Διαθέσιμης Ισχύος των καναλιών ή των υποσταθμών τους.
- Χειρισμός Διαφόρων Παρεμβολών, Θορύβου καθώς και των καιρικών φαινομένων.
- Ευκολία Επικοινωνίας κάθε χρήστη με τον BS.
- Προτεραιότητα των χρηστών εντός του δικτύου, πχ. οι κλήσεις έκτακτης ανάγκης θα πρέπει να έχουν πάντοτε προτεραιότητα.
- Τεχνικές RA που ακολουθεί κάθε BS.
- Διαφορετικές Εφαρμογές ή Υπηρεσίες εντός του ίδιου δικτύου που ενδέχεται να απαιτούν διαφορετικό εύρος πληροφορίας μεταξύ τους.

Η αντιμετώπιση των επιμέρους προβλημάτων αποτελεί ήδη ένα δύσκολο έργο και άρα σε ένα σύνθετο και συνεπώς πραγματικό σενάριο, τα παραπάνω προβλήματα είναι πολύ πιο δύσκολο να επιλυθούν.

Κάθε μεμονωμένο δίκτυο επικοινωνίας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά λειτουργίας, υπακούει σε συγκεκριμένους αλγόριθμους και επηρεάζεται από ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών παραμέτρων. Είναι λοιπόν προφανές ότι δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε ένα γενικό μοντέλο μελέτης και ότι το κάθε πρόβλημα RA είναι μοναδικό και πρέπει να μελετηθεί ξεχωριστά. Συνεπώς, ο σχεδιασμός και η διαχείριση ψηφιακών δικτύων τηλεπικοινωνίας πρέπει να λαμβάνει υπόψιν το RA, καθώς είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που επηρεάζει την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

1.2 Στόχοι της εργασίας

Η κατανομή πόρων, όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των δικτύων επικοινωνίας. Για να αναλύσουμε περαιτέρω το πρόβλημα της RA, πρέπει να προσδιορίσουμε τους πόρους που πρέπει να διατεθούν. Κάποιοι από αυτούς είναι:

- Χρονικές περιόδους, το πλήρες χρονικό πλαίσιο χωρίζεται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, επιτρέποντας σε πολλούς κόμβους να μοιράζονται το ίδιο κανάλι χωρίς σύγκρουση.
- Μετάδοση Ισχύς/Ενέργεια, χρησιμοποιείται για τη διανομή της συνολικής διαθέσιμης ισχύος στον πομπό κατά μήκος των διαφόρων κεραιών ή στρωμάτων.
- Εύρος ζώνης, διαδικασία εκχώρησης ραδιοσυχνοτήτων σε διαφορετικές εφαρμογές.
- Χρήστες, κάθε χρήστης θα πρέπει να κατανεμηθεί στην κεραιά που βρίσκεται πιο κοντά του και μπορεί να τον εξυπηρετήσει καλύτερα.
- Φάσμα (spectrum), εκχωρεί φάσμα χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ζώνης ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

Οι πόροι που αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να κατανέμονται προσεκτικά για μεγάλο αριθμό συνδέσεων παρεμβολής ώστε να παρέχουν υψηλή απόδοση, δικαιοσύνη για τους χρήστες και σταθερή Ποιότητα Παρεχόμενης Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS). Μια κρίσιμη πρόκληση στα ασύρματα δίκτυα είναι αυτή της αποδοτικής κατανομής ενέργειας (Energy Efficiency - EE), που αποτελεί έναν κοινό πόρο που πρέπει να κατανεμηθεί αποτελεσματικά. Σε ορισμένα έθνη, το κόστος λειτουργίας των υποδομών αυξάνεται ραγδαία [1]. Ως αποτέλεσμα, το χαμηλό λειτουργικό κόστος για τον διαχειριστή συστήματος και η απόδοση της επένδυσης επιτυγχάνονται με την αποτελεσματική χρήση φάσματος/ισχύος. Ένας ακόμα σπάνιος πόρος είναι η ισχύς μετάδοσης ενός 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.

Τα BS και οι υποσταθμοί τους κατασκευάζονται με συγκεκριμένες προδιαγραφές το οποίο σημαίνει πως ανεξάρτητα από την χρήση τους οι σταθμοί έχουν μέ-

γιστη έξοδο ισχύος μετάδοσης (Transmit Power Output - TPO). Το TPO δεν ταυτίζεται με την ισχύ του BS, καθώς μπορεί να προκύψουν απώλειες στις γραμμές τροφοδοσίας ή ακόμα και κέρδη λόγω της κεραιάς που μπορεί να μεταδώσει σωστά ένα σήμα. Μια έξυπνα κατανεμημένη επιλογή TPO εγγυάται πως το σύστημα αποδίδει συνολικά καλύτερα. Ο όρος «καλύτερη απόδοση» ποικίλλει ανάλογα με τους στόχους που χρειάζεται να επιτευχθούν και μπορεί να περιλαμβάνει αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, μεγαλύτερη απόσταση λήψης από το σταθμό, καλύτερο ρυθμό μετάδοσης, ευρύτερη γεωγραφική κάλυψη ή και ακόμη αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου και των συσκευών του [2].

Αυξάνοντας το TPO ενός συστήματος παρατηρούνται πολλαπλά οφέλη που αφορούν την συνολική λειτουργία του δικτύου. Αρχικά, μεγαλύτερο TPO μεταφράζεται σε υψηλότερη ισχύς σήματος στον δέκτη και αυτό συνεπάγεται υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR) που έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του ποσοστού σφάλματος δυαδικού ψηφίου (Bit Error Rate- BER) μιας ψηφιακής επικοινωνίας. Στην περίπτωση που το σύστημα παρουσιάζει μεγαλύτερο SNR, τα συστήματα που χρησιμοποιούν Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC) μπορούν να μεταδώσουν πληροφορίες με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, με αποτέλεσμα ένα σύστημα με υψηλή φασματική απόδοση.

Επιπλέον, στα ασύρματα δίκτυα που έχουν απώλεια σήματος καναλιών ή ξεθώριασμα, ο υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης συνεπάγεται μειωμένη πιθανότητα απώλειας σήματος. Μειονεκτήματα παρουσιάζει αντίστοιχα και η χρήση υψηλότερης ισχύος δεδομένων καθώς αυξάνει την συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και άρα μπορεί να προκύψει πρόβλημα σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα που έχουν περιορισμένη διάρκεια μπαταρίας.

Ακόμα ένα ζήτημα το οποίο χρίζει αντιμετώπισης αποτελεί η αύξηση των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών που χρησιμοποιούν ίδιες ζώνες συχνοτήτων. Σε συστήματα επικοινωνίας Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Κώδικα Ευρείας Εμβέλειας (Code Division Multi-Access - CDMA) υπάρχουν πολλοί χρήστες που μοιράζονται συγκεκριμένες συχνότητες και το σήμα τους διακρίνεται μόνο μέσω διαφορετικών κωδικοποιήσεων. Ο αριθμός των χρηστών μέσα σε μια κυψέλη καθώς και η ακτίνα αυτής περιορίζονται από την ποσότητα παρεμβολής της. Ως αποτέλεσμα, αύξηση στην παρεμβολή συνεπάγεται μείωση της χωρητικότητας και του μεγέθους της κυψέλης. Ακόμα, στα συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης με Διαφορετικές Συχνότητες (Frequency Division Multiple Access - FDMA) γίνεται χρήση διαφορετικών συχνοτήτων και με τον τρόπο αυτό οι παρεμβολές παρεμένουν με-

ταξύ διαφορετικών κυψελών μειώνοντας έτσι την ικανότητα του συστήματος να επαναχρησιμοποιήσει τη συχνότητα.

Η έννοια του Ετερογενούς Δικτύου (Heterogeneous Network - HetNet) προωθείται στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα και παρουσιάζεται στο [3]. Το περιγραφόμενο δίκτυο αποτελείται από κόμβους αναμετάδοσης χαμηλής κατανάλωσης και σταθμούς βάσης που τοποθετούνται εκτενώς για καλύψουν την ακμή της κυψέλης και τους εσωτερικούς τους χρήστες. Η τοποθέτηση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιωθεί η συνολική δικαιοσύνη των χρηστών καθώς και η απόδοση του συστήματος. Οι συγγραφείς του [4] προτείνουν ένα καινούργιο πρότυπο σχεδιασμού, το οποίο φέρνει πιο κοντά τους δέκτες και τους πομπούς επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό καλή ποιότητα σύνδεσης με μικρή ισχύ μετάδοσης. Η εγγύτητα πολλών πομπών και δεκτών δυστυχώς δημιουργεί σημαντικές παρεμβολές εντός του δικτύου, οι οποίες μπορεί να έχουν σοβαρή επίδραση στην απόδοση του συστήματος εάν δεν αντιμετωπιστούν σωστά. Για να γίνει αποδοτικά το RA και να αποσβεστούν οι παρεμβολές στα HetNets, τεχνολογίες όπως ο συντονισμός πολλαπλών κυψελών και η Πολλαπλή Έξοδος Πολλαπλής Εισόδου (Multiple Input Multiple Output - MIMO) θα είναι εξαιρετικά χρήσιμες.

Η σωστή ανάπτυξη του RA επιτρέπει τον ευέλικτο συντονισμό μεταξύ των κόμβων BS επιτρέποντας ταυτόχρονα την εφαρμογή των αναγκαίων πρωτοκόλλων σε κάθε BS. Ο συντονισμός ειδικά στην περίπτωση που είναι πετυχημένος επιτρέπει στη μείωση των παρεμβολών μεταξύ των παρεμβαλλόμενων κόμβων (π.χ. Συντονισμένος Πολλαπλών Σημείων (Coordinated Multi-Point - Comp)). Βέβαια αυτό θεωρείται δαπανηρό αν ληφθούν υπόψη τα γενικά έξοδα μετάδοσης. Το CoMP, για παράδειγμα, απαιτεί ολοκληρωμένο συντονισμό BS, συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής δεδομένων σε όλα τα συνεργαζόμενα BS.

Οι παραπάνω προκλήσεις και δυσκολίες που υπάρχουν πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε οι χρήστες να έχουν καλό QoS και να απολαμβάνουν υψηλές αποδόσεις χωρίς καθυστερήσεις. Για τον λόγο αυτό η επίλυση ή έστω βελτιστοποίηση κάποιων από τα παραπάνω προβλήματα έχει μεγάλη αξία καθώς με τον τρόπο αυτό οι παρεχόμενες υπηρεσίες αναβαθμίζονται, η ενέργεια κατανέμεται αποτελεσματικότερα και όλο και περισσότεροι χρήστες απολαμβάνουν αυτά τα οφέλη.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η αρχιτεκτονική 5G HetNet απομακρύνεται από το τρέχον μοντέλο που ως επίκεντρο έχει το δίκτυο (Network Centric - NC) και μετατοπίζεται προς ένα πρωτοποριακό μοντέλο που επικεντρώνεται στον χρήστη (User centric - UC). Το νέο αυτό μοντέλο προσανατολίζεται στην παροχή αυξημένης συνδεσιμότητας μεταξύ των συνδρομητών του δικτύου και των BS που έχουν ανατεθεί σε πυκνές διατάξεις HetNet. Το χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα δίκτυα σε ομοιογενή και παραδοσιακά είναι ότι τα HetNet αποσυνδέουν το κεντρικό δίκτυο διαιρώντας το σε δυο δίκτυα, το Άνω Ζεύξης (Uplink - UL) και της Κάτω Ζεύξης (Downlink - DL). Τα παραπάνω θεωρούνται ως δυο ξεχωριστά δίκτυα με διαφορετικά μοντέλα συστημάτων και με ξεχωριστή αρχιτεκτονική. Εκμεταλλευόμενοι τα παραπάνω παρέχεται η δυνατότητα στους Εξοπλισμούς Χρήστη (User Equipment - UE) να επικοινωνούν πιθανώς με πολλά BS προς τις κατευθύνσεις UL και DL, παρέχοντας έτσι περισσότερο έλεγχο στην διαχείριση όλων των πιθανών συσχετίσεων για τα αποσυνδεδεμένα δίτυα. Η χρήση των HetNets υιοθετείται καθώς προβλέπει την βελτίωση των τρέχουσων υποδομών μακροκυτταρικών κυψελών (macro cells), με την εγκατάσταση Small Cell BSs (SCBS) κατά μήκος των ορίων μακροκυτταρικών κυψελών, παρέχοντας στους χρήστες καλύτερη κάλυψη ακόμα και στα όρια της κυψέλης.

Με την παραπάνω ανάλυση ουσιαστικά έχει γίνει εισαγωγή σε βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος του αποδοτικού RA με χρήση τεχνικών θεωρίας παιγνίων (Game Theory - GT). Νέες τεχνολογίες όπως το GT και Μηχανική Μάθηση (Machine Learning - ML) 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 βοήθησε στην επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος.

Η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας είναι συνεπώς η παρακάτω. Η ιστορία των γενιών των δικτύων από το 1G έως και το 5G παρουσιάζεται στην Ενότητα 2 μαζί με διάφορες εφαρμογές καθώς και τεχνολογίες τους. Στην Ενότητα 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. Στην Ενότητα 4 γίνεται εμβάθυνση στις βασικές έννοιες του GT και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η παρούσα τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί στα δίκτυα επηρεάζοντας θετικά το RA. Στην συνέ-

χεια, περιγράφουμε τον τρόπο λειτουργίας και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από έναν εξομοιωτή ενός δικτύου 5G που υλοποιήθηκε σε Python. Το κεφάλαιο 5 συνεπώς δείχνει πως μέσω χρήσης ενός κλασικού αλγόριθμου για RA, εκτελείται σύνδεση χρηστών σε συγκεκριμένα BS. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται ο μηχανισμός που υλοποιείται για την επίλυση του προβλήματος του αποδοτικού RA με χρήση τεχνικών GT. Τέλος, στα κεφάλαια 8 και 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι μελλοντικές εργασίες αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή στα Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα Δίκτυα μέσω ανάλυσης παλιότερων γενιών των δικτύων, ξεκινώντας από την πρώτη μέχρι την πιο σύγχρονη που είναι η πέμπτη.

2.1 Η γενιά 1G

Το 1G αποτελεί την πρώτη γενιά κινητών δικτύων, η οποία δημιουργήθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1970 και ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στα τέλη του 1980. Αυτή η γενιά χρησιμοποιούσε αναλογική τεχνολογία για την παροχή υπηρεσιών ομιλίας και η μέγιστη ταχύτητα ήταν τα 2.4 Kbps. Το 1979, η NTT (Nippon Telegraph and Telephone) κυκλοφόρησε ουσιαστικά για πρώτη φορά το 1G στο Τόκιο και μέσα σε ένα χρόνο κατάφερε να καλύψει τηλεπικοινωνιακά όλη την Ιαπωνία. Το 1983 οι Η.Π.Α. κυκλοφόρησαν το κινητό DynaTAC, το οποίο ήταν το πρώτο τηλέφωνο που ήταν συμβατό με το 1G. Στην Ευρώπη, χρησιμοποιούταν το NMT, το οποίο ήταν το πρώτο κινητό δίκτυο που επέτρεπε σε παγκόσμιο επίπεδο την περιαγωγή. Οι κινητές συσκευές συνεπώς μπορούσαν να συνδεθούν σε κάποιο άλλο διαθέσιμο δίκτυο, ακόμα και όταν είναι εκτός του εύρους του κεντρικού δικτύου τους.

Παρά το γεγονός ότι η χρήση του ήταν ευρεία, τα πρακτικά προβλήματα που

αυτό παρουσίαζε οδήγησαν στην ανάπτυξη της επόμενης γενιάς δικτύων. Μερικά από τα μειονεκτήματα του 1G ήταν 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 και δεν μπορούσε να εξασφαλιστεί η ιδιωτικότητα τους. Οι περιορισμοί αυτοί προεκύπταν από το γεγονός ότι δεν υπήρχαν κυψελωτοί BS και δεν υπήρχε παροχή κάλυψης σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

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

2.2 Η γενιά 2G

Η 2G γενιά δημιουργήθηκε το 1980 και τέθηκε στην κυκλοφορία μέχρι τα τέλη του 1991. Η βασική διαφορά είναι ότι πλέον τα σήματα είναι ψηφιακά και όχι αναλογικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι κρυπτογράφησης που εξασφαλίζουν πως οι συνομιλίες των χρηστών είναι πιο ασφαλείς. Παράλληλα, οι ίδιοι απολαμβάνουν καλύτερη ποιότητα κλήσεων αυξημένης αξιοπιστίας και πλέον μπορούν να στέλνουν Short Time Messages (SMS) και Multimedia Messages (MMS). Είναι ακόμα πολύ σημαντικό να αναφερθεί πως εξαιτίας της καλύτερης επεξεργασίας των σημάτων οι χρήστες απολαμβάνουν μειωμένο θόρυβο που οφείλεται στην διασυμβολική παρεμβολή. 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 και αποστέλλουν ταυτόχρονα πληροφορία και με την χρήση του δεύτερου πρωτοκόλλου 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 Communications), που αρχικά εφαρμόστηκε στην Φιν-

λανδία το 1991. Το παρόν σύστημα υποστήριζε την περιαγωγή και έδινε στους χρήστες του 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 όταν 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 8 Phase Shift Keying (8PSK). Εφόσον οι απαιτήσεις αυξάνονται γίνεται μετάβαση στην επόμενη γενιά.

2.3 Η γενιά 3G

Η νέα αυτή γενιά των δικτύων εμφανίστηκε το 1998 και τέθηκε σε εφαρμογή μέχρι το 2001. Δημιουργήθηκε καθώς ικανοποιούσε την ανάγκη των χρηστών για βελτιωμένες επιδόσεις, όπως γρηγορότερη και πιο σταθερή σύνδεση στο διαδίκτυο, ταχύτερη μεταφορά δεδομένων, και τέλος κάλυψη κάθε συσκευής κινητής τηλεφωνίας σε οποιοδήποτε μέρος και στιγμή. Αυτή η γενιά είναι υπεύθυνη για την εξέλιξη των smartphones και 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 να είναι 144 Kbps όταν το δίκτυο πρέπει να εξυπηρετήσει πολύ κόσμο και το μέγιστο να είναι 2 Gbps όταν δεν υπάρχουν πολλοί χρήστες. Πλέον οι χρήστες αυξάνονται και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται παραπάνω συχνοτικές ζώνες για την καλύτερη εξυπηρέτηση όλων των χρηστών. Είναι απαραίτητο να σημειώσουμε 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.

2.4 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. Αυτή η 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 έως 35 χιλιομέτρων από τον σταθμό βάσης και να εξυπηρετούνται χωρίς προβλήματα στην σύνδεση τους με καλό QoS.

Αυτή η γενιά δεν είναι απλά ένα πρωτόκολλο αλλά συνδυασμός πολλών. Οι τεχνολογίες υποδεικνύουν κριτήρια τα οποία πρέπει να πληρούνται ώστε συγκεκριμένες τεχνολογίες να θεωρούνται 4G. Ένα από τα βασικότερα πρωτόκολλα είναι το Long Term Evolution – LTE, το οποίο 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). Η ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες χρειάστηκε να εκσυγχρονιστούν για να μπορούν να υποστηρίξουν τις πλέον μεγάλες ταχύτητες. Με αυτήν την γενιά οι χρήστες απολαμβάνουν τα οφέλη συγκριτικά μεγαλύτερες ταχύτητες, όπως 100 Mbps.

Πολύ σημαντική τεχνολογία του 4G είναι και η WiMAX, η οποία αποτελεί τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης και δουλεύει με παρεμφερή τρόπο με το Wi-Fi εξασφαλίζοντας ωστόσο σημαντικά μεγαλύτερη εμβέλεια.

2.5 Η γενιά 5G

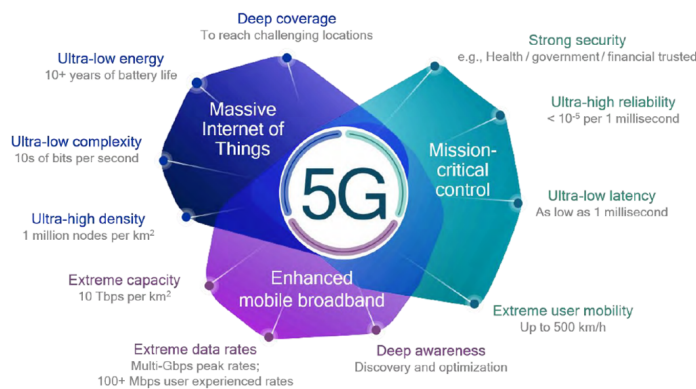
Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [5], τα οποία υπάρχουν εδώ και 40 χρόνια, όπως και το Διαδίκτυο, έχουν δει πολλές αλλαγές. Η φωνή και το κείμενο ήταν διαθέσιμα στις δύο πρώτες γενιές, με το 3G να σηματοδοτεί τη μετάβαση στη σύνδεση στο διαδίκτυο, με ταχύτητες που υπολογίζονται σε εκατοντάδες kbps. Η βιομηχανία 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 αιχμής είναι απαραίτητος, ο οποίος θα αναλυθεί 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 ευελιξίας. 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, γίνεται λόγος για κλήσεις έκτακτης ανάγκης και υπηρεσίες στις οποίες δεν γίνεται να υπάρχει καθυστέρηση, όπως εκείνες που 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.



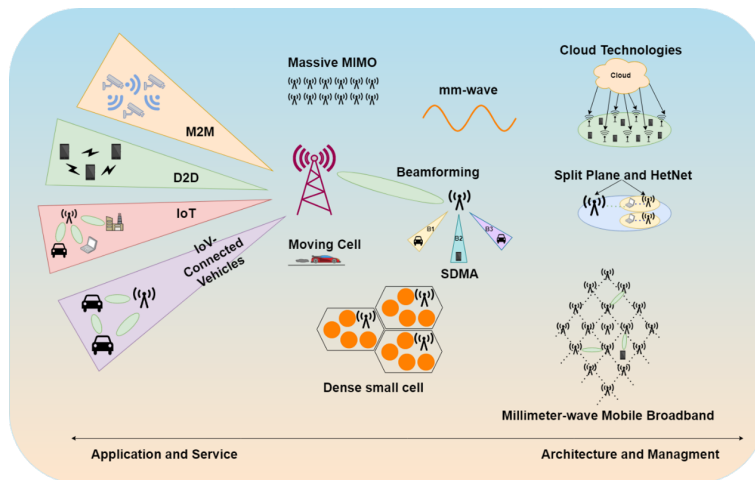
Σχήμα 2.1: Τα πλεονεκτήματα της δικτύου 5G [6].

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται οι στόχοι που θέτει αυτή η νέα γενιά δικτύων. Η επίτευξη των παραπάνω στόχων δεν είναι εύκολη διαδικασία και είναι αναμενόμενο, 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

οραματιστεί στην αρχή της αναπτύξεως του. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G 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, ούτε 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: Λειτουργίες του 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 εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται πλέον σε μεγάλο βαθμό. 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 προσεχτική ανάλυση μεταξύ ζωνών αναμένεται να είναι ζωτικής σημασίας. Κάποιες από τις πιθανές επιλογές είναι χαμηλότερες συχνότητες για ευρεία κάλυψη, δίκτυα ανυψωμένων κυμάτων (millimeter wave – mmWave) που επιτρέπουν τοπικές και εξατομικευμένες ζώνες επικοινωνίας και οικιακή συνδεσιμότητα μικρής εμβέλειας στο τμήμα φάσματος χωρίς άδεια των ζωνών κυμάτων mm. Στην συνέχεια παρουσιάζονται κάποιοι ακόμα βασικοί στόχοι:

- Η μεγάλη χωρητικότητα της περιοχής υποδηλώνει ότι θα χρησιμοποιηθούν μικροσκοπικές κυψέλες για την πυκνότητα του δικτύου. Η ζήτηση για μειωμένη καθυστέρηση απαιτεί μικρότερα χρονικά διαστήματα μετάδοσης. Όταν

δεν υπάρχουν δεδομένα για αποστολή, η ανάγκη για καλή ΕΕ απαιτεί ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. 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. Συγκεκριμένα προορίζονται να δώσουν μια βελτίωση μεγέθους τάξης 3 σε σχέση με αυτό που είναι σήμερα δυνατό. 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 φορέα που παρέχουν έως 1 GHz είναι εφικτά. 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 μετατόπιση για μεγαλύτερη απώλεια διαδρομής και να προσφέρουν ώθηση χωρικής πολυπλεξίας. Οι πολυάριθμες κεραιές που λαμβάνονται υπόψη για το BS σε συχνότητες κυμάτων mm κυμαίνονται από 256 έως 1024. Οι κεραιές αποτελούνται από μια δισδιάστατη διάταξη διασταυρούμενων πολωμένων στοιχείων (2D). Ο πίνακας μπορεί επίσης να αποτελείται από υπό-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 προκωδικοποίηση 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 το 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. Ο κυ-

κλοφοριακός φόρτος μειώνεται από εγκαταστάσεις μικρών κυψελών υψηλής πυκνότητας, ενώ η κυκλοφορία σε επίπεδο ελέγχου θα εξακολουθεί να απαιτεί υπηρεσία μακρό-κυτταρικής κυψέλης (στις ζώνες μικροκυμάτων). Η υψηλότερη κυτταρική πυκνότητα μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη ενδο-κυτταρική παρεμβολή, μειώνοντας τυχόν κέρδη χωρητικότητας (capacity). Επιπλέον, ανάλογα με την απώλεια διαδρομής μικρής εμβέλειας, μπορεί η άπειρη ανάπτυξη στην ποσότητα των μικρών κυττάρων να αποδειχθεί αντι-παραγωγική λόγω της παρεμβολής άλλων κυττάρων (Order Cell Interference - OCI). Λύσεις μετριασμού παρεμβολών, όπως ο συνεργατικός προγραμματισμός, το COMP και άλλες, από την άλλη πλευρά, θα 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 κεραίες, 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 ορθογωνίας επικοινωνίας, που περιλαμβάνει λογισμικό, πόρους σε εκκρεμότητα και χρονική ευθυγράμμιση μηνυμάτων, είναι σχετικά σημαντικό όταν ο αριθμός των συσκευών είναι μεγάλος. 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 διαδρομών για τεράστια κανάλια MIMO (Massive MIMO) αρχιτεκτονικές, 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) αγνοούνται.

- Massive MIMO

- Κανάλια για Κατανεμημένα Συστήματα
- Κανάλια mmWave

Η σύγκλιση της αυξανόμενης πρόσβασης φάσματος κυμάτων mm, 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 η καθυστέρηση 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: Αυτός είναι περίπου δέκα φορές ταχύτερος 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: Απαιτούνται περισσότερες συνδεδεμένες μονάδες με μεγαλύτερα εύρη ζώνης για εκτεταμένες χρονικές περιόδους σε έναν συγκεκριμένο χώρο.
4. Τεράστιος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών: Για να επιτευχθεί ο στόχος του IoT, τα νέα δίκτυα 5G πρέπει να μπορούν να συνδέουν χιλιάδες συσκευές.
5. Προσβασιμότητα 99,999%: Το 5G αναμένει 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 τοις εκατό στην κατανάλωση ενέργειας: η ανάπτυξη πράσινης τεχνολογίας εξετάζεται ήδη. Με τις υψηλές ταχύτητες δεδομένων του ασύρματου δικτύου 5G και την ευρεία σύνδεση, αυτό θα είναι ακόμη πιο κρίσιμο.
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 προσφορών. Δύο βασικά μοτίβα έχουν παρατηρηθεί από το δίκτυο του NTT Docomo [8]:

- Ευρέως διαδεδομένη ασύρματη σύνδεση.
- Διανομή σημαντικά πλούσιου υλικού σε πραγματικό χρόνο.

Τα παραπάνω υποδηλώνουν 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-εξαγωγική κάλυψη σε πολύ μικρότερες εγκαταστάσεις κυψελών. Οι ερευνητές έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειές τους στις μέρες μας στο πώς να αναπτύξουν 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 η απόλυτη ανάλυση του ασύρματου δικτύου.

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 κύτταρα έχουν ήδη αναπτυχθεί. Ως αποτέλεσμα, τα δίκτυα 5G, τα οποία έχουν υψηλή συμφόρηση, θα αντιμετωπίσουν σημαντική διαταραχή του συν-καναλιού, καθιστώντας την τρέχουσα διεπαφή αέρα παραωχημένη. 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 διεπαφής αέρα και έξυπνο σχεδιασμό κεραίας καλύπτονται σε αυτήν την ενότητα.

Κεφάλαιο 3

Κατανομή Πόρων στα Δίκτυα

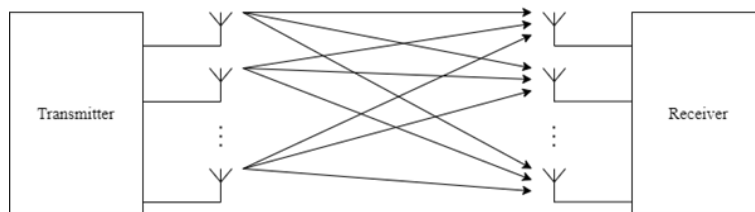
3.1 Η τεχνολογία MIMO

3.1.1 Λειτουργία

Ως MIMO ορίζεται η τεχνολογία Πολλαπλής Εισόδου Πολλαπλής Εξόδου γνωστή και ως Multiple Input Multiple Output, η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη επικοινωνία με πολλά κανάλια εισόδου αλλά και εξόδου. Χρησιμοποιώντας μόνο ένα ραδιο-κανάλι, η τεχνολογία αυτή παρέχει την δυνατότητα εκχώρησης παρόμοιων σύμβολων ως πολλά σήματα σε διακριτές κεραιές. Τα διαφορετικά είδη κεραιάς αποτελούν διακριτές στρατηγικές για την βελτίωση της ισχύος μιας ζεύξης ραδιοσυχνοτήτων και της ποιότητας του σήματος.

Ο διαχωρισμός των συμβόλων εκτελείται στο σημείο μετάδοσης, στο οποίο δημιουργούνται πολλαπλές ροές δεδομένων οι οποίες επανακασκευάζονται στο σημείο λήψης από ένα ξεχωριστό σύστημα MIMO με παρόμοιες κεραιές. Καθώς τα συστήματα έχουν απώλειες, ο δέκτης εξοπλίζεται με ένα σύστημα προσαρμογής το οποίο αναλαμβάνει να εξομαλύνει πιθανές χρονικές διαφορές μεταξύ της λήψης του σήματος, χαμένες μεταδόσεις, αλλοιώσεις εξαιτίας θορύβου, καθώς και παρεμβολές. Η διαφορά του MIMO σε σχέση με παραδοσιακούς αλγόριθμους διαμόρφωσης κεραιάς όπως SISO (Single Input Single Output), είναι ότι καταφέρνει να ειδοποιεί όταν αποστέλονται πλεονάζοντα δεδομένα. Τα συστήματα MIMO προφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα χρήσης σε σχέση με κλασικούς αλγόριθμους, όπως ο SISO, κάποια από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Τα συστήματα MIMO εκμεταλλεύονται τις ανακυκλώμενες και αναπηδημένες εκπομπές ραδιοσυχνοτήτων (διάδοση πολλαπλών διαδρομών), ενισχύοντας με τον τρόπο αυτό την ισχύ του σήματος χωρίς να καθιστούν την οπτική επαφή αναγκαία. Ο συνδυασμός δεδομένων που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές είναι αυτός που εν τέλει καταφέρνει να ενισχύσει την ισχύ του σήματος. Η συγκεκριμένη ιδιότητα είναι απαραίτητη σε πόλεις, οι οποίες ως πυκνοκατοικημένες περιοχές έχουν αυξημένες ανάγκες και τα δεδομένα που αποστέλλονται είναι πολλά.
2. Η απόδοση αυξάνεται συνολικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ποιότητα απόδοσης όλου του δικτύου και να παραδίδεται αυξημένου επιπέδου περιεχόμενο στους χρήστες.
3. Προβλήματα όπως η απώλεια πακέτων δεδομένων ή ξεθώριασμα αντιμετωπίζονται με την χρήση πολλαπλών ροών δεδομένων, οι οποίες προσφέρουν και βελτιωμένο ήχο και εικόνα.



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα MIMO συστήματος.

Οι ανεξάρτητοι κόμβοι μπορούν να συνδέονται και να αποσυνδέονται από ένα MIMO δίκτυο όποτε επιθυμούν. Στην περίπτωση παράδοσης (handover), εκτελείται αποσύνδεση από ένα BS και σύνδεση σε ένα άλλο, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και αυτόματη προώθηση δεδομένων μέσω του δικτύου. Αυτό καταλήγει στην δημιουργία ενός αυτοσχηματιζόμενου και αυτοθεραπευόμενου δικτύου. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και τα Ad Hoc δίκτυα, τα οποία παρέχουν την δυνατότητα κλιμάκωσης.

Αυτή η δυνατότητα τρόπου δικτύωσης δίνει στα συστήματα MIMO την ευκαιρία να χρησιμοποιήσουν αυτήν την δικτύωση για να επιτύχουν αξιοπιστία και επεκτασιμότητα της κάλυψης του δικτύου. Πλέον τα παραπάνω περιγραφόμενα συστήματα γίνονται όλο και περισσότερο εφικτά καθώς οι τεχνολογίες MIMO συρρικνώνονται σε μέγεθος και ομαδοποιούνται σε γνωστούς φορητούς παράγοντες. Ακριβώς επειδή η τοποθέτησή τους δεν είναι μόνιμη, σταθμοί βάσης και αναμεταδότες δικτύου εγκαθίστανται γρήγορα και να εξυπηρετήσουν περιοχές που υπάρχει ανάγκη για καλύτερη κάλυψη.

Η επεξεργασία σημάτων χωροχρόνου είναι μια από τις πιο θεμελιώδεις έννοιες των ασύμαρτων δικτύων MIMO. Πιο αναλυτικά, ο χρόνος, ο οποίος αποτελεί και την εγγενή διάσταση των δεδομένων ψηφιακής επικοινωνίας, επαυξάνεται με την χωρική διάσταση, η οποία κληρονομείται από την χρήση πολλών διασκορπισμένων γεωγραφικά κεραιών. Συνεπώς τα MIMO δίκτυα μπορούν να θεωρηθούν εξέλιξη έξυπνων κεραιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ήδη στα ασύρματα δίκτυα. Το ασύρματο δίκτυο MIMO αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη δίνοντας με τον τρόπο αυτό την δυνατότητα στο σήμα να μετακινείται αμφίδρομα. Τα μονοπάτια προσαρμόζονται και αλλάζουν ανάλογα με την τοποθέτηση της κεραιάς. Η αξιοποίηση των επιπλέον διαδρομών μπορεί να γίνει με χρήση συστημάτων MIMO, τα οποία ενισχύουν την χωρητικότητα δεδομένων σύνδεσης και αυξάνουν το SNR κάνοντας με αυτόν τον τρόπο την σύνδεση περισσότερο αξιόπιστη.

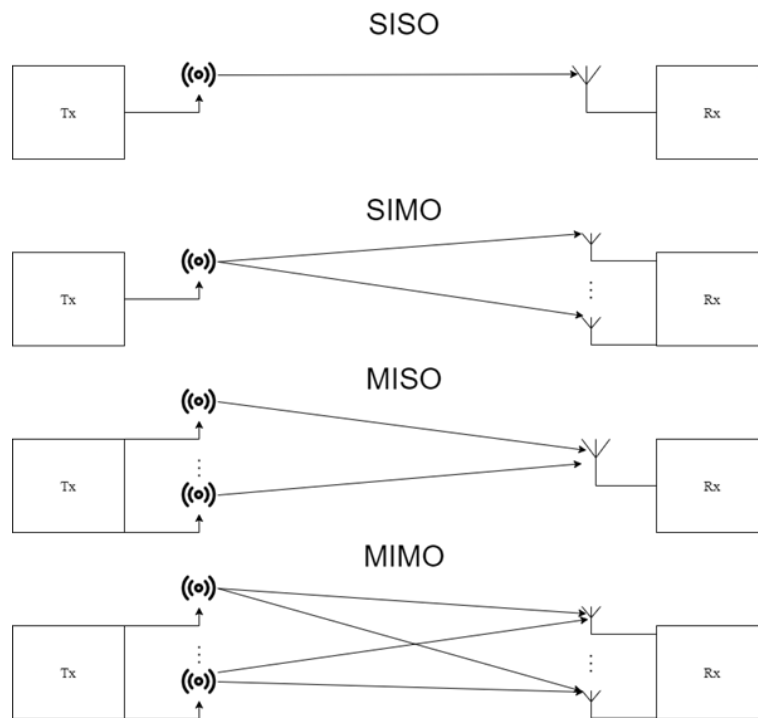
Το Massive MIMO αποτελεί καινοτομία που εξελίσσει το MIMO και προσφέρει οφέλη όπως αξιοπιστία, ανθεκτικότητα και ενεργειακή οικονομία. Επιπλέον, η χρήση υλικού χαμηλού κόστους διευκολύνεται με την χρήση της τεχνολογίας Massive MIMO στο BS αλλά και στην κινητή μονάδα. Συνεπώς στο BS, ο εξοπλισμός αντικαθίσταται με σειρά από εξαρτήματα χαμηλού κόστους και άρα χαμηλής κατανάλωσης που λειτουργούν σε πόρους διαδοχικής συχνότητας. Η συχνότητα αυτή καλείται "Massive" [9].

3.1.2 Χαρακτηριστικά Αρχιτεκτονικής

Το MIMO αποτελεί έναν τρόπο για την αύξηση του εύρους ζώνης και συγκεκριμένα για τον υπερδιπλασιασμό του χρησιμοποιώντας πολλαπλές διαδρομές διάδοσης και πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης. Η τεχνολογία MIMO αποτελεί κρίσιμο στοιχείο των ασύμαρτων δικτύων επικοινωνίας όπως το IEEE 802.11n και άλλων πολύ γνωστών τεχνολογιών. Ο όρος MIMO αναφέρεται πλέον σε μια κοινή τεχνολογία που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα πολλαπλών διαδρομών για την λήψη και μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων την ίδια χρονική στιγμή και μέσω του ίδιου καναλιού. Η αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού παρατηρείται εξαιτίας του OFDM, η οποία χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση καναλιών. Λόγω των τεράστιων πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών έναντι εκείνων που χρησιμοποιούν μόνο έναν πομποδέκτη κεραιάς, εφαρμόζονται στα σύγχρονα συστήματα μαζί με τα πρότυπα επικοινωνίας τους.

Παράλληλα με την τεχνολογία MIMO, χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνολογίες όπως τα συστήματα SISO τα οποία χρησιμοποιούν μόνο ένα BS και στα δυο

άκρα με σύζευξη διαφοροποίησης στο άλλο άκρο λήψης. Αντίθετα, τα SIMO (Single Input Multiple Output), χρησιμοποιούν μόνο ένα BS και δυο άκρα ζεύξης. Ακόμα, υπάρχει και το MISO (Multiple Input Single Output), το οποίο αποτελεί μια τεχνική κεραίας ασύρματης τεχνολογίας που χρησιμοποιεί πολλές κεραίες στην πηγή. Για την μείωση των λαθών και την συνολική αύξηση της ταχύτητας δεδομένων οι κεραίες συγχωνεύονται μεταξύ τους. Σε αντίθεση με το MIMO υπάρχει μόνο μια κεραία στον προορισμό, δηλαδή στον δέκτη.



Σχήμα 3.2: Διαφορετικές μορφές κεραίας.

Η τεχνολογία MIMO έχει ευρεία χρήση σε ασύρματα τοπικά δίκτυα, καθώς και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G, 4G καθώς και 5G για τα οποία έχει γίνει πρότυπο. Το παραπάνω σύστημα δίνει την δυνατότητα στα δεδομένα να φτάσουν από πολλές διαδρομές στην κεραία λήψης χωρίς να επηρεάζονται από ξεθώριασμα. Παράλληλα, ενισχύεται το SNR, βελτιώνεται το ποσοστό σφάλματος και επεκτείνεται η χωρητικότητα των δικτύων ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency - RF). Επιπλέον, το φάσμα καθώς και η ΕΕ του σταθμού βάσης μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με την παροχή πολλών κεραιών.

Η επικοινωνία ενός συστήματος MIMO απεικονίζεται ως μητρώο και όχι ως διάνυσμα. Με τον τρόπο αυτό διαδίδονται πολλαπλές ροές δεδομένων σε πολλαπλούς χρήστες. Τα δεδομένα που πρέπει να αποσταλούν κωδικοποιούνται και

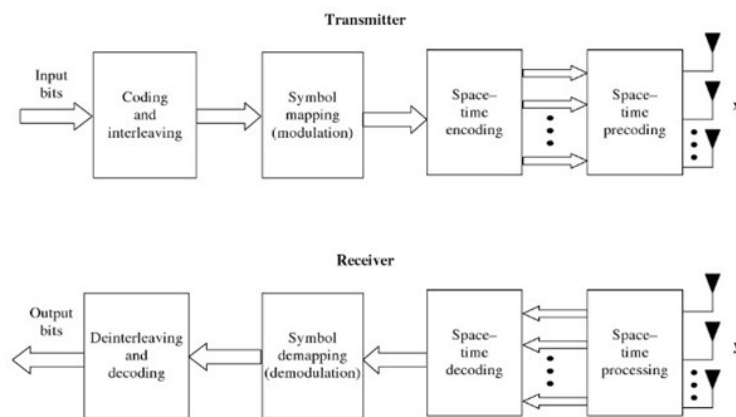
με την χρήση πολυάριθμων πομπών εξασφαλίζεται η ροή μετάδοσης της πληροφορίας. Τα συστήματα MIMO διαθέτουν εκατοντάδες κεραιές που εκπέμπουν σε πολλά ασύρματα τερματικά απότομα. Μέσω της χρήσης διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), οι κεραιές καταφέρνουν να εξυπηρετούν πολλαπλούς χρήστες αδιάκοπα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η τεχνολογία του beamforming χρησιμοποιείται καθώς μειώνεται η καθυστέρηση και βελτιώνεται το SNR [10].

Στην πηγή, απαριθμούνται τα πέντε βασικά στοιχεία ενός συστήματος MIMO:

- Πιλότος Πομπός (Pilot Transmitter)
- Κωδικοποιητής (Encoder)
- Αποκωδικοποίησης & Ανιχνευτής (Decoder & Detection)
- Διαμόρφωση δέσμης (Beamforming)
- Προκωδικοποιητής (Precoder)

Κάθε ένα από τα παραπάνω στοιχεία είναι υπεύθυνο για μια διακριτή εργασία. Ο πομπός και ο δέκτης είναι δυο από τα πιο βασικά στοιχεία κάθε συστήματος MIMO, καθώς στέλνουν και λαμβάνουν στοιχεία εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτόν την επικοινωνία.

Παρακάτω αναλύεται η δομή ενός συστήματος MIMO, για το οποίο τα σήματα εισόδου και εξόδου απεικονίζονται. Τα προς μετάδοση δεδομένα αρχικά κωδικοποιούνται και στην συνέχεια η μονάδα του αντιστοιχιστή λαμβάνει τα δεδομένα τα οποία πρέπει να μετατρέψει σε σύμβολα δεδομένων. Επόμενο βήμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3, αποτελεί η μετάδοση των δεδομένων σε έναν χωροχρονικό κωδικοποιητή, ο οποίος δημιουργεί ροή χωροχρονικών δεδομένων. Εφόσον η αποστολή δεδομένων γίνεται στο σύστημα MIMO, τροφοδοσία παρέχεται από πολλαπλές κεραιές.



Σχήμα 3.3: Δομικά στοιχεία συστήματος MIMO.

Ο αναλυτής (parser) που τοποθετείται στον κωδικοποιητή πολυπλέκει τα δυαδικά ψηφία έτσι ώστε να γίνεται κωδικοποίηση και ο αναμεταδότης να λειτουργεί ως αντικαταστάτης μηδενικών σε μονάδες και το αντίστροφο για τα ληφθέντα και αποσταλμένα δεδομένα. Επόμενο πολύ σημαντικό βήμα αποτελεί η κρυπτογράφηση των δεδομένων τα οποία κρυπτογραφούνται με χρήση του Forward Error Concatenation (FEC), ο οποίος επιτρέπει την συμφωνία σφαλμάτων. Η έξοδος του κωδικοποιητή αναλύεται από τον αναλυτή ροής, ο οποίος διαιρεί τις χωρικές ροές και τις αποστέλει σε διαφορετικούς παρεμβολείς. Ο παρεμβολέας τυλίγει τα bit κάθε χωρικής ροής και τα στέλνει ως μια σειρά από bit θορύβου στον αποκωδικοποιητή FEC. Η χαρτογράφηση Quadrature Amplitude Modulation (QAM) αντιστοιχίζει διαφορά bit σε διάφορα σχέδια και συνεργάζεται με τον Space-Time Blocking Code (STBC), ο οποίος σχεδιάζει την χωρική ροή στον χωροχρόνο. Καθ'όλη την διάρκεια της αποστολή συγκρίσιμων σημάτων σε πολλά χρονικά ρεύματα επιδιώκεται η χρήση της εφαρμογής κυκλικής μετατόπισης. Η ίδια εφαρμόζεται σε αυτές καθ'όλη την διάρκεια της φάσης δεδομένων της μετάδοσης ενός πακέτου. Ρεύματα σαν αυτά χαρτογραφούνται με χρήση πολλαπλών δικτύων μεταφορών μέσω χρήσης χωρικής χαρτογράφησης. Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για την αποστολή πληροφορίας αποτελεί η απευθείας χαρτογράφηση. Με χρήση του ανάστροφου μετασχηματισμού Fourier το μπλοκ πληροφορίας μετασχηματίζεται σε μπλοκ πεδίου χρόνου. Για την εξάλειψη των λαθών, γίνεται χρήση διαστημάτων προστασίας (Guard Intervals - GIs) η οποία εξασφαλίζει ενίσχυση της απόσβασης του φάσματος και απάλυνση των άκρων του συμβόλου. Προφανώς από την πλευρά του λήπτη, οι διαδικασίες αντιστρέφονται για να προκύψει η αρχική πληροφορία που στάλθηκε.

Η τεχνολογία MIMO προσπαθεί να μειώσει τα πιθανά λάθη στις μεταδόσεις και να αυξήσει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω,

στα BS ενσωματώνονται κεραιές με τεχνολογία έξυπνης κεραιάς από την 4G γενιά των δικτυακών τεχνολογιών. Ανάλογα με τις ανάγκες τοποθετείται διαφορετικός αριθμός κεραιών, ο οποίος κυμαίνεται σε τέσσερις, οκτώ ή δεκαέξι είτε από την πλευρά του πομπού είτε και του δέκτη. Ανάλογα με την επιλογή ουσιαστικά δημιουργείται μια διαφορετική παραλλαγή του MIMO, η οποία δεν επηρεάζει την λειτουργικότητα. Αντίθετα, το Massive MIMO αποτελεί μια μέθοδο η οποία αποτελείται από πολλές περισσότερες κεραιές, είτε 128 είτε 256, και αποτελεί μια από τις βασικές τεχνικές του δικτύου 5G, διατηρώντας ταυτόχρονα όλες τις βασικές λειτουργικότητες του.

Η τεχνολογία MIMO αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται καθημερινά. Μια πολύ σημαντική λειτουργικότητα του διαδικτύου είναι το WiFi, το οποίο αποτελεί ένα ασύρματο δίκτυο που καλύπτει καθημερινά τις ανάγκες μικρών συσκευών που συνδέονται σε αυτό. Η τεχνολογία MIMO προσφέρει την δυνατότητα σε όσους χρησιμοποιούν την συνδεσιμότητα μέσω WiFi να απολαμβάνουν σταθερή κάλυψη, αυξημένη εμβέλεια και να διορθώνουν παρεμβολές. Αυτές οι υπηρεσίες είναι εξαιρετικά σημαντικές καθώς οι χρήστες ενδέχεται να χρειάζονται υπηρεσίες με υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα Voice over Internet Protocol (VoIP).

Ακόμα, το WiMax αποτελεί μια ακόμα τεχνολογία που χρησιμοποιεί το MIMO και επωμίζεται τα οφέλη της χρήσης πολλαπλών κεραιών από τα BS. Τα συγκεκριμένα οφέλη αφορούν την ενίσχυση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται με την επαναχρησιμοποίηση του χώρου και με επέκταση της εμβέλειας. Ο πελάτης από την πλευρά του χρησιμοποιεί προσαρμοστικές συστοιχίες, οι οποίες συμβάλλουν θετικά στην καταπολέμηση της εξασθένησης του σήματος που παρατηρείται εξαιτίας της ύπαρξης κτιρίων. Συνεπώς, το WiMax πλέον χρησιμοποιείται και εντός των κτιρίων με χρήση της τεχνολογίας MIMO. Καθώς οι απαιτήσεις αυξάνονται η χρήση κεραιών πολλαπλών δεσμών είναι αναγκαία ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτεροι ρυθμοί δεδομένων, να αυξηθεί η κάλυψη και η χωρητικότητα που τα δίκτυα αυτά παρέχουν, ώστε να είναι πανομοιότυπη με αυτή του WiMax. Παράλληλα, η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί τις εφαρμογές αναγνώρισης ραδιοσυχνότητων (Radio Frequency Identification -RFID) και Ultra-wideband, εξασφαλίζοντας περαιτέρω επέκταση εμβέλειας.

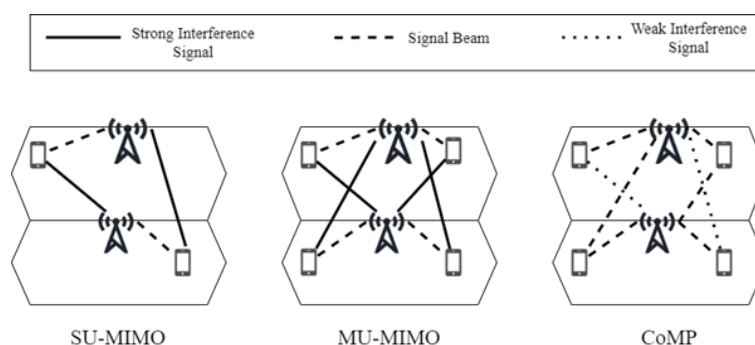
Η τεχνολογία του MIMO δίνει την δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε Συστήματα Ψηφιακής Τηλεόρασης συμπεριλαμβάνοντας βίντεο και ήχο.

Το MIMO γίνεται επίσης όλο και πιο σημαντικό στις δορυφορικές επικοινωνίες. Χρησιμοποιείται στη δορυφορική παρακολούθηση, όπου πολλές κεραιές είναι τοποθετημένες στις οροφές κινούμενων αυτοκινήτων, για να επιτρέπουν την παρακολούθηση οχημάτων, και σε δορυφόρους ώστε να υπάρχει ακόμη μεγαλύτερη κάλυψη σε δορυφορικούς ραδιοφωνικούς δέκτες, βελτιώνοντας παράλληλα την εσωτερική λήψη.

3.1.3 Η τεχνολογία MU - MIMO

Η τεχνολογία MIMO παρέχει πολλές δυνατότητες που βελτιώνουν κατά πολύ την ποιότητα της επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται κατά κόρον. Πιο αναλυτικά, μειώνει τις παρεμβολές και εξασφαλίζει ποικιλομορφία και χωρική πολυπλεξία [11]. Αυτά τα πλεονεκτήματα κατατάσσουν το MIMO σε μια απαραίτητη για την ενίσχυση της φασματικής απόδοσης στρατηγική. Το MU - MIMO, ή αλλιώς το βελτιωμένο MIMO, χρησιμοποιείται στο LTE και καλύπτει τις σύγχρονες απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης, οι οποίες μέχρι στιγμής καλύπτονται από παραδοσιακές τεχνικές όπως η προκωδικοποίηση, η χωρική ποικιλομορφία και η πολυπλεξία, τεχνικές όπως το MIMO πολλαπλών χρηστών (Multi User-MIMO), Beamforming και CoMP. Ένα από τα πολύ σημαντικά οφέλη του MU - MIMO είναι ότι μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλούς χρήστες οι οποίοι βρίσκονται στον ίδιο πόρο χρόνου και συχνότητας αξιοποιώντας με τον τρόπο αυτό τα κέρδη της χωρικής πολυπλεξίας.

Κάποιες από τις βελτιωμένες μορφές MIMO είναι οι εξής: Single User MIMO (SU - MIMO), CoMP, MU - MIMO. Οι μορφές αυτές απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.4: Βελτιωμένες Μορφές MIMO.

Παρακάτω δίνονται μερικές πληροφορίες για τις βελτιωμένες μορφές MIMO που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.

- SU - MIMO, Χρησιμοποιείται για την περίπτωση που απαιτείται ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων για έναν χρήστη.
- MU - MIMO, Οι ροές δεδομένων διαχωρίζονται και με τον τρόπο αυτό εξυπηρετούνται πολλοί χρήστες ταυτόχρονα. Μέσω αυτής της διαδικασίας ενισχύεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μιας κυψέλης.
- CoMP, Χρησιμοποιείται για να αντιμετωπιστεί η παρεμβολή στο εσωτερικό της κυψέλης (Inter-Cell Interference - ICI) και για να ενισχυθεί ο ρυθμός με τον οποίο αποστέλλονται δεδομένα εσωτερικά και ειδικότερα στα όρια της κυψέλης.

Η [12] δίνει νέες ρυθμίσεις, οι οποίες εξασφαλίζουν πως τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών μπορούν να ενσωματώσουν νέες τεχνολογίες και κατά συνέπεια να βελτιώσουν την απόδοση των. Η απόδοση φάσματος κυψέλης, η απόδοση φάσματος χρήστη άκρων κυψέλης, το εύρος ζώνης, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, η μέση απόδοση φάσματος χρήστη και η μέγιστη απόδοση φάσματος αποτελούν μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση των διευρυμένων υπηρεσιών MIMO.

Το MU - MIMO παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το κλασικό MIMO, ωστόσο έχει και κάποια μειονεκτήματα. Ένα από τα πιο σημαντικά και δύσκολα όσον αφορά την αντιμετώπιση προβλήματα, αποτελεί η παρεμβολή μεταξύ κυψελών, η οποία μπορεί να αποβεί και καταστροφική στην περίπτωση λανθασμένης διαχείρισης. Το παραπάνω πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως δύσκολο εξαιτίας της μεγάλης φασματικής απόδοσης που απαιτείται για την επίλυση του.

Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, οι συγγραφείς της εργασίας [13] προτείνουν μια μέθοδο συντονισμού δικτύου που μετασχηματίζει το MU-MIMO σε MIMO πολλαπλών τοποθεσιών με χρήση της μετάδοση συγχρονισμού BS-to-BS. Το μειονέκτημα του προτεινόμενου μηχανισμού είναι πως απαιτεί σχεδόν ιδανικές συνθήκες, όπως τέλεια πληροφόρηση καναλιού ώστε να αποκομιστούν τα μέγιστα οφέλη ενός πλήρως συντονισμένου MIMO. Σε κάθε περίπτωση τα πλεονεκτήματα παραμένουν σημαντικά ακόμα και όταν οι συνθήκες δεν είναι βέλτιστες.

Μια ακόμα χρήση της τεχνολογίας MIMO αποτελεί το Massive MIMO, το οποίο επεκτείνει ουσιαστικά τη βασική σχεδίαση MIMO πολλές φορές. Εξυπηρετώντας

πολλούς χρήστες ή τερματικά ταυτόχρονα με εκατοντάδες κεραιές, ανοίγει το δρόμο για μελλοντικές ενεργειακά αποδοτικές και ασφαλείς ευρυζωνικές τεχνολογίες. Για να επωφεληθούν οι χρήστες πλήρως από το Massive MIMO απαιτείται πλήρης κατανόηση της κατάστασης του καναλιού τόσο στην ανερχόμενη UL όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη DL του καναλιού. Τα πλεονεκτήματα υπερτερούν και για τον λόγο αυτό το Massive MIMO χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες αφού καταφέρνει να βελτιώσει την χωρητικότητα του δικτύου (κατά 10 φορές), χρησιμοποιεί εξαρτήματα χαμηλού κόστους, τα οποία έχουν επιπρόσθετα και χαμηλή κατανάλωση και τέλος μειώνει την καθυστέρηση αυξάνοντας ταυτόχρονα την ευρωστία.

Η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας MIMO εξαρτάται από την αυθεντικότητα και την διαθεσιμότητα των πληροφοριών κατάστασης καναλιού (Channel State Information - CSI). Αυτό σημαίνει πως η απόδοση ενός συστήματος MIMO επηρεάζεται από την περιορισμένη είσοδο CSI. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα την διαφοροποίηση του MIMO γενικά αλλά και στο LTE καθώς οι λειτουργικοί περιορισμοί που τίθενται πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για την περαιτέρω βελτίωση του συστήματος έχει παρατηρηθεί πως η ευέλικτη εναλλαγή από SU - MIMO σε MU - MIMO με την αλλαγή των συνθηκών και της κυκλοφορίας, ενισχύει σημαντικά την απόδοση. Στην εργασία [14], γίνεται λόγος για την τεχνολογία MU - MIMO ως μέθοδο αξιοποίησης των χωρικών πληροφοριών με σκοπό την ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος. Η χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται σημαντικά καθώς πολλές συσκευές έχουν πρόσβαση στους ίδιους πόρους χρόνου - συχνότητας της τεχνολογίας MU - MIMO.

Με χρήση του προτύπου LTE δίνεται η δυνατότητα αύξησης αλλά και μείωσης των κεραιών που λαμβάνουν και εκπέμπουν. Για υψηλότερους ρυθμούς χρησιμοποιούνται συστήματα MIMO, τα οποία είναι 8x8 και παρέχουν την δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης πολλών ταυτόχρονων συνδέσεων για τις ίδιες πηγές εύρους ζώνης, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι παρεμβολές που δημιουργούνται στο εσωτερικό μιας κυψέλης αποτελούν σημαντικό πρόβλημα που περιορίζει την λειτουργικότητα και την αποτελεσματικότητα του δικτύου. Για την μείωση της παρεμβολής, προτείνεται μια ποικιλία προσεγγίσεων διαμόρφωσης δέσμης. Η τεχνολογία MU - MIMO προγραμματίζει πολλές συσκευές στον ίδιο πόρο χρόνου - συχνότητας ταυτόχρονα και με τον τρόπο αυτό προσφέρει κέρδος χωρικής πολυπλεξίας. Σημαντικό είναι να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως η αποτελεσματικότητα δεν εξαρτάται μόνο από τα παραπάνω αλλά αντίθετα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια της CSI εξόδου, που σχετίζεται άμεσα με την ανάδραση.

Τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών της πέμπτης και έκτης γενιάς επικεντρώνονται στην χρησιμοποίηση πιο σύγχρονων τεχνολογιών για την αύξηση της απόδοσης μετάδοσης, εστιάζοντας στην βελτίωση μεγεθών όπως η ταχύτητα δεδομένων, η καθυστέρηση και η κατανάλωση μπαταρίας. Παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών αποτελούν τα δίκτυα OFDM, mmWave, MIMO καθώς και τα Μη Ορθογώνια MultiAccess (Non - Orthogonal MultiAccess - NOMA) [15], [16]. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του MU - MIMO είναι ότι μπορεί να απομονώσει στην κίνηση του κάθε συνδρομητή καθώς και να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα από πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Παλιότερα μπορούσε να δημιουργηθεί μόνο μια δέσμη ανά σετ στοιχείων αλλά πλέον χρησιμοποιούνται πολλές δέσμες, οι οποίες είναι επτά. Η τεχνολογία MIMO καταφέρνει να αυξήσει την απόδοση μιας ασύρματης σύνδεσης χωρίς να απαιτείται περισσότερο φάσμα με χρήση τεχνικών που χρησιμοποιούν φάσεις κατεύθυνσης x και y . Οι φάσεις πολικότητας είναι μεταξύ τους κάθετες και η κάθε μια έχει την δική της ροή για να αποστέλλει και να αποδέχεται δεδομένα.

Το SNR, η εκτιμώμενη ακρίβεια του καναλιού [17], η χωρική σύνδεση στο κανάλι διάδοσης [18] και η θεωρητική χωρητικότητα [19] αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν την φασματική απόδοση του συστήματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα δίκτυα MU - MIMO δεν παρουσιάζουν περιορισμούς σχετικά με την διάδοση και για τον λόγο αυτό το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας έχει στραφεί προς αυτού του είδους τα δίκτυα. Οι διαθέσιμοι πόροι (ισχύς, εύρος ζώνης, κεραιές, κωδικοί ή χρονοθυρίδες) στα συστήματα MU - MIMO θα πρέπει να διανέμονται μεταξύ των ενεργών χρηστών k . Το κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, που ονομάζεται κανάλι εκπομπής αποτελεί έναν πομπό, ο οποίος εκπέμπει διάφορα σήματα σε πολλούς δέκτες ενώ το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης, που αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως Κανάλι Πολλαπλής Πρόσβασης (Multiple Access Channel - MAC) αποτελεί το υλικό που είναι υπεύθυνο για την σύνδεση πολλών κεραιών εκπομπής σε έναν δέκτη.

3.2 Η λειτουργία DUDE

3.2.1 Λειτουργία

Παραδοσιακά τα DL και UL λαμβάνονταν από την ίδια κεραία και υπήρχε πάντοτε συσχέτιση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα ένα κινητό UE θα πρέπει πάντα να συνδέεται με ένα συγκεκριμένο και πανομοιότυπο BS. Η συσχέτιση αυτή των ζεύξεων ήταν η βέλτιστη τεχνική καθώς η μεταξύ τους συσχέτιση είναι πανομοιότυπη. Ωστόσο, η αποσύνδεση της συσχέτισης σε ένα πλέον πυκνό και ετερογενές δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα με την αποσύνδεση των δυο μπορεί να υπάρξει πλέον διαφορά στις δυνάμεις μετάδοσης και στις τοπολογίες ανάπτυξης διαφορετικών BS. Αυτή η παραδοσιακή προσέγγιση τέθηκε υπό έλεγχο ωστόσο πολλοί συνεχίζουν να υποστηρίζουν την παραδοσιακή υλοποίηση που συνδέει το UL και το DL καθώς είναι η απλούστερη λύση αναφορικά την κατασκευή, την λειτουργία και από καθαρά σχεδιαστική άποψη. Τα παραπάνω ισχύουν για την προσπάθεια αποδοχής κλήσεων και πρωτοκόλλων παράδοσης, συγχρονισμού αναγνωρίσεων (ACK/NAK), έλεγχο ισχύος και διαχείριση πόρων DL/UL, μεταξύ άλλων.

Η αποσύνδεση των δυο θέτει νέες απαιτήσεις όπως ισχυρό συγχρονισμό και μετάδοση δεδομένων μεταξύ των σταθμών βάσης. Σχεδιαστικά η ιδέα ύπαρξης ενός ομοιογενούς δικτύου με μεγάλες κεραίες που εκπέμπουν σε παρόμοια ισχύ χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και την κατασκευή κυψελοειδών δικτύων με δυνατότητες αποσύνδεσης του DL και του UL. Στα δίκτυα των γενεών 2G και 3G όπου κατά κύριο λόγο μεταφέρονται φωνητικά δεδομένα το φορτίο και στις δυο κατευθύνσεις ήταν περίπου ίσα κατανομημένο. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί πως η κίνηση κατερχόμενη ζεύξης κυριαρχεί στα συστήματα των γενιών 3.5G και 4G και για τον λόγο αυτό η χρήση τεχνικών συσχέτισης με επίκεντρο το DL και όχι UL, είναι απαραίτητη. Οι απαιτήσεις αυτές έχουν διατηρηθεί και στα δίκτυα 5G. Αντιθέτως, μια συνδεδεμένη ένωση αποτελεί μια περιορισμένη παραλλαγή αυτής της ευρύτερης πολιτικής συσχέτισης και έχει το χαρακτηριστικό πως δεν επιβάλλει απαίτηση σύζευξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μια καλά σχεδιασμένη στρατηγική Downlink/Uplink Decoupling (DUDe) να μπορεί να αποδώσει καλύτερα από μια συνδεδεμένη σχέση στην θεωρία.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η κίνηση του δικτύου στα δίκτυα 5G είναι συνήθως ασύμμετρη και η απαιτούμενη διεκπεραίωση σε επίπεδο κατερχόμενη ζεύξης είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται στην ανοδική ζεύξη. Για τον

λόγο αυτό τα δίκτυα πλέον σχεδιάζονται με γνώμονα το DL. Βέβαια με την έλευση του IoT και του MTC, όπου η κυκλοφορία συγκεντρώνεται στο UL και σε συνδυασμό με την αυξανόμενη επιρροή συμμετρικών υπηρεσιών πληροφορίας, όπως βίντεο συνομιλίες, παιχνίδια πραγματικού χρόνου και μέσα κοινωνικής δικτύωσης κ.λπ., η ανοδική σύνδεση γίνεται όλο και πιο σημαντική. Αυτό σημαίνει πως η βελτιστοποίηση της ανοδικής ζεύξης μπορεί να βελτιώνει κατά πολύ την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Στα περισσότερα κυψελωτά δίκτυα, η συσχέτιση κυψελών καθορίζεται αποκλειστικά από την ισχύ του σήματος που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της κατερχόμενης ζεύξης [20].

Η προτεινόμενη στρατηγική λειτούργησε επιτυχώς σε ένα ομοιογενές δίκτυο στο οποίο όλα τα BS εκπέμπουν ή λαμβάνουν με συγκρίσιμα αν όχι ίδια συνολικά επίπεδα ισχύος παρά τις όποιες διαφορές στην ισχύ μετάδοσης UL και DL και τις απαιτήσεις παρεμβολών. Αντίθετα, τα HetNets απαιτούν ισχύ μετάδοσης πολλαπλών επιπέδων και για τον λόγο αυτό η ήδη επικρατούσα στρατηγική αποτελεί σπατάλη όσον αφορά το UL. Σε ένα κλασσικό HetNet δίκτυο 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. Αυτό σε συνδυασμό με την μεγάλη κλίμακα στην οποία γίνονται αυτές οι σπατάλες ενέργειας κάνει το σύστημα συνολικά μη αποδοτικό. Όλοι οι πομποί του UL αποτελούν συσκευές με παρόμοια ισχύ μετάδοσης και εμβέλεια. Ακόμα, ένα UE το οποίο συνδέεται σε ένα DL κελί και λαμβάνει το μέγιστο επίπεδο πληροφοριών θα μπορούσε κάλλιστα να συνδεθεί σε ένα UL, χρησιμοποιώντας λιγότερη ενέργεια. Όταν γίνεται λόγος για ένα κελί η σπατάλη είναι αμελητέα. Ωστόσο όσο αυξάνονται οι κυψέλες ενός HetNet και το δίκτυο γίνεται γενικά πιο πυκνό το χάσμα αυτό μεταξύ των ιδανικών ορίων κελιών DL και UL διευρύνεται. Για την επιύση του παραπάνω προβλήματος προτάθηκε η χρήση μια νέας τεχνικής 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 επιστημονική κοινότητα είναι διχασμένη σχετικά με τα πιθανά πλεονεκτήματα που προσφέρει η παραπάνω τεχνική αποσύνδεσης του δικτύου. Οι τοπολογίες ανάπτυξης BS και ισχύος μετάδοσης μπορεί να ποικίλλουν αρκετά και υποστηρίζουν την διατήρηση της σύζευξης για διαφορετικούς λόγους. Αναφορικά με την αρχιτεκτονική του δικτύου τα κανάλια προώθησης και τα λογικά κανάλια είναι απλά στην κατασκευή και εκτέλεση. Σε αυτό περιλαμβάνεται συγχρονισμός εξουσιοδότησης (ACK/NAK), αναμονή ελέγχου ισχύος, διαχείριση πόρων ραδιοφώνου DL/UL καθώς και διαδικασίες παράδοσης και έγκρισης. Από τα παραπάνω

γίνεται αντιληπτό πως απαιτείται ισχυρός συγχρονισμός με τα BS και καλή σύνδεση δεδομένων.

3.2.2 Χαρακτηριστικά Αρχιτεκτονικής

Το DUDe δίνει την δυνατότητα στα UE να συνδεθούν σε διαφορετικό BS για την κάλυψη των αναγκών της κατερχόμενης ζεύξης και σε διαφορετικό για την εξυπηρέτηση των αναγκών της ανερχόμενης ζεύξης. Το δίκτυο που χρησιμοποιεί αυτή την τεχνολογία αποθηκεύει δυο λίστες (μια για διευθύνσεις DL και μία για διευθύνσεις UL) που αποτελούνται από τα BS τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πιθανές συσχετίσεις και δημιουργούνται για κάθε ένα από τα διαθέσιμα UE. Ακόμα, κάθε μια από αυτές τις λίστες ταξινομείται σύμφωνα με δείκτες όπως το Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR) ή η απώλεια διαδρομής (Path Loss - PL). Μετά την δημιουργία και προεπιλογή της λίστας, κάθε UE προσπαθεί να συνδεθεί στο βέλτιστο BS. Αν το BS μπορεί να διαθέσει το ζητούμενο μπλοκ πόρων (Resource Block - RB), τότε μόνο δημιουργείται σύνδεση μεταξύ των δυο. Αντίθετα, αν δεν υπάρχουν αρκετά RBs, το UE προσπαθεί να συνδεθεί στο επόμενο BS που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του UE. 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 συνδέσεις, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό σε ταχύτερες συσχετίσεις και καλύτερη εμπειρία χρήστη.

Για την επιτυχή εφαρμογή της αποσυνδεδεμένης σύνδεσης κυψελών στα σημερινά συστήματα δικτύου απαιτείται συνεργασία μεταξύ πολλαπλών BS και αξιόπιστη σύνδεση. Οι βασικές απαιτήσεις του DUDe είναι μια σύνδεση χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ των BSs για την ζεύξη DL αλλά και για την UL για να εξασφαλιστεί πως τα μηνύματα ελέγχου μπορούν να ανταλλαχθούν γρήγορα. Το DUDe σε αντίθεση με άλλες πιο προηγμένες παραλλαγές του CoMP δεν θέτει αυστηρό όριο στη χωρητικότητα του backhaul. Σε αυτές τις παραλλαγές ένα δίκτυο υψηλού εύρους ζώνης είναι απαραίτητο για την επίτευξη γρήγορης ροής δεδομένων. Εξίσου σημαντικό είναι πως το DUDe επιτυγχάνει βελτιώσεις συγκρίσιμες με την κοινή επεξεργασία UL έχοντας ακόμα μειωμένο κόστος ανάπτυξης.

Το DUDe σε αντίθεση με το MIMO είναι πιο οικονομικό καθώς με απλή χρήση φάσματος αυξάνει την απόδοση. Οι υπάρχουσες προδιαγραφές LTE/LTE-A ενδέχεται να επιτρέπουν ήδη το DUDe ανάλογα βέβαια και με τις ιδιότητες του backhaul καθώς και το σενάριο ανάπτυξης. Τα δυο πιθανά σενάρια που επιτρέ-

που ανάπτυξη του DUDe είναι τα παρακάτω:

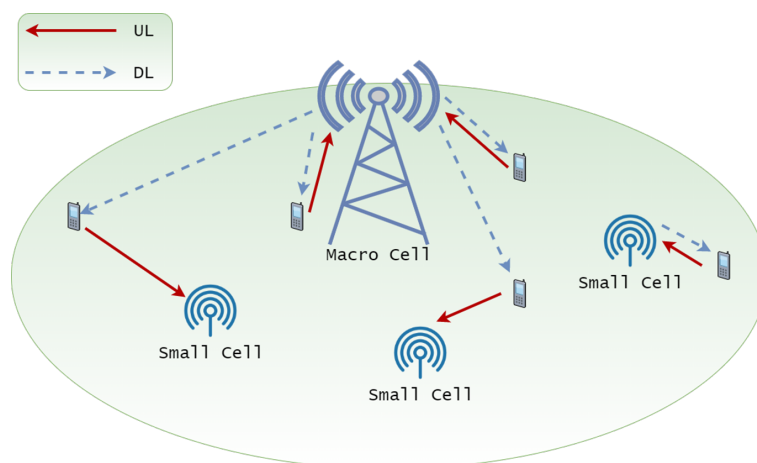
- Κεντρικό σύστημα επεξεργασίας, το οποίο χρησιμοποιείται ως κεντρικός κόμβος.
- Κοινό αναγνωριστικό κυψέλης και διπλή συνδεσιμότητα.

Το DUDe μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο LTE-A χωρίς να υπάρχει περαιτέρω υποστήριξη προτύπων με την προϋπόθεση πως υπάρχουν διάφοροι πομποί με διακριτά cell-ID ώστε να είναι δυνατή η μεταξύ τους διάκριση. Αυτά τα cell-ID είναι συνδεδεμένα στην ίδια κεντρική οντότητα (π.χ. Central RAN). Η επιλογή BS που χρησιμοποιείται για μετάδοση σε ένα συγκεκριμένο UE κατά την διάρκεια του DL, γίνεται με χρήση παραδοσιακών τεχνικών και τις περισσότερες φορές σύμφωνα με εκτιμήσεις για την ισχύ του σήματος DL. Ο κόμβος λήψης είναι ανεξάρτητος από τις απαιτήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα σήματα UL να μην λαμβάνονται από κανέναν και η αποκωδικοποίησή τους να πραγματοποιείται στην μονάδα ραδιοφώνου ή μέσω της διεπαφής Common Public Radio Link (CPRI). Η διεπαφή εξασφαλίζει πως τα αναλογικά δεδομένα που δειγματοληπτήθηκαν μπορούν να μεταφερθούν σε μια κεντρική μονάδα προς επεξεργασία. Ακόμα, ο κόσμος DL στέλνει σήματα Access-Stratum (AS) που σχετίζονται με το UL, τα οποία αποτελούν μηνύματα ελέγχου επιπέδου 1, 2 και RRC που συνδέονται με τη μετάδοση κατά τη διάρκεια του UL που παραδίδεται στο κινητό τερματικό από τη μονάδα ασύρματου. Επιπροσθέτως, τα σήματα AS που συνδέονται με το DL πρέπει να λαμβάνονται από τον κόμβο UL. Τα μηνύματα που μεταδίδονται μεταξύ της Οντότητας Διαχείρισης Κίνησης (Mobility Management Entity - MME) και του τερματικού κινητής τηλεφωνίας μπορούν να αντιμετωπιστούν με τον ίδιο τρόπο.

Η τεχνική κοινής ταυτότητας κυψέλης [21] αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εξέλιξη της προσέγγισης που αναλύθηκε παραπάνω, στην οποία οι μονάδες ραδιοφώνου αποτελούν όλες μέρος της ίδιας κυψέλης. Οι αναβαθμίσεις CSI και οι τεχνολογίες συντοποθεσίας αναπτύχθηκαν ως μέρος της προσπάθειας CoMP και 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 η τεχνική έχει μια απόκλιση από τη συνήθη προσέγγιση που ως επίκεντρο έχει την κυψέλη, της οποίας τα σημεία θεωρούνται ως πόροι που πρέπει να χρησιμοποιούνται με τον βέλτιστο τρόπο ώστε η απόδοση να βελτιώνεται. Ακόμα, οι ιδιόκτητες λύσεις διαχειρίζονται την κινητικότητα και την συσχέτιση των κόμβων καλύτερα και με τον τρόπο αυτό

αυξάνουν κατά πολύ την ανθεκτικότητα της κινητικότητας σε πολυσύχναστα δίκτυα, περισσότερο από τεχνικές που βασίζονται σε μέτρα με επίκεντρο την UE. Αν και φαίνεται απλό, τα συστήματα κεντρικής επεξεργασίας απαιτούν ένα backhaul το οποίο θα έχει χαμηλή καθυστέρηση και θα εκπληρώνει με τον τρόπο αυτό τις απαιτήσεις 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.

Η κατασκευή ενός backhaul με χαμηλή καθυστέρηση δεν αποτελεί απλή διαδικασία και συνήθως επιτυγχάνεται με τη σύνδεση πομπών σε ένα συγκεκριμένο κεντρικό διανομέα. Το τερματικό μπορεί να συνδεθεί με δυο κελιά ταυτόχρονα για την αποσύνδεση DL και UL ή την συγκέντρωση ροών δεδομένων, χάρη στη Διπλή Συνδεσιμότητα. Οι δυο κυψέλες λειτουργούν ανεξάρτητα σε αντίθεση με την λύση της κεντρικής ζώνης και με τον τρόπο αυτό μειώνονται σημαντικά οι ανάγκες backhaul. Το κύριο BS (γνωστό και ως eNodeB) επιβλέπει τα δεδομένα DL καθώς και τη σηματοδότηση 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 μειονεκτήματα όσο και πλεονεκτήματα. 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 σημαντικό σημείο για τη σηματοδότηση NAS, η συσχέτιση και η μετακίνηση κόμβων, διαχειρίζονται με καθιερωμένες μεθόδους στο άκρο MME και δεν είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτές προσαρμοσμένες βελτιώσεις.



Σχήμα 3.5: Η πρακτική εφαρμογή του DUDe.

3.2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Σε ένα σύνηθες σενάριο HetNet, η περιοχή που καλύπτεται από ένα DL είναι αρκετά μεγαλύτερη όταν συγκρίνεται με έναν σταθμό βάσης, ο οποίος έχει προδιαγραφές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Διακυμάνσεις στις μεταβολές των περιοχών κάλυψης οφείλονται σε διάφορους λόγους, κάποιιοι εκ των οποίων είναι, η απόδοση της κεραίας καθώς και σε αλλαγές στα υψόμετρα των σταθμών βάσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως η μέγιστη ισχύς εκπομπής όλων των πομπών UL είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά την διάρκεια του DL μια συσκευή επιλέγει να συνδεθεί είτε με ένα Macrocell είτε με κάποιο άλλο είδος κυψέλης με κριτήριο την απόδοση και το μικρότερο PL [22].

Από τα παραπάνω προκύπτουν δυο θετικές συνέπειες. Αρχικά, 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 του μειωμένου PL, ένα UE που είναι συνδεδεμένο σε ένα Macrocell προς την κατεύθυνση DL μπορεί να συνδεθεί σε ένα Smallcell στο UL. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα μεγαλύτερο SNR εξασφαλίζει την ύπαρξη λιγότερων παρεμβολών ανάλογα με την απόσταση της BS σύνδεσης. Όπως είναι λογικό, αυτό το όφελος είναι σημαντικό για την ισχύ αποστολής UE.

Επιπλέον, το χαμηλότερο PL επιτρέπει τη μείωση της ισχύος μετάδοσης μέσω διαχείρισης ισχύος για ένα καθορισμένο στόχο SNR. Το DUDe έχει την δυνατότητα να μειώνει επίσης τις παρεμβολές UL. Η παρεμβολή που προκαλείται μειώνεται κατά περίπου 2-3 dB και ως αποτέλεσμα προκύπτει η μειωμένη ισχύς κατά την φάση της μετάδοσης, κάτι το οποίο υποδεικνύεται στο [22]. Η παραπάνω παρατήρηση είναι πολύ σημαντική καθώς τα UE εμφανίζουν χαμηλό SINR κατά τη διάρκεια του UL, επειδή σε ένα γεμάτο δίκτυο, η παρεμβολή μειώνεται κατά 3dB, διπλασιάζοντας έτσι τη ροή δεδομένων.

Ένα ακόμα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του DUDe είναι η δυνατότητα να εξισορροπηθεί το φορτίο μεταξύ UL και DL. Δεν συνίσταται η σύνδεση των ίδιων ζευγών UE και BS, και προς τις δύο κατευθύνσεις όποτε δίνεται η δυνατότητα ύπαρξης διαφορετικών φορτίων για τις διακριτές κατευθύνσεις DL και UL. Ως αποτέλεσμα, ορισμένα από αυτά τα 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 [23].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το DUDe μειώνει τις παρεμβολές όχι μόνο στο UE αλλά και στο BS, δίνοντας με τον τρόπο αυτό την δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης συσχέτισης. 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). Η απόσταση από το BS, το επίπεδο ελέγχου ισχύος και τα βάρη προκωδικοποίησης UL αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν όλες τις παρεμβολές που δημιουργούνται από το κάθε UE. Αντίθετα, η παρεμβολή κατά τη διάρκεια του DL σε ένα συγκεκριμένο UE, έχει άμεση συσχέτιση με το μήκος του χώρου μεταξύ την ισχύ εκπομπής των BS, των BS και τα βάρη σχηματισμού δέσμης DL. Ακόμα, ο σχεδόν ολοκληρωτικός έλεγχος προγραμματισμού και φόρτωσης για κάθε μια 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 αποκλίνουν σημαντικά.

Ως αποτέλεσμα, μια αποσυνδεδεμένη σύνδεση, που επιτρέπει στο UE (ή το δίκτυο) να αναζητά ανεξάρτητα το περιβάλλον με τις λιγότερες παρεμβολές για καθεμία από τις δύο συνδέσεις, ξεπερνά την απόδοση ενός συζευγμένου συσχετισμού. Επιπλέον, το DUDe βοηθάει πολύ την επικοινωνία D2D, η οποία θα πραγματοποιείται πλέον στις συχνότητες του φάσματος UL από το 3GPP Rel. 12. Το DUDe παρέχει μειωμένη ισχύ μετάδοσης για τους δέκτες D2D μειώνοντας την κατά τη διάρκεια του UL και ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές, επιτρέποντας περισσότερες μεταδόσεις D2D.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα του DUDe είναι πως σε σχέση με άλλες τεχνολογίες δεν είναι τόσο ακριβό στην ανάπτυξη του. Για να μπορεί να γίνει χρήση του DUDe απαιτείται αρχικά καλή σύνδεση μεταξύ των BS χαμηλής καθυστέρησης καθώς και δυνατότητα αποστολής μηνυμάτων ελέγχου, τα οποία είναι επίσης υψηλής ταχύτητας και αποστέλλονται μεταξύ του DL BS και του UL BS.

Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες, αυτή η απαιτούμενη υψηλή ταχύτητα δεν απαιτεί τεράστια χωρητικότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το DUDe να παρέχει την ίδια ταχύτητα αλλά με χαμηλότερο κόστος υλοποίησης. Η κάλυψη DL από Macrocells σε ένα τυπικό σενάριο HetNet, είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σύγκριση με ένα BS με απαιτήσεις χαμηλής ισχύος. Πιθανές διακυμάνσεις εμβέλειας είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, κάποιοι από τους οποίους είναι οι διαφορές στο ύψος των BS, κενά ισχύος μετάδοσης DL και τα κέρδη των κεραιών.

Αντίθετα, στο UL όλοι οι πομποί έχουν περίπου ίση μέγιστη ισχύ εκπομπής. Έτσι, για να υπάρξει όφελος από την μειωμένη απώλεια διαδρομής, οι συσκευές που συνδέονται με Macrocells στο DL μπορούν να αντιστοιχιστούν με Smallcells στο UL. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο σχεδόν ανεξάρτητος προγραμματισμός σε DL και UL βελτιώνεται και οι τυχαίες παρεμβολές λόγω του φορτίου μειώνονται.

Οι στόχοι που προβλέπεται να επιτευχθούν είναι οι παρακάτω:

- Μεγαλύτερο SINR
- Ταχύτερη φασματική απόδοση (Spectral Efficiency - SE)
- Υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων προκύπτουν από την αύξηση της απαιτούμενης λαμβανόμενης ισχύος
- Ελαχιστοποίηση των παρεμβολών

3.2.4 Εφαρμογές

Η τρέχουσα τάξη προωθεί την αποσύνδεση των DL και UL αφού τα σήματα οδηγούνται σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας με χρήση συνδέσεων χαμηλών καθυστερήσεων. Αυτό βέβαια αναφέρεται σε τοπικές υλοποιήσεις στις οποίες όλα τα σημεία μετάδοσης έχουν μικρές εμβέλειες και συνδέονται με μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας βασικής ζώνης. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί σε μια μεγαλύτερη περιοχή από μια εντελώς συγκεντρωτική και συνήθως καλείται CloudRAN. Πολλαπλές μονάδες που εκπέμπουν ραδιοσυχνότητες συνδεδεμένες με ένα συγκεκριμένο κεντρικό σύστημα επεξεργασίας βασικής ζώνης σε αυτήν την περιοχή.

Το 5G θέλοντας να ικανοποιήσει τις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις ρυθμού που προκύπτουν, δημιουργεί πολύπλοκες και πολύ πυκνές αναπτύξεις. 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. Κάτι τέτοιο ισχύει με την προϋπόθεση πως όλα τα Smallcells θα παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά κυκλοφορίας, ισχύος και ανάπτυξης. 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 μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι όλα τα Smallcells θα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά.

Ακόμα, αναμένεται να εξελιχθεί ο τομέας που ασχολείται με την έρευνα για το 5G. Μέσα στα επόμενα χρόνια θα γίνει σημαντική πρόοδος σχετικά με την τεχνολογία του τεράστιου MIMO, των εξαιρετικά πυκνών BS, της εισαγωγής φάσματος mmWave και μιας αρχιτεκτονικής που δεν περιστρέφεται γύρω από κύτταρα όπως αναφέρεται στο [24].

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων θα συμβάλλει καθοριστικά στην εξέλιξη των σημερινών αρχιτεκτονικών σχεδίων 3GPP, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και θα επιτρέψει την εισαγωγή της τεχνολογίας DUDe σε μελλοντικές διαφορετικές αναπτύξεις 5G, αποτελεσματικά. 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

Θεωρία Παιγνίων

4.1 Επισκόπηση

Η μελέτη των μαθηματικών μοντέλων σύγκρουσης και συνεργασίας μεταξύ ευφυών λογικών υπευθύνων παικτών για την λήψη αποφάσεων είναι γνωστή ως GT [25]. Το GT διδάσκει γενικές μαθηματικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση σεναρίων στα οποία δύο ή περισσότερα άτομα λαμβάνουν αποφάσεις που επηρεάζουν την ευημερία των άλλων. Ως αποτέλεσμα, το GT παρέχει ζωτικής σημασίας γνώσεις για ερευνητές σε όλες τις κοινωνικές επιστήμες καθώς και σε πρακτικούς φορείς λήψης αποφάσεων. Έχει εφαρμογές στη λογική, στην επιστήμη συστημάτων και στην επιστήμη των υπολογιστών, καθώς και σε όλους τους κλάδους των κοινωνικών επιστημών. Κάποια από τα πρώτα παιχνίδια που κατασκευάστηκαν είναι αυτά του μηδενικού αθροίσματος δύο ατόμων, στα οποία τα κέρδη ή οι απώλειες κάθε παίκτη εξισορροπούνται τέλεια με αυτά των άλλων παικτών. Το GT δίνει την δυνατότητα μοντελοποίησης μιας κατάστασης στρατηγικής αλληλεξάρτησης σε μορφή παιχνιδιού για την επιστήμη της ορθολογικής λήψης αποφάσεων και σχετίζεται με ένα ευρύ φάσμα συμπεριφορών.

Το σύγχρονο GT μπορεί να αναχθεί στο έργο των Zermelo (1913), Borel (1921), von Neumann (1928) και στο θεμελιώδες βιβλίο των von Neumann και Morgenstern (1944). Το σύγχρονο GT ξεκίνησε με την απόδειξη του John von Neumann για τις ισορροπίες μεικτής στρατηγικής σε ένα παιχνίδι μηδενικού αθροίσματος δύο ατόμων. Η μικτή στρατηγική συνεπάγεται πως ο παίκτης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ των διαθέσιμων στρατηγικών, μια με πιθανότητα μεγαλύτερη του 0.

Αντίστοιχα, αμιγής στρατηγική είναι εκείνη με την οποία ο παίκτης επιλέγει μια στρατηγική με πιθανότητα ίση με 1, ακολουθεί δηλαδή μόνο μια στρατηγική απο τις διαθέσιμες.

Ακολούθησε το βιβλίο του 1944 *Theory of Games and Economic Behavior*, το οποίο έγραψε από κοινού με τον Oskar Morgenstern και ασχολήθηκε με συνεργατικά παιχνίδια στα οποία συμμετείχαν αρκετοί συμμετέχοντες. Η δεύτερη έκδοση αυτού του βιβλίου περιλάμβανε μια αξιωματική θεωρία της αναμενόμενης χρησιμότητας, η οποία επέτρεπε σε μαθηματικούς και οικονομολόγους να αναλύουν τη λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα. Μεγάλο μέρος της πρώιμης εργασίας για το GT έγινε στο Princeton κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, στο ίδιο πνευματικό περιβάλλον με πολλούς από τους κορυφαίους θεωρητικούς φυσικούς του κόσμου.

Οι θεωρητικοί παιγνίων χρησιμοποιούν ποσοτικά μοντέλα και υποθετικά παραδείγματα για να προσπαθήσουν να εξηγήσουν τη σύγκρουση και τη συνεργασία. Από πολλές απόψεις, αυτά τα παραδείγματα μπορεί να είναι υπερβολικά απλοϊκά, αλλά η απλότητά τους μπορεί να κάνει τις βασικές ανησυχίες της σύγκρουσης και της συνεργασίας πιο εύκολα αντιληπτές σε σύγκριση με τις πολύ πιο περίπλοκες καταστάσεις της πραγματικής ζωής.

Η διαδικασία της μοντελοποίησης της θεωρίας παιγνίων ξεκινά με μια ιδέα για το πώς αλληλοεπιδρούν οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων [26]. Αυτή η έννοια εκφράζεται ρητά σε ένα μοντέλο, το οποίο ενσωματώνει σημαντικές πτυχές της περιστασης και απαιτεί χρόνο για να κυριαρχήσει. Το επόμενο βήμα είναι να εξηγηθεί το μοντέλο καθώς και η φυσική του σημασία. Το μοντέλο πρέπει να διατηρεί ορισμένους λογικούς περιορισμούς και είναι καλώς ορισμένο. Η έρευνα μπορεί να παράγει ευρήματα που υποστηρίζουν ή διαψεύδουν μια συγκεκριμένη υπόθεση. Εάν είναι λανθασμένη, η ανάλυση θα πρέπει να παρέχει βοήθεια στον προσδιορισμό του γιατί είναι λανθασμένη. Το πρόβλημα μπορεί να έγκειται σε εσφαλμένη υπόθεση είτε στο γεγονός ότι το μοντέλο μπορεί να είναι ελλιπές. Συνεπώς, καταλήγοντας στο παραπάνω συμπέρασμα, προκύπτει η ανάγκη καλύτερης έρευνας και ίσως απαιτείται χρήση διαφορετικού μοντέλου. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια αμφίδρομη αλληλεπίδραση μεταξύ των ιδεών και των μοντέλων που δημιουργήθηκαν για να τις διαφωτίσουν: οι επιπτώσεις των μοντέλων μας βοηθούν να αξιολογήσουμε εάν οι ιδέες έχουν νόημα και αυτές οι ιδέες, υπό το φως των επιπτώσεων των μοντέλων, μπορεί να δείξουν πώς οι υποθέσεις των κατασκευασμένων μοντέλων είναι εσφαλμένες. Σε κάθε σενάριο, η διαδικασία ανάπτυξης και πρόσβασης σε ένα μοντέλο στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση του προβλήματος.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το GT είναι η μελέτη των ανταγωνιστικών συνθηκών που καθορίζουν τις βέλτιστες τακτικές και επιτυγχάνουν τα επιθυμητά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας διάφορα μαθηματικά εργαλεία όπως σύνολα, πιθανότητες, στατιστικές και άλγεβρα [27]. Αφού οι παίκτες αναγνωρίζουν τις μελλοντικές τους ενέργειες, τα αποτελέσματά τους γίνονται επίσης γνωστά. Το GT παρέχει ένα πλαίσιο ή ένα λεξιλόγιο για την κατανόηση δια δραστικών σεναρίων επιλογής ή καταστάσεων στις οποίες αλληλοεπιδρούν πολλοί υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων με ανταγωνιστικούς στόχους. Βασική στόχευση είναι η κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς σε σενάρια σύγκρουσης, καθώς και πώς οι κανόνες του παιχνιδιού μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Ακόμα, στόχος του GT είναι η κατανόηση των μαθηματικών και λογικών ενεργειών που πρέπει να κάνουν οι παίκτες σε μια ποικιλία παιχνιδιών για να αποκομίσουν τα μέγιστα κέρδη για τον εαυτό τους.

Έχοντας κάνει μια εισαγωγή σε κάποιες βασικές έννοιες και στην λογική του GT είναι σημαντικό να οριστεί ορολογία, που θα χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει καλύτερα τα παιχνίδια που δημιουργήθηκαν. Οι διάφοροι όροι που αναλύονται παρακάτω βοηθούν στην βαθύτερη κατανόηση και σωστότερη περιγραφή των παιχνιδιών, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

- Όροι που περιγράφουν τα παιχνίδια

1. Ο όρος "παιχνίδι" αναφέρεται σε μια επίσημη απεικόνιση ενός στρατηγικού σεναρίου. Ένα παιχνίδι μπορεί να περιγραφεί με τρεις τρόπους:
 - Παίκτης: Σε ένα παιχνίδι, ένας παίκτης είναι ένας πράκτορας που παίρνει αποφάσεις.
 - Κανόνες: Αυτή η ενότητα καλύπτει όλες τις πιθανές κινήσεις που μπορούν να γίνουν.
 - Κέρδος: Αυτός είναι ένας αριθμός που αντιπροσωπεύει το κέρδος ενός παίκτη μετά την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης ενέργειας. Μπορεί να είναι είτε αρνητικό είτε θετικό ανάλογα με το παιχνίδι που έχει οριστεί.
2. Set στρατηγικής: Το άθροισμα όλων των πιθανών κινήσεων που μπορεί να κάνει ένας παίκτης. Οι πιθανές κινήσεις των παικτών είναι γνωστές στους άλλους.
3. Παιχνίδια μηδενικού αθροίσματος: Είναι παιχνίδια στα οποία το άθροισμα των κερδών όλων των συμμετεχόντων είναι μηδέν.

4. Nash-Equilibrium: Πρόκειται για μια κατάσταση, στην οποία κανένας παίκτης δεν θέλει μονομερώς να αλλάξει την στρατηγική του καθώς λαμβάνει την μέγιστη απόδοση με την δεδομένη επιλογή. Μπορούν να υπάρχουν πολλαπλές θέσεις ισορροπίας κατά Nash σε ένα παιχνίδι.

4.2 Σύνδεση GT και Δικτύων

Σε ένα μοντελοποιημένο σενάριο, οι παίκτες είναι αυτοί που λαμβάνουν αποφάσεις [28]. Παραλληλίζοντας ένα παιχνίδι σε περιβάλλον δικτύου, οι παίκτες μπορεί να είναι τα BS του δικτύου ή ακόμα και οι χρήστες του. Οι ενέργειες είναι οι διάφορες επιλογές που έχει κάθε παίκτης. Το σύνολο των ενεργειών σε παιχνίδια δυναμικής ή εκτεταμένης μορφής μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου. Σε ένα ασύρματο σύστημα, οι ενέργειες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την επιλογή ενός σχήματος διαμόρφωσης, ρυθμού κωδικοποίησης, πρωτοκόλλου, παραμέτρου ελέγχου ροής, στάθμης ισχύος μετάδοσης ή οποιασδήποτε άλλης παραμέτρου ελεγχόμενης από τον κόμβο.

Το αποτέλεσμα του παιχνιδιού καθορίζεται από το "προφίλ δράσης" που δημιουργείται όταν κάθε παίκτης επιλέγει μια ενέργεια. Κάθε παίκτης μπορεί να αξιολογήσει όλα τα πιθανά αποτελέσματα διαμορφώνοντας έτσι μια σχέση προτίμησης. Σε πολλές περιπτώσεις, μια συνάρτηση χρησιμότητας (utility function - UF) χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη σχέση προτίμησης. Αυτή η συνάρτηση δίνει ένα κέρδος στην κάθε δράση του χρήστη, όταν αυτός επιλέγει την στρατηγική του. Κάθε αποτέλεσμα συνεπώς υποδηλώνει το πόσο καλή ή όχι είναι η στρατηγική που επιλέχθηκε σε σχέση και με την στρατηγική που επέλεξαν άλλοι παίκτες.

Με τον τρόπο αυτό, διαμορφώνεται μια κυρίαρχη στρατηγική που ουσιαστικά αποτελεί την βέλτιστη λύση για όλους τους παίκτες που παίζουν το παιχνίδι. Στο σενάριο ασύρματης σύνδεσης, ένας παίκτης μπορεί να επιλέξει αποτελέσματα που οδηγούν σε ισχυρότερους λόγους SNR, λιγότερα ποσοστά σφαλμάτων bit, πιο αξιόπιστη συνδεσιμότητα δικτύου και μειωμένη κατανάλωση μπαταρίας, αν και αυτοί οι στόχοι μπορεί συχνά να έρχονται σε αντίθεση στην πράξη. Ένα από τα πιο δύσκολα στοιχεία της χρήσης του GT είναι η ακριβής μοντελοποίηση αυτών των αλληλεπιδράσεων.

Ωστόσο, θα πρέπει να υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ ενός παιχνιδιού, το οποίο απαιτεί πολλούς υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, και ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, το οποίο απαιτεί μόνο έναν παράγοντα. Ένα μοντέλο παιχνιδιού είναι συνήθως κατάλληλο μόνο σε ρυθμίσεις όπου μπορούμε να

περιμένουμε ότι οι αποφάσεις κάθε πράκτορα θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα άλλων πρακτόρων.

- Χαρακτηριστικά παιχτών
 1. Κοινή λογική: Κάθε παίκτης είναι λογικός και συνεπώς προσπαθεί να παίξει με τρόπο που μεγιστοποιεί την απόδοσή του. Οι παίκτες συνεπώς δεν δρουν συναισθηματικά και στοχεύουν απλώς στην μεγιστοποίηση του κέρδους τους.
 2. Πλήρης Γνώση: Κάθε παίκτης γνωρίζει τα ίδια γεγονότα. Οι έννοιες του ορθολογισμού και της τέλει πληροφόρησης είναι γνωστές. Όλοι οι παίκτες γνωρίζουν τα κέρδη όλων των αντιπάλων τους καθώς και τις πιθανές ενέργειες τους από κάθε θέση.
 3. Τέλεια πληροφόρηση: Κάθε παίκτης κάνει μια κίνηση και έχει πλήρη επίγνωση όλων των προηγούμενων κινήσεων.

Μια παρανόηση που μπορεί να προκύψει από τα παραπάνω είναι ότι το GT απαιτεί από όλους τους συμμετέχοντες να είναι εξαιρετικά λογικοί. Άλλοι συμμετέχοντες μπορεί να έχουν διαφορετικά κίνητρα καθώς και διαφορετικές πληροφορίες. Υπάρχουν διαφορετικές στρατηγικές που επιλέγουν οι παίκτες και αυτές καθορίζουν το προφίλ τους. Αυτό κάνει και το πρόβλημα της μοντελοποίησης ενός προβλήματος με χρήση GT εξαιρετικά δύσκολο.

Πολλά μοντέλα στο GT περιλαμβάνουν την έννοια της ορθολογικής επιλογής. Με λίγα λόγια, αυτή η θεωρία δηλώνει ότι ένας υπεύθυνος λήπτης αποφάσεων επιλέγει τη βέλτιστη ενέργεια από όλες τις επιλογές που έχει πρόσβαση με βάση τις προτιμήσεις του. Η «ορθολογικότητά» των παικτών μετριέται από τη συνέπεια των επιλογών τους όταν παρουσιάζεται ποικιλία αυτών, και όχι από τη φύση των συμπαθειών και των αντιπαθειών τους.

Τα ad hoc δίκτυα κατείχαν εξέχουσα θέση στη βιβλιογραφία των ασύρματων επικοινωνιών και δικτύων. Ένα ad hoc δίκτυο είναι ένα δίκτυο πολλαπλών δρομολογίων, αυτό-διαμόρφωσης χωρίς κεντρική εξουσία. Ως αποτέλεσμα, κάθε μέρος του σχεδιασμού και της λειτουργίας ενός ad hoc δικτύου ιδανικά θα εφαρμοζόταν και στα ασύρματα 5G δίκτυα εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει. Επιπλέον, οι κόμβοι σε ένα ad hoc δίκτυο είναι συχνά περιορισμένοι όσον αφορά την ενέργεια και την ισχύ. Πολλά από αυτά τα ίδια χαρακτηριστικά, όπως αποκεντρωμένη λειτουργία, αυτο-διαμόρφωση και επίγνωση ισχύος/ενέργειας—είναι συνήθως επιθυμητά σε επερχόμενα ασύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων

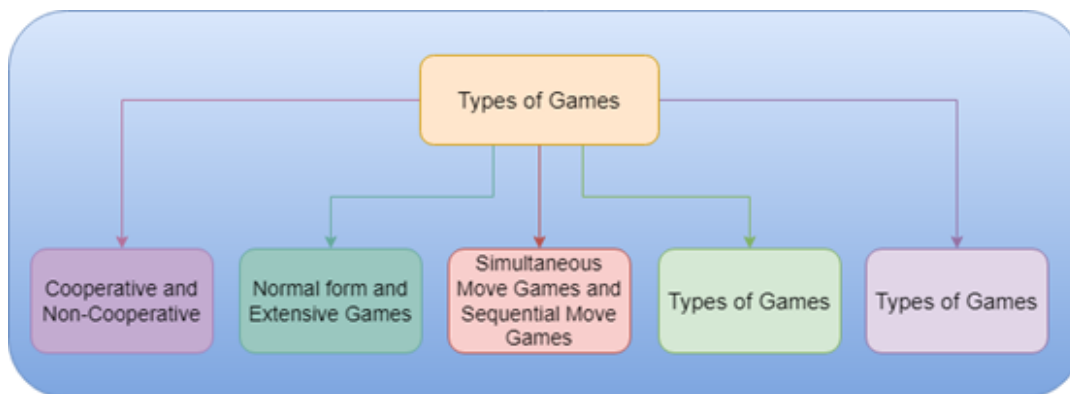
των δικτύων αισθητήρων, των δικτύων πλέγματος και των πανταχού παρόντων υπολογιστικών συστημάτων.

Όπως είδαμε, το GT είναι η μελέτη του πώς αλληλοεπιδρούν τα αυτόνομα άτομα. Κάθε κόμβος που εκτελεί ένα καταναμημένο πρωτόκολλο σε ένα σύγχρονο ασύρματο δίκτυο πρέπει να κάνει τις δικές του κρίσεις (πιθανώς βασιζόμενος σε πληροφορίες από άλλους κόμβους). Αν και οι κανόνες ή οι αλγόριθμοι ενός πρωτοκόλλου μπορεί να περιορίζουν αυτές τις επιλογές, κάθε κόμβος θα έχει τελικά κάποια ευελιξία στον καθορισμό παραμέτρων ή στην αλλαγή του τρόπου λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, αυτοί οι κόμβοι μπορεί να λειτουργήσουν ως αυτόνομοι πράκτορες, παίρνοντας αποφάσεις σχετικά με την ισχύ μετάδοσης, την προώθηση πακέτων και άλλους παράγοντες.

Οι κόμβοι μπορεί να επιδιώκουν το "μεγαλύτερο καλό" του δικτύου στο σύνολό του σε ορισμένες περιπτώσεις. Σε άλλες περιπτώσεις, οι κόμβοι μπορεί να ενεργούν εγωιστικά, νοιάζονται μόνο για τα συμφέροντα των δικών τους χρηστών. Τέλος, οι κόμβοι ενδέχεται να ενεργούν εσκεμμένα προκειμένου να υποβαθμίσουν την απόδοση του δικτύου για άλλους χρήστες. Η εφαρμογή του GT στο δεύτερο και τρίτο σενάριο μπορεί να είναι εύκολη, δεδομένου ότι το GT γενικά ερευνά καταστάσεις στις οποίες οι στόχοι του παίκτη είναι αντίθετοι. Αν και οι στόχοι του κόμβου μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένοι στο πρώτο σενάριο (καθώς όλοι οι συμμετέχοντες επιθυμούν το "καλύτερο καλό" του δικτύου), το GT μπορεί να είναι ακόμα ωφέλιμο. Παρόλο που οι κόμβοι έχουν τους ίδιους στόχους, θα έχουν ο καθένας μια ξεχωριστή άποψη για την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, με αποτέλεσμα ίσως διαφωνίες σχετικά με την καλύτερη πορεία δράσης.

Τα διαφορετικά είδη παιχνιδιών βοηθούν στην κατανόηση διαφόρων τύπων προβλημάτων που το GT μπορεί να μοντελοποιήσει. Ο αριθμός των παικτών σε ένα παιχνίδι, η συμμετρία του παιχνιδιού και η συνεργασία των παικτών παίζουν σημαντικό ρόλο και διαφοροποιούν τα είδη παιχνιδιών.

4.3 Είδη παιχνιδιών



Σχήμα 4.1: Είδη Παιχνιδιών

Το μη συνεργατικό και το συνεργατικό GT είναι οι δύο κλάδοι του GT. Τα συνεργατικά παιχνίδια, μελετώνται συχνά χρησιμοποιώντας το πλαίσιο συνεργασίας GT, το οποίο εστιάζει στην πρόβλεψη των ομάδων που θα σχηματιστούν, των κοινών ενεργειών που θα αναλάβουν οι ομάδες και των συλλογικών κερδών που θα προκύψουν. Το κλασικό μη συνεργατικό GT, από την άλλη πλευρά, επικεντρώνεται στην πρόβλεψη των ενεργειών και των κερδών μεμονωμένων παικτών, καθώς και στην αξιολόγηση των ισορροπιών Nash. Η ατομική ανταμοιβή μπορεί να οδηγήσει σε ένα σενάριο που ονομάζεται Τραγωδία των Κοινών, στο οποίο οι πόροι δαπανώνται μη αποτελεσματικά από τους χρήστες. Λόγω έλλειψης επίσημων διαπραγματεύσεων, τα δημόσια αγαθά μειώνονται δραματικά λόγω της υπερβολικής χρήσης και της χαμηλής προμήθειας λόγω ιδιωτικών κινήτρων.

Το μη συνεργατικό GT εξετάζει επίσης πως οι μέθοδοι διαπραγμάτευσης θα αλλάξουν την κατανομή των κερδών εντός κάθε ομάδας, ενώ το ομαδικό GT απλώς καλύπτει τη δομή, τις τακτικές και τις αποδόσεις των ομάδων. Επειδή το μη συνεργατικό GT είναι πιο γενικό, τα συνεργατικά παιχνίδια μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας μη συνεργατικά GT (το αντίθετο δεν ισχύει), εφόσον γίνονται αρκετές υποθέσεις για να καλύψουν όλες τις πιθανές στρατηγικές που είναι διαθέσιμες στους παίκτες λόγω της πιθανότητας εξωτερικής επιβολής συνεργασίας. Ενώ μπορεί να είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μια ενιαία θεωρία, σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για την κατάλληλη αναπαράσταση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της στρατηγικής διαπραγμάτευσης. Το μοντέλο που προκύπτει θα είναι περίπλοκο αν πρόκειται να είναι χρήσιμο στον πραγματικό κόσμο και αυτό το καθιστά δύσκολο στην μοντελοποίηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το συνεργατικό GT προσφέρει ένα απλούστερο

πλαίσιο που επιτρέπει μια ολοκληρωμένη μελέτη του παιχνιδιού χωρίς να κάνει υποθέσεις σχετικά με τη διαπραγματευτική ισχύ.

Τα μη συνεργατικά παιχνίδια είναι εκείνα στα οποία οι συμμετέχοντες επιλέγουν τη δική τους στρατηγική για να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους. Το δίλημμα του φυλακισμένου είναι το μεγαλύτερο παράδειγμα ενός μη συνεργατικού παιχνιδιού [29]. Το συνηθισμένο δίλημμα του κρατούμενου τίθεται έτσι ώστε και οι δύο συμμετέχοντες να επιλέγουν να υπερασπιστούν τον εαυτό τους σε βάρος του άλλου. Ως αποτέλεσμα, και τα δύο μέρη βρίσκονται σε χειρότερη θέση από ότι θα ήταν αν είχαν συνεργαστεί στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το δίλημμα του κρατούμενου είναι μια κατάσταση κατά την οποία δύο άτομα τοποθετούνται σε ξεχωριστούς χώρους και δεν μπορούν να επικοινωνήσουν. Σε αυτές τις συνθήκες τα μέλη πρέπει να επιλέξουν αν θα συνεργαστούν ή όχι με τον άλλον. Όταν και οι δύο πλευρές επιλέγουν να συνεργαστούν, η καθεμία λαμβάνει το υψηλότερο όφελος.

Το κλασικό δίλημμα των κρατουμένων έχει ως εξής:

- Δύο ληστές τραπεζών συνελήφθησαν και ανακρίνονται σε χωριστά δωμάτια. (A και B)
- Οι αρχές δεν έχουν άλλους μάρτυρες και μπορούν να αποδείξουν την υπόθεση εναντίον τους. Το μόνο που μπορούν να κάνουν είναι να πείσουν τουλάχιστον έναν από τους ληστές να προδώσει τον συνεργό του και να ομολογήσει το έγκλημα.
- Κάθε ληστής τράπεζας έρχεται αντιμέτωπος με την επιλογή να συνεργαστεί με τον συνεργό του και να παραμείνει σιωπηλός ή να αποστατήσει από τη συμμορία και να καταθέσει στη δίωξη.
- Εάν και οι δύο συνεργαστούν και σιωπήσουν, οι αρχές θα μπορούν να τους καταδικάσουν μόνο με μικρότερη κατηγορία, που θα έχει ως αποτέλεσμα ο καθένας από αυτούς να εκτίσει ένα χρόνο φυλάκιση (1 έτος για τον A + 1 έτος για τον B = 2 χρόνια συνολική ποινή φυλάκισης).
- Αν ο ένας καταθέσει και ο άλλος όχι, αυτός που καταθέτει θα αφεθεί ελεύθερος, ενώ ο άλλος θα καταδικαστεί σε πενταετή ποινή (0 έτη για τον αποστάτη + 5 χρόνια για τον ένοχο = σύνολο πέντε ετών).
- Εάν και οι δύο καταθέσουν ο ένας εναντίον του άλλου, ο καθένας θα καταδικαστεί σε δύο χρόνια φυλάκιση για τους ρόλους τους στη ληστεία (2 χρόνια για τον A + 2 χρόνια για τον B = 4 χρόνια συνολικά).

	Ομολογία	Σιωπή
Ομολογία	2,2	0,5
Σιωπή	5,0	1,1

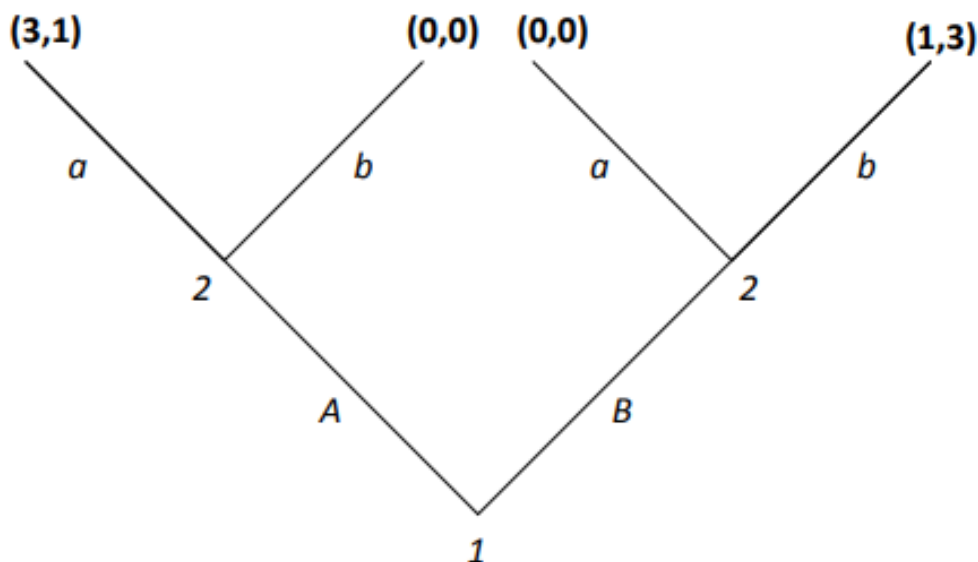
Πίνακας 4.1: Utility Table του Διλήματος του Φυλακισμένου

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο παρουσιάζονται οι πληροφορίες τα παιχνίδια μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: παιχνίδια κανονικής και εκτεταμένης μορφής. Ο όρος "παιχνίδι κανονικής μορφής" αναφέρεται σε ένα παιχνίδι που περιγράφεται ως μητρώο και παρουσιάζεται στο [30]. Με άλλα λόγια, τα παιχνίδια κανονικής μορφής είναι εκείνα στα οποία το κέρδος και οι τακτικές ενός παιχνιδιού περιγράφονται σε μορφή πίνακα. Ένα παράδειγμα παιχνιδιού κανονικής μορφής αποτελεί το Δίλημμα του φυλακισμένου το οποίο περιγράφηκε παραπάνω. Η κυρίαρχη τακτική και η ισορροπία Nash μπορούν να εντοπιστούν χρησιμοποιώντας παιχνίδια κανονικής μορφής. Τα μητρώα σε παιχνίδια κανονικής μορφής απεικονίζουν τις στρατηγικές που χρησιμοποιούνται από τους διάφορους συμμετέχοντες στο παιχνίδι, καθώς και τα πιθανά αποτελέσματα. Τα παιχνίδια εκτεταμένης μορφής, από την άλλη πλευρά, είναι εκείνα στα οποία το παιχνίδι περιγράφεται με τη μορφή ενός δέντρου αποφάσεων. Εκτεταμένα παιχνίδια μορφής βοηθούν στην απεικόνιση τυχαίων γεγονότων. Τα ονόματα των συμμετεχόντων εμφανίζονται σε ξεχωριστούς κόμβους στα παιχνίδια αυτά, οι οποίοι έχουν δομή που μοιάζει με δέντρο. Επιπλέον, οι πιθανές ενέργειες και οι αποδόσεις κάθε παίκτη παρατίθενται σε αυτό το πλαίσιο. Ένα παράδειγμα παιχνιδιού εκτεταμένης μορφής είναι η «πόλεμος των φύλων». Αυτού του είδους τα παίγνια περιγράφονται αναλυτικά στην εργασία [31].

Το παιχνίδι «πόλεμος των φύλων» παρουσιάζει μια πρόκληση συντονισμού και παρουσιάζεται στην [32]. Οι παίκτες πρέπει να επιλέξουν είτε μεταξύ ενός αγώνα τένις είτε μια παράσταση όπερας. Στην περίπτωση που οι παίκτες παρευρεθούν σε διαφορετικές εκδηλώσεις κανείς παίκτης δεν έχει όφελος. Η βέλτιστη κατάσταση είναι αυτή όπου οι δυο παίκτες παραμένουν μαζί. Κάθε ένας έχει ένα αγαπημένο συμβάν στο οποίο θέλει να παρευρεθεί. Στον άντρα αρέσουν οι αγώνες τένις και στην γυναίκα οι παραστάσεις όπερας. Ο παίκτης που θα παρευρεθεί στην εκδήλωση της προτίμησής του λαμβάνει λαμβάνει όφελος μεγαλύτερο από αυτό που θα λάμβανε αν πήγαινε στην άλλη εκδήλωση. Αυτό το παιχνίδι έχει μόνο μία μεταβλητή, το a , η οποία είναι η ανταμοιβή που λαμβάνει ο παίκτης που πηγαίνει στην εκδήλωση που προτιμάει. Ο άλλος παίκτης έχει όφελος 1 επειδή δεν χωρίζεται με τον άλλο παίκτη. Σε κάθε άλλη περίπτωση οι ανταμοιβές των παικτών είναι 0. Ο πίνακας κερδών αυτού του παιχνιδιού απεικονίζεται παρακάτω και στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται η εκτεταμένη μορφή του παραπάνω παιχνιδιού.

	A	B
A	3,1	0,0
B	0,0	1,3

Πίνακας 4.2: Utility Table του παιχνιδιού Πόλεμος των Φύλων



Σχήμα 4.2: Εκτεταμένη μορφή παιχνιδιού.

Τα παιχνίδια κατηγοριοποιούνται επίσης και με βάση του αθροίσματος τους. Το σύνολο των αποτελεσμάτων όλων των παικτών σε ένα παιχνίδι σταθερού αθροίσματος παραμένει σταθερό ακόμα κι αν τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Σε ένα παιχνίδι πολλαπλών παραγόντων, σταθερού αθροίσματος, οι συμμετέχοντες πρέπει να συντονίσουν μια ακολουθία κινήσεων προκειμένου να ελέγξουν έναν πεπερασμένο αριθμό πόρων [33]. Ένα παιχνίδι μηδενικού αθροίσματος είναι ένα παιχνίδι σταθερού αθροίσματος στο οποίο το άθροισμα των αποτελεσμάτων όλων των παικτών είναι μηδέν. Οι στρατηγικές διαφορετικών παικτών δεν αλλάζουν τους διαθέσιμους πόρους σε ένα παιχνίδι μηδενικού αθροίσματος. Επιπλέον, σε ένα παιχνίδι μηδενικού αθροίσματος, το κέρδος ενός παίκτη είναι πάντα ισοδύναμο με την απώλεια του άλλου. Το σκάκι και το ποδόσφαιρο είναι δύο παραδείγματα παιχνιδιών μηδενικού αθροίσματος.

Τα παιχνίδια χωρίς μηδενικό άθροισμα, από την άλλη πλευρά, είναι εκείνα στα οποία το άθροισμα των αποτελεσμάτων όλων των παικτών δεν είναι μηδέν. Τα καθαρά κέρδη των παικτών αντισταθμίζουν τις απώλειες του ψεύτικου παίκτη. Οι παίκτες γνωρίζουν ο ένας τους χώρους στρατηγικής του άλλου, τις λειτουργίες πληρωμής και τις λειτουργίες μετάβασης. Τα δεδομένα είναι ακριβή και ο κάθε

συμμετέχων λαμβάνει λογικές αποφάσεις [34]. Σε αυτά τα παιχνίδια, η επιτυχία του ενός παίκτη έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια του άλλου. Τα μη μηδενικά παιχνίδια, από την άλλη πλευρά, είναι παιχνίδια συνεργασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα παιχνίδια συνεργασίας όλοι είτε κερδίζουν είτε χάνουν. Παράδειγμα ενός παίγνιου μη μηδενικού αθροίσματος αποτελεί το Δίλημμα του φυλακισμένου.

Ακόμα ένας τρόπος διάκρισης παιχνιδιών είναι χαρακτηρίζοντας τα ως συμμετρικά είτε ασύμμετρα. Στα συμμετρικά παιχνίδια, οι στρατηγικές που υιοθετούν όλοι οι παίκτες είναι ίδιες. Συμμετρία μπορεί να υπάρχει στα βραχυπρόθεσμα παιχνίδια μόνο επειδή στα παιχνίδια μεγάλης διάρκειας αυξάνεται ο αριθμός των επιλογών με έναν παίκτη. Οι αποφάσεις σε ένα συμμετρικό παιχνίδι εξαρτώνται από τις στρατηγικές που χρησιμοποιούνται και όχι από τους παίκτες του παιχνιδιού. Ακόμη και σε περίπτωση ανταλλαγής παικτών, οι αποφάσεις παραμένουν ίδιες στα συμμετρικά παιχνίδια. Παράδειγμα συμμετρικών παιχνιδιών είναι το δίλημμα του φυλακισμένου που εξηγήθηκε νωρίτερα.

Τα ασύμμετρα παιχνίδια, από την άλλη, είναι εκείνα στα οποία οι στρατηγικές των παικτών αποκλίνουν. Η τακτική που ωφελεί έναν παίκτη μπορεί να μην είναι εξίσου χρήσιμη με τον άλλο παίκτη σε ασύμμετρα παιχνίδια. Στα ασύμμετρα παιχνίδια, ωστόσο, η λήψη αποφάσεων επηρεάζεται από τα πολλά είδη τακτικών και αποφάσεων που χρησιμοποιούν οι συμμετέχοντες. Η εισαγωγή μιας νέας επιχείρησης σε μια αγορά είναι ένα παράδειγμα ασύμμετρου παιχνιδιού, καθώς διάφορες εταιρείες χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για να εισέλθουν στην ίδια αγορά. Η είσοδος ενός νέου οργανισμού σε μια αγορά είναι ένα παράδειγμα ασύμμετρου παιχνιδιού αφού διάφοροι οργανισμοί χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για να εισέλθουν στην ίδια αγορά.

Η συνάφεια της συμμετρίας στα παιχνίδια δρομολόγησης διερευνήθηκε και αποδείχθηκε ότι τα δίκτυα με ευρείες τοπολογίες έχουν μοναδικές συμμετρικές ισορροπίες υπό την προϋπόθεση ότι το παιχνίδι είναι συμμετρικό και το κόστος πληροί ορισμένες προϋποθέσεις [35].

4.4 Εφαρμογές του GT

Το GT είναι ένα αυτοτελές θέμα που έχει εφαρμογές στα εφαρμοσμένα μαθηματικά, τις κοινωνικές επιστήμες (ιδιαίτερα τις οικονομικές), τη βιολογία, τη μηχαν-

νική, τις πολιτικές επιστήμες, τις διεθνείς σχέσεις, την επιστήμη των υπολογιστών και τη φιλοσοφία. Το GT έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για να προσπαθήσει να οικοδομήσει ηθικές ή κανονιστικές θεωρίες συμπεριφοράς. Οι μελετητές στα οικονομικά και τη φιλοσοφία έχουν χρησιμοποιήσει το GT για να εξηγήσουν καλύτερα την ορθολογική συμπεριφορά. Οι διαπροσωπικές σχέσεις, ο ανταγωνισμός, οι συγκρούσεις και οι πολιτικές υποθέσεις είναι όλα παραδείγματα φαινομένων που μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας το GT. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών GT παρατίθενται παρακάτω [35].

Το GT είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στα μαθηματικά οικονομικά και τις επιχειρήσεις για να περιγράψει τα πρότυπα συμπεριφοράς των αλληλοεπιδρώντων παραγόντων. Οι οικονομολόγοι χρησιμοποιούν την θεωρία παιγνίων για να μελετήσουν τον οικονομικό ανταγωνισμό και φαινόμενα όπως η διαπραγματεύση, ο σχεδιασμός μηχανισμών, οι δημοπρασίες και η θεωρία ψηφοφορίας. Το GT καθορίζει διάφορες τακτικές και παρέχει χρήσιμα εργαλεία για την επίλυση ζητημάτων στρατηγικής. Στα οικονομικά μοντέλα GT, κάθε παίκτης αναγκάζεται να λαμβάνει υπόψη τις ενέργειες των άλλων ενώ αποφασίζει για μια στρατηγική, καθώς ένας παίκτης μπορεί να αντιδράσει στις κινήσεις του αντιπάλου του.

Πολλά φαινομενικά ασυνήθιστα φυσικά γεγονότα στη βιολογία μελετώνται χρησιμοποιώντας GT. Επειδή οι ανιδιοτελείς, αλτρομιστικές δραστηριότητες φαίνεται να αψηφούν την επιλογή του Δαρβίνου, η ανάπτυξη της συνεργασίας είναι ένα σημαντικό ζήτημα στη βιολογία. Σε ένα εξελικτικό πλαίσιο, το GT έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση της ανάπτυξης της συνεργασίας.

Από πολλές απόψεις, το GT και η φιλοσοφία συνδέονται. Σε φιλοσοφικές συζητήσεις, το GT έχει χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο και έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των φιλοσόφων αφού παρέχει ένα μέσο κατανόησης των αντιλήψεων τους.

Το GT χρησιμοποιείται στην δικτύωση τα τελευταία χρόνια, συνήθως για να χειρίζεται προβλήματα δρομολόγησης και κατανομής πόρων σε ανταγωνιστικό πλαίσιο, όπως αναφέρεται στο [36]. Η χρήση του στις ασύρματες επικοινωνίες εισήχθη πρόσφατα: οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων του παιχνιδιού είναι λογικοί καταναλωτές ή χειριστές δικτύου που διαχειρίζονται τις συσκευές επικοινωνίας τους.

Η ανάλυση σκοπεύει να δείξει πώς το GT μπορεί να εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση ζητημάτων που αφορούν τις τηλεπικοινωνίες, επιτρέποντας επίσης τη

βελτιστοποίηση πολλαπλών επιπέδων χρησιμοποιώντας πολλά πλαίσια θεωρητικών παιχνιδιών. Το θέμα της τιμολόγησης διερευνάται επίσης στα περισσότερα από αυτά τα παιχνίδια, καθώς η τιμολόγηση είναι μια σημαντική πτυχή σε μια λειτουργία χρησιμότητας.

OSI Layer	Application field	Specific application
Physical	Power control	Power control for CDMA Power control in OFDMA Networks
	Spectrum allocation	Spectrum sharing- Spectrum transactions
	MIMO Systems	Power management in MIMO
	Cooperative communications	Decode-and-forward cooperation
Data link	Medium access control	Access to slotted Aloha Random access to the interference channel
Network	Routing	Routing and forwarding
Transport	Call admission control	Request distribution among providers Call acceptance based on provider and customer context
	Load control	Termination of sessions based on provider and customer context
	Cell selection	Inter-cell and intra-cell games

Σχήμα 4.3: Εφαρμογές του GT στα διάφορα επίπεδα ενός δικτύου

Η απόδοση είναι συνήθως αποτέλεσμα της εκτιμώμενης αναλογίας SINR που λαμβάνουν οι παίκτες/κόμβοι στο φυσικό επίπεδο. Μια διαδραστική διαδικασία λήψης αποφάσεων με φυσικό επίπεδο συμβαίνει όταν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο ανταποκρίνονται σε αλλαγές στο αντιληπτό SINR αλλάζοντας το σήμα τους. Σε αυτό το πλαίσιο, το GT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη διανομή πόρων, όπως η ηλεκτρική ενέργεια ή το φάσμα. Η αποφυγή παρεμβολών είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη σε αυτές τις συνθέσεις.

Επιπλέον, το πρόβλημα ελέγχου πρόσβασης μέσου εμπλέκεται σε εφαρμογές GT για το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων. Σε αυτά τα παιχνίδια, οι εγωιστές χρήστες προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν την αξία τους αποκτώντας δυσανάλογη πρόσβαση στο κανάλι. Ωστόσο, αυτή η κίνηση μειώνει τη δυνατότητα πρόσβασης άλλων χρηστών στο κανάλι.

Οι λειτουργίες του επιπέδου δικτύου περιλαμβάνουν τη δημιουργία διαδρομών και τη δρομολόγηση πακέτων κατά μήκος αυτών των διαδρομών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το GT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει έναν κόμβο να επιλέξει την καλύτερη διαδρομή ή να αποφασίσει εάν θα στείλει ή όχι ένα πακέτο. Αυτά τα παιχνίδια ονομάζονται προώθησης. Λόγω του γεγονότος ότι οι κόμβοι πρέπει να αποφασίζουν για τις δραστηριότητές τους διατηρώντας παράλληλα τη γνώση της συμπεριφοράς των άλλων, το GT είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα σε αυτό το πλαίσιο. Η προώθηση ενός πακέτου για έναν άλλο κόμβο δεν είναι λογική, τουλάχιστον εκ πρώτης όψευς, επειδή κάθε κόμβος θέλει να εξοικονομήσει

την ενέργειά του έτσι ώστε να μπορεί να προσφέρει όσο το δυνατόν περισσότερη κίνηση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συνεπώς αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος που αποτελεί παραλλαγή ενός ήδη υπάρχοντος παιχνιδιού το οποίο καλείται Τραγωδία των Κοινών. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται λεπτομερώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος, αναλύονται οι παραδοχές που έγιναν και περιγράφονται αναλυτικά σενάρια δοκιμών.

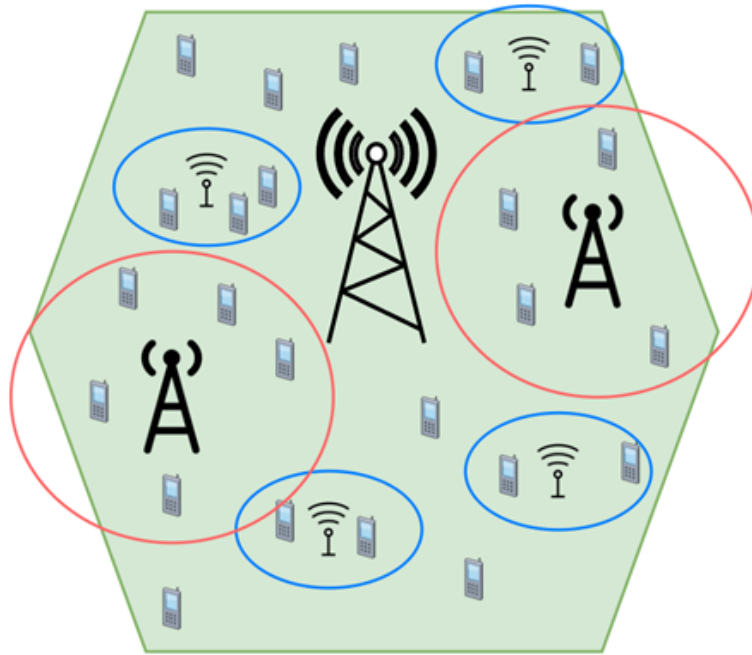
Κεφάλαιο 5

Περιβάλλον Εξομοίωσης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία ενός εργαλείου το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και προσομοιώνει τον τρόπο λειτουργίας ενός ετερογενούς 5G δικτύου. Οι απαιτήσεις σε Mbps και οι παρεχόμενες υπηρεσίες εξηγούνται αναλυτικά στην συνέχεια. Το HetNet αποτελείται από Macrocells, Microcells και Picocells. 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 επιπλέον κάλυψης σε περίπτωση που τα Macrocells εξαντλήσουν τους πόρους που κατέχουν για κατανομή εξαιτίας των πολλών χρηστών που εντοπίζονται σε μια περιοχή.

Συνεπώς στόχος αυτής της ενότητας είναι να εξηγήσει σύντομα την συνδεσιμότητα που μπορεί να παρέχει ο εξομοιωτής καθώς και τους αλγόριθμους που χρησιμοποιεί για τον έλεγχο της πληροφορίας. Ακόμα, αναλύεται το σκεπτικό ανάπτυξης του συστήματος και δίνονται παραδείγματα της λειτουργίας του. Στο τέλος της ενότητας αναγράφονται πληροφορίες σχετικά με την αρχιτεκτονική του συστήματος και παρουσιάζεται η έξοδος μετά την εκτέλεση του κώδικα.

Η αρχιτεκτονική που υλοποιείται απεικονίζεται Σχήμα 5.1. Στο σενάριο που επιλέχθηκε προς υλοποίηση οι Εξοπλισμοί των Χρηστών (UEs) συνδέονται σε διάφορα BSs. Οι παραπάνω καλούνται και σημεία πρόσβασης (Access Points - APs) διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης ραδιοσύνδεσης (Radio Access Technologies - RATs).



Σχήμα 5.1: Τοπολογία αρχιτεκτονικής εξομοιωτή.

Στο υλοποιημένο δίκτυο ένα UE μπορεί να συνδεθεί σε πολλαπλά BS. Αυτή η λειτουργία καλείται *multi connectivity* και δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να συνδέεται σε διαφορετικά BS ανάλογα με το ποιο παρέχει το καλύτερο σήμα. Η δυνατότητα της πολυσυνδεσιμότητας, επιτρέπει στο δίκτυο να ανταποκριθεί σε μια ποικιλία απαιτήσεων σταθερού QoS που εκτείνονται από την ποιότητα της σύνδεσης έως την απόδοση, αλλά και την εξοικονόμηση ενέργειας. Το πλαίσιο αυτό δίνει την δυνατότητα σε ροές πληροφορίας να δρομολογηθούν ή ακόμα και να κατευθύνονται.

Οι τρεις κύριες διαδικασίες για τον έλεγχο της ροής της πληροφορίας εντοπίζονται στην έκδοση 16 του 3GPP [37]. Παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

1. Διεύθυνση κυκλοφορίας, η οποία συνίσταται στο πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής δικτύου για την παροχή σύνδεσης.
2. 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.).
3. Διαχωρισμός κυκλοφορίας, ο οποίος αναφέρεται στην δυνατότητα αντιγραφής μιας υπηρεσίας σε δύο ή περισσότερους διαφορετικούς BSs για τη βελτίωση της ποιότητας ανταλλαγής πληροφοριών.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προσομοιώνεται η πρώτη διαδικασία, η οποία αποτελεί και την βασική λειτουργία του περιβάλλοντος εξομείωσης.

5.1 Θεωρία

Οι αλγόριθμοι που αναλύονται παρακάτω αξιολογούνται και επικυρώνονται με χρήση ενός απλοποιημένου, ρεαλιστικού αλλά και σχετικού σεναρίου χρήσης. Η ανάλυση των προτεινόμενων αλγορίθμων αποτελεί αναγκαία διαδικασία και η κατανομή πόρων που παρουσιάζονται παρακάτω επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στα μαθηματικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των. Η ανάπτυξη τους απαιτεί χρήση θεωρητικών αποτελεσμάτων τομέων όπως θεωρία παιγνίων και μηχανική μάθηση. Στο [38], γίνεται περιγραφή υψηλού επιπέδου για τα σεσνάρια ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένης της συχνότητας φορέα (carrier frequency), του συγκεντρωτικού εύρους ζώνης συστήματος (bandwidth), της διάταξης δικτύου (network layout), των στοιχείων κεραιάς (BS/UE), της διανομής/ταχύτητας UE και των προφίλ υπηρεσίας. Στην συνέχεια, αναλύονται οι τιμές που λαμβάνουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σε κάθε σεσνάριο ανάπτυξης.

Τα σεσνάρια ανάπτυξης τα οποία έχουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την επιστημονική κοινότητα ομαδοποιούνται στις 3 παρακάτω κατηγορίες:

- Επικοινωνίες Εξαιρετικά Αξιόπιστες και Χαμηλής Καθυστέρησης (Ultra-Reliable and Low Latency Communications - URLLC).
- Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής (massive Machine Type Communications - mMTC).
- Βελτιωμένη Ευρυζωνική Ζώνη Κινητής Τηλεφωνίας (enhanced Mobile BroadBand - eMBB).

Η επιλογή σεναρίου ανάπτυξης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την στόχευση του εκάστοτε αλγορίθμου. Παρακάτω αναγράφονται κάποια από τα πιο ενδιαφέροντα σεσνάρια ανάπτυξης:

1. Το σεσνάριο πυκνής ανάπτυξης μικροκυψελοειδών εστιάζει στην χρήση Macrocells με ή χωρίς Microcells. Καλείται να αντιμετωπίσει τα προβλήματα της υψηλής πυκνότητας χρηστών και την ύπαρξη τεράστιων φορτίων 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. Για την ανάπτυξη του πρέπει να θεωρηθεί μια συνεχής κυψελοειδής διάταξη, η οποία θα λαμβάνει υπόψη τις σχετικές παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν.

2. 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 πυκνότητα χρήστη, η συνεπής εμπειρία χρήστη σε εσωτερικούς χώρους και η υψηλή χωρητικότητα.
3. 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) σε αυτό το σενάριο είναι η αξιοπιστία υπό υψηλές ταχύτητες και επομένως συχνές λειτουργίες παράδοσης.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Το σενάριο ανάπτυξης μεγάλης εμβέλειας ορίζεται για να επιτρέψει 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.

8. 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.

Σε αυτόν τον εξομοιωτή περιλαμβάνονται μοντέλα παρεμβολών, ρεαλιστική κατανάλωση των πόρων του δικτύου και οι χρήστες υιοθετούν διαφορετικά προφίλ ενεργειών, τα οποία αλλάζουν ανάλογα με τις υπηρεσίες σύνδεσης και τους χρήστες. Ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό αυτής της εξομοίωσης είναι η δυνατότητα ευελιξίας στην προσθήκη διαφορετικών αλγορίθμων καθώς επιτρέπεται η ενσωμάτωση λύσεων επιλογής δικτύου έως και λύσεων δυναμικής διαχείρισης πληροφορίας.

Οι BS ενός 5G δικτύου έχουν πεπερασμένους πόρους. Ως πόρος θεωρείται κάθε στοιχείο το οποίο διαμοιράζεται μεταξύ των χρηστών και τους είναι απαραίτητο για την χρήση του δικτύου. Αυτό μπορεί να αφορά το εύρος ζώνης συχνοτήτων ή τον χρόνο κατανομής αιτημάτων των UE. Ο στόχος του RA καθώς και αυτού του αλγορίθμου είναι να μοιράζει βέλτιστα τους πόρους μεταξύ των χρηστών ώστε να παρέχει μια αποτελεσματική λύση που εξασφαλίζει την συνδεσιμότητα περισσότερων χρηστών στο δίκτυο. Παράλληλα, το σύστημα ενσωματώνει τους πόρους που σχετίζονται με όλα τα είδη κυψελών του συστήματος που αναπτύσσεται.

Για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης του εξομοιωτή χρησιμοποιούνται μετρικές, οι οποίες καλούνται KPIs και κάποιοι πιθανοί περιγράφονται στο [38]. Ένα υποσύνολο αυτών των μετρικών χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη προσομοίωση. Η επιλογή του υποσυνόλου KPIs θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τον στόχο του αλγορίθμου υπό διερεύνηση. Οι πιθανοί KPI είναι:

- 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.
- 5η εκατοστιαία απόδοση φάσματος χρήστη.
- Πυκνότητα σύνδεσης.
- Κινητικότητα.
- Ενεργειακή απόδοση δικτύου.
- Μέγιστος ρυθμός δεδομένων.
- Μέγιστη φασματική απόδοση.
- Εύρος ζώνης.
- Αναμονή επιπέδου ελέγχου.
- Καθυστέρηση επιπέδου χρήστη.
- Καθυστέρηση για σπάνια μικρά πακέτα.
- Χρόνος διακοπής κινητικότητας.

Εφόσον καθοριστεί σαφώς το σενάριο ανάπτυξης και οριστούν τα KPI που χρησιμοποιούνται πρέπει να οριστούν και παράμετροι οι οποίες σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τα χαρακτηριστικά του καναλιού καθώς και το μοντέλο του. Στο [39], παρουσιάζεται ένα μοντέλο καναλιού για διαφορετικές συχνότητες και συνθήκες. Η εργασία παρουσιάζει μοντέλα κεραιάς, διαφορετικά σενάρια, απώλειες στην διαδρομή καθώς και πιθανή εξασθένηση ενώ παράλληλα λαμβάνει υπόψη το περιβάλλον ενδιαφέροντος. Τέλος, περιγράφονται οι παράμετροι για τους πομπούς και τους δέκτες.

5.2 Ανάλυση Μοντέλου και Περιγραφή Μηχανισμού

Οι UEs ακολουθούν μια συγκεκριμένη διαδικασία προκειμένου να συνδεθούν στα διαθέσιμα BSs. Αρχικά, το κάθε UE υπολογίζει το 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. Στο επόμενο βήμα ξεκινάει

μια συνεχής διαδικασία, η οποία ολοκληρώνεται μόνο όταν επιτευχθεί επιτυχημένη σύνδεση ή όταν δεν υπάρχουν άλλα BS, μέσα στη λίστα υποψηφίων BS, στην οποία μπορεί να συνδεθεί το UE. Με την επιτυχή σύνδεση του UE στο BS με το μεγαλύτερο RSRP, το BS εξάγεται από την λίστα των υποψηφίων και το UE υποβάλλει αίτημα σύνδεσης στο εν λόγω BS. Στην περίπτωση που το BS μπορεί να πραγματοποιήσει την σύνδεση, τότε επιστρέφεται ο ρυθμός δεδομένων που λαμβάνει ο χρήστης ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο ρυθμός δεδομένων που επιστρέφεται είναι μηδέν. Με τον ίδιο επανληπτικό τρόπο το BS διαγράφεται από την λίστα υποψηφίων και η διαδικασία ξεκινά ξανά. Αντίθετα, στην περίπτωση σύνδεσης, τότε εκτελούνται οι απαραίτητες διαδικασίες για την πραγματοποίηση της σύνδεσης και οι διαδικασίες για το συγκεκριμένο UE ολοκληρώνονται.

Για την καλύτερη επεξήγηση και κατανόηση της διαδικασίας παρακάτω αναγράφεται ο αλγόριθμος που δημιουργεί την σύνδεση μεταξύ των UE και των BS μέσα στο δίκτυό μας, με τη μορφή ψευδοκώδικα. Ο αλγόριθμος είναι ο εξής:

Algorithm 1: The Connection Process:

```

1: for each UE do:
2:     Calculate RSRP from nearby BSs
3:     repeat:
4:         Find BS of max RSRP from BS list
5:         dataRate = BS.requestConnection(UE)
6:         if dataRate != 0:
7:             BS.establishConnection(UE)
8:             break
9:         else:
10:            Delete BS from candidate BS list
11:    until BS list is empty

```

Σχήμα 5.2: Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε.

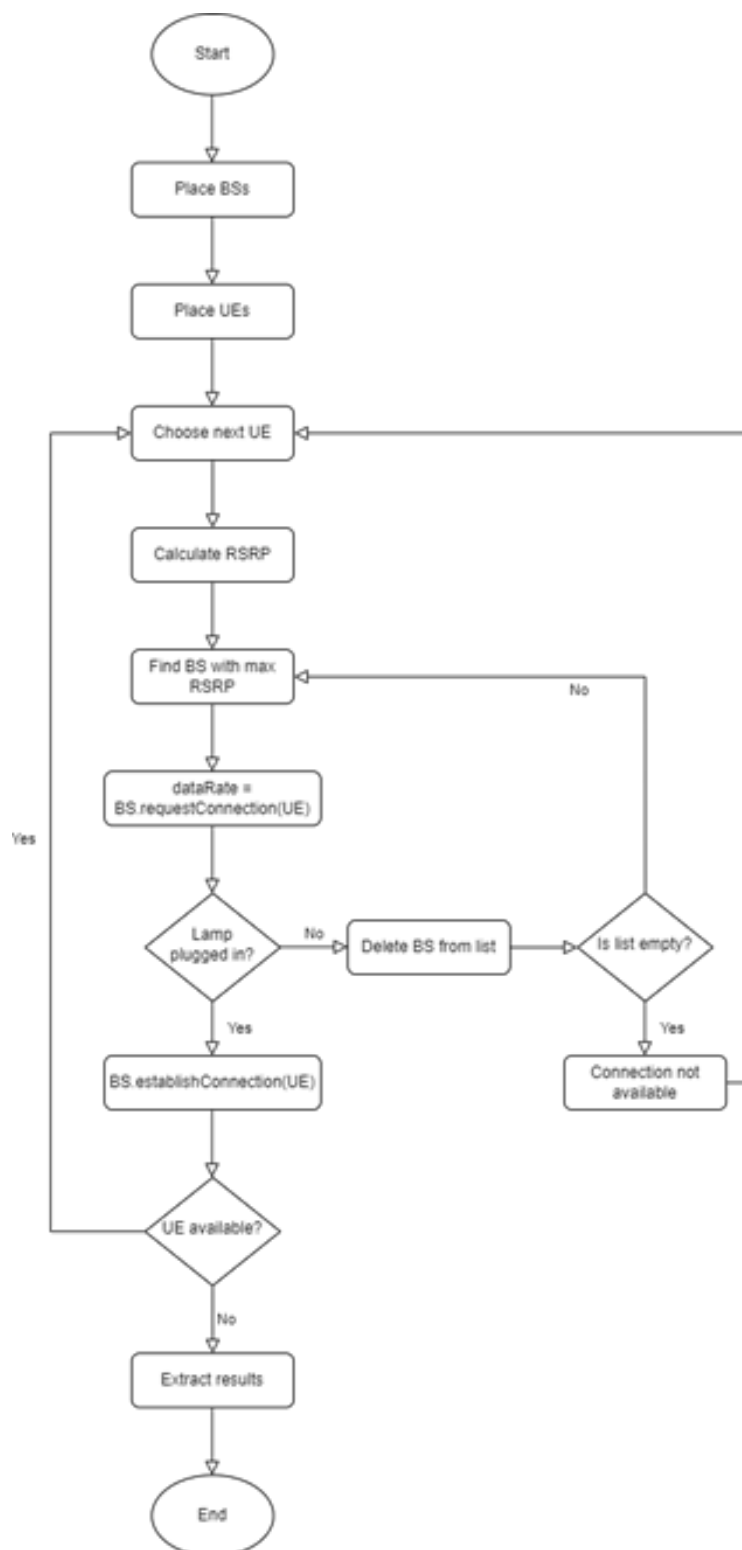
Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται ένα υποδειγματικό σενάριο χρήσης της προσομοίωσης για την οποία λαμβάνονται υπόψη αναφορές που έγιναν στην ενότητα. Στόχος αποτελεί η επαλήθευση της ικανότητας του αλγορίθμου να κατανείμει τους χρήστες στις τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (Macro, Micro και Pico), μεγιστοποιώντας τον ρυθμό δεδομένων UEs κατά το DL και ελαχιστοποιώντας τη μετάδοση ισχύος BS, λαμβάνοντας υπόψη ένα προαστιακό περιβάλλον.

Η τοπολογία που περιγράφεται διατάσσει τα Macrocells σε ένα εξαγωνικό πλέγμα, το οποίο έχει ακτίνα 200 μέτρων και απεικονίζεται στο σχήμα 5.4. Τα Micro, Pico

Παράμετροι	Τιμές		
	Macro	Micro	Pico
Φέρουσα Συχνότητα (MHz)	2100	2400	2600
Εύρος Ζώνης (MHz)	5	5	5
Μέγιστη ισχύς DL (W)	1	0.25	0.1
Μέγιστη ισχύς BS (W)	20	2	1
Κέρδος Αντέννας (dB)	16	5	5
Απώλεια διαδρομής (dB)	3	2	2
Κέρδος αντέννας UE (dB)	0	0	0

Πίνακας 5.1: Παράμετροι Προσομοίωσης

καθώς και τα UE τοποθετούνται με χρήση της ομοιόμορφης κατανομής εντός της ακτίνας των Macrocell. Ο θόρυβος προστίθεται με χρήση κανονικής κατανομής, στα σήματα, που μεταδίδονται από τα BS στους UE. Τέλος, ως KPIs επιλέχθηκαν το συνολικό bitrate των δικτύων, την ενεργειακή απόδοση του δικτύου και το QoS.



Σχήμα 5.3: Ο αλγόριθμος λειτουργίας της προσομοίωσης.

Μέχρι στιγμής έχει δωθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθεί ο προσομοιωτής από την αρχή μέχρι την στιγμή που βγάζει 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. Το παραπάνω σχήμα συνοψίζει την όλη διαδικασία του προσομοιωτή που περιγράφηκε.

5.3 Σύστημα Μοντέλου

Η ανάλυση των ήδη υπάρχοντων αλγορίθμων κατανομής πόρων επικεντρώθηκε στα μαθηματικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους. Αυτό γιατί τα μαθηματικά χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες τους καθώς και ο σχεδιασμός τους απαιτεί χρήση θεωρητικών αποτελεσμάτων από διάφορους ερευνητικούς τομείς, από τη μηχανική μάθηση έως τη θεωρία παιγνίων.

Στόχος αποτελεί η σύγκριση μεταξύ της απόδοσης των αλγορίθμων σε όσο πιο ρεαλιστικές συνθήκες γίνεται, ώστε να μπορεί να καθοριστεί ο κατάλληλος αλγόριθμος κατανομής πόρων. Αυτή είναι ουσιαστικά και η ανάγκη ανάπτυξης του εν λόγω προσομοιωτή.

Ο εξομοιωτής περιλαμβάνει ρεαλιστική χρήση πόρων δικτύου, δυνατότητα εισαγωγής κινητικότητας χρηστών, μοντέλα παρεμβολών, δυνατότητα συμπερίληψης κινούμενων BS και κρατάει διαφορετικά προφίλ ανάλογα με τους χρήστες και τις υπηρεσίες σύνδεσης τους. Οι λειτουργίες αυτές παρέχονται με ευελίξια ώστε να επιτρέπεται η ενσωμάτωση ενός ευρέος φάσματος αλγορίθμων, ξεκινώντας από λύσεις επιλογής δικτύου έως λύσεις δυναμικής διαχείρισης κυκλοφορίας, με λογικές ελέγχου που μπορούν να αναπτυχθούν με διάφορους τρόπους.

Οι BS που καλούνται να εξυπηρετήσουν τα αιτήματα των UE έχουν πεπερασμένο σύνολο πόρων, τόσο όσον αφορά τον χρόνο που απαιτείται για την κατανομή των αιτημάτων των χρηστών όσο και περιορισμένο εύρος ζώνης. Συνεπώς, στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου αποτελεί ο βέλτιστος έλεγχος τέτοιων πόρων και η δημιουργία μιας ανθεκτικής και αποτελεσματικής λύσης που εξασφαλίζει την συνδεσιμότητα των χρηστών στο διαδίκτυο, ενσωματώνοντας επίσης πόρους που σχετίζονται με όλα τα είδη κυψελών που παρέχει το εν λόγω σύστημα.

Η ελάχιστη μονάδα που μπορεί να κατανέμει ένα 5G AP είναι τα Μπλοκ Φυσι-

κών Πόρων (Physical Resource Block - PRB). Κάθε PRB αποτελείται από 12 υποφορείς συχνότητας με εύρος ζώνης $2^\mu * 15$ kHz και χρονική διάρκεια $\alpha = 2^{-\mu}$ ms, όπου $\mu \in 0, 1, 2, 3, 4$ 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 [40].

Η ισχύς λήψης, ή Ισχύς λήψης σήματος αναφοράς 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:

$$RSRP_{(i,j)} = P_j + G_j - L_j - L_{(i,j)} \quad (5.1)$$

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:

$$P_j = \frac{1000 * BS_{power}}{\frac{BS_{PRB}}{10 * 2^\mu} * BS_{subcarriers}} \quad (5.2)$$

Στον εν λόγω εξομοιωτή, η απώλεια διαδρομής $L_{(i,p)}$ υπολογίζεται μέσω του μοντέλου COST-HATA [41], [42], 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 κεραίας 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 αποτελεί την σταθερή μετατόπιση και ορίζεται όπως φαίνεται παρακάτω. Εξετάζεται η περίπτωση των προαστιακών περιοχών:

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

Για τον υπολογισμό του αριθμού των PRB 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 SINR. Το τμήμα θερμικού θορύβου υπολογίζεται σύμφωνα με:

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

$$\theta_p = \frac{\sum_{(\tau \in (t-T, t))} \sum_{(j \in I_i)} C_{(j,p)}(\tau) N_{(j,p)}(\tau)}{T \# R_p} \quad (5.7)$$

όπου το $\theta_p(t)$ αποτελεί τον λόγο 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, $C_{(j,p)}(t)$, το οποίο ισούται με 1 εάν το UE j είναι συνδεδεμένο στο BS p τη χρονική στιγμή t και 0 διαφορετικά. Τέλος, με $N_{(j,p)}(t)$ συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός μπλοκ πόρων του BS p .

Το τμήμα παρεμβολής υπολογίζεται ως εξής:

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

όπου το $F_{(p,p')}$ είναι 1 εάν ο BS p και p' μοιράζονται την ίδια συχνότητα φέρεια 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

$$SINR_{m,k} = \frac{RSRP_{m,k}}{I + N} \quad (5.9)$$

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

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

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

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, αντίστοιχα:

$$n_{(i,p)}^{PRB} = \lceil \frac{b_{pk}^i}{r_{(i,p)}} \rceil \quad (5.12)$$

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

Ο προσομοιωτής παρέχει επίσης διάφορες μετρήσεις για τα BS, τα UE και το δίκτυο. Δηλαδή, μεταξύ άλλων, η κατανάλωση ενέργειας κάθε BS, η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου και το QoS κάθε UE. Η συνολική κατανάλωση κάθε BS p μετριέται πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα ενέργειας που ασκεί ένα BS για να μεταφέρει ένα μόνο PRB, με τον συνολικό αριθμό PRB που κατανέμει στους χρήστες. Ο τύπος φαίνεται παρακάτω:

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

Είναι λοιπόν προφανές ότι για να ανακτήσουμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας

γειας 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 εν λόγω προσομοιωτής, βγάζει δύο εκδόσεις του όρου, μία για κάθε μεμονωμένο χρήστη και μία για ολόκληρο το δίκτυο. Για κάθε UE, ορίζουμε το QoS όπως φαίνεται παρακάτω:

$$QoS_{UE}^i = \frac{ab_p^i}{b_p^i} \quad (5.16)$$

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:

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

5.4 Έξοδοι και Παραδείγματα Χρήσης

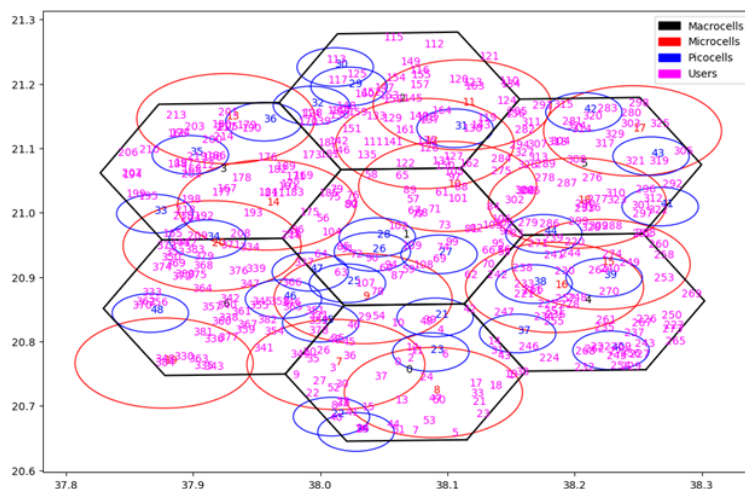
Η λειτουργία του εξομοιωτή ξεκινάει με την επιλογή της πόλης στην οποία στήνεται το δίκτυο της Πέμπτης γενιάς και διαμορφώνοντας με τον τρόπο αυτό ένα διαφορετικό σενάριο που αντιστοιχεί σε διαφορετική πόλη με ξεχωριστή τοπολογία. Η κυρίαρχη διαφορά βρίσκεται στην τοποθέτηση των κεραιών καθώς και στο πλήθος τους. Οι πληροφορίες σχετικά με την πολογία, την πόλη, τον αριθμό των κεραιών αποθηκεύονται σε αρχεία της μορφής csv (Comma Separated Values) τα οποία αναγράφονται παρακάτω:

- "center.csv", το οποίο αποθηκεύει την κεντρική τοποθεσία του δικτύου, σε μορφή συντεταγμένων του χάρτη, γύρω από την οποία αναπτύσσονται τα Macrocells.
- "macrocells.csv", το οποίο κρατάει τις θέσεις των Macrocells.
- "microcells.csv", το οποίο κρατάει τις θέσεις των Microcells.

- “picocells.csv”, το οποίο κρατάει τις θέσεις των Picocells.

Μελλοντικές εκδόσεις του εξομοιωτή θα δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να συνδέει τον εξομοιωτή με χάρτη και να επιλέγει περισσότερες παραμέτρους για την δημιουργία της εξομοίωσης ώστε το δίκτυο Πέμπτης γενιάς που δημιουργείται να είναι πιο προσαρμοσμένο στις ανάγκες του χρήστη.

Ένα παράδειγμα της χρήσης της εξομοίωσης απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα και είναι ουσιαστικά ένα Γραφικό Περιβάλλον Διεπαφής Χρήστη (Graphical User Interface – GUI):



Σχήμα 5.4: Τοπολογία εξομοιωτή.

Το παραπάνω γράφημα απεικονίζει την τοπολογία που αναπτύχθηκε στον εξομοιωτή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Το δίκτυο που απεικονίζεται αποτελείται από 7 Macrocells, 14 Microcells, 28 Picocells και 385 χρήστες. Τα Macrocells ζωγραφίζονται με μαύρο χρώμα και έχουν σχήμα εξαγώνου. Στο κέντρο τους απεικονίζεται το ID του BS και η ακτίνα του κυττάρου ταυτίζεται με την ακτίνα του εξαγώνου. Με κόκκινο χρώμα αναπαριστούν Microcell και όπως και στα Macrocell, στο κέντρο του κύκλου, εμφανίζεται το ID του BS. Αντίστοιχα, ισχύουν και για τους μπλε κύκλους οι οποίοι αναπαριστούν τα Picocells. Τέλος, με μωβ χρώμα απεικονίζονται οι αριθμοί που αποτελούν αναγνωριστικά των χρηστών.

Μετά την λήξη της προσομοίωσης γίνεται εξαγωγή των αποτελεσμάτων τα οποία αποθηκεύονται σε csv. Τα αποτελέσματα αφορούν τα UEs, τους BSs αλλά

και το ίδιο το δίκτυο. Συγκεκριμένα, για το καθένα υπολογίζονται οι εξής πληροφορίες:

1. UEs:

- ID
- Ληφθέν RSRP
- Ληφθέν SINR
- Απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων
- Ληφθέν ρυθμός δεδομένων
- ID του BS
- Το είδος του BS
- QoS

2. BSs:

- ID
- Είδος
- Πλήθος χρηστών
- Καταναλωθέν ενέργεια

3. Δίκτυο:

- Συνολικός δοθέν ρυθμός δεδομένων
- QoS
- Πλήθος χρηστών
- Καταναλωθέν ενέργεια

Κεφάλαιο 6

Προτεινόμενος Μηχανισμός

Στο παρακάτω κεφάλαιο γίνεται λόγος για τον προτεινόμενο μηχανισμό αυτής της διπλωματικής εργασίας, ο οποίος όπως προκύπτει αποτελεί μια πιο αποδοτική λύση σε σχέση με τους ήδη υπάρχοντες και κλασικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για RA. Στόχος αυτής της ενότητας συνεπώς, είναι να παρουσιαστεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε και αποτελεί παραλλαγή ενός ήδη υπάρχοντος παιχνιδιού που ονομάζεται Τραγωδία των Κοινών και να παρουσιαστούν παραδοχές που έγιναν κατά την ανάπτυξη του. Ακόμα, αναλύεται το σενάριο στο οποίο έγιναν οι δοκιμές. Για την ανάπτυξη αυτού του αλγορίθμου καθώς και της εξομοίωσης δικτύου Πέμπτης γενιάς η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python. Στόχος της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η δημιουργία ενός αλγορίθμου ο οποίος στην σύγκριση του με έναν κλασικό αλγόριθμο για RA, αποδίδει καλύτερα και δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν υπηρεσίες υψηλού επιπέδου χωρίς καθυστερήσεις.

6.1 Ανάλυση αλγορίθμου που υλοποιείται

Αρχικά, θα δοθεί περιγραφή του παιχνιδιού που ονομάζεται Τραγωδία των Κοινών. Το παραπάνω παιχνίδι εκφράζει μια κατάσταση στην οποία οι χρήστες δρουν ατομικά και έχοντας ανοιχτή πρόσβαση σε έναν πόρο ενεργούν αυτόνομα για το δικό τους συμφέρον, προκαλώντας εξάντληση πόρων ενάντια στο κοινό καλό όλων των χρηστών. Αν και τα συστήματα πόρων ανοιχτής πρόσβασης μπορεί να

καταρρεύσουν λόγω κατάχρησης, υπήρξαν και συνεχίζουν να υπάρχουν πολλά παραδείγματα μελών μιας κοινωνίας με ρυθμιζόμενη πρόσβαση σε έναν κοινό πόρο που συνεργάζονται για να εκμεταλλευτούν αυτούς τους πόρους με σύνεση χωρίς να καταρρεύσουν, ή ακόμα και να παράγουν «τέλεια τάξη» επίσης γνωστή ως NE [43]. Ένα από τα παραδείγματα που δείχνει τον τρόπο λειτουργίας του παραπάνω αλγορίθμου είναι το παρακάτω. Έστω ότι n παίκτες αγωνίζονται για την πρόσβαση σε ένα κανάλι τηλεπικοινωνίας. Όταν οι χρήστες δρουν εγωιστικά και ζητούν πολλούς από τους πόρους του συστήματος, αυτοί εξαντλούνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κανένας από τους χρήστες να μην απολαμβάνει τα οφέλη της τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης εξαιτίας αυτής της συμφοράς. Ας υποθέσουμε ότι μια κεραία μπορεί να παρέχει το πολύ 100 PRBs. Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, εάν ένας πόρος εξαντληθεί, κανένας παίκτης δεν μπορεί να τον χρησιμοποιήσει καθώς η παρεμβολή αυξάνεται απότομα. Ο ακόλουθος τύπος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διεπαφής χρήστη ανταμοιβής ενός παίκτη:

$$u_i(z_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^n x_j > 100 \\ x_i(100 - \sum_{j=1}^n x_j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.1)$$

Η ανταμοιβή των παικτών γίνεται 0, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους απαραίτητους πόρους, εάν ζητήσουν περισσότερα από 100 PRB. Η χαμηλότερη μονάδα πόρων που εκχωρούνται σε έναν χρήστη ονομάζονται PRB, που είναι οι κατανομημένοι πόροι. Κάθε παιχνίδι διαθέτει έναν πίνακα στον οποίο αναγράφονται τα οφέλη κάθε ενέργειας που μπορούν να κάνουν οι παίκτες. Δημιουργείται με τον τρόπο αυτό ένας ειδικός πίνακας για το παιχνίδι που παρουσιάζουμε ο οποίος έχει ως εξής:

	S1	G1
S2	1,1	1,2
G2	2,1	0,0

Πίνακας 6.1: Utility Table προτεινόμενου αλγόριθμου.

όπου οι S1 και G1 είναι οι δύο στρατηγικές του Παίκτη 1 και οι S2 και G2 οι δύο στρατηγικές του Παίκτη 2. Το κέρδος που αναγράφεται στο κατάλληλο κελί δίνεται στους παίκτες σύμφωνα με τη στρατηγική που επιλέγουν.

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.1 οι στρατηγικές που μπορούν να επιλέξουν οι παίκτες είναι δυο. Κάθε παίκτης έχει την επιλογή να είναι Άγιος (Saint) ή Άπληστος (Greedy). Στην περίπτωσή μας, ως παίκτες θεωρούμε μια ομάδα παι-

κτών που ζητούν πόρους από τους BS του δικτύου. Οι απαιτήσεις σε πόρους κάθε παίκτη καθορίζονται από τις στρατηγικές του κάθε ενός ξεχωριστά, οι οποίες αθροίζονται στο συνολικό αριθμό των πόρων που χρειάζεται η ομάδα. Θέλουμε να προσομοιώσουμε τις αλληλεπιδράσεις που θα είχαν οι λογικοί παίκτες εφαρμόζοντας αυτές τις δύο μεθόδους στην πράξη. Επειδή ο άπληστος παίκτης είναι εγωκεντρικός και αγνοεί την εξάντληση των πόρων, ζητά περισσότερους πόρους από τους απαραίτητους. Ωστόσο, ο παίκτης που επιλέγει την στρατηγική Αγίου ζητά τον απαραίτητο αριθμό PRB. Οι παίκτες διατηρούν τις μοναδικές στρατηγικές τους ενώ συμμετέχουν στην ομάδα.

Έχοντας πει τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως κάθε επιλογή εμπεριέχει ρίσκο. Ως βέλτιστη θεωρείται η επιλογή αυτή που μειώνει τον εν λόγω κίνδυνο διατηρώντας ή ακόμα και βελτιώνοντας το QoS. Οι παίκτες επιλέγουν τακτικές και φτάνουν σε ένα NE (Nash Equilibrium γνωστό και ως "σημείο ισορροπίας"). Αυτό συμβαίνει επειδή η θεμελιώδης ιδέα επίλυσης προβλημάτων καθώς και η πρόβλεψη συμπεριφοράς παραμένει η ίδια όταν το GT εφαρμόζεται σε πολλά προβλήματα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1 που αναφέρθηκε παραπάνω, το παιχνίδι έχει δύο NE, που είναι οι καταστάσεις (S1, G2) και (S2, G1). Επιπλέον, το διαμορφωμένο παιχνίδι χρησιμοποιεί μια μικτή στρατηγική, που σημαίνει ότι αντί για την επιλογή μιας ενιαίας, προκαθορισμένης επιλογής, η ομάδα επιλέγει με βάση μια κατανομή πιθανοτήτων σε μια σειρά πιθανών ενεργειών.

Ως αποτέλεσμα, ο μηχανισμός που προτείνεται χωρίζει τους παίκτες σε δύο ομάδες. Κάθε ομάδα δεν έχει απαραίτητα τον ίδιο αριθμό συμμετεχόντων. Η στρατηγική Saint ή Greedy που επιλέγουν οι παίκτες τυχαία παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από την ομάδα στην οποία ανήκουν. Η ομάδα εκχωρείται σε ένα BS που μπορεί να τους εξυπηρετήσει εάν τα ζητούμενα PRB δεν υπερβούν το επιλεγμένο όριο.

Η ομάδα συνδέεται με το επιλεγμένο BS εάν το σύνολο των ζητούμενων πόρων είναι μικρότερο από 350. Επιπλέον, εάν μια ομάδα ξεπεράσει τον προκαθορισμένο αριθμό, δεν λαμβάνει τίποτα σύμφωνα με τον αλγόριθμο του επιλεγμένου παιχνιδιού. Ο πίνακας 6.1 περιγράφει τα οφέλη της ομάδας και την κατανομή των πόρων σε περίπτωση που και οι δύο ομάδες συμμετέχουν στο παιχνίδι. Για παράδειγμα, εάν οι G1 και G2 μπορούν να παίξουν το παιχνίδι και να επιλέξουν τη στρατηγική Saint ταυτόχρονα, οι πόροι του δικτύου κατανέμονται εξίσου μεταξύ τους. Η ομάδα G1 λαμβάνει τα 2/3 των πόρων και η ομάδα G2 λαμβάνει το υπόλοιπο 1/3 εάν η ομάδα G1 παίζει άπληστα.

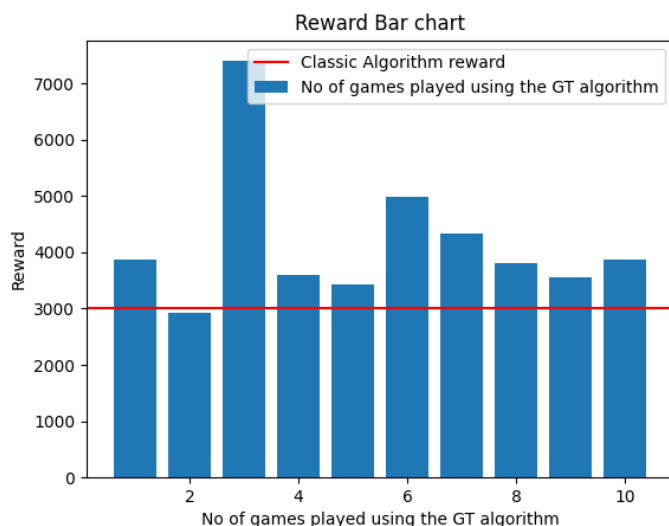
Κεφάλαιο 7

Αποτελέσματα

Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της σύγκρισης που διενεργήθηκε, πρέπει να τεθούν οι παράμετροι της εξομοίωσης στις οποίες βασίστηκε η διαδικασία αυτή. Οι παράμετροι αυτές αναγράφονται στο Κεφάλαιο 5, που περιγράφει την Εξομοίωση και συγκεκριμένα στον Πίνακα 5.1.

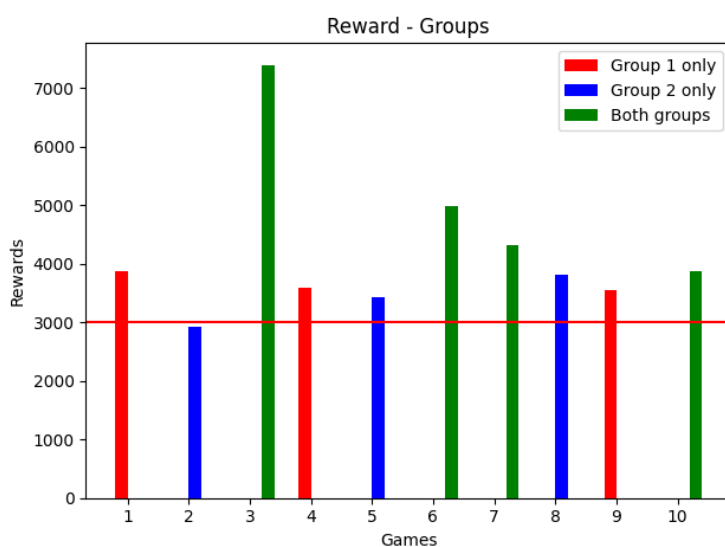
Ο στόχος είναι να αξιολογηθεί η ικανότητα του αλγορίθμου να συσχετίσει και να καταναίμει τους χρήστες σε τρεις διαφορετικές κυψέλες—Macro, Micro και Pico—βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση δεδομένων UE DL και μειώνοντας τη μετάδοση ισχύος BS σε ένα ενιαίο περιβάλλον. Προκειμένου να παρέχει αποτελεσματικά την υπηρεσία που ζητά ο χρήστης, το σύστημα παρακολουθεί επίσης όλα τα PRB. Τέλος, καθορίζονται οι KPI για QoS, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης bit δικτύου και η EE δικτύου. Μέσα στην ακτίνα κυψέλης των 200 μέτρων των MaBS, η οποία είναι οργανωμένη σε ένα εξαγωνικό πλέγμα, τα MiBS, PiBS και οι χρήστες είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένοι. Ο θόρυβος που εισάγεται σε κάθε σήμα που μεταδίδεται από τα BS στο UE έχει κανονική κατανομή.

Το Σχήμα 7.1 συγκρίνει τους δύο αλγόριθμους σχηματίζοντας γραφικά τις ανταμοιβές για καθέναν από αυτούς. Η ανταμοιβή του παραδοσιακού αλγόριθμου RA που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση αντιπροσωπεύεται από την οριζόντια κόκκινη γραμμή. Το έπαθλο που προσφέρει ο αλγόριθμος GT σε ένα σενάριο όπου παίζονται 10 παιχνίδια διαδοχικά απεικονίζεται από τις μπλε ράβδους. Ο αλγόριθμος GT λειτουργεί καλύτερα από τον παραδοσιακό. Λόγω της μεθόδου που χρησιμοποιείται, όταν οι παίκτες ζητούν περισσότερα PRB από τον επιτρεπόμενο αριθμό, δεν συνδέονται και η αμοιβή τους είναι μηδενική.



Σχήμα 7.1: Σύγκριση του κέρδους για τον κάθε αλγόριθμο.

Η ανταμοιβή GT μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αν και οι δύο ομάδες παίζουν το παιχνίδι, πράγμα που σημαίνει ότι ζητούν λιγότερα PRB από το ανώτατο όριο. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι παίκτες διατηρούν τη στρατηγική τους και γίνονται μέλη μιας ομάδας που μπορεί να ζητήσει συγκεκριμένο αριθμό PRB.



Σχήμα 7.2: Συνολικό κέρδος σε σχέση με ομάδες.

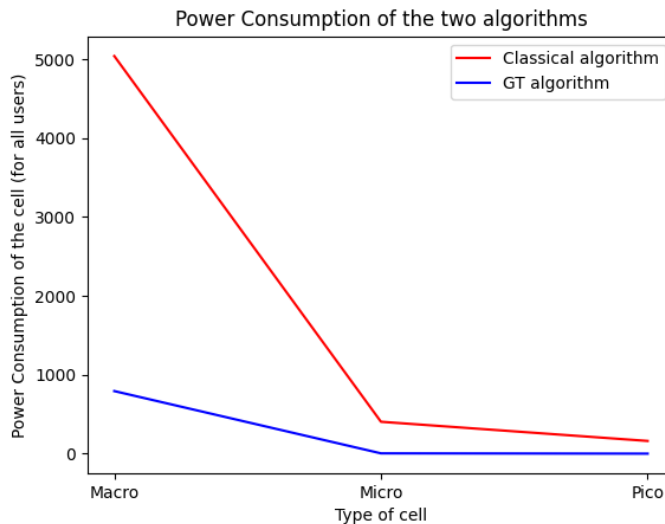
Η σχέση μεταξύ της ποσότητας των ομάδων που συμμετέχουν και των ανταμοιβών που αποκτήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Οι αμοιβές που επισημαίνονται

σε αυτό το γράφημα αντιστοιχούν σε αυτές του Σχήματος 7.1. Το γράφημα δίνει επίσης την συσχέτιση μεταξύ των ανταγωνιστικών ομάδων και της συνολικής ανταμοιβής που κερδίζεται αθροιστικά. Το σχήμα ουσιαστικά απεικονίζει ότι η συμμετοχή και των δυο ομάδων στα παιχνίδια αποφέρει μεγαλύτερες ανταμοιβές.

Το παρόν γράφημα ράβδων χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση της συνολικής πληρωμής κάθε παιχνιδιού χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο GT. Το πράσινο χρησιμοποιείται για να δείξει ότι και οι δύο ομάδες συμμετέχουν στο παιχνίδι. Εάν καμία από τις δύο ομάδες δεν συμμετέχει, το έπαθλο ορίζεται είτε με κόκκινο ή μπλε χρώμα. Το κέρδος της συμβατικής προσέγγισης απεικονίζεται με την κόκκινη οριζόντια γραμμή, πανομοιότυπη με αυτή του Γραφήματος 7.1. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο παραδοσιακός αλγόριθμος RA υπερέχει του προτεινόμενου GT μόνο όταν η ομάδα 2 είναι ο μόνος παίκτης στο παιχνίδι. Αυτό συμβαίνει επειδή η ομάδα 1 ζητά περισσότερα PRB από αυτά που μπορεί να διανείμει ο εκάστοτε BS. Ως αποτέλεσμα, η ομάδα δεν συνδέεται σε BS καθώς σύμφωνα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται δεν πληρούνται οι αναγκαίες προϋποθέσεις.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως φαίνεται από τα γραφήματα στα Σχήματα 7.1 και 7.2. Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση που ο παραδοσιακός αλγόριθμος RA υπερτερεί σε ένα από τα δέκα παιχνίδια που απεικονίζονται. Το Σχήμα 7.2 δείχνει ότι η συνολική ανταμοιβή είναι υψηλότερη στα παιχνίδια όπου και οι δύο ομάδες ζητούν λιγότερα PRB από το ανώτατο όριο σε σύγκριση με τα παιχνίδια όπου μόνο μία ή καμία ομάδα παίζει. Σε περίπτωση που δεν συμμετέχει καμία ομάδα, το έπαθλο είναι μηδενικό επειδή οι συμμετέχοντες δεν έλαβαν υπόψη τους τον κίνδυνο και εξάντλησαν τον πόρο απαιτώντας περισσότερα από όσα τους ήταν απαραίτητα. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορούν να συνδεθούν σε ένα BS και το αντίστοιχο QoS τους είναι 0.

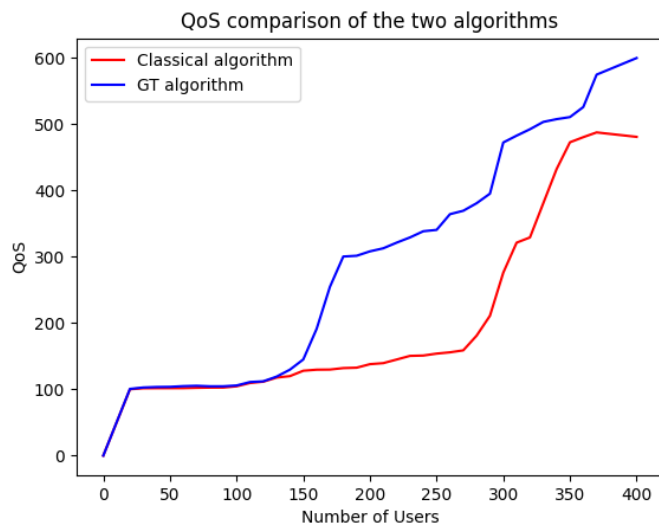
Με την βέλτιστη κατανομή PRB που διαμοιράζονται σε κάθε χρήστη, επιτυγχάνεται EE καθώς και ένας αλγόριθμος GT που εκτελεί καλύτερο RA από έναν κλασικό αλγόριθμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο διαμοιρασμός των PRB επηρεάζει άμεσα τη συνολική χρήση ενέργειας ενός δικτύου. Ανάλογα με τη στρατηγική τους, οι παίκτες μπορούν είτε να ζητήσουν τα απαραίτητα PRB χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο GT είτε να ζητήσουν παραπάνω, με κίνδυνο να εξάντλησουν τον πόρο και το QoS τους να είναι 0.



Σχήμα 7.3: Σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας.

Η κατανάλωση ενέργειας και των δύο αλγορίθμων φαίνεται παραπάνω. Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα, σε σύγκριση με τον παραδοσιακό αλγόριθμο, ο αλγόριθμος GT χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια. Η κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται ως η συνολική ποσότητα ενέργειας που απαιτείται από όλους τους τύπους κυψελών για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών και εξαρτάται από τον αριθμό των PRB που έχουν εκχωρηθεί. Για τον υπολογισμό της ενέργειας που καταναλώνει κάθε BS, χρειάζεται να γίνει πολλαπλασιασμός μεταξύ της ποσότητας που χρειάζεται για κάθε BS για να μεταδώσει ένα μόνο PRB με την ποσότητα PRB που κάθε BS κατανέμει στους UEs. Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος GT διασφαλίζει ότι ο αριθμός των PRB δεν είναι ούτε μεγαλύτερος ούτε μικρότερος από αυτόν που απαιτεί ο κάθε χρήστης, η κατανάλωση ενέργειας διατηρείται χαμηλότερη από ό,τι με μια παραδοσιακή μέθοδο.

Επιπλέον, μια σύγκριση του QoS των δύο τεχνικών φαίνεται στο Σχήμα 7.4. Το γράφημα δείχνει ότι το QoS του προτεινόμενου μηχανισμού αποδίδει καλύτερα από αυτόν του παραδοσιακού αλγορίθμου RA. Έτσι, ακόμη και με περιορισμένη χωρητικότητα δικτύου, ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να κάνει χρήση τεχνικών ή τεχνολογιών που βασίζονται στο δίκτυο για τη ρύθμιση της κυκλοφορίας και τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας κρίσιμων εφαρμογών. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το QoS του προτεινόμενου σχήματος τείνει να αυξάνεται μαζί με τον αριθμό των χρηστών, σε αντίθεση με τον συμβατικό αλγόριθμο, ο οποίος αυξάνεται αλλά με πολύ πιο αργό ρυθμό.



Σχήμα 7.4: Σύγκριση του QoS.

Τέλος, συγκρίνονται τα KPI που ορίστηκαν για το δίκτυο, τα οποία προσφέρουν μια ευρεία εικόνα της λειτουργικότητας του. Οι μετρικές KPIs που ορίζονται είναι το QoS, το συνολικό bitrate των δικτύων και η ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Ο αλγόριθμος GT χρησιμοποιεί συνολικά λιγότερη ισχύ σε σύγκριση με τον κλασικό, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7.4. Ο κλασικός έχει κατανάλωση 5050 kW, ενώ ο προτεινόμενος έχει μόνο 797 kW, σημειώνοντας σημαντική πτώση, όπως προκύπτει από την KPI μετρική που υπολογίστηκε.

Οι τιμές των παρακάτω μετρικών δεν απεικονίζονται σε γραφήματα καθώς μια τιμή συνοψίζει την συνολική λειτουργικότητα του δικτύου. Οι τιμές αυτών των KPIs υπολογίζονται όπως τρέχει το πρόγραμμα και αποθηκεύονται σε αρχεία csv. Επιπλέον, υπολογίζεται το bitrate του δικτύου. Ο ρυθμός μετάδοσης bit, που μετράται σε bit/sec, είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στους υπολογιστές και στις τηλεπικοινωνίες για να περιγράψει την ποσότητα των bit που παραδίδονται ή υποβάλλονται σε επεξεργασία ανά μονάδα χρόνου. Δεδομένου ότι ο ρυθμός μετάδοσης bit και το QoS σχετίζονται στενά, φαίνεται λογικό ότι η προτεινόμενη μέθοδος έχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης bit από τον παραδοσιακό αλγόριθμο RA. Πιο συγκεκριμένα, το bitrate του αλγορίθμου GT είναι 182 bits/sec ενώ του συμβατικού αλγορίθμου RA είναι 167 bits/sec.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

8.1 Ανακεφαλαίωση

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός αλγόριθμου ο οποίος εκτελεί αποδοτικά RA και πετυχαίνει, με τον τρόπο αυτό, μέγιστη συνολική ανταμοιβή σε σχέση με έναν κλασικό αλγόριθμο κατανομής πόρων με τον οποίο συγκρίνεται. Για να ελεγχθεί αποτελεσματικά η απόδοση του αλγορίθμου δημιουργήθηκε και ένας εξομοιωτής, ο οποίος μιμήθηκε τη λειτουργία ενός ετερογενούς δικτύου πέμπτης γενιάς. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι υπεύθυνος για την σύνδεση των χρηστών με τους BSs, αλλά και για τη σωστή κατανομή των PRBs.

Παράλληλα, γίνεται αναφορά στην θεωρία των δικτύων 5G και επιπλέον σε προηγούμενες γενιές δικτύων που έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη της τελευταίας γενιάς. Το 5G άλλαξε ριζικά και τον σχεδιασμό του δικτύου ώστε αυτός να μπορεί να υποστηρίξει τις νέες ανάγκες των χρηστών. Ακόμα, εξετάστηκαν οι τρέχουσες τεχνολογίες δικτύου και πως αυτές ενσωματώθηκαν στα δίκτυα 5G αλλά και στον εξομοιωτή που κατασκευάστηκε. Επίσης, μελετήθηκαν οι τεχνολογίες MIMO και DUDe ως δυο πολύ σημαντικές τεχνολογίες, που έχουν την καλύτερη ανάπτυξη σε δίκτυα 5G.

Για την ανάπτυξη του προτεινόμενου αλγορίθμου κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη της ιστορίας του GT και κάποιων γνωστών παιχνιδιών για την βαθύτερη κατανόηση των εννοιών που αυτό πραγματεύεται. Αναλύονται συνεπώς οι κατηγορίες που διαφοροποιούν τα παιχνίδια και δίνονται μερικά παραδείγματα τους. Η κατη-

γορία στην οποία ανήκει το παιχνίδι, στο οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη του αλγορίθμου, είναι το μη συνεργατικό και ανταγωνιστικό μεταξύ των παικτών παιχνίδι.

Πολύ σημαντική για αυτήν την διπλωματική, είναι η ανάπτυξη του εξομοιωτή, ο οποίος κατασκευάστηκε για να χρησιμεύσει ως περιβάλλον αλληλεπίδρασης και δίνει την δυνατότητα αντικειμενικής σύγκρισης μεταξύ των δυο αλγορίθμων. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως ο εξομοιωτής συμμορφώνεται με τα πρότυπα δικτύου 5G. Παρουσιάστηκαν 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.

Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη του αλγορίθμου βασίστηκε σε ένα ήδη υπάρχον παιχνίδι που καλείται "Τραγωδία των Κοινών", στο οποίο πραγματοποιήθηκαν αλλαγές. Έγινε αριθμός δοκιμών με χρήση τυχαίων συναρτήσεων, τα οποία απέδειξαν πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος απέδωσε καλύτερα τις περισσότερες -αν όχι όλες- τις φορές. Τέλος, παρουσιάστηκαν γραφήματα, που αναφέρονται σε πτυχές της μεθόδου καθώς και στην επίδραση του μηχανισμού στο προσομοιωμένο δίκτυο.

8.2 Συμπεράσματα

Η μαζική κίνηση δεδομένων, οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση είναι βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα 5G. Για να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, απαιτείται μια ποικιλία νέων προσεγγίσεων και βελτιώσεων σε μεθόδους που μπορούν να εφαρμοστούν πρακτικά και είναι ρεαλιστικές.

Για τον λόγο αυτό απαιτείται μια καινοτόμος ιδέα που θα μεταμορφώσει πλήρως τους τρέχοντες αλγόριθμους και αυτή είναι η ενσωμάτωση του GT, η οποία όπως φαίνεται από την παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στους προϋπάρχοντες αλγόριθμους RA. Σε αυτή την έρευνα, παρουσιάζεται μια μοναδική μέθοδος GT που βελτιώνει την EE και καταφέρνει να μεγιστοποιήσει την απόδοση του RA μέσω καλύτερης κατανομής PRB.

Εκτός από τον αλγόριθμο αναπτύχθηκε ένα εργαλείο προσομοίωσης που μιμείται τη λειτουργία ενός 5G HetNet. Τα αποτελέσματα που παρέχονται είναι επαρ-

κής αιτιολόγηση για την ανώτερη απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου έναντι του παραδοσιακού RA. Αυτό φαίνεται λεπτομερώς και στα γραφήματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7, τα οποία συνοδεύονται από την ανάλυση τους, η οποία συμπεριλαμβάνει και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πιο αναλυτικά, το γράφημα 7.1 συγκρίνει τις ανταμοιβές που κερδίζονται και από τα δυο παιχνίδια σε ένα σύστημα όπου εισάγεται τυχαιότητα. Εισάγοντας τυχαιότητα εξασφαλίζεται πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος GT αποδίδει καλύτερα αφού σε συνθήκες οι οποίες δεν είναι ελεγχόμενες, παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση.

Παράλληλα, το γράφημα 7.3 συγκρίνει την κατανάλωση ενέργειας των δυο αλγορίθμων, η οποία υπολογίζεται ως η συνολική ποσότητα ενέργειας που απαιτείται από όλους τους τύπους κυψελών για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών και εξαρτάται από τον αριθμό των PRB που έχουν εκχωρηθεί. Ο αλγόριθμος GT κάνει διαμοιρασμό PRB και άρα διασφαλίζει ότι ο αριθμός των PRB δεν είναι ούτε μεγαλύτερος ούτε μικρότερος από αυτόν που απαιτεί ο κάθε χρήστης. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα ο προτεινόμενος αλγόριθμος να έχει καλύτερη απόδοση από τον κλασικό κάτι που φαίνεται και στο συγκεκριμένο γράφημα.

Ακόμα, γίνεται σύγκριση του QoS στο γράφημα 7.4. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης αποδεικνύει την υπεροχή του προτεινόμενου αλγορίθμου στην σύγκριση του με τον κλασικό. Συνεπώς ανεξάρτητα από την περιορισμένη χωρητικότητα δικτύου, ο GT αλγόριθμος χρησιμοποιεί τεχνολογίες και τεχνικές που εξασφαλίζουν την σωστότερη ρύθμιση της πληροφορίας και του διαμοιρασμού πόρων. Το QoS του προτεινόμενου σχήματος τείνει να αυξάνεται με τον αριθμό των χρηστών, σε αντίθεση με τον συμβατικό αλγόριθμο, ο οποίος αυξάνεται αλλά με πολύ πιο αργό ρυθμό.

Τέλος, παρουσιάζονται και τα KPI που ορίστηκαν για το δίκτυο και προσφέρουν μια ευρεία εικόνα της λειτουργικότητας του δικτύου. Συγκεκριμένα και η ισχύς του GT αλγορίθμου αλλά και το bitrate του είναι καλύτερο σε σχέση με αυτό του κλασικού αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 9

Μελλοντική Εργασία

Μια ιδέα για πιθανή μελλοντική εργασία είναι η ανάπτυξη έξυπνων πρακτόρων που μπορούν να εκτιμήσουν τον κίνδυνο και να συνεργαστούν για να μοιραστούν πεπερασμένους πόρους αποτελεσματικά και δίκαια. Επιπλέον, μειώνεται η υπερκατανάλωση των πόρων του δικτύου και διαχειρίζεται η ευθραυστότητα του φάσματος. Επομένως, όταν χρησιμοποιούν το φάσμα, οι χρήστες υιοθετούν συμπεριφορά αναζήτησης κινδύνου αντί να ενεργούν ως τυφλοί μεγιστοποιητές κέρδους.

Η συμβολή του ML συνεπώς θα είναι καθοριστική αφού οι παίκτες ατομικά θα έχουν την δυνατότητα να αντιλαμβάνονται το κοινωνικό αντίκτυπο της συμπεριφοράς τους. Μια πιο εγωιστική και ωφελμιστική ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά για το δίκτυο αποτελέσματα, στην περίπτωση που εξαντληθεί ο πόρος που διαμοιράζεται. Συνεπώς είναι στην ευχέρεια των παικτών να προσπαθήσουν να διαμορφώσουν την στρατηγική τους όσο παίζουν με τέτοιο τρόπο ώστε να κερδίζουν τα μέγιστα και να μην διακυνδυνεύουν την εξάντληση του πόρου.

Ακόμα, συνιστάται να γίνει μελέτη τοπολογιών πολύ πιο σύνθετων, οι οποίες συγκρίνουν αντικειμενικά τους δυο αλγορίθμους καθώς προσομοιάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις συνθήκες των πραγματικών συστημάτων. Στόχος είναι σε αυτές τις πολύ δύσκολες συνθήκες να βρεθούν αλγόριθμοι που ενσωματώνουν το GT, οι οποίοι μπορούν να παρέχουν, σε σύγκριση με τους κλασικούς, χαμηλότερη πολυπλοκότητα στο δίκτυο.

Παράλληλα, έχει αξία η ανάπτυξη διαφορετικών GT αλγορίθμων. Αυτοί υλοποιούν νέα είτε ήδη υπάρχοντα παιχνίδια και πραγματοποιούν την μεταξύ τους

σύγκριση. Το GT φαίνεται ότι μπορεί να συμβάλλει στην βελτίωση του RA, άρα μια τέτοια εργασία, η οποία συγκρίνει διαφορετικούς αλγόριθμους, θα βοηθούσε στην βελτίωση της απόδοσης κατανομής πόρων. Τέλος, θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος GT, ο οποίος να μην κατανέμει μόνο έναν πόρο αλλά πολλαπλούς και με αυτόν τον τρόπο να στοχεύει στην βελτίωση της κατανομής πολλαπλών πόρων δικτύου.

Οι παραπάνω μελέτες θα βοηθήσουν σημαντικά στην βελτίωση της κατανομής των πόρων του δικτύου. Η εισαγωγή τεχνικών όπως GT και ML μπορούν να αυξήσουν κατά πολύ την απόδοση και να κάνουν τα δίκτυα δικαιότερα, γρηγορότερα και αποτελεσματικότερα ώστε να εξυπηρετούν τα UE παρέχοντας υπηρεσίες υψηλού επιπέδου.

Βιβλιογραφία

- [1] *Widely/FCC Report*.
- [2] K.J. Ray Liu Zhu Han. *Resource Allocation for Wireless Networks: Basics, Techniques and Applications*.
- [3] 3GPP TS 36.300. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN)*. 2011.
- [4] Andrews J. Chandrasekhar V. *Femtocell networks: A survey*. 2008, σσ. 59–67.
- [5] Larry Peterson και Oğuz Sunay. *5G Mobile networks: a systems approach*. Τόμ. 1. 1. Morgan & Claypool Publishers, 2020.
- [6] Peter Orosz et all. *QoS Guarantees for Industrial IoT Applications over LTE-a Feasibility Study*. 2019.
- [7] Mansoor Shafi και Andreas F. et all Molisch. "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice". Στο: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.6 (2017). 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). DOI: [10.1109/COMST.2016.2532458](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458).
- [9] F. Tufvesson E. G. Larsson O. Edfors και T. L. Marzetta. *Massive MIMO for next generation wireless systems*. 2014. DOI: [10.1109/MCOM.2014.6736761](https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761).
- [10] G. Y. Li L. Lu. *Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges*. 2014. DOI: [10.1109/JSTSP.2014.2317671](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2317671).
- [11] A.J. PAULRAJ κ.ά. *An Overview of MIMO Communications—A Key to Gigabit Wireless*. Τόμ. 92. Μαρ. 2004. DOI: [10.1109/JPROC.2003.821915](https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.821915).
- [12] Anatolij Zubow. *Downlink MIMO in IEEE 802.11ac-Based Infrastructure Networks*. Δεκ. 2015. DOI: [10.1109/GLOCOM.2015.7416948](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2015.7416948).

- [13] M. Sawahashi κ.ά. *Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-advanced*. Τόμ. 17. 3. 2010.
- [14] David Gesbert κ.ά. *Shifting the MIMO paradigm*. Τόμ. 24. Οκτ. 2007, σσ. 36–46. DOI: [10.1109/MSP.2007.904815](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.904815).
- [15] Marco Giordani κ.ά. *Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies*. Τόμ. 58. 3. 2020. DOI: [10.1109/MCOM.001.1900411](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411).
- [16] M. Polese et al. *Integrated Access and Backhaul in 5G mmWave Networks: Potential and Challenges*. Τόμ. 58. 3. 2020. DOI: [10.1109/MCOM.001.1900346](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900346).
- [17] Fredrik Rusek κ.ά. *Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays*. Τόμ. 30. 1. 2013. DOI: [10.1109/MSP.2011.2178495](https://doi.org/10.1109/MSP.2011.2178495).
- [18] Caire Giuseppe κ.ά. *Multiuser MIMO Achievable Rates With Downlink Training and Channel State Feedback*. Τόμ. 56. 6. 2010. DOI: [10.1109/TIT.2010.2046225](https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2046225).
- [19] E. G. Larsson H. Q. Ngo και T. L. Marzetta. *Uplink power efficiency of multiuser MIMO with very large antenna arrays*.
- [20] S. Parkvall E. Dahlman και J. Skold. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. 2013.
- [21] Claussen Holger κ.ά. *Ultra-Dense Networks*. Νοέ. 2017. DOI: [10.1002/9781119307600.ch16](https://doi.org/10.1002/9781119307600.ch16).
- [22] Smiljkovikj Katerina, Popovski Petar και Gavrilovska Liljana. *Analysis of the Decoupled Access for Downlink and Uplink in Wireless Heterogeneous Networks*. Τόμ. 4. 2014. DOI: [10.1109/LWC.2015.2388676](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2388676).
- [23] Boccardi Federico κ.ά. *Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it*. Τόμ. 54. 3. 2016. DOI: [10.1109/MCOM.2016.7432156](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7432156).
- [24] Andrews Jeffrey G. κ.ά. *What Will 5G Be?* Τόμ. 32. 6. 2014. DOI: [10.1109/JSAC.2014.2328098](https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098).
- [25] R. B. Myerson. *Game theory: analysis of conflict*. Harvard university Press, 1997.
- [26] M. J. Osborne. *Introduction to Game Theory*. 2004.
- [27] Goswami et. all. *Review of game theoretical applications in communication systems*. 2014.
- [28] Allen Mackenzie και Luiz Dasilva. ``Game Theory for Wireless Engineers''. Στο: *Synthesis Lectures on Communications 1* (Ιαν. 2006). DOI: [10.2200/S00014ED1V01Y200508COM00](https://doi.org/10.2200/S00014ED1V01Y200508COM00)
- [29] Duncan Snidal. *Coordination versus Prisoners Dilemma: Implications for International Cooperation and Regimes*. Cambridge University Press, 1985, σσ. 923–942.

- [30] Eric Van Damme. *A relation between perfect equilibria in extensive form games and proper equilibria in normal form games*. Springer, 1984, σσ. 1–13.
- [31] Akramizadeh Ali, Menhaj Mohammad -B. και Afshar Ahmad. *Multiagent reinforcement learning in extensive form games with complete information*. 2009. DOI: [10.1109/ADPRL.2009.4927546](https://doi.org/10.1109/ADPRL.2009.4927546).
- [32] Mariano Pedro, Nunes Davide και Correia Luís. *A comparison of public and private partner selection models in the Battle of Sexes game*. 2014, σσ. 518–523. DOI: [10.1109/ICoCS.2014.7060989](https://doi.org/10.1109/ICoCS.2014.7060989).
- [33] Christopher G. Harris. *Developing a Repeated Multi-agent Constant-Sum Game Algorithm Using Human Computation*. 2012, σσ. 390–394. DOI: [10.1109/WI-IAT.2012.175](https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2012.175).
- [34] Xiao-yan Zhang. *A note on dynamic zero-sum games*. 2009, σσ. 4758–4760. DOI: [10.1109/CCDC.2009.5194849](https://doi.org/10.1109/CCDC.2009.5194849).
- [35] et all Altman. *Symmetric games with networking applications*. 2011, σσ. 1–5.
- [36] Dimitris E Charilas και Athanasios D Panagopoulos. *A survey on game theory applications in wireless networks*. Τόμ. 54. 18. Elsevier, 2010, σσ. 3421–3430.
- [37] *3GPP Release 16*.
- [38] Jens Bartelt κ.ά. *5G transport network requirements for the next generation fronthaul interface*. Τόμ. 2017. 1. SpringerOpen, 2017, σσ. 1–12.
- [39] *3GPP TR 38.901 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*.
- [40] *3GPPP 38.104, Table 5.3.3-1: Minimum guardband [kHz] (FR1) and Table: 5.3.3-2: Minimum guardband [kHz] (FR2)*.
- [41] http://www.cost.eu/domains_actions/ict/Actions/231.
- [42] http://www.lx.it.pt/cost231/final_report.htm.
- [43] Apostolopoulos Pavlos Athanasios κ.ά. *Data Offloading in UAV-assisted Multi-access Edge Computing Systems under Resource Uncertainty*. Τόμ. PP. Μαρ. 2021. DOI: [10.1109/TMC.2021.3069911](https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3069911).