



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

Διπλωματική Εργασία

Κατανομή πόρων σε δίκτυα 5ης γενιάς χρησιμοποιώντας την τεχνική αποσύνδεσης ανερχόμενης κατερχόμενης ζεύξης (DUDe).

Κωνσταντίνος Τσαχρέλιας

A.M.1096511

Επιβλέπων

Μπούρας Χρήστος

Συνεπιβλέπων

Σκλάβος Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Μέλος Επιτροπής Αξιολόγησης

Καθηγητής, Γκάμας Απόστολος

Πάτρα, 2023

© Copyright συγγραφή Τσαχρέλιας Κωνσταντίνος, 2023

© Copyright θέματος Μπούρας Χρήστος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Πάτρα 2023
Κωνσταντίνος Τσαχρέλιας

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών στο πρόγραμμα σπουδών ΥΔΑ(Υπολογιστική Δεδομένων και Αποφάσεων) του Τμήματος Μηχανικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών.

Ο τίτλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι «Κατανομή πόρων σε δίκτυα 5ης γενιάς χρησιμοποιώντας την τεχνική αποσύνδεσης ανερχόμενης κατερχόμενης ζεύξης (DUDe)». Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου, πτυχιούχο και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών, Επιστημονικό Υπεύθυνο της Μονάδας 6 του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων και Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντάς μου το θέμα της διπλωματικής μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Σκλάβο καθώς και τον κ. Απόστολο Γκάμα των οποίων η βοήθεια και η υποστήριξη ήταν καθοριστική για την υλοποίηση αυτής της διπλωματικής. Μου έδωσαν ιδέες και τρόπους για να ξεκινήσω αυτή τη δουλειά καθώς και συμβουλές για την σωστή της δόμηση.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική πραγματοποιήθηκε εν όψει της ανάγκης βελτίωσης της ανθρώπινης επικοινωνίας και κατά συνέπεια στόχος ήταν η βελτιστοποίηση των τεχνολογιών των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων που τη διευκολύνουν. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση που περιγράφεται και αναλύεται στην εν λόγω διπλωματική είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας αποσύνδεσης κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης, η οποία όχι μόνο προσφέρει πιο ομαλή κατανομή των χρηστών μεταξύ των κεραιών ενός δικτύου 5ης γενιάς, αλλά είναι και πιο ενεργειακά αποδοτική από την υπάρχουσα τεχνολογία σύζευξης κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης, αφήνοντας έτσι θετικό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Επίσης, η διπλωματική καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία (downlink / uplink decoupling), μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου, τόσο σε πόρους όσο και σε τελικούς χρήστες, με τη προσθήκη μικρών κυψελών σε απρόσιτα σημεία, καθώς αυξάνει τη γενική απόδοση και την εμβέλεια του δικτύου, πάντα σε σύγκριση με τη σύζευξη τεχνολογίας (downlink / uplink coupling).

Abstract

The specific thesis work was carried out in view of the need to improve human communication and consequently the goal was to optimize the technologies of the telecommunication networks that facilitate it. In particular, the optimization which is described and analyzed in said diploma is the application of the downlink/uplink decoupling technology, which not only offers a smoother distribution of users between the antennas in a 5th generation network but is also more energy efficient than the existing downlink/uplink coupling technology, thus leaving a positive footprint on the environment. Also, the thesis concludes that this specific technology (downlink / uplink decoupling), can increase the capacity of the network, even if some small cells are inaccessible, as it increases its general performance, always in comparison with the downlink / uplink technology coupling.

Περιεχόμενα

<i>1</i>	<i>vii</i>
<i>Εισαγωγή</i>	<i>vii</i>
<i>2</i>	<i>1</i>
<i>Η εξέλιξη των ασύρματων κινητών δικτύων</i>	<i>1</i>
2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	1
2.2 Κυψελωτά δίκτυα πρώτης γενιάς (1G).....	4
2.3 Κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G).....	5
2.4 Κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G).....	7
2.5 Κυψελωτά δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G).....	9
2.6 Κυψελωτά δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G).....	11
<i>3</i>	<i>15</i>
<i>Υλοποίηση Ασύρματων Κινητών Δικτύων</i>	<i>15</i>
3.1 Ορισμός του λόγου σήματος προς θόρυβο και η χρησιμότητα του στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.....	15
3.2 Εισαγωγή στις τεχνικές υλοποίησης.....	19
3.2.1 Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας.....	20
3.2.2 Πολλαπλή πρόσβαση σε ορθογώνια διαίρεση συχνότητας.....	23
3.2.3 Τεχνική διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing).....	24
3.2.4 Τεχνική διαίρεσης συχνότητας (Frequency-Division Duplexing).....	26
<i>4</i>	<i>29</i>
<i>Αποσύνδεση της ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης</i>	<i>29</i>
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας στα ετερογενή δίκτυα.....	29
4.2 Τα σημαντικότερα οφέλη της διαχώρισης της ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης.....	33
4.3 Έρευνες συναφείς με την τεχνολογία DUDe.....	35
<i>5</i>	<i>39</i>
<i>Αξιολόγηση αποσύνδεσης ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης</i>	<i>39</i>
5.1 Περιβάλλον Εξομοίωσης.....	39
5.1.1 Παράμετροι Εξομοίωσης.....	40
5.1.1 Ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου των σεναρίων.....	43

5.2 Πειράματα κατανομής χρηστών.....	45
5.2.1 Ανάλυση του αλγορίθμου για την υλοποίηση των σεναρίων	45
5.2.2 Σύγκριση των τεχνολογιών DUDe και DUCo με βάση την κατανομή χρηστών..	46
5.2.3 Σύγκριση της τεχνολογίας DUDe και DUCo με βάση των περιορισμό της χωρητικότητας των κεραιών.....	51
5.3 Πειράματα κατανομής εύρους ζώνης (bandwidth).....	53
5.3.1 Ανάλυση του αλγορίθμου των σεναρίων.....	54
5.3.2 Σύγκριση της τεχνολογίας DUDe με DUCo για την κατανομή του εύρους ζώνης.	57
6.....	63
<i>Συμπεράσματα και Προοπτικές.....</i>	63
6.1 Σύνοψη	63
6.2 Τελικά συμπεράσματα.....	63
6.3 Μελλοντική Εργασία.....	64
<i>Βιβλιογραφία- Αναφορές</i>	67
<i>Σύντομο Βιογραφικό Συγγραφέα.....</i>	80

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Παράδειγμα ενός κυψελώδους ασύρματου κινητού δικτύου.....	3
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου 4ης γενιάς.....	11
Εικόνα 3. Απεικόνιση της εξέλιξης των κινητών δικτύων τηλεπικοινωνίας.....	13
Εικόνα 4. Απεικόνιση της εξέλιξης των κινητών δικτύων τηλεπικοινωνίας.....	14
Εικόνα 5: διάγραμμα αναπαράστασης ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας.....	23
Εικόνα 6 Συγκριτική αναπαράσταση για την πολλαπλή πρόσβαση σε ορθογώνια διαίρεση συχνότητας.....	24
Εικόνα 7: Συγκριτική αναπαράσταση της τεχνικής διαίρεσης χρόνου.....	26
Εικόνα 8: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση της τεχνικής διαίρεσης συχνότητας.....	28
Εικόνα 9: Γραφική αναπαράσταση της τεχνολογίας DUDe.....	31
Εικόνα 10: γραφικής αναπαράσταση ενός ετερογενούς δικτύου 5ης γενιάς.....	32
Εικόνα 11: Γραφική αναπαράσταση της εφαρμογής της τεχνολογίας διαχώρισης της κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης.....	35
Εικόνα 12: Γραφική αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου.....	42
Εικόνα 13: Συγκριτική αναπαράσταση για την μέση κατανομή $N = 100$ UE.....	47
Εικόνα 14: Συγκριτική αναπαράσταση για την μέση κατανομή $N = 1000$ UE.....	48
Εικόνα 15: Συγκριτική αναπαράσταση για την μέση κατανομή $N = 2000$ UE.....	48
Εικόνα 16: Σύγκριση DUCo/DUDe για $N=100$ UE.....	52
Εικόνα 17: Σύγκριση DUCo/DUDe για $N=1000$ UE.....	52
Εικόνα 18: Σύγκριση DUCo/DUDe για $N=2000$ UE.....	53
Εικόνα 19: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 1 και $N = 100$ UE.....	58
Εικόνα 20: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 2 και $N = 100$ UE.....	58
Εικόνα 21: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 1 και $N = 200$ UE.....	59
Εικόνα 22: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 2 και $N = 200$ UE.....	60
Εικόνα 23: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 1 και $N = 400$ UE.....	60
Εικόνα 24: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 2 και $N = 400$ UE.....	61

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι εκτέλεσης των προσομοιώσεων.....	42
Πίνακας 2: Τιμές για τις υπηρεσίες των χρηστών.....	54

Συντομογραφίες

3 GPP	3RD Generation Partnership Project
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
DL	Downlink
DUCo	Downlink/Uplink Coupling
DUDe	Downlink/Uplink Decoupling
D2D	Device-to-Device
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	General Packet Radio Service
IoT	Internet Of Things
FDD	Frequency Division Duplexing
HetNet	Heterogeneous Network
LTE	Long Term Evolution
MIMO	MIMO (Multiple in Multiple Output)
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SFBS	Space Frequency Block Coding
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
TDD	Time Division Duplexing
UE	User Equipment
UL	Uplink
RB	Resource Block
VDSL	Very High-Bit-Rate Digital Subscriber Line
QoS	Quality of Service
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WAP	Wireless Application Protocol
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN

Wireless Local Area Network

WCDMA

Wideband Code Division Multiple Access

1

Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των δικτύων 5G έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ζήτησης για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μικρή καθυστέρηση και βελτιωμένη συνολική απόδοση του δικτύου. Ο αναδυόμενος τομέας νέων εφαρμογών, όπως αυτόνομα οχήματα και η εικονική πραγματικότητα, απαιτεί την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης και αποδοτικής υποδομής 5G. Σε αυτό το πλαίσιο, τα ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous Network ή HetNets) αποτελούν μια ελπιδοφόρα λύση για την παροχή βελτιώσεων κάλυψης και χωρητικότητας στα δίκτυα 5G. Τα HetNets χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη διαφορετικών τύπων σταθμών βάσεων, όπως macro cell, micro cell, pico cell κ.α., για την κάλυψη διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών και αριθμού χρηστών. Ένας από τους κύριους στόχους στα HetNets είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων, με τέτοιο τρόπο που να παρέχει, από την μια μεγαλύτερη απόδοση, αλλά ταυτόχρονα και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Οι παραδοσιακές τεχνικές κατανομής πόρων, όπως η σύζευξη ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης κ.α. έχουν περιορισμένες δυνατότητες για να παρέχουν αποτελεσματικές και αποδοτικές λύσεις για τα δίκτυα 5G. Αυτές οι τεχνικές δεν λαμβάνουν υπόψη τις προτιμήσεις των χρηστών και τις συνθήκες του δικτύου, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη κατανομή πόρων. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, έχει προταθεί μια νέα τεχνολογία που ονομάζεται αποσύνδεση ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης (Downlink/Uplink Decoupling ή DUDe). Το DUDe είναι μια λύση που βελτιστοποιεί την κατανομή εύρους ζώνης στα HetNets, προσαρμόζοντας δυναμικά την κατανομή των πόρων του δικτύου, ανάλογα με τη ζήτηση των χρηστών και της συνθήκες του δικτύου. Το DUDe λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους, όπως η τοποθεσία του χρήστη, ο θόρυβος, η ισχύς του σήματος και ο φόρτος του δικτύου, για να προσδιορίσει τη βέλτιστη κατανομή των πόρων. Το DUDe μπορεί να χρησιμοποιήσει αλγόριθμους μηχανικής μάθησης και άλλες προηγμένες τεχνικές για να λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο για την κατανομή πόρων. Η τεχνολογία DUDe προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές κατανομής πόρων, μπορεί να προσαρμοστεί σε μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου σε πραγματικό χρόνο και να κατανέμει πόρους βάσει των προτιμήσεων των χρηστών και των συνθηκών του δικτύου. Επιπλέον, το DUDe μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του δικτύου μειώνοντας την καθυστέρηση, αυξάνοντας τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και βελτιώνοντας την εμπειρία του χρήστη.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι να αποδείξει ότι η τεχνολογία DUDe επιτυγχάνει πιο αποδοτική και ομαλή κατανομή πόρων σε σχέση με την τεχνολογία σύζευξης ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης (Downlink/Uplink Coupling ή DUCo) ανεξάρτητα από τον αριθμό των χρηστών εντός του δικτύου. Ένα άμεσο αποτέλεσμα αυτού

είναι ότι χρησιμοποιούνται χαμηλότερα επίπεδα πόρων από τις macro cell κεραιές, και συνεπώς υπάρχει μεγαλύτερο απόθεμα αυτών για να εξυπηρετηθούν καλύτερα οι υπάρχοντες χρήστες και οι πιθανοί νέοι χρήστες που θα εισέλθουν στο δίκτυο. Η συνεισφορά στην επιστημονική κοινότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς τονίζει την αναγκαιότητα εφαρμογής της τεχνολογίας DUDe στα δίκτυα της 5ης γενιάς. Με την καλύτερη κατανομή των πόρων, μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη απόδοση του δικτύου, αύξηση της χωρητικότητάς του και μείωση της καθυστέρησης. Επίσης ο αναγνώστης αυτής της διπλωματικής είναι σε θέση να εμβαθύνει στις γενικότερες αρχές και τεχνικές πάνω στις οποίες δημιουργούνται τα κυψελοειδή δίκτυα.

Το υπόλοιπο της διπλωματικής δομείτε ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή στα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, στο Κεφάλαιο 3 έχουμε την αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών πάνω στις οποίες βασίζονται τα κυψελοειδή δίκτυα και εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα, το Κεφαλαίο 4 ξεκινάει με μια αναλυτική παρουσίαση της τεχνικής DUDe και εστιάζει αφενός στον λόγο για τον οποίο είναι καινοτόμα, αλλά και αφετέρου παρουσιάζονται αναλυτικά τα οφέλη που την κάνουν να ξεχωρίζει από τις ήδη υπάρχουσες τεχνικές, στο Κεφάλαιο 5 έχουμε την παρουσίαση και ανάλυση των πειραμάτων και η διπλωματική καταλήγει με τα τελικά συμπεράσματα καθώς και με πιθανή μελλοντική έρευνα που θα βοηθήσει σε περαιτέρω βελτιστοποίηση των δικτύων 5^{ης} γενιάς στο κεφάλαιο 6. Στο τέλος παρατίθεται παράρτημα, το οποίο περιέχει μέρος του κώδικα των υλοποιήσεων, καθώς και βιβλιογραφία.

2

Η εξέλιξη των ασύρματων κινητών δικτύων

2.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η ιστορία των κυψελοειδών δικτύων μπορεί να εντοπιστεί στις αρχές του 20ου αιώνα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών. Αρχικά έχουμε τη πρώτη γενιά κυψελοειδών δικτύων 1G, η οποία ήταν αναλογική και αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980. Αυτά τα δίκτυα βασίστηκαν στην ιδέα της διαίρεσης μιας περιοχής επικοινωνίας-σύνδεσης χριστών με τις κεραίες μετάδοσης σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κυψέλες, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από έναν πομπό/δέκτη χαμηλής ισχύος. Μία από τις βασικές καινοτομίες των δικτύων 1G ήταν η χρήση της πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiplexing ή FDM) που επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς να παρεμβολές μεταξύ τους. Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και ταυτόχρονα αύξησε τη χωρητικότητα του δικτύου. Ωστόσο, τα δίκτυα 1G είχαν αρκετούς περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της κακής ποιότητας κλήσεων, της περιορισμένης χωρητικότητας ανεξάρτητα από το γεγονός της προφανής αύξησης της και της έλλειψης ασφάλειας, που οδηγούσε σε πολλά περιστατικά υποκλοπών κλήσεων και την καταφανή παραβίαση της ιδιωτικότητας του ατόμου [1].

Στην συνέχεια η εξέλιξη της επιστήμης των ασύρματων τηλεπικοινωνιών μας έφερε την δεύτερη γενιά κυψελοειδών δικτύων 2G, η οποία ήταν ψηφιακή και αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1990. Τα δίκτυα 2G έφεραν αρκετές βελτιώσεις σε σχέση με το 1G, όπως καλύτερη ποιότητα κλήσεων, αυξημένη χωρητικότητα και βελτιωμένη ασφάλεια. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία 2G ήταν το Global System for Mobile Communications (GSM), το οποίο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες ακόμη και στις μέρες μας. Επίσης υπάρχει και η Code Division Multiple Access (CDMA) ήταν μια άλλη δημοφιλής μορφή τεχνολογίας 2G, η οποία χρησιμοποιήθηκε κυρίως στη Βόρεια Αμερική. Τα δίκτυα 2G εισήγαγαν επίσης την έννοια της Short Message Service (SMS), γνωστή ως σύντομα γραπτά μηνύματα, η οποία ήταν και είναι μέχρι και τις μέρες μας, ένας δημοφιλής τρόπος για τους χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους, μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων. Με την αυξημένη χωρητικότητα και τη βελτιωμένη ασφάλεια των δικτύων 2G, άνοιξε ο δρόμος για μια ποικιλία νέων υπηρεσιών, όπως το mobile banking.

Τα επόμενα χρόνια η ανάγκη για βελτιστοποίηση των προηγούμενων τεχνολογιών δημιούργησε τα δίκτυα 3G. Αύτη η τρίτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 και έφερε ακόμη περισσότερες βελτιώσεις σε σχέση με το 2G. Συγκεκριμένα τα δίκτυα 3G αύξησαν τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων, επιτρέποντας ταχύτερη πρόσβαση στο Διαδίκτυο και τη δυνατότητα μετάδοσης εφαρμογών μεγάλων δεδομένων, όπως ροή βίντεο(streaming) και μουσικής. Τεχνολογίες 3G όπως το Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) και το CDMA2000 υιοθετήθηκαν ευρέως σε όλο τον κόσμο.

Τα δίκτυα 4G, η τέταρτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, άρχισαν να αναπτύσσονται τη δεκαετία του 2010. Το 4G έφερε σημαντικές βελτιώσεις στην ταχύτητα και τη χωρητικότητα, με ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων έως και 100 φορές ταχύτερους από το 3G. Αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη ακόμη πιο προηγμένων εφαρμογών, όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας και εικονική πραγματικότητα. Τεχνολογίες 4G όπως το Long-Term Evolution (LTE) και το Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές χώρες σήμερα. Το 5G είναι η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας και αυτή τη στιγμή αναπτύσσεται σε όλο τον κόσμο. Με ακόμη υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο από το 4G, το 5G αναμένεται να επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης, όπως αυτοδηγούμενα αυτοκίνητα, βιομηχανικούς αυτοματισμούς και τηλεϊατρική. Το 5G βασίζεται σε μια ποικιλία τεχνολογιών, όπως mmWave, Massive Multi Input Multi Output (MIMO) και beamforming, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και αυξημένη χωρητικότητα.

Καθώς τα κυψελωτά δίκτυα συνεχίζουν να εξελίσσονται και να βελτιώνονται, αλλάζουν και οι τρόποι με τους οποίους τα χρησιμοποιούν οι άνθρωποι και οι οργανισμοί. Μια σημαντική τάση τα τελευταία χρόνια είναι η αυξανόμενη χρήση κινητών συσκευών για δραστηριότητες όπως η κοινωνική δικτύωση, οι ηλεκτρονικές αγορές μέσω κινητού τηλεφώνου. Αυτό οδήγησε σε αύξηση του όγκου των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας, καθώς και στην ανάγκη για ταχύτερες και πιο αξιόπιστες συνδέσεις.

Μια άλλη τάση ήταν η ανάπτυξη της επικοινωνίας Machine-to-Machine (M2M), η οποία επιτρέπει σε συσκευές όπως αισθητήρες και μηχανές να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κυψελοειδών δικτύων. Αυτό έχει ανοίξει νέες ευκαιρίες για την δημιουργία καινοτόμων βελτιώσεων σε διάφορους τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές καθώς επίσης μέσω αυτών των εύκαιρων έχουμε και την εμφάνιση νέων τομέων, όπως είναι οι έξυπνες πόλεις και το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things ή IoT) γενικότερα.

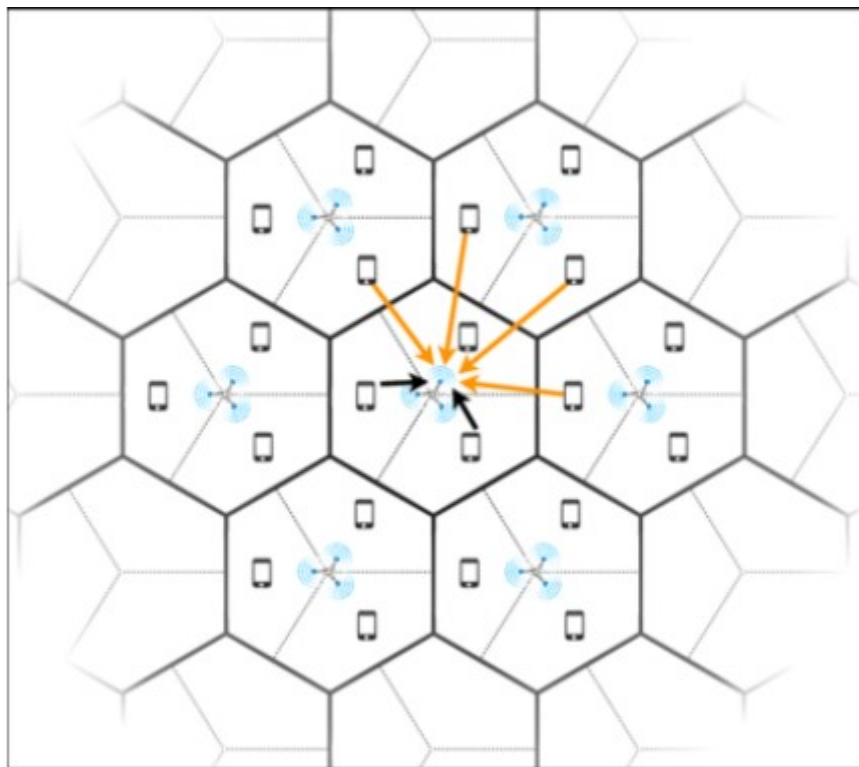
Το 5G θα διευκολύνει πολλές περιπτώσεις χρήσης που είναι επί του παρόντος απρόσιτες με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως οι κρίσιμες επικοινωνίες και οι περιπτώσεις χρήσης χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και υψηλού εύρους ζώνης, όπως χειρουργικές επεμβάσεις εξ αποστάσεως και αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα. Το 5G μπορεί να υποστηρίξει τη γρήγορη και ασφαλή επικοινωνία που απαιτείται για τον τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών που δημιουργεί το IoT, όπως δισεκατομμύρια αισθητήρες και συσκευές, συμπεριλαμβανομένων καμερών, βιομηχανικού εξοπλισμού, ιατρικών συσκευών.

Καθώς όλο και περισσότερες συσκευές συνδέονται και ο όγκος των δεδομένων που μεταδίδονται μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας συνεχίζει να αυξάνεται, είναι επίσης σημαντικό τα δίκτυα αυτά να παραμένουν ασφαλή. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G θα ενισχύσει περαιτέρω τα ισχύοντα μέτρα ασφαλείας για την προστασία των δεδομένων των χρηστών και την αποτροπή της μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε συσκευές και δίκτυα. Η βιομηχανία δικτύων κινητής τηλεφωνίας θα συνεχίσει επίσης να συνεργάζεται με κυβερνήσεις,

ρυθμιστικές αρχές και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς για να διασφαλίσει ότι το ραδιοφάσμα κατανέμεται με αποτελεσματικό και δίκαιο τρόπο. Με την αυξανόμενη ζήτηση για κινητές υπηρεσίες και τον αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, είναι πιο σημαντικό από ποτέ να διασφαλιστεί ότι υπάρχει αρκετό διαθέσιμο φάσμα για την υποστήριξη αυτών των υπηρεσιών.

Συνοπτικά, τα κυψελωτά δίκτυα έχουν διανύσει πολύ δρόμο από την απαρχή τους και θα συνεχίσουν να αλλάζουν και να εξελίσσονται τα επόμενα χρόνια. Ενώ η χωρητικότητα και η ταχύτητα των δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχουν βελτιωθεί σημαντικά, ο τρόπος που χρησιμοποιούμε αυτά τα δίκτυα για επικοινωνία, εργασία και παιχνίδι, εξελίσσεται επίσης γρήγορα. Με τα δίκτυα 5G να κυκλοφορούν πλέον σε όλο τον κόσμο, μπορούμε να περιμένουμε να δούμε ακόμη περισσότερες αλλαγές και νέες ευκαιρίες για κινητή επικοινωνία, IoT και Industry 4.0.

Καταλήγοντας, η ιστορία των κυψελωτών δικτύων έχει δει μια σταθερή εξέλιξη από τα αναλογικά δίκτυα 1G της δεκαετίας του 1980 στα ψηφιακά δίκτυα 5G του σήμερα. Κάθε γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει φέρει βελτιώσεις στην ταχύτητα, τη χωρητικότητα και την ικανότητα υποστήριξης νέων και πιο προηγμένων εφαρμογών. Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας δικτύων κινητής τηλεφωνίας προωθεί την καινοτομία και δημιουργεί νέες ευκαιρίες για τον τρόπο με τον οποίο άνθρωποι και οργανισμοί επικοινωνούν και χρησιμοποιούν την τεχνολογία (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Παράδειγμα ενός κυψελώδους ασύρματου κινητού δικτύου.

2.2 Κυβελωτά δίκτυα πρώτης γενιάς (1G)

Τα κυβελωτά δίκτυα πρώτης γενιάς (1G), γνωστά και ως αναλογικά κυβελωτά δίκτυα, ήταν η πρώτη γενιά κυβελοειδών δικτύων που αναπτύχθηκαν εμπορικά. Εισήχθησαν τη δεκαετία του 1980 και αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό άλμα προς τα εμπρός στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών [2], [3].

Τα δίκτυα 1G βασίστηκαν στην ιδέα της διαίρεσης μιας περιοχής εξυπηρέτησης σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κυψέλες, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετείται από έναν πομπό/δέκτη χαμηλής ισχύος. Αυτό επέτρεψε σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς παρεμβολές μεταξύ τους και παρείχε αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Μία από τις βασικές καινοτομίες των δικτύων 1G ήταν η χρήση της Frequency Division Multiplexing (FDM) που επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς να παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Αυτό επιτεύχθηκε με τη διαίρεση της διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων σε μικρότερα κανάλια και την εκχώρηση τους σε διαφορετικούς χρήστες. Κάθε κανάλι είχε διαφορετική συχνότητα, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη ταυτόχρονα χωρίς να παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Τα δίκτυα 1G έκαναν επίσης χρήση τεχνολογίας μεταγωγής κυκλώματος, η οποία αφιέρωσε ένα συγκεκριμένο κανάλι σε μια κλήση για όλη τη διάρκειά της. Αυτό επέτρεψε έναν σχετικά υψηλό βαθμό ασφάλειας και εξασφάλισε ότι υπήρχε διαθέσιμο ένα ειδικό κανάλι για κάθε κλήση.

Ένας όμως από τους σημαντικότερους περιορισμούς των δικτύων 1G ήταν η κακή ποιότητα κλήσεων που αντιμετώπιζαν συχνά οι χρήστες. Αυτό οφειλόταν στη χρήση αναλογικής τεχνολογίας, η οποία ήταν επιρρεπής σε παρεμβολές και παραμορφώσεις. Επιπλέον, τα δίκτυα 1G είχαν περιορισμένη χωρητικότητα και δεν ήταν σε θέση να υποστηρίξουν υπηρεσίες δεδομένων όπως τα γραπτά μηνύματα. Ένα άλλο μειονέκτημα των δικτύων 1G ήταν η έλλειψη ασφάλειας, καθώς ήταν σχετικά εύκολη η παρακολούθηση και η ακρόαση κλήσεων. Αυτό απασχόλησε τόσο άτομα όσο και οργανισμούς και ήταν ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη ψηφιακών κυβελοειδών δικτύων. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, τα δίκτυα 1G διαδραμάτισαν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη της κυβελοειδούς τεχνολογίας, θέτοντας τα θεμέλια για τα πιο προηγμένα και ικανά κυβελωτά δίκτυα του σήμερα.

Συμπερασματικά, τα δίκτυα 1G αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών, αλλά περιορίζονταν από την τεχνολογία της εποχής. Η χρήση της αναλογικής τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα κακή ποιότητα κλήσης και έλλειψη ασφάλειας, αλλά επέτρεψε την αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και άνοιξε το δρόμο για μελλοντικές εξελίξεις. Καθώς τα κυβελωτά δίκτυα συνέχισαν να εξελίσσονται, αναπτύχθηκαν δίκτυα 2G, 3G, 4G και 5G, καθένα από τα οποία χτίστηκε πάνω στα θεμέλια που τέθηκαν από τα δίκτυα 1G, ξεπερνώντας τους περιορισμούς του. Τα δίκτυα 1G μπορεί να θεωρηθούν ως μια πρώιμη έκδοση των κυβελοειδών δικτύων, αλλά ήταν ένα σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη της κινητής επικοινωνίας που έχουμε σήμερα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δίκτυα 1G χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη, αλλά μέρη του κόσμου δεν υιοθέτησαν τόσο γρήγορα την τεχνολογία 1G και ορισμένες περιοχές δεν είχαν καθόλου δίκτυα 1G. Στην Ασία και την Αφρική, για παράδειγμα, η ανάπτυξη των δικτύων 2G ξεκίνησε νωρίτερα, παρακάμπτοντας απευθείας την τεχνολογία 1G. Παρά τους περιορισμούς τους, τα δίκτυα 1G διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στα πρώτα χρόνια της ασύρματης επικοινωνίας και βοήθησαν στην καθιέρωση της βιομηχανίας κινητής

τηλεφωνίας. Η ανάπτυξη των δικτύων 1G επέτρεψε τις πρώτες εμπορικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και η εισαγωγή των κινητών τηλεφώνων έγινε δυνατή για πρώτη φορά. Αυτή ήταν μια επαναστατική εξέλιξη που άλλαξε τον τρόπο που οι άνθρωποι επικοινωνούσαν και επηρέασε ακόμη και κατά ένα βαθμό το τρόπο με τον οποίο εργάζονταν μιας και οι επιχειρήσεις δημιουργούνταν πιο εύκολα μέσω της ασύρματης επικοινωνίας. Η ανάπτυξη δικτύων 1G βοήθησε επίσης στην τόνωση της καινοτομίας και της έρευνας στον τομέα της ασύρματης επικοινωνίας. Καθώς η ζήτηση για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας αυξανόταν, τόσο αυξανόταν η ανάγκη για πιο προηγμένα και ικανά κυψελωτά δίκτυα. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη των δικτύων 2G, τα οποία αντιμετώπισαν σε ικανοποιητικό βαθμό πολλούς από τους περιορισμούς των δικτύων 1G και άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη της βιομηχανίας κινητής τηλεφωνίας.

Σήμερα, τα δίκτυα 1G είναι σε μεγάλο βαθμό απαρχαιωμένα και έχουν καταργηθεί στα περισσότερα μέρη του κόσμου. Ωστόσο, η κληρονομιά των δικτύων 1G εξακολουθεί να φαίνεται στα κυψελωτά δίκτυα του σήμερα, καθώς οι βασικές αρχές και έννοιες που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή 1G εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα.

Καταλήγοντας, τα κυψελωτά δίκτυα 1G ήταν η πρώτη γενιά κυψελοειδών δικτύων που αναπτύχθηκαν εμπορικά και αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών. Άνοιξαν το δρόμο για την ευρεία υιοθέτηση των κινητών τηλεφώνων και της ασύρματης επικοινωνίας αλλά περιορίστηκαν από την τεχνολογία της εποχής. Οι βασικές αρχές και έννοιες που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή του 1G συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα και η σημασία τους στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας δεν μπορεί να αμφισβητηθεί.

2.3 Κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G)

Η δεύτερη γενιά (2G) κυψελοειδών δικτύων, γνωστά και ως ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα, αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των δικτύων πρώτης γενιάς (1G). Τα δίκτυα 2G εισήχθησαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και αντιπροσώπευαν μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών. Μία από τις βασικές καινοτομίες των δικτύων 2G ήταν η χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας, η οποία αντικατέστησε την αναλογική τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα δίκτυα 1G. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα κλήσης, αυξημένη χωρητικότητα και βελτιωμένη ασφάλεια. Η ψηφιακή τεχνολογία επέτρεψε επίσης την εισαγωγή νέων υπηρεσιών όπως η ανταλλαγή σύντομων μηνυμάτων κειμένου και οι τραπεζικές συναλλαγές μέσω κινητού τηλεφώνου. Τα δίκτυα 2G χρησιμοποίησαν Time Division Multiple Access (TDMA) και Code Division Multiple Access (CDMA) για να διαιρέσουν τη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων σε χρονοθυρίδες ή κανάλια κώδικα, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς παρεμβολές μεταξύ τους. Αυτό επέτρεψε την αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και αύξησε τη χωρητικότητα του δικτύου. Τα δίκτυα 2G έκαναν επίσης χρήση τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων, η οποία εκχωρούσε δυναμικά κανάλια στους χρήστες ανάλογα με τις ανάγκες, αντί να αφιερώνει ένα συγκεκριμένο κανάλι σε μια κλήση για ολόκληρη τη διάρκειά της, όπως έκανε το 1G. Αυτό επέτρεψε την αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος και την αυξημένη χωρητικότητα [4], [5].

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία 2G ήταν το Global System for Mobile Communications (GSM), το οποίο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε πολλές χώρες σήμερα. Το GSM χρησιμοποιεί το TDMA για να διαιρέσει τη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων σε χρονοθυρίδες, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς να παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Το CDMA ήταν μια άλλη δημοφιλής τεχνολογία 2G, η οποία χρησιμοποιήθηκε κυρίως στη Βόρεια Αμερική.

Το 2.5G είναι ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των κυψελοειδών δικτύων 2G και 3G. Αρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, έφερε κάποιες σταδιακές βελτιώσεις στα δίκτυα 2G, όπως υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και την εισαγωγή βασικών υπηρεσιών δεδομένων όπως το General Packet Radio Service (GPRS). Αυτές οι υπηρεσίες επέτρεψαν τις πρώτες βασικές συνδέσεις διαδικτύου για κινητά και βασικές υπηρεσίες δεδομένων, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και την περιήγηση στον Ιστό (Browsing). Τα δίκτυα 2G και 2.5G διαδραμάτισαν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη και την καινοτομία της βιομηχανίας κινητής τηλεφωνίας. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση των κινητών τηλεφώνων και της ασύρματης επικοινωνίας και άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων και ικανών κυψελοειδών δικτύων. Τα δίκτυα 2G αντιπροσώπευαν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα δίκτυα 1G όσον αφορά την ποιότητα, τη χωρητικότητα και την ασφάλεια των κλήσεων, και η εισαγωγή του 2.5G έφερε ένα πιο σημαντικό βήμα προς μια κινητή επικοινωνία με επίκεντρο τα δεδομένα. Σήμερα, τα δίκτυα 2G και 2.5G καταργούνται σταδιακά σε πολλά μέρη του κόσμου καθώς αυξάνεται η ζήτηση για ταχύτερες και πιο προηγμένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, η κληρονομιά των δικτύων 2G και 2.5G εξακολουθεί να φαίνεται στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας του σήμερα. Οι βασικές αρχές και έννοιες που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή 2G και 2.5G εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα και αυτά τα δίκτυα έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό που εισήγαγαν τα δίκτυα 2G και 2.5G ήταν η βελτιωμένη ασφάλεια. Τα δίκτυα 2G χρησιμοποιούσαν ψηφιακή κρυπτογράφηση για την ασφάλεια της επικοινωνίας και την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης στο δίκτυο. Αυτή ήταν μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα δίκτυα 1G, τα οποία στερούνταν οποιασδήποτε μορφής κρυπτογράφησης και καθιστούσαν σχετικά εύκολη την παρακολούθηση και την ακρόαση κλήσεων. Η βελτιωμένη ασφάλεια των δικτύων 2G ήταν ζωτικής σημασίας τόσο για άτομα όσο και για οργανισμούς, οι οποίοι μπορούσαν πλέον να έχουν μια αίσθηση ασφάλειας γνωρίζοντας ότι η επικοινωνία τους ήταν προστατευμένη.

Επιπλέον, τα δίκτυα 2G παρείχαν επίσης μια υποδομή που επέτρεψε την ανάπτυξη του mobile trade και του mobile banking. Αυτές οι υπηρεσίες έδωσαν τη δυνατότητα στους πελάτες να πραγματοποιούν τραπεζικές υπηρεσίες χωρίς την παρουσία τους σε κάποιο φυσικό κατάστημα, μόνο από τις κινητές συσκευές τους, όπως έλεγχο των υπολοίπων των λογαριασμών τους, πληρωμή λογαριασμών και μεταφορά κεφαλαίων. Αυτό πρόσθεσε μια εντελώς νέα διάσταση στην κινητή τηλεφωνία και επέτρεψε στους ανθρώπους να πραγματοποιούν οικονομικές συναλλαγές εξ αποστάσεως. Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα 2.5G ήταν ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των δικτύων 2G και 3G και έφεραν κάποιες σταδιακές βελτιώσεις σε σχέση με τα δίκτυα 2G. Η κύρια βελτίωση είναι η εισαγωγή βασικών υπηρεσιών δεδομένων όπως το GPRS, το οποίο επέτρεψε τις πρώτες βασικές συνδέσεις στο Διαδίκτυο για κινητά και τις βασικές υπηρεσίες δεδομένων όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και την περιήγηση στον Ιστό. Αυτό παρείχε μια γεύση από τις δυνατότητες του mobile internet και το μέλλον της κινητής επικοινωνίας.

Όσον αφορά την ανάπτυξη, τα δίκτυα 2G αναπτύχθηκαν ευρέως σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο και θεωρήθηκαν ως η ραχοκοκαλιά της κινητής επικοινωνίας για περισσότερο από μια δεκαετία. Αντίθετα, τα δίκτυα 2.5G αναπτύχθηκαν σε πιο περιορισμένη κλίμακα μιας και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως σκαλοπάτι προς τα δίκτυα 3G. Καθώς η κινητή επικοινωνία συνέχισε να εξελίσσεται και η ζήτηση για ταχύτερες και πιο προηγμένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας αυξανόταν, η ανάπτυξη δικτύων 3G ήταν απαραίτητη για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Ωστόσο, τα δίκτυα 2G και 2.5G έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση των κινητών τηλεφώνων και της ασύρματης επικοινωνίας και παρείχαν την υποδομή για το κινητό εμπόριο και τις εξ αποστάσεως τραπεζικές συναλλαγές .

Συμπερασματικά, τα κυψελωτά δίκτυα 2G και 2.5G αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό βήμα προς το μέλλον στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών, βασιζόμενη στα θεμέλια που έθεσαν τα δίκτυα 1G. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση των κινητών τηλεφώνων και της ασύρματης επικοινωνίας και άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων και ικανών κυψελοειδών δικτύων. Ενώ τα δίκτυα 2G και 2.5G καταργούνται σταδιακά σήμερα, η κληρονομιά τους είναι ακόμα εμφανής στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και η σημασία τους στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας δεν μπορεί να αμφισβητηθεί.

2.4 Κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G)

Η τρίτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας (3G) αναπτύχθηκε αφενός μεν για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των δικτύων 2G και 2.5G, και αφετέρου για να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και να ενεργοποιήσει προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων. Τα δίκτυα 3G εισήχθησαν στις αρχές της δεκαετίας του 2000 και αντιπροσώπευαν μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών. Μία από τις βασικές καινοτομίες των δικτύων 3G ήταν η χρήση ταχύτερων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων, που επέτρεψαν την ανάπτυξη προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων, όπως βίντεο για κινητά, κινητή τηλεόραση και κινητό Διαδίκτυο. Τα δίκτυα 3G χρησιμοποιούσαν διάφορες τεχνολογίες όπως CDMA2000, Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) και Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA) για να επιτύχουν υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, οι οποίοι κυμαίνονταν από 144 kbps έως 2Mbps [6].

Τα δίκτυα 3G έκαναν επίσης χρήση τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων, παρόμοια με τα δίκτυα 2G και 2.5G, αλλά με μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Τα δίκτυα 3G βελτίωσαν επίσης τα μέτρα ασφαλείας των δικτύων 2G εισάγοντας πιο προηγμένες μεθόδους κρυπτογράφησης, όπως η κρυπτογράφηση που βασίζεται σε κάρτες SIM, για την ασφαλή επικοινωνία και την πρόληψη της μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης στο δίκτυο. Αυτό συνέβαλε στη διασφάλιση της προστασίας των ευαίσθητων πληροφοριών, όπως οι οικονομικές συναλλαγές. Μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες 3G ήταν το WCDMA, το οποίο είναι επίσης γνωστό ως Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε κυρίως στην Ευρώπη και την Ασία. Μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ήταν η CDMA2000, η οποία χρησιμοποιήθηκε κυρίως στη Βόρεια Αμερική και σε μέρη της Ασίας. Το 3.5G είναι ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των κυψελοειδών δικτύων 3G και 4G, άρχισε να αναπτύσσεται στα μέσα της δεκαετίας του 2000 και έφερε κάποιες σταδιακές βελτιώσεις σε σχέση με τα δίκτυα 3G, όπως υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, που αυτό είχε ως αποτέλεσμα την βελτίωση υπηρεσιών

πολυμέσων, όπως η κινητή τηλεόραση και κινητό internet. Αυτές οι υπηρεσίες έφεραν επίσης τη ροή βίντεο υψηλής ποιότητας, τα παιχνίδια για κινητά και την πιο προηγμένη χρήση διαδικτύου για κινητά.

Τα δίκτυα 3G και 3.5G διαδραμάτισαν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη και την καινοτομία της βιομηχανίας κινητής τηλεφωνίας, επέτρεψαν την ευρεία υιοθέτηση προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων και mobile internet. Άνοιξαν επίσης το δρόμο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων και ικανών κυψελοειδών δικτύων όπως το 4G και το 5G. Τα δίκτυα 3G αντιπροσώπευαν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα δίκτυα 2G και 2.5G όσον αφορά τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και τις προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων και η εισαγωγή του 3.5G έφερε ακόμη πιο σημαντικά βήματα προς πιο προηγμένη κινητή επικοινωνία.

Σήμερα, τα δίκτυα 3G και 3.5G καταργούνται σταδιακά σε πολλά μέρη του κόσμου, καθώς αυξάνεται η ζήτηση για ταχύτερες και πιο προηγμένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, η κληρονομιά τους είναι ακόμα εμφανής στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι βασικές αρχές και έννοιες που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή 3G και 3.5G εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα και αυτά τα δίκτυα έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις. Τα κυψελωτά δίκτυα 3G και 3.5G αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών και βασίστηκαν στα θεμέλια που έθεσαν τα δίκτυα 2G και 2.5G. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων και mobile internet και άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων και ικανών κυψελοειδών δικτύων όπως το 4G και το 5G. Ενώ τα δίκτυα 3G και 3.5G καταργούνται σταδιακά σήμερα, η κληρονομιά τους είναι ακόμα εμφανής στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και η σημασία τους στην ιστορία της κινητής τηλεφωνίας δεν μπορεί να αμφισβητηθεί.

Επιπλέον, τα δίκτυα 3G και 3.5G ήταν επίσης σημαντικά για την ανάπτυξη της κινητής ευρυζωνικότητας. Η κινητή ευρυζωνική σύνδεση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την πρόσβαση στο Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας που παρέχεται μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας, σε αντίθεση με μια σύνδεση σταθερής γραμμής. Με την εισαγωγή των δικτύων 3G και 3.5G, η ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία έγινε βιώσιμη επιλογή για πολλούς χρήστες, επιτρέποντάς τους να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο από οπουδήποτε με κυψελοειδές σήμα. Αυτό έκανε το κινητό Διαδίκτυο πιο προσιτό και βολικό για ένα ευρύ φάσμα χρηστών, από ιδιώτες έως επιχειρήσεις. Τα δίκτυα 3G και 3.5G άνοιξαν επίσης το δρόμο για την εμφάνιση εφαρμογών και υπηρεσιών για κινητά. Καθώς το Διαδίκτυο για κινητά έγινε ευρύτερα διαθέσιμο, οι προγραμματιστές άρχισαν να δημιουργούν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και υπηρεσιών που θα μπορούσαν να έχουν πρόσβαση μέσω κινητών συσκευών. Αυτό περιλάμβανε πράγματα όπως mobile banking, πλοήγηση, μέσα κοινωνικής δικτύωσης και πολλά άλλα. Αυτή η επέκταση των υπηρεσιών και των εφαρμογών για κινητά είχε σημαντικό αντίκτυπο στον τρόπο που ζούμε, εργαζόμαστε και επικοινωνούμε. Όσον αφορά την ανάπτυξη, τα δίκτυα 3G αναπτύχθηκαν ευρέως σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο και θεωρήθηκαν ως η ραχοκοκαλιά της κινητής επικοινωνίας για περισσότερο από μια δεκαετία, επιτρέποντας υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων. Τα δίκτυα 3.5G, ωστόσο, αναπτύχθηκαν σε μικρότερη κλίμακα και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως σκαλοπάτι προς τα δίκτυα 4G.

Καθώς η κινητή τηλεφωνία συνέχισε να εξελίσσεται και η ζήτηση για ταχύτερες και πιο προηγμένες υπηρεσίες αυξανόταν, η ανάπτυξη δικτύων 4G ήταν απαραίτητη για την κάλυψη αυτών των αναγκών. Ωστόσο, τα δίκτυα 3G και 3.5G έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο

στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων και κινητού Διαδικτύου, παρείχαν μια υποδομή για κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές και εφαρμογές για κινητά και αντιπροσώπευαν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα δίκτυα 2G και 2.5G όσον αφορά τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και τις υπηρεσίες πολυμέσων.

Συνοπτικά, τα κυψελωτά δίκτυα 3G και 3.5G αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών και βασίστηκαν στα θεμέλια που έθεσαν τα δίκτυα 2G και 2.5G. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων, mobile internet και mobile broadband. Βελτίωσαν την ασφάλεια του δικτύου και άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων και ικανών κυψελοειδών δικτύων όπως το 4G και το 5G. Σήμερα, ενώ τα δίκτυα 3G και 3.5G καταργούνται σταδιακά σε πολλά μέρη του κόσμου, η κληρονομιά τους είναι ακόμα εμφανής στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι βασικές αρχές και έννοιες που αναπτύχθηκαν κατά την εποχή 3G και 3.5G εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα κυψελωτά δίκτυα και αυτά τα δίκτυα έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις. Οι εξελίξεις στο 3G και το 3.5G επέτρεψαν πιο εξελιγμένες υπηρεσίες δεδομένων και επέτρεψαν στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο, να παρακολουθούν βίντεο και να μεταδίδουν περιεχόμενο στις κινητές συσκευές τους, ανοίγοντας το δρόμο για μεταφορά δεδομένων, υπηρεσία που αποτελεί επανάσταση στο τομέα της κινητής τηλεφωνίας και η οποία έχει τεράστιο αντίκτυπο τον τρόπο που ζούμε, εργαζόμαστε και επικοινωνούμε.

2.5 Κυψελωτά δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)

Η τέταρτη γενιά (4G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας, γνωστά και ως δίκτυα LTE, αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των δικτύων 3G και 3.5G, κυρίως για να υποστηρίξει ακόμη υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και να ενεργοποιήσει προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων. Τα δίκτυα 4G εισήχθησαν στις αρχές της δεκαετίας του 2010 και αντιπροσώπευαν μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών. Μία από τις βασικές καινοτομίες των δικτύων 4G είναι η χρήση ακόμη υψηλότερων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων, που κυμαίνονταν από 100Mbps έως 1Gbps, κάτι που επιτρέπει προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων, όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, διαδικτυακά παιχνίδια και προηγμένη χρήση διαδικτύου για κινητά. Τα δίκτυα 4G χρησιμοποιούν Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) και τεχνολογία MIMO για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων [7].

Τα δίκτυα 4G έκαναν επίσης χρήση τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων, παρόμοια με τα δίκτυα 3G και 3.5G, αλλά με μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Αυτό επιτρέπει την πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος και επιτρέπει την παροχή προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων, όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας και διαδικτυακά παιχνίδια. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των δικτύων 4G είναι η υποστήριξη Voice over LTE (VoLTE), που είναι μια μέθοδος παροχής υπηρεσιών φωνής και SMS μέσω δικτύου LTE, που επιτρέπει στους χρήστες να πραγματοποιούν κλήσεις και να στέλνουν μηνύματα κειμένου μέσω δικτύου 4G με υψηλότερη ποιότητα και ταχύτερο χρόνο απόκρισης.

Τα δίκτυα 4G βελτίωσαν επίσης τα μέτρα ασφαλείας των δικτύων 3G εισάγοντας πιο προηγμένες μεθόδους κρυπτογράφησης, όπως το Advanced Encryption Standard (AES), για

την ασφάλεια της επικοινωνίας και την πρόληψη της μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης στο δίκτυο.

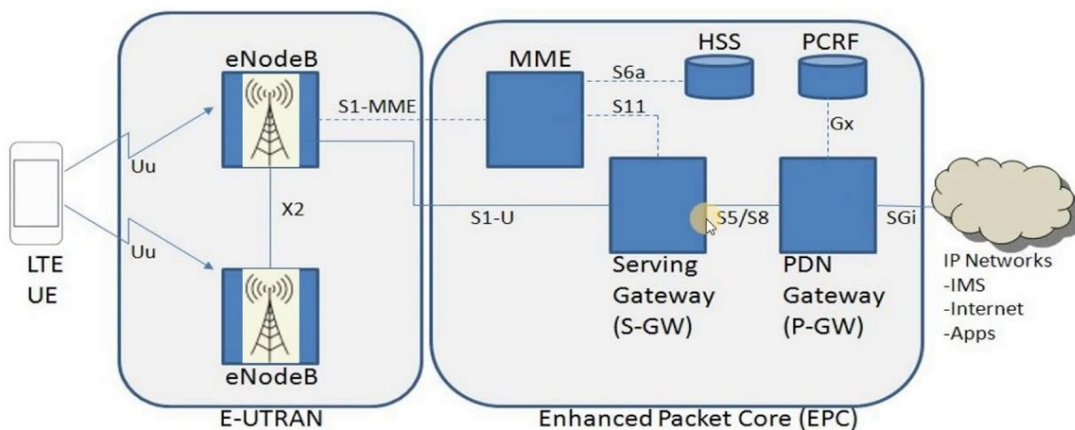
Τα κυψελωτά δίκτυα 4+ γενιάς, γνωστά και ως δίκτυα 4.5G ή 4G+, είναι ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των κυψελοειδών δικτύων 4G και 5G. Αρχισαν να αναπτύσσονται σε ορισμένα μέρη του κόσμου στα τέλη της δεκαετίας του 2010 και έφεραν κάποιες σταδιακές βελτιώσεις σε σχέση με τα δίκτυα 4G, όπως υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, πιο προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων, βελτιωμένη χωρητικότητα και βοήθησαν στην γενικότερη αύξηση της απόδοσης του δικτύου. Τα δίκτυα 4G+ χρησιμοποιούν τεχνολογίες όπως το Carrier Aggregation, το LTE-Advanced Pro και το Massive MIMO για να επιτύχουν υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, που μπορεί να κυμαίνονται από 300 Mbps έως 1 Gbps.

Ορισμένες από τις δυνατότητες των δικτύων 4G+ περιλαμβάνουν μεγαλύτερες ταχύτητες λήψης και μεταφόρτωσης, βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου, καλύτερη κάλυψη, αξιοπιστία και βελτιωμένη υποστήριξη για συσκευές IoT. Αυτές οι δυνατότητες καθιστούν τα δίκτυα 4G+ πιο κατάλληλα για εφαρμογές όπως η επαυξημένη πραγματικότητα, η εικονική πραγματικότητα και άλλες προηγμένες υπηρεσίες που απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο. Τα δίκτυα 4G και 4G+ έχουν διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της βιομηχανίας κινητής τηλεφωνίας, καθώς επέτρεψαν την ευρεία υιοθέτηση προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων και mobile internet. Άνοιξαν επίσης το δρόμο για την ανάπτυξη πιο προηγμένων και ικανών κυψελοειδών δικτύων όπως το 5G. Τα δίκτυα 4G αντιπροσώπευαν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τα δίκτυα 3G και 3.5G όσον αφορά τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και τις προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων και η εισαγωγή του 4G+ έφερε πιο σημαντικά βήματα προς πιο προηγμένη κινητή επικοινωνία.

Σήμερα, ενώ τα δίκτυα 4G εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε πολλά μέρη του κόσμου, η ζήτηση για ταχύτερες και πιο προηγμένες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται και πολλοί πάροχοι έχουν ήδη αναπτύξει δίκτυα 5G. Ωστόσο, τα δίκτυα 4G και 4G+ συνεχίζουν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και έχουν θέσει τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις.

Συμπερασματικά, τα κυψελωτά δίκτυα 4G και 4G+ αντιπροσώπευαν ένα σημαντικό βήμα προόδου στην τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών και βασίστηκαν στα θεμέλια που έθεσαν τα δίκτυα 3G και 3.5G. Κατέστησαν δυνατή την ευρεία υιοθέτηση προηγμένων υπηρεσιών πολυμέσων, mobile internet και παρείχαν υποδομές για βελτιωμένη ασφάλεια και Voice over LTE. Επίσης, επέτρεψαν μεγαλύτερες ταχύτητες λήψης και μεταφόρτωσης, βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου, μεγαλύτερη και αποδοτικότερη κάλυψη, αξιοπιστία στην επικοινωνία και την παροχή υπηρεσιών και βελτιωμένη υποστήριξη για συσκευές IoT. Τα δίκτυα 4G και 4G+ έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ιστορία της κινητής επικοινωνίας και η κληρονομιά τους είναι ακόμα εμφανής στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (Εικόνα 2).

4G | LTE ARCHITECTURE



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου 4ης γενιάς

2.6 Κυψελωτά δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G)

Το 5G είναι η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, σχεδιασμένα να παρέχουν μεγαλύτερες ταχύτητες διαδικτύου, χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο και πιο αξιόπιστες συνδέσεις από τις προηγούμενες γενιές. Τα δίκτυα 5G είναι σε θέση να παρέχουν ταχύτητες λήψης έως και 100 φορές μεγαλύτερες από τα δίκτυα 4G, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η εικονική πραγματικότητα και το διαδίκτυο των πραγμάτων IoT [8].

Μία από τις κύριες τεχνολογίες πίσω από το 5G είναι γνωστή ως Millimeter Wave technology (mmWave), η οποία χρησιμοποιεί ζώνες υψηλής συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων από τα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούν χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Επιπλέον, τα δίκτυα 5G έχουν επίσης σχεδιαστεί για να είναι πιο αξιόπιστα από τις προηγούμενες γενιές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δίκτυα 5G χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες όπως η διαμόρφωση δέσμης, η οποία επιτρέπει την πιο ακριβή στόχευση μεμονωμένων συσκευών και τον διαχωρισμό δικτύου, που επιτρέπει την ιεράρχηση διαφορετικών τύπων κίνησης στο δίκτυο. Οι αυξημένες ταχύτητες και χωρητικότητα των δικτύων 5G, θα επιτρέψουν την δυνατότητα νέων καινοτόμων χρήσεων και εφαρμογών σε τομείς όπως τα αυτόνομα οχήματα, οι βιομηχανικοί αυτοματισμοί και οι έξυπνες πόλεις. Για παράδειγμα, η χαμηλή καθυστέρηση και η υψηλή αξιοπιστία των δικτύων 5G είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων, καθώς θα πρέπει να μπορούν να επικοινωνούν με άλλα οχήματα και με την υποδομή σε πραγματικό χρόνο για την αποφυγή ατυχημάτων. Επιπλέον, τα δίκτυα 5G θα χρησιμοποιηθούν επίσης για τη σύνδεση του τεράστιου αριθμού συσκευών, που θα χρησιμοποιηθούν σε έξυπνες πόλεις, όπως φανάρια, κάμερες και άλλους αισθητήρες, στο διαδίκτυο. Ένας άλλος τομέας όπου το 5G θα έχει

σημαντικό αντίκτυπο είναι στον τομέα της εικονικής και της επαυξημένης πραγματικότητας. Με τις υψηλές ταχύτητες και τη χαμηλή καθυστέρηση, το 5G θα επιτρέψει τη μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας και άλλων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία εξαιρετικά καθηλωτικών εμπειριών εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας.

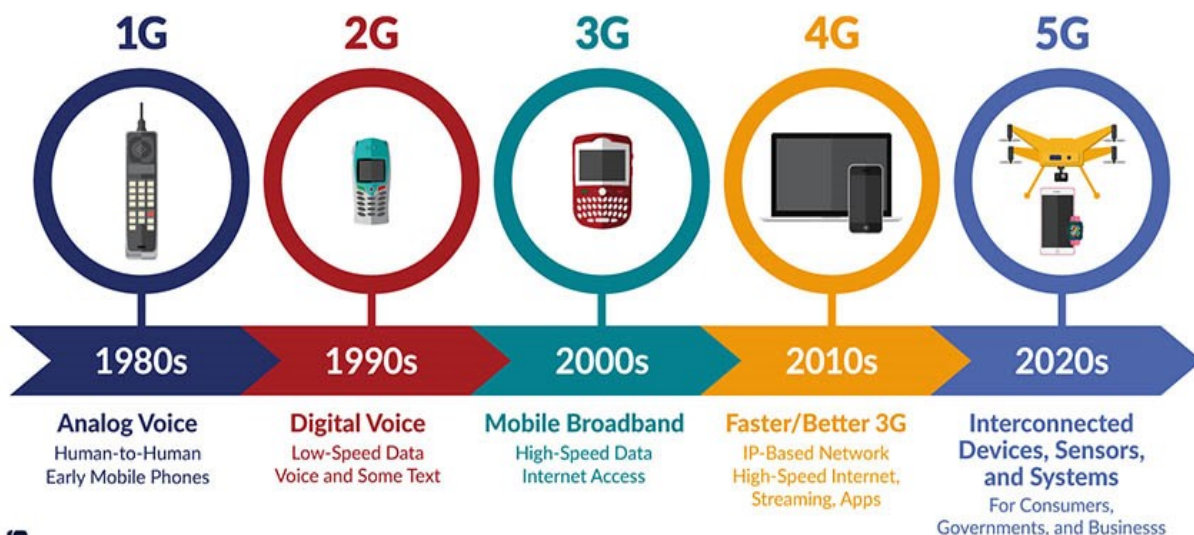
Τα δίκτυα 5G αναμένεται επίσης να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των υπολογιστών αιχμής. Επίσης τα δίκτυα αυτά εισάγουν την έννοια του υπολογισμού ακμών, η οποία αναφέρεται στην επεξεργασία δεδομένων στην άκρη του δικτύου και όχι σε μια κεντρική τοποθεσία. Αυτό θα επιτρέψει την ταχύτερη επεξεργασία των δεδομένων και θα μειώσει τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν μέσω του δικτύου. Αυτό θα είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα, όπου οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο. Ένας άλλος τομέας όπου το 5G θα έχει σημαντικό αντίκτυπο είναι στον τομέα της τηλεϊατρικής. Με τις υψηλές ταχύτητες και τη χαμηλή καθυστέρηση, τα δίκτυα 5G θα επιτρέψουν τη μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας και άλλων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας τη δυνατότητα στους γιατρούς να διαβουλεύονται με ασθενείς εξ αποστάσεως και να πραγματοποιούν χειρουργικές επεμβάσεις εξ αποστάσεως. Ωστόσο, τα δίκτυα 5G φέρνουν επίσης νέες προκλήσεις και κινδύνους για την ασφάλεια. Ο αυξημένος αριθμός συσκευών και η αυξημένη πολυπλοκότητα των δικτύων μπορεί να τα κάνει πιο ευάλωτα σε επιθέσεις. Επιπλέον, η χρήση ζωνών υψηλής συχνότητας για δίκτυα 5G αυξάνει επίσης τον κίνδυνο παρεμβολών από άλλες πηγές, όπως ο καιρός, που μπορεί να διαταράξει το σήμα.

Επιπλέον, το 5G είναι το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, καθώς με τις μεγαλύτερες ταχύτητες, τη χαμηλότερη καθυστέρηση και την αυξημένη χωρητικότητα θα επιτρέψει νέες περιπτώσεις χρήσης και εφαρμογές που δεν ήταν δυνατές με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Θα διαδραματίσει επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων, των υπολογιστών αιχμής, της τηλεϊατρικής και των νέων επιχειρηματικών μοντέλων, θα επιτρέψει νέες ροές εσόδων και θα οδηγήσει στην καινοτομία και την οικονομική ανάπτυξη σε πολλούς διαφορετικούς κλάδους. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια και να ληφθούν μέτρα για τον μετριασμό των κινδύνων και των προκλήσεων που συνεπάγονται τα δίκτυα 5G.

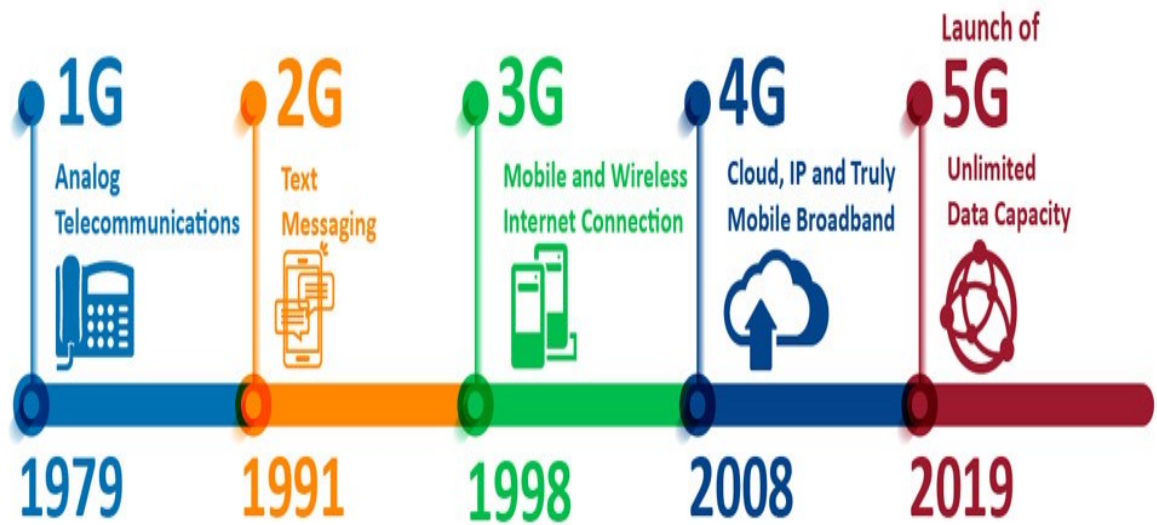
Προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες των δικτύων 5G και να διασφαλιστεί η ασφάλειά τους, είναι σημαντικό να υπάρχουν κατάλληλες υποδομές και κανονισμοί. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη συσκευών με δυνατότητα 5G, τη δημιουργία δικτύων με δυνατότητα 5G και την ανάπτυξη προτύπων και πολιτικών που θα διέπουν τη χρήση τους. Ρυθμιστικοί φορείς όπως η Federal Communications Commission (FCC) στις Ηνωμένες Πολιτείες και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στην Ευρωπαϊκή Ένωση εργάζονται για να διασφαλίσουν ότι τα δίκτυα 5G αναπτύσσονται με τρόπο ασφαλή για τους καταναλωτές και τις επιχειρήσεις. Αυτό περιλαμβάνει την κατανομή του φάσματος, την ανάπτυξη προτύπων ασφαλείας και τη θέσπιση κανονισμών που θα διέπουν τη χρήση των δικτύων 5G. Η βιομηχανία λαμβάνει επίσης μέτρα για να διασφαλίσει την ασφάλεια των δικτύων 5G. Οι πάροχοι δικτύων κινητής τηλεφωνίας επενδύουν σε νέες τεχνολογίες και λύσεις για να προστατεύσουν τα δίκτυά τους από επιθέσεις και να διασφαλίσουν ότι μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμη και σε περίπτωση παραβίασης της ασφαλείας. Επιπλέον, οι εταιρείες που αναπτύσσουν συσκευές και εξοπλισμό με δυνατότητα 5G εργάζονται επίσης για να διασφαλίσουν ότι τα προϊόντα τους είναι ασφαλή και μπορούν να ενημερωθούν για να αντιμετωπίσουν τις ευπάθειες ασφαλείας καθώς ανακαλύπτονται.

Μια άλλη σημαντική πτυχή του 5G είναι η διεθνής συνεργασία και τυποποίηση. Το 5G είναι μια παγκόσμια τεχνολογία και είναι σημαντικό όλες οι χώρες να συνεργαστούν για να διασφαλίσουν ότι τα δίκτυα 5G αναπτύσσονται με τρόπο ασφαλή και αποτελεσματικό. Αυτό περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ των χωρών για την κατανομή του φάσματος, την ανάπτυξη προτύπων ασφαλείας και τη θέσπιση κανονισμών που θα διέπουν τη χρήση των δικτύων 5G.

Συμπερασματικά, το 5G είναι μια τεχνολογία μετασχηματισμού που έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο που ζούμε, εργαζόμαστε και παίζουμε. Με τις μεγαλύτερες ταχύτητες, τη χαμηλότερη καθυστέρηση και την αυξημένη χωρητικότητα, θα επιτρέψει νέες περιπτώσεις χρήσης και εφαρμογές που δεν ήταν δυνατές με προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, για να διασφαλιστεί ότι τα δίκτυα 5G αναπτύσσονται και αποτελεσματικό τρόπο, είναι σημαντικό να υπάρχει κατάλληλη υποδομή, κανονισμοί και διεθνής συνεργασία. Η πάροχοι και η κυβέρνηση συνεργάζονται για να διασφαλίσουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία των δικτύων 5G και να διασφαλίσουν ότι τα οφέλη του 5G είναι προσβάσιμα σε όλους (Εικόνα 3, Εικόνα 4).



Εικόνα 3. Απεικόνιση της εξέλιξης των κινητών δικτύων τηλεπικοινωνίας



Εικόνα 4. Απεικόνιση της εξέλιξης των κινητών δικτύων τηλεπικοινωνίας

3

Υλοποίηση Ασύρματων Κινητών Δικτύων

3.1 Ορισμός του λόγου σήματος προς θόρυβο και η χρησιμότητα του στο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.

Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων ενός καναλιού είναι ο υψηλότερος ρυθμός με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα σε αυτό το κανάλι χωρίς σφάλματα. Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του εύρους ζώνης του καναλιού, της αναλογίας σήματος προς θόρυβο και της τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται [9].

Το εύρος ζώνης του καναλιού είναι ένα μέτρο της ποσότητας του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που είναι διαθέσιμο για χρήση. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο περισσότερα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, ένα κανάλι με εύρος ζώνης 20 MHz μπορεί να μεταδώσει περισσότερα δεδομένα από ένα κανάλι με εύρος ζώνης 10 MHz. Ωστόσο, δεν αφορά μόνο το εύρος ζώνης, αλλά και την αποτελεσματικότητα της χρήσης του, τη χρησιμοποιούμενη τεχνική διαμόρφωσης, την κωδικοποίηση και άλλες παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό.

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise-Ratio ή SNR) είναι ένα μέτρο της ποιότητας του σήματος. Είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου. Όσο υψηλότερο είναι το SNR, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του σήματος και τόσο υψηλότερος είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Αντίθετα, ένα χαμηλό SNR θα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Το SNR είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση και την ποιότητα των συστημάτων που επεξεργάζονται ή μεταδίδουν σήματα, όπως συστήματα επικοινωνίας, συστήματα ήχου, συστήματα ραντάρ, συστήματα απεικόνισης και συστήματα απόκτησης δεδομένων. Ένα υψηλό SNR σημαίνει ότι το σήμα είναι καθαρό και εύκολο να εντοπιστεί ή να ερμηνευτεί, ενώ ένα χαμηλό SNR σημαίνει ότι το σήμα είναι κατεστραμμένο ή επισκιασμένο από θόρυβο και μπορεί να είναι δύσκολο να διακριθεί ή να ανακτηθεί. Το SNR μπορεί να βελτιωθεί με διάφορες μεθόδους, όπως η αύξηση της ισχύος του σήματος, η μείωση του επιπέδου θορύβου, το φιλτράρισμα του ανεπιθύμητου θορύβου ή η χρήση τεχνικών διόρθωσης σφαλμάτων. Το SNR καθορίζει επίσης τη μέγιστη δυνατή ποσότητα δεδομένων που μπορεί να μεταδοθεί αξιόπιστα σε ένα δεδομένο κανάλι, το οποίο εξαρτάται από το εύρος ζώνης και το SNR του. Αυτή η σχέση περιγράφεται από το θεώρημα Shannon-Hartley, το οποίο είναι ένας θεμελιώδης

νόμος της θεωρίας της πληροφορίας. Το SNR μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης και ορισμού του σήματος και του θορύβου. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος έκφρασης SNR είναι σε ντεσιμπέλ, που είναι μια λογαριθμική κλίμακα που διευκολύνει τη σύγκριση μεγάλων ή μικρών τιμών. Άλλοι ορισμοί του SNR μπορεί να χρησιμοποιούν διαφορετικούς παράγοντες ή βάσεις για τον υπολογισμό, ανάλογα με το περιβάλλον και την εφαρμογή.

Ο θόρυβος είναι ένας εγγενής παράγοντας στις πραγματικές μετρήσεις, επηρεάζοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων. Περιλαμβάνει ηλεκτρονικό θόρυβο που προέρχεται από τα συστήματα μέτρησης, καθώς και εξωτερικές επιρροές όπως άνεμος, δονήσεις, διακυμάνσεις θερμοκρασίας, αλλαγές υγρασίας, ακόμη και τη βαρυτική έλξη των ουράνιων σωμάτων, ανάλογα με τη φύση της μέτρησης και την ευαισθησία της συσκευής. Ωστόσο, είναι εφικτό να μετριάσει ο θόρυβος ασκώντας έλεγχο στο περιβάλλον μέτρησης. Για την αντιμετώπιση του εσωτερικού ηλεκτρονικού θορύβου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενισχυτές χαμηλού θορύβου για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος του στις μετρήσεις. Αυτοί οι εξειδικευμένοι ενισχυτές έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με ελάχιστο πρόσθετο θόρυβο, με αποτέλεσμα βελτιωμένη πιστότητα σήματος.

Όταν τα χαρακτηριστικά του θορύβου διαφέρουν από αυτά του σήματος και είναι γνωστά, η χρήση ενός φίλτρου γίνεται μια βιώσιμη επιλογή για τη μείωση του θορύβου. Για παράδειγμα, ένας ενισχυτής κλειδώματος είναι ικανός να εξάγει ένα σήμα στενού εύρους ζώνης από μια σημαντικά ισχυρότερη ευρυζωνική πηγή θορύβου, βελτιώνοντας έτσι το SNR κατά έναν σημαντικό παράγοντα. Σε περιπτώσεις όπου το σήμα παραμένει σταθερό ή παρουσιάζει περιοδικότητα ενώ ο θόρυβος είναι τυχαίος, το SNR μπορεί να βελτιωθεί μέσω της διαδικασίας υπολογισμού του μέσου όρου πολλαπλών μετρήσεων. Λαμβάνοντας τον μέσο όρο πολλαπλών δειγμάτων, η συνεισφορά θορύβου μειώνεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των δειγμάτων που λήφθηκαν κατά μέσο όρο. Αυτή η τεχνική αυξάνει αποτελεσματικά τη σχετική ισχύ του σήματος, οδηγώντας σε υψηλότερο SNR και βελτιωμένη ακρίβεια μέτρησης.

Όταν μια μέτρηση μετατρέπεται σε ψηφιακή μορφή, ο αριθμός των δυαδικών ψηφίων που εκχωρούνται για την αναπαράσταση της μέτρησης θέτει ένα όριο στην επιτευχτέα αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR). Αυτός ο περιορισμός προκύπτει επειδή η κβαντοποίηση του σήματος εισάγει ένα σφάλμα γνωστό ως θόρυβος κβαντοποίησης, το οποίο αποτελεί το ελάχιστο δυνατό επίπεδο θορύβου. Ο θόρυβος κβαντοποίησης είναι μη γραμμικός και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σήματος, οδηγώντας σε διαφορετικούς υπολογισμούς για διάφορα μοντέλα σήματος. Εννοιολογικά, ο θόρυβος κβαντοποίησης μοντελοποιείται ως αναλογικό σήμα σφάλματος σε συνδυασμό με το σήμα πριν από την κβαντοποίηση, που συχνά αναφέρεται ως "προσθετικός θόρυβος". Το μέγιστο SNR που μπορεί να επιτευχθεί βασίζεται στην υπόθεση ενός τέλει σήματος εισόδου. Ωστόσο, σε σενάρια πραγματικού κόσμου, το σήμα εισόδου συχνά επηρεάζεται ήδη από θόρυβο, καθιστώντας το επίπεδο θορύβου του σήματος δυνητικά μεγαλύτερο από τον θόρυβο κβαντοποίησης. Επιπλέον, οι πρακτικοί μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό εισάγουν άλλες πηγές θορύβου που υποβαθμίζουν περαιτέρω το SNR σε σύγκριση με το θεωρητικό μέγιστο που ορίζεται από τον εξιδανικευμένο θόρυβο κβαντοποίησης. Αυτές οι πρόσθετες πηγές θορύβου μπορούν να περιλαμβάνουν τεχνικές σκόπιμης παραμόρφωσης. Στα ψηφιακά συστήματα, ενώ το SNR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έκφραση των επιπέδων θορύβου, είναι πιο συνηθισμένο να χρησιμοποιείται η μέτρηση Eb/No (ενέργεια ανά bit ανά φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου). Αυτή η μέτρηση παρέχει μια τυποποιημένη μέτρηση της ενέργειας του σήματος σε σχέση με τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Στο πλαίσιο των ψηφιακά διαμορφωμένων σημάτων, ο λόγος σφάλματος διαμόρφωσης (Measure Modulation Accuracy ή

MER) χρησιμεύει ως μέτρο του SNR. Προσδιορίζει ποσοτικά την ποιότητα και την πιστότητα του ψηφιακά διαμορφωμένου σήματος, αντανακλώντας τα χαρακτηριστικά SNR στο συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό του SNR ανάλογα της συνθήκης τους δικτύου είναι οι κάτωθι:

$$\text{SNR} = P_{\text{signal}}/P_{\text{noise}} \quad (1)$$

όπου P είναι η μέση ισχύς. Τόσο η ισχύς σήματος όσο και η ισχύς θορύβου πρέπει να μετρούνται στα ίδια ή ισοδύναμα σημεία ενός συστήματος και εντός του ίδιου εύρους ζώνης συστήματος. Ανάλογα με το αν το σήμα είναι σταθερά (s) ή τυχαία μεταβλητή (S), το SNR για τον τυχαίο θόρυβο N γίνεται:

$$\text{SNR} = s^2/E[N^2] \quad (2)$$

όπου το E αναφέρεται στην αναμενόμενη τιμή, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση το μέσο τετράγωνο του N. Επίσης μια εναλλακτική του παραπάνω τύπου είναι η ακόλουθη:

$$\text{SNR} = E[S^2]/E[N^2] \quad (3)$$

Εάν ο θόρυβος έχει αναμενόμενη τιμή μηδέν, όπως συνηθίζεται, ο παρονομαστής είναι η διακύμανσή του, το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης σ_N. Στην συνέχεια επειδή πολλά σήματα έχουν πολύ μεγάλο δυναμικό εύρος, τα σήματα εκφράζονται συχνά χρησιμοποιώντας τη λογαριθμική κλίμακα ντεσιμπέλ. Με βάση τον ορισμό του ντεσιμπέλ, το σήμα και ο θόρυβος μπορούν να εκφραστούν σε ντεσιμπέλ (dB) ως:

$$P_{\text{signal,dB}} = 10 \log_{10}(P_{\text{signal}}) \quad (4)$$

$$P_{\text{noise,dB}} = 10 \log_{10}(P_{\text{noise}}) \quad (5)$$

Η αντικατάσταση των ορισμών του SNR, του σήματος και του θορύβου σε ντεσιμπέλ στην εξίσωση 1 οδηγεί σε έναν τύπο για τον υπολογισμό του SNR σε ντεσιμπέλ, όταν το σήμα και ο θόρυβος είναι επίσης σε ντεσιμπέλ:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = P_{\text{signal,dB}} - P_{\text{noise,dB}} \quad (6)$$

Στον παραπάνω τύπο, το P μετριέται σε μονάδες ισχύος, όπως watt (W) ή milliwatts (mW), και ο SNR είναι ένας καθαρός αριθμός.

Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης για τη μετάδοση δεδομένων μέσω ενός καναλιού, όπως η διαμόρφωση πλάτους (Amplitude Modulation ή AM), η διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation ή FM) και η διαμόρφωση φάσης (Phase Modulation ή PM). Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές διαμόρφωσης έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Για παράδειγμα, η χρήση του Quadrature Amplitude Modulation (QAM) σε ένα κανάλι μπορεί να επιτρέψει υψηλότερο μέγιστο ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με τη χρήση Phase Shift Keying (PSK).

Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται επηρεάζει επίσης τον ρυθμό δεδομένων, οι τεχνικές κωδικοποίησης καναλιών όπως η Fix Forwarding Correction (FEC) μπορούν να βοηθήσουν στη διόρθωση σφαλμάτων που εμφανίζονται κατά τη μετάδοση δεδομένων και μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων. Στην πράξη, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων ενός καναλιού είναι συχνά μικρότερος από το θεωρητικό μέγιστο, λόγω περιορισμών του πραγματικού κόσμου όπως παρεμβολές, εξασθένηση και διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Αυτά τα αποτελέσματα μπορεί να προκαλέσουν σφάλματα στα μεταδιδόμενα δεδομένα και να μειώσουν τον συνολικό ρυθμό δεδομένων. Ωστόσο, η πρόοδος σε τεχνολογίες όπως η MIMO και η διαμόρφωση δέσμης μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και στη βελτίωση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων.

Συνοπτικά, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων ενός καναλιού είναι ένα μέτρο του πόσα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν σε αυτό το κανάλι χωρίς σφάλματα. Καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το εύρος ζώνης του καναλιού, η αναλογία σήματος προς θόρυβο, η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται και η κωδικοποίηση που εφαρμόζεται. Ενώ ο θεωρητικός μέγιστος ρυθμός δεδομένων μπορεί να υπολογιστεί, οι πραγματικοί περιορισμοί όπως η παρεμβολή και η εξασθένηση μπορούν να μειώσουν τον πραγματικό μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Ωστόσο, η πρόοδος της τεχνολογίας μπορεί να βοηθήσει στον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και στη βελτίωση του συνολικού ρυθμού δεδομένων.

3.2 Εισαγωγή στις τεχνικές υλοποίησης

Οι παρεμβολές είναι ένα κοινό ζήτημα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Παρεμβολές μπορεί να προκύψουν λόγω διαφόρων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων άλλων ασύρματων συσκευών, φυσικών εμποδίων και περιβαλλοντικών συνθηκών. Μία από τις κύριες πηγές παρεμβολών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι άλλες ασύρματες συσκευές. Για παράδειγμα, ένα κοντινό δίκτυο Wi-Fi μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, προκαλώντας διακοπή κλήσεων και αργές ταχύτητες δεδομένων. Επιπλέον, άλλα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μπορούν επίσης να προκαλέσουν παρεμβολές, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη πυκνότητα χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Τα φυσικά εμπόδια μπορούν επίσης να προκαλέσουν παρεμβολές σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Για παράδειγμα, κτίρια και άλλες κατασκευές μπορεί να μπλοκάρουν το σήμα και να προκαλέσουν διακοπή κλήσεων ή αργές ταχύτητες δεδομένων. Επιπλέον, φυσικά εμπόδια όπως δέντρα, λόφοι και υδάτινα σώματα μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν επίσης να έχουν αντίκτυπο στην απόδοση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Για παράδειγμα, οι καιρικές συνθήκες όπως η βροχή και το χιόνι μπορεί να επηρεάσουν τη διάδοση των ραδιοκυμάτων, προκαλώντας παρεμβολές και μειώνοντας την εμβέλεια του δικτύου. Επιπλέον, η θερμοκρασία και η υγρασία μπορούν να έχουν αντίκτυπο στην απόδοση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Για τον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνικών και τεχνολογιών. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM) για να διαιρέσουν το διαθέσιμο φάσμα σε μικρότερες ζώνες, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο ταυτόχρονα. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες, όπως τη διαμόρφωση δέσμης για να κατευθύνουν το σήμα σε συγκεκριμένες συσκευές και τον διαχωρισμό δικτύου για να δώσουν προτεραιότητα σε διαφορετικούς τύπους κίνησης [10].

Επιπλέον, οι πάροχοι δικτύου χρησιμοποιούν επίσης προηγμένο λογισμικό και αλγόριθμους για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και την αποφυγή παρεμβολών. Αυτό περιλαμβάνει τεχνικές όπως η ακύρωση παρεμβολών, η οποία χρησιμοποιείται για την αφαίρεση ανεπιθύμητων σημάτων από το δίκτυο και η επιλογή δυναμικής συχνότητας (Dynamic Frequency Selection ή DFS), η οποία χρησιμοποιείται για αυτόματη εναλλαγή σε διαφορετική συχνότητα όταν ανιχνεύεται παρεμβολή. Μια άλλη στρατηγική που εξετάζεται για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στα δίκτυα 5G είναι η χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος. Το μη αδειοδοτημένο φάσμα αναφέρεται στις συχνότητες που δεν έχουν εκχωρηθεί σε συγκεκριμένο χειριστή ή χρήστη και είναι διαθέσιμες για χρήση από οποιονδήποτε. Αυτό περιλαμβάνει συχνότητες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται για Wi-Fi. Η χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του αντίκτυπου των παρεμβολών, καθώς υπάρχουν λιγότεροι περιορισμοί στη χρήση αυτών των συχνοτήτων και είναι ευκολότερο να βρεθεί ένα σαφές κανάλι επικοινωνίας. Η τεχνολογία γνωστικού ραδιοφώνου εξετάζεται επίσης ως λύση για παρεμβολές σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η τεχνολογία γνωστικού ραδιοφώνου επιτρέπει στις συσκευές να προσαρμόζονται στο περιβάλλον και να αλλάζουν δυναμικά τις παραμέτρους λειτουργίας τους για την αποφυγή παρεμβολών. Αυτό περιλαμβάνει την προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης, της συχνότητας και του σχήματος διαμόρφωσης για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των παρεμβολών. Τέλος, η χρήση

αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligent ή AI) εξετάζεται επίσης ως λύση για παρεμβολές σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση δεδομένων δικτύου σε πραγματικό χρόνο και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον τρόπο βελτιστοποίησης του δικτύου με βάση τις τρέχουσες συνθήκες. Για παράδειγμα, ένας αλγόριθμος τεχνητής νοημοσύνης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει πού είναι πιθανό να εμφανιστούν παρεμβολές και να προσαρμόσει ανάλογα το δίκτυο για να ελαχιστοποιήσει τον αντίκτυπό τους.

Μια άλλη στρατηγική που μπορεί να εφαρμοστεί για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι η χρήση του συντονισμού δικτύου και των συνεργατικών επικοινωνιών. Ο συντονισμός δικτύου και οι συνεργατικές επικοινωνίες αναφέρονται στη διαδικασία πολλαπλών ασύρματων συσκευών που συνεργάζονται για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Αυτό περιλαμβάνει τεχνικές όπως η επικοινωνία συσκευής με συσκευή (Device to Device ή D2D), όπου οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας, αντί να διέρχονται από το κυψελοειδές δίκτυο, και η συνεργατική αναμετάδοση, όπου οι συσκευές λειτουργούν ως ρελέ για άλλες συσκευές για να επεκτείνουν την εμβέλεια του δικτύου. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του αντίκτυπου των παρεμβολών δημιουργώντας πολλαπλές διαδρομές επικοινωνίας και επιτρέποντας στις συσκευές να μοιράζονται πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες του δικτύου.

Μια άλλη προσέγγιση για τον μετριασμό των παρεμβολών είναι η χρήση τεχνολογιών δικτύωσης που ορίζονται από λογισμικό (Software-defined Networking ή SDN) και τεχνολογιών εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (Network Function Virtualization ή NFV). Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν στους πάροχοι δικτύων να διαμορφώνουν δυναμικά και να διαχειρίζονται τα δίκτυά τους με βάση τις τρέχουσες συνθήκες. Για παράδειγμα, οι πάροχοι δικτύου μπορούν να χρησιμοποιήσουν SDN και NFV για να προσαρμόσουν δυναμικά τη συχνότητα, την ισχύ και τη διαμόρφωση του δικτύου τους για να αποφύγουν παρεμβολές. Τέλος, η χρήση προηγμένων τεχνολογιών κεραιών μπορεί επίσης να βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι προηγμένες τεχνολογίες κεραιών, όπως η μαζική MIMO και η διαμόρφωση δέσμης μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του δικτύου εστιάζοντας το σήμα σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και δημιουργώντας πολλαπλές δέσμες για υποστήριξη πολλών χρηστών.

Συμπερασματικά, η παρεμβολή είναι μια σημαντική πρόκληση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση και την αξιοπιστία του δικτύου. Για τον μετριασμό των επιπτώσεων των παρεμβολών, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνικών και τεχνολογιών, όπως προηγμένο λογισμικό και αλγόριθμους, FDM, διαμόρφωση δέσμης, τεμαχισμός δικτύου, γνωστική ραδιοτεχνολογία, AI, συντονισμός δικτύου και συνεργατικές επικοινωνίες, SDN, NFV και προηγμένες τεχνολογίες κεραιών. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνολογίες, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των δικτύων τους και να διασφαλίσουν ότι οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε γρήγορες και αξιόπιστες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας.

3.2.1 Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing ή OFDM) είναι ένα σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε ένα ευρύ εύρος ζώνης. Είναι

ένας τύπος διαμόρφωσης πολλαπλών φορέων, που σημαίνει ότι διαιρεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλαπλούς υποφορείς. Κάθε δευτερεύων φορέας μεταφέρει ένα μικρό μέρος των δεδομένων, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και μειώνοντας τον αντίκτυπο της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών. Η βασική αρχή πίσω από το OFDM είναι η χρήση της ορθογωνικότητας, η οποία διασφαλίζει ότι οι υποφορείς είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, που σημαίνει ότι δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων σε διαφορετικούς υποφορείς, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και την απόδοση του συστήματος.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του OFDM είναι η ανθεκτικότητά του στην εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών. Η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών συμβαίνει όταν το σήμα ταξιδεύει μέσω πολλαπλών διαδρομών στον δέκτη, προκαλώντας την άφιξη διαφορετικών εκδόσεων του σήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εποικοδομητικές και καταστροφικές παρεμβολές, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση και να μειώσουν το SNR. Ωστόσο, η χρήση της ορθογωνικότητας στο OFDM διασφαλίζει ότι οι υποφορείς δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους, μειώνοντας τον αντίκτυπο της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών. Ένα άλλο πλεονέκτημα του OFDM είναι η ευελιξία του. Το OFDM επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης σε διαφορετικούς υποφορείς, ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος με την προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και τη διατήρηση υψηλού επιπέδου απόδοσης.

Στην συνέχεια σημαντικό είναι να αναφέρουμε την μετάδοση πολλαπλών φορέων, η οποία είναι μια τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε ένα ευρύ εύρος ζώνης. Είναι ένας τύπος διαμόρφωσης στον οποίο το διαθέσιμο εύρος ζώνης χωρίζεται σε πολλαπλούς υποφορείς. Κάθε δευτερεύων φορέας μεταφέρει ένα μικρό μέρος των δεδομένων, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και μειώνοντας τον αντίκτυπο της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μετάδοσης πολλαπλών φορέων είναι η στιβαρότητά της στο ξεθώριασμα πολλαπλών διαδρομών. Η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών συμβαίνει όταν το σήμα ταξιδεύει μέσω πολλαπλών διαδρομών στον δέκτη, προκαλώντας την άφιξη διαφορετικών εκδόσεων του σήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές παρεμβολές, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση και να μειώσουν το SNR. Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών υποφορέων στη μετάδοση πολλαπλών φορέων διασφαλίζει ότι οι υποφορείς δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους, μειώνοντας τον αντίκτυπο της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών [11].

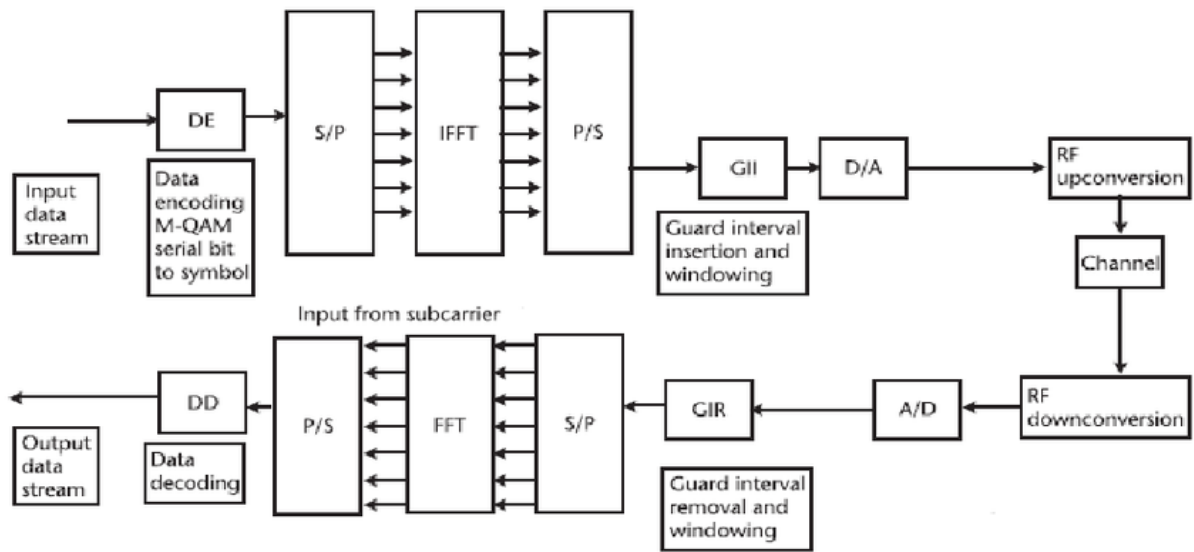
Η OFDM είναι ένας τύπος διαμόρφωσης πολλαπλών φορέων που χρησιμοποιεί ορθογωνικότητα για να διασφαλίσει ότι οι δευτερεύοντες φορείς δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας όπως η ψηφιακή τηλεόραση, η ψηφιακή εκπομπή ήχου, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LAN ή WLAN) και το πιο πρόσφατο πρότυπο κυψελοειδούς επικοινωνίας, το 5G. Στο 5G, το OFDM είναι γνωστό ως Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), το οποίο είναι μια έκδοση πολλαπλών χρηστών του OFDM. Επιτρέπει σε διαφορετικούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων εκχωρώντας διαφορετικούς υποφορείς σε κάθε χρήστη. Αυτό βελτιώνει τη φασματική απόδοση και επιτρέπει σε μεγάλο αριθμό χρηστών να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Εκτός από το OFDM, άλλες τεχνικές μετάδοσης πολλαπλών φορέων όπως το Discrete Multi-Tone (DMT) και το Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας. Το DMT χρησιμοποιείται

ευρέως σε συστήματα Digital Subscriber Line (DSL), ενώ το FBMC χρησιμοποιείται σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας όπως το 5G και το IoT.

Η μετάδοση πολλαπλών φορέων είναι μια τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε ένα ευρύ εύρος ζώνης. Είναι ένας τύπος διαμόρφωσης στον οποίο το διαθέσιμο εύρος ζώνης χωρίζεται σε πολλαπλούς υποφορείς, γεγονός που μειώνει τον αντίκτυπο της εξασθένησης πολλαπλών διαδρομών. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μετάδοσης πολλαπλών φορέων είναι η στιβαρότητά της στο ξεθώριασμα πολλαπλών διαδρομών, η ευελιξία και η υψηλή φασματική απόδοση. Η OFDM είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές μετάδοσης πολλαπλών φορέων και χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας όπως η ψηφιακή τηλεόραση, η ψηφιακή εκπομπή ήχου, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα και τα κυψελωτά συστήματα επικοινωνίας 5G. Εκτός από τη στιβαρότητα και την ευελιξία του, το OFDM παρέχει επίσης υψηλή φασματική απόδοση. Η φασματική απόδοση είναι το μέτρο του πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τη μετάδοση δεδομένων. Η OFDM είναι σε θέση να επιτύχει υψηλή φασματική απόδοση διαιρώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε πολλαπλούς υποφορείς, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων. Αυτό μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα και την απόδοση του συστήματος. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του OFDM είναι η ικανότητά του να μετριάξει τις παρεμβολές μεταξύ φορέων (Inter Carrier Interference ή ICI) και της παρεμβολές μεταξύ συμβόλων (Intersymbol Interference ή ISI). Το ICI εμφανίζεται όταν το σήμα από έναν δευτερεύοντα φορέα παρεμβαίνει με το σήμα από έναν άλλο δευτερεύοντα φορέα και το ISI εμφανίζεται όταν το σήμα από ένα σύμβολο παρεμβαίνει στο σήμα από ένα άλλο σύμβολο. Αυτό μπορεί να προκληθούν από εξασθένηση επιλεκτικής συχνότητας, μετατόπιση συχνότητας ή εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών. Τα συστήματα OFDM χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές, όπως εισαγωγή κυκλικού προθέματος, εξισορρόπηση και ακύρωση παρεμβολών για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων, γεγονός που βελτιώνει την ευρωστία του συστήματος. Ένα άλλο πλεονέκτημα του OFDM είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ποικιλία συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το OFDM χρησιμοποιείται ευρέως σε ψηφιακή τηλεόραση, ψηφιακή εκπομπή ήχου, ασύρματα τοπικά δίκτυα και συστήματα κινητής επικοινωνίας 5G. Αυτό το καθιστά μια ευέλικτη και ευρέως υιοθετημένη τεχνολογία για διαφορετικούς τύπους συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Τέλος, το OFDM είναι σχετικά απλό στην εφαρμογή του και δεν απαιτεί πολύπλοκες δομές δέκτη. Αυτό το καθιστά οικονομικά αποδοτικό και εύκολο στην εφαρμογή του σε διαφορετικούς τύπους συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να ωφελήσει πολύ τα συστήματα που απαιτούν δομές δεκτών χαμηλού κόστους και χαμηλής πολυπλοκότητας, όπως συσκευές IoT.

Συμπερασματικά, το OFDM είναι ένα σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα συστήματα επικοινωνίας. Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως στιβαρότητα σε εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών, υψηλή φασματική απόδοση, ικανότητα μετριασμού ICI και ISI, ευελιξία και απλότητα υλοποίησης. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν την OFDM μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία για διαφορετικούς τύπους συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε συστήματα κινητής επικοινωνίας 5G. Με την αυξανόμενη ζήτηση για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και αξιοπιστίας, το OFDM αναμένεται να συνεχίσει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο μέλλον της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: διάγραμμα αναπαράστασης ορθογώνιας πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας.

3.2.2 Πολλαπλή πρόσβαση σε ορθογώνια διαίρεση συχνότητας

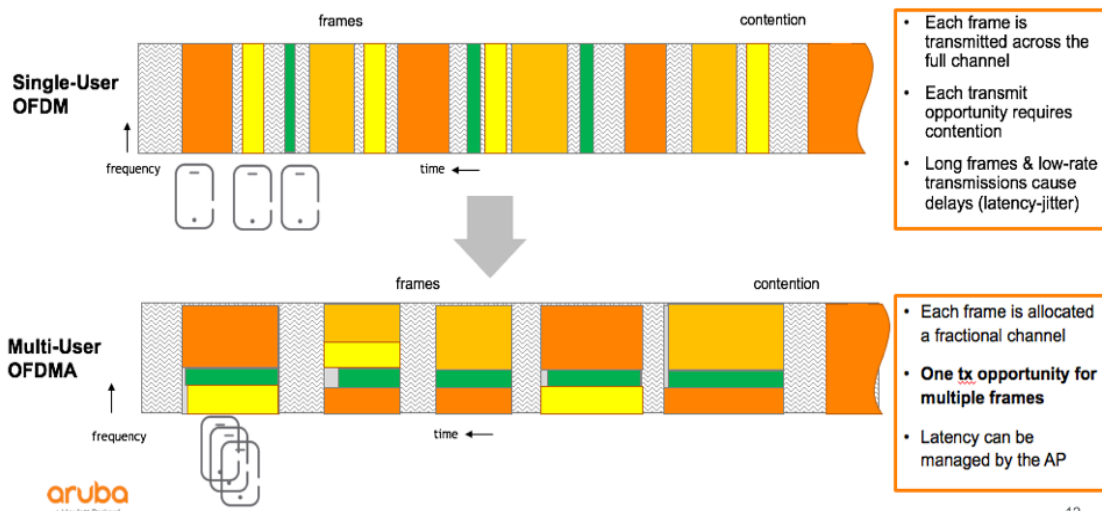
ΤΟ OFDMA είναι μια έκδοση πολλαπλών χρηστών του OFDM. Είναι μια τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, ιδιαίτερα στο πιο πρόσφατο πρότυπο κυψελοειδούς επικοινωνίας, το 5G. ΤΟ OFDMA είναι μια έκδοση πολλαπλών χρηστών του OFDM, η οποία επιτρέπει σε διαφορετικούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων εκχωρώντας διαφορετικούς υποφορείς σε κάθε χρήστη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του OFDM είναι η ικανότητά του να βελτιώνει τη φασματική απόδοση. Η φασματική απόδοση είναι το μέτρο του πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τη μετάδοση δεδομένων. Με την κατανομή διαφορετικών υποφορέων σε διαφορετικούς χρήστες, Το OFDMA είναι σε θέση να επιτύχει υψηλή φασματική απόδοση, επιτρέποντας σε περισσότερους χρήστες να μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Αυτό βελτιώνει τη χωρητικότητα και την απόδοση του συστήματος και επιτρέπει σε μεγάλο αριθμό χρηστών να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο ταυτόχρονα.

Το OFDMA επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης και ρυθμών δεδομένων σε διαφορετικούς υποφορείς, ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος με την προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και τη διατήρηση υψηλού επιπέδου απόδοσης. Επιπλέον, αυτό μπορεί επίσης να βελτιώσει την ευρωστία του συστήματος έναντι διαφορετικών τύπων βλαβών καναλιών. Το OFDMA παρέχει επίσης στιβαρότητα στις παρεμβολές μεταξύ χρηστών (Inter User Interference ή IUI). Το IUI εμφανίζεται όταν το σήμα από έναν χρήστη παρεμβαίνει στο σήμα από άλλο χρήστη. Με την κατανομή διαφορετικών υποφορέων σε διαφορετικούς χρήστες, Το OFDMA είναι σε θέση να μειώσει το IUI, γεγονός που βελτιώνει την ευρωστία του συστήματος. ΤΟ OFDMA επιτρέπει επίσης τη δυναμική κατανομή των πόρων. Πόροι όπως οι δευτερεύοντες μεταφορείς και η ισχύς μπορούν να κατανεμηθούν δυναμικά σε διαφορετικούς χρήστες ανάλογα με τις ανάγκες τους. Αυτό μπορεί να ωφελήσει τα συστήματα με μεγάλο αριθμό χρηστών, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων και τη βελτιωμένη απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, επιτρέπει επίσης στο σύστημα να προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κυκλοφορίας, κάτι που μπορεί να ωφελήσει

πολύ τα συστήματα με υψηλή μεταβλητότητα στην κυκλοφορία. Το OFDMA παρέχει επίσης υποστήριξη για την παροχή Quality of Service (QoS). Με την κατανομή διαφορετικών υπομεταφορέων σε διαφορετικούς χρήστες, Το OFDMA επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών σε διαφορετικούς χρήστες. Αυτό μπορεί να ωφελήσει σε μεγάλο βαθμό συστήματα με ποικίλο σύνολο χρηστών, καθώς επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών σε διαφορετικούς τύπους χρηστών. Ένα άλλο πλεονέκτημα του OFDMA είναι η ικανότητά του να υποστηρίζει μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Το OFDMA επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων τόσο προς τις κατευθύνσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική απόδοση και χωρητικότητα του συστήματος (Εικόνα 6).

Συμπερασματικά, Το OFDMA είναι μια έκδοση πολλαπλών χρηστών του OFDM που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε συστήματα κινητής επικοινωνίας 5G. Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα όπως βελτιωμένη φασματική απόδοση, ευελιξία, ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών μεταξύ χρηστών, δυναμική κατανομή πόρων, υποστήριξη παροχής ποιότητας υπηρεσίας και υποστήριξη για μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το OFDMA μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία για διαφορετικούς τύπους συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, ιδιαίτερα σε συστήματα κινητής επικοινωνίας 5G. Με την αυξανόμενη ζήτηση για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και αξιοπιστίας, Το OFDMA αναμένεται να συνεχίσει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο μέλλον της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών [12].

Multi-user OFDMA compared with single-user OFDM 3x higher throughput for short packets or multiple clients



Εικόνα 6 Συγκριτική αναπαράσταση για την πολλαπλή πρόσβαση σε ορθογώνια διαίρεση συχνότητας

3.2.3 Τεχνική διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing)

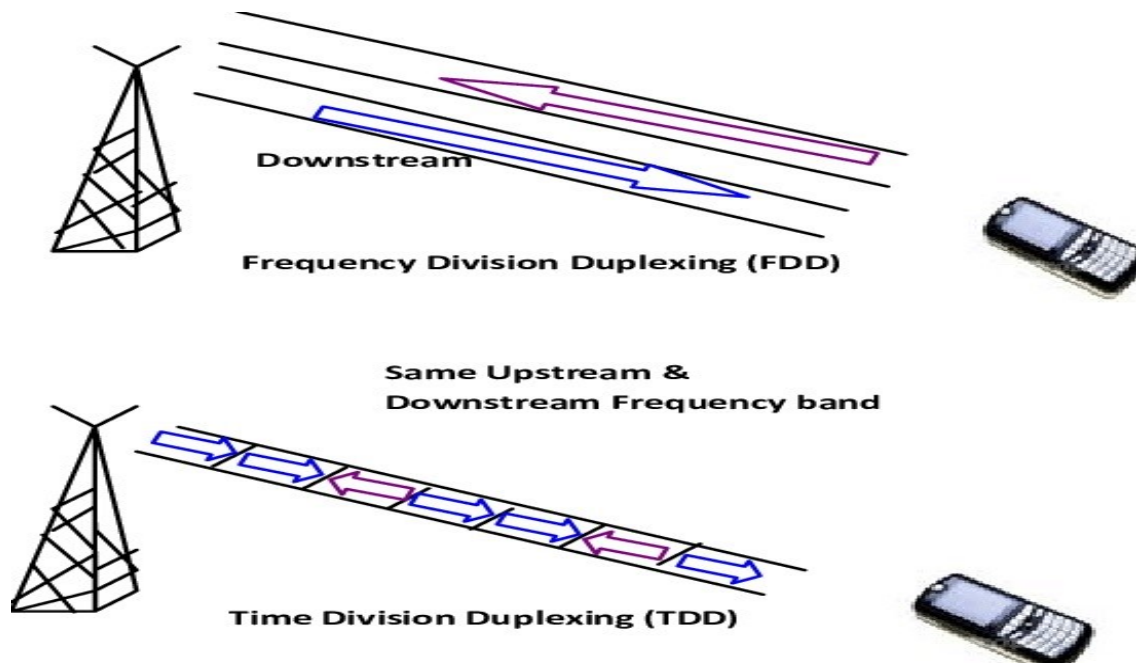
Η Time Division Duplexing (TDD) χρησιμοποιείται σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Είναι μια τεχνική που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, με την κατανομή διαφορετικών χρονοθυρίδων για μετάδοση και

λήψη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του TDD είναι η ικανότητά του να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού. Στα συστήματα TDD, οι συνθήκες του καναλιού μπορούν να παρακολουθούνται και οι χρονοθυρίδες μετάδοσης και λήψης μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα, για να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση. Αυτό μπορεί να ωφελήσει πολύ τα συστήματα με υψηλή μεταβλητότητα στις συνθήκες καναλιού, καθώς επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και να διατηρεί υψηλό επίπεδο απόδοσης [13].

Ένα άλλο πλεονέκτημα της TDD είναι η ικανότητά του να υποστηρίζει μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Η TDD επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων σε κατευθύνσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική απόδοση και χωρητικότητα του συστήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συστήματα με υψηλή ασυμμετρία στην κίνηση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων και τη βελτιωμένη απόδοση του συστήματος. Με την κατανομή διαφορετικών χρονοθυρίδων για μετάδοση και λήψη, η TDD επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών σε διαφορετικούς χρήστες. Αυτό μπορεί να ωφελήσει σε μεγάλο βαθμό συστήματα με ποικίλο σύνολο χρηστών, καθώς επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών σε διαφορετικούς τύπους χρηστών. Ένα άλλο πλεονέκτημα της TDD είναι ότι απαιτεί λιγότερο πολύπλοκο συγχρονισμό και σηματοδότηση σε σύγκριση με άλλες μεθόδους διπλής όψης, όπως το Frequency Division Duplexing (FDD). Αυτό μπορεί να ωφελήσει πολύ τα συστήματα με απαιτήσεις χαμηλού κόστους και χαμηλής πολυπλοκότητας, καθώς καθιστά το σύστημα πιο οικονομικό και ευκολότερο στην εφαρμογή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα TDD είναι πιο επιρρεπή σε παρεμβολές μεταξύ μεταδόσεων άνω ζεύξης και κάτω ζεύξης, καθώς και οι δύο εκπομπές πραγματοποιούνται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Για να μετριαστεί αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, όπως η δυναμική κατανομή χρονοθυρίδων, ο έλεγχος ισχύος και η διαμόρφωση δέσμης. Ένας άλλος περιορισμός των συστημάτων TDD είναι η ανάγκη για ακριβή συγχρονισμό χρόνου μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού σταθμού. Αυτό είναι κρίσιμο για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία και να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές μεταξύ μεταδόσεων άνω και κάτω ζεύξης. Τα τελευταία χρόνια, η TDD έχει αναπτυχθεί όλο και περισσότερο σε προηγμένα κυψελωτά συστήματα όπως το 4G και το 5G. Στο 4G, η TDD χρησιμοποιείται στο πρότυπο Time Division-Long Term Evolution (TD-LTE), το οποίο αποτελεί εναλλακτική του προτύπου Frequency Division-Long Term Evolution (FD-LTE). Στο 5G, η TDD χρησιμοποιείται στο πρότυπο New Radio (NR), το οποίο έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων κινητών ευρυζωνικών υψηλής ταχύτητας, επικοινωνιών χαμηλής καθυστέρησης και μαζικών επικοινωνιών τύπου μηχανής (Εικόνα 7).

Συμπερασματικά, η TDD είναι μια μέθοδος διπλής όψης που επιτρέπει στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, εκχωρώντας διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Παρέχει προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού, υποστήριξη για μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, λιγότερο περίπλοκο συγχρονισμό και σηματοδότηση. Ωστόσο, είναι επιρρεπής σε παρεμβολές μεταξύ μεταδόσεων άνω ζεύξης και κάτω ζεύξης και απαιτείται ακριβής συγχρονισμός χρόνου. Η TDD χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, όπως συστήματα κινητής επικοινωνίας 4G και 5G, ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και το IoT και ο ρόλος του στο μέλλον της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται [14].



Εικόνα 7: Συγκριτική αναπαράσταση της τεχνικής διαίρεσης χρόνου

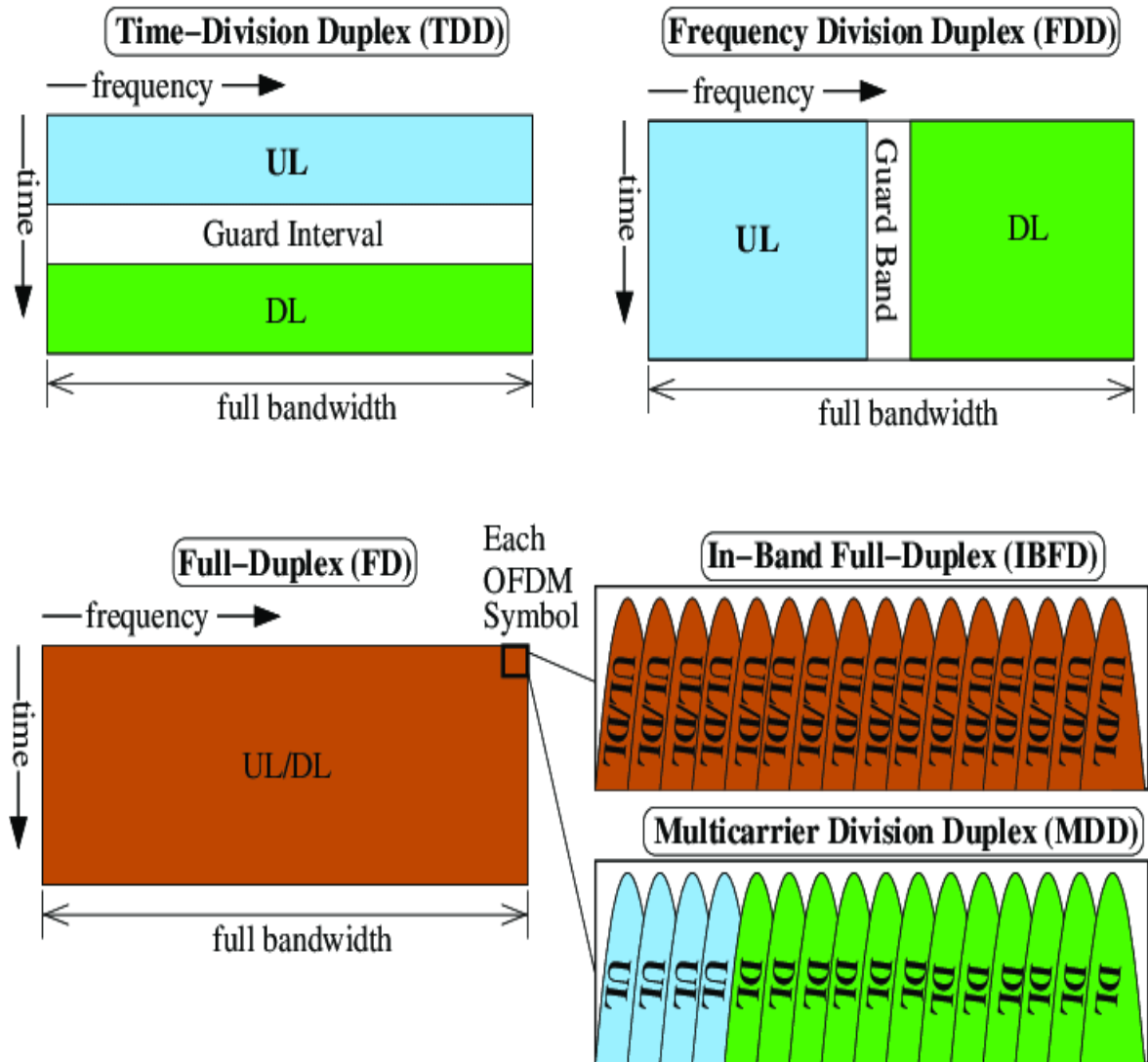
3.2.4 Τεχνική διαίρεσης συχνότητας (Frequency-Division Duplexing)

Η Frequency-Division Duplexing (FDD) είναι ένας τύπος μεθόδου διπλής όψης που χρησιμοποιείται σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών. Είναι μια τεχνική που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, εκχωρώντας ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων για μετάδοση και λήψη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του FDD είναι η ικανότητά του να παρέχει ανεξάρτητο έλεγχο των μεταδόσεων άνω και κάτω ζεύξης. Στα συστήματα FDD, οι μεταδόσεις άνω και κάτω ζεύξης συμβαίνουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, γεγονός που επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της ισχύος μετάδοσης, των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και άλλων παραμέτρων. Αυτό μπορεί να ωφελήσει πολύ τα συστήματα με υψηλή ασυμμετρία στην κίνηση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, καθώς επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων και τη βελτιωμένη απόδοση του συστήματος.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του FDD είναι η ικανότητά του να παρέχει καλύτερη απομόνωση μεταξύ των μεταδόσεων άνω και κάτω ζεύξης. Στα συστήματα FDD, οι μεταδόσεις άνω και κάτω ζεύξης συμβαίνουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, γεγονός που βελτιώνει την απομόνωση μεταξύ των δύο εκπομπών. Αυτό μπορεί να ωφελήσει πολύ τα συστήματα με υψηλές παρεμβολές μεταξύ των μεταδόσεων ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης, καθώς επιτρέπει βελτιωμένη απόδοση και χωρητικότητα συστήματος. Το FDD παρέχει επίσης υποστήριξη για την παροχή QoS. Με την κατανομή διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων για μετάδοση και λήψη, το FDD επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών σε διαφορετικούς χρήστες. Ένα άλλο πλεονέκτημα του FDD είναι ότι υποστηρίζεται ευρέως από υπάρχοντα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Το FDD έχει υιοθετηθεί ευρέως σε διάφορα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, όπως συστήματα κινητής επικοινωνίας 3G και 4G, ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN και το IoT.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα FDD απαιτούν πιο πολύπλοκα εξαρτήματα φιλτραρίσματος και διπλής όψης σε σύγκριση με άλλες μεθόδους διπλής όψης όπως η TDD. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος και μπορεί επίσης να οδηγήσει σε επιπλέον απώλεια ισχύος. Ένας άλλος περιορισμός των συστημάτων FDD είναι η ανάγκη για μεγαλύτερη ποσότητα φάσματος συχνοτήτων σε σύγκριση με τα συστήματα TDD. Αυτό μπορεί να είναι μια πρόκληση σε περιβάλλοντα με περιορισμό φάσματος, καθώς μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν ή τον όγκο των δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν (Εικόνα 8).

Συμπερασματικά, το FDD είναι μια μέθοδος διπλής όψης που χρησιμοποιείται σε συστήματα ασύρματων επικοινωνιών που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων με την κατανομή ξεχωριστών ζωνών συχνοτήτων για μετάδοση και λήψη. Παρέχει ανεξάρτητο έλεγχο μετάδοσης ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, καλύτερη απομόνωση μεταξύ μεταδόσεων άνω ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης, υποστήριξη παροχής ποιότητας υπηρεσίας και ευρεία υποστήριξη από υπάρχοντα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το FDD μια ελκυστική επιλογή για συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, ιδιαίτερα για συστήματα με υψηλή ασυμμετρία στην κίνηση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, υψηλές παρεμβολές μεταξύ των μεταδόσεων ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης και υπάρχοντα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας. Με την αυξανόμενη ζήτηση για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και αξιοπιστίας, το FDD αναμένεται να συνεχίσει να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο μέλλον της τεχνολογίας ασύρματων επικοινωνιών [16].



Εικόνα 8: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση της τεχνικής διαίρεσης συχνότητας

4

Αποσύνδεση της ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας στα ετερογενή δίκτυα

Η ιστορία των 5G HetNets μπορεί να ανιχνευθεί στις αρχές της δεκαετίας του 2000, όταν η έννοια των ετερογενών δικτύων (Heterogeneous networks ή HetNets) εισήχθη για πρώτη φορά ως ένας τρόπος βελτίωσης της κάλυψης και της χωρητικότητας των κυψελοειδών δικτύων. Τα HetNets περιλαμβάνουν την ανάπτυξη πολλαπλών σημείων πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένων κυψελών μακροεντολής, μικρών κυψελών και σημείων πρόσβασης Wi-Fi, για να συμπληρώσουν την κάλυψη και τη χωρητικότητα των παραδοσιακών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G οδήγησε σε μια νέα γενιά HetNets, σχεδιασμένων να υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης πέρα από τις παραδοσιακές ευρυζωνικές συνδέσεις για κινητά. Αυτές περιλαμβάνουν εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, έξυπνες πόλεις και το IoT, οι οποίες απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστη συνδεσιμότητα χαμηλής καθυστέρησης.

Ένας από τους βασικούς μοχλούς των 5G HetNets είναι η ανάγκη υποστήριξης μιας μαζικής αύξησης της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Σύμφωνα με τον Visual Networking Index (VNI) της Cisco, η παγκόσμια κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να επταπλασιαστεί μεταξύ 2016 και 2021, λόγω του πολλαπλασιασμού των φορητών συσκευών και της δημοτικότητας των υπηρεσιών ροής. Για να καλύψουν αυτή τη ζήτηση, τα 5G HetNets χρησιμοποιούν προηγμένες ασύρματες τεχνολογίες και συχνότητες, συμπεριλαμβανομένων συχνοτήτων κυμάτων χιλιοστών mmWave και τεράστιων κεραιών MIMO. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου, επιτρέποντας ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών και υπηρεσιών. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα των 5G HetNets είναι η ευελιξία τους. Συνδυάζοντας πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες και συχνότητες, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να προσαρμόσουν τα δίκτυά τους ώστε να ανταποκρίνονται στις διαφορετικές ανάγκες περιπτώσεων χρήσης και τοποθεσιών. Για παράδειγμα, σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, μικρές κυψέλες και συχνότητες mmWave μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή κάλυψης υψηλής

χωρητικότητας, ενώ στις αγροτικές περιοχές, οι ζώνες χαμηλότερης συχνότητας και οι μεγαλύτερες μακροκυτταρικές κυψέλες μπορεί να είναι πιο κατάλληλες.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, τα 5G HetNets θέτουν επίσης ορισμένες προκλήσεις. Μία από τις βασικές προκλήσεις είναι η διαχείριση παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών και συχνοτήτων. Όταν χρησιμοποιούνται πολλά σημεία πρόσβασης σε κοντινή απόσταση, μπορούν να παρεμβαίνουν μεταξύ τους και να μειώσουν τη συνολική απόδοση του δικτύου. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, τα 5G HetNets βασίζονται σε προηγμένες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, όπως η μετάδοση CoMP και η διαμόρφωση δέσμης. Μια άλλη πρόκληση που αντιμετωπίζουν τα 5G HetNets είναι η ανάγκη εξισορρόπησης του κόστους και της πολυπλοκότητας της ανάπτυξης και διαχείρισης πολλαπλών σημείων πρόσβασης με τα οφέλη που παρέχουν. Ενώ οι μικρές κυψέλες μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, μπορεί επίσης να είναι δαπανηρή η ανάπτυξη και η συντήρησή τους. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων εξερευνούν νέα επιχειρηματικά μοντέλα, όπως η κοινή χρήση υποδομών και το NaaS, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του κόστους και στην αύξηση της αποτελεσματικότητας.

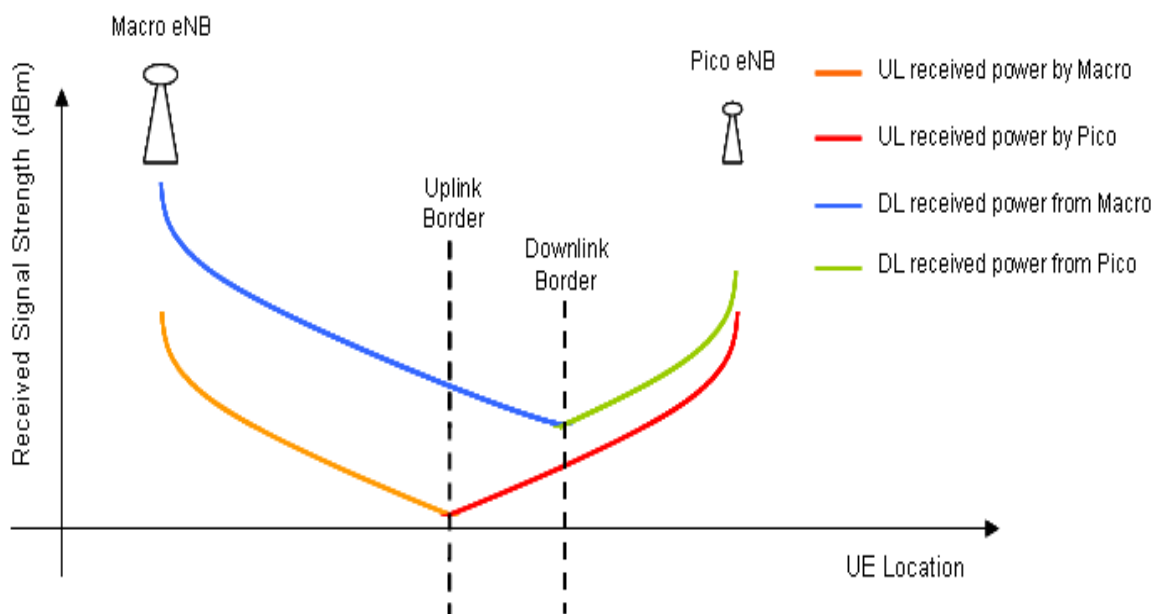
Συμπερασματικά, η ιστορία των 5G HetNets είναι στενά συνδεδεμένη με την ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G και την ανάγκη παροχής συνδεσιμότητας υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και υπηρεσιών. Καθώς η τεχνολογία 5G συνεχίζει να εξελίσσεται, τα HetNets είναι πιθανό να γίνουν ακόμη πιο σημαντικά, επιτρέποντας νέες και καινοτόμες περιπτώσεις χρήσης και παρέχοντας την ευελιξία και την προσαρμογή που απαιτούνται για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ενός ταχέως μεταβαλλόμενου ασύρματου τοπίου.

Μια τεχνική για την βελτιστοποίηση των 5G HetNets είναι η αποσύνδεση Downlink/Uplink η οποία αποτελεί ανώτερη τεχνολογία σε σύγκριση με την παραδοσιακή σύζευξη Downlink/Uplink, που εφαρμόζεται ευρέως στα 5G HetNets. Τα HetNets χαρακτηρίζονται από την παρουσία διαφόρων τύπων σταθμών βάσης (Base Station ή BS) με διαφορετικές ισχύς μετάδοσης, περιοχές κάλυψης και επίπεδα χωρητικότητας, που συνυπάρχουν στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Συμβατικά, τα κυψελωτά δίκτυα έχουν επιδείξει στενά συζευγμένες μεταδόσεις Downlink (DL) και Uplink (UL), πράγμα που σημαίνει ότι το ίδιο BS είναι υπεύθυνο τόσο για τη μετάδοση όσο και για τη λήψη σημάτων από κινητές συσκευές. Ωστόσο, στα HetNets, η αποσύνδεση DL/UL μπορεί να επιτευχθεί με την αντιστοίχιση διαφορετικών BS για μεταδόσεις DL και UL, αντίστοιχα. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την πιο αποτελεσματική κατανομή και αξιοποίηση των πόρων, οδηγώντας σε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση του δικτύου και στην εμπειρία του χρήστη.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της αποσύνδεσης DL/UL είναι ότι επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών τύπων BS με συμπληρωματικά χαρακτηριστικά για μεταδόσεις DL και UL. Για παράδειγμα, τα macro BS, με υψηλή ισχύ μετάδοσης και μεγάλες περιοχές κάλυψης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταδόσεις DL, ενώ τα BS μικρών κυψελών, με χαμηλή ισχύ μετάδοσης και περιορισμένες περιοχές κάλυψης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταδόσεις UL. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μετριάσει τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, να βελτιώσει τη φασματική απόδοση και να βελτιώσει την ποιότητα της υπηρεσίας για τους χρήστες. Η αποσύνδεση DL/UL επιτρέπει τη δυναμική κατανομή πόρων με βάση τη ζήτηση κίνησης και τις συνθήκες δικτύου. Κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης κυκλοφορίας, μπορούν να διατεθούν πρόσθετοι πόροι σε μεταδόσεις DL που χρησιμοποιούν macro BS. Από την άλλη πλευρά, κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης, οι πόροι μπορούν να κατευθυνθούν προς μεταδόσεις UL χρησιμοποιώντας BS μικρών κυψελών. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα την πιο αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου και την καλύτερη απόδοση του δικτύου, κάτι που δεν είναι δυνατό σε δίκτυα σύζευξης Downlink/Uplink. Επιπλέον, η αποσύνδεση DL/UL είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας των HetNets. Με την ανάπτυξη διαφορετικών τύπων BS για μεταδόσεις DL και UL, οι πάροχοι δικτύου μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά την αντιστάθμιση μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας, η οποία είναι απαραίτητη για την παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας στους χρήστες. Αντίθετα, η σύζευξη Downlink/Uplink περιορίζει την επιλογή των BS και για τις μεταδόσεις DL και UL, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συμφόρηση δικτύου, υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσιών και κακή εμπειρία χρήστη.

Επίσης ένα χαρακτηριστικό της αποσύνδεσης κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης είναι ότι μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της συμφόρησης του δικτύου, ιδιαίτερα σε περιόδους αιχμής χρήσης. Κατανέμοντας περισσότερο εύρος ζώνης στην κατεύθυνση κατερχόμενης ζεύξης όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση για εφαρμογές, που απαιτούν μεγάλη ροή δεδομένων, το δίκτυο μπορεί να εξασφαλίσει μια πιο ομαλή και πιο αξιόπιστη εμπειρία για τους χρήστες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ικανοποίηση και διατήρηση των πελατών, καθώς και σε βελτιωμένα έσοδα για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Ένα άλλο πλεονέκτημα του DUDe είναι ότι επιτρέπει την πιο αποτελεσματική χρήση των πόρων σε περιοχές με υψηλή ασυμμετρία κυκλοφορίας, όπου υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ του όγκου της κίνησης κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης. Για παράδειγμα, σε μια κατοικημένη περιοχή όπου οι περισσότεροι χρήστες κάνουν ροή βίντεο, το δίκτυο μπορεί να εκχωρήσει περισσότερο εύρος ζώνης στην κατεύθυνση κατερχόμενης ζεύξης, ενώ εξακολουθεί να παρέχει επαρκές εύρος ζώνης ανόδου για δραστηριότητες όπως η τηλεδιάσκεψη ή η μεταφόρτωση αρχείων. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της συμφόρησης του δικτύου και στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου.

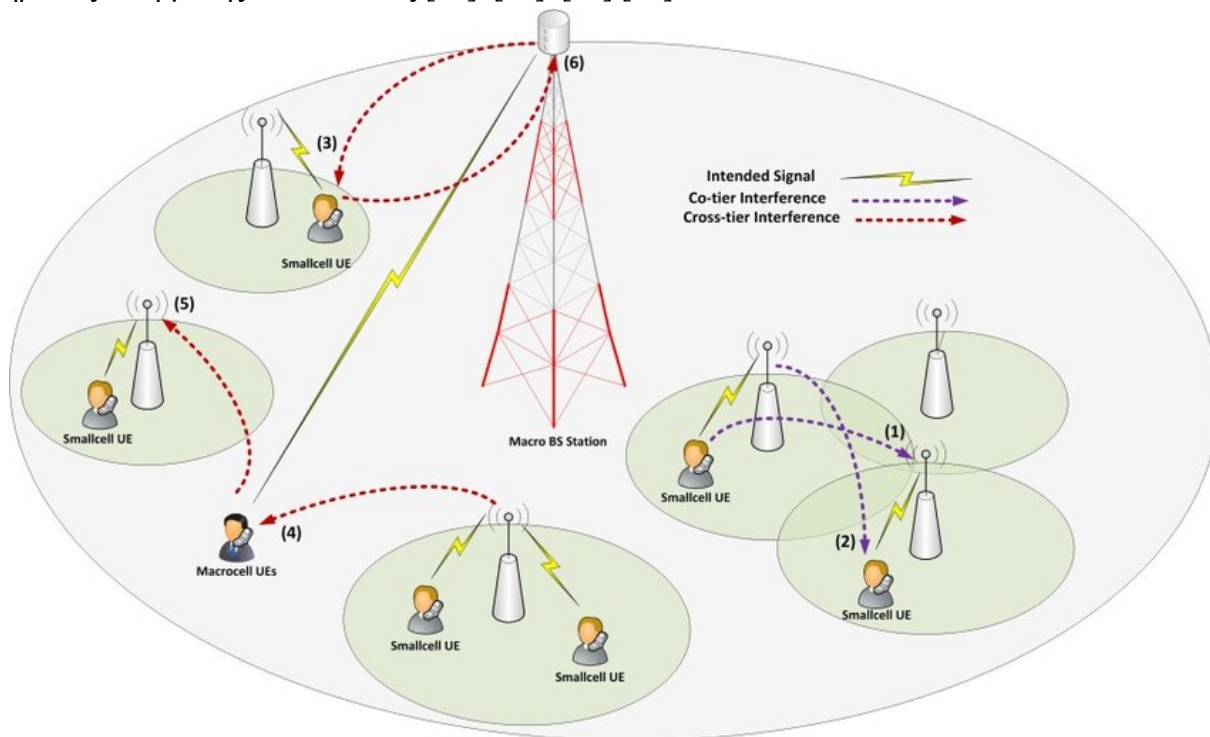


Εικόνα 9: Γραφική αναπαράσταση της τεχνολογίας DUDe

Όπως απεικονίζεται στην (Εικόνα 9), όταν ένας χρήστης μετακινείται από ένα κελί μιας κεραίας macro σε ένα κελί μιας κεραίας pico, ή οποία είναι μια κεραία μικρής κάλυψης, υπάρχει μια απόσταση μεταξύ ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, η οποία αναγκάζει τον χρήστη να λάβει ένα ισχυρότερο σήμα για το κανάλι ανόδου από την κεραία pico και για το

κανάλι κατερχόμενης ζεύξης από την macro cell κεραία. Αυτό το σενάριο δημιουργεί μια ευκαιρία για την αξιοποίηση της τεχνολογίας DUE, επιτρέποντας μια ξεχωριστή σύνδεση για τα κανάλια ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Αυτό μπορεί να απελευθερώσει πόρους και κίνηση από την macro cell κεραία, μειώνοντας το φορτίο της και αυξάνοντας την απόδοσή της. Κατανέμοντας τους χρήστες πιο ομοιόμορφα στο δίκτυο, η τεχνολογία DUE μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα του δικτύου και την ενεργειακή απόδοση, με αποτέλεσμα θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον και στην απόδοση της μπαταρίας των κινητών τερματικών συσκευών. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκφόρτωση της κυκλοφορίας από την macro cell κεραία προς τη κεραία pico για το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης, γεγονός που μειώνει τις παρεμβολές και βελτιώνει τη συνολική ποιότητα της υπηρεσίας για τους χρήστες. Τα οφέλη της τεχνολογίας DUE επισημαίνονται στην τεχνική έκθεση 3GPP, η οποία παρέχει μια πιο λεπτομερή επισκόπηση της τεχνολογίας και της εφαρμογής της. Συνολικά, η τεχνολογία DUE προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων του δικτύου και τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, ενώ παράλληλα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ασύρματων δικτύων. Συμπερασματικά, το DUE είναι μια σημαντική τεχνική για τη βελτιστοποίηση της χρήσης εύρους ζώνης σε δίκτυα 5G, επιτρέποντας πιο ευέλικτη κατανομή πόρων με βάση τη ζήτηση κίνησης, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικές βελτιώσεις στην αποτελεσματικότητα του δικτύου, στην εμπειρία χρήστη και στη συνολική απόδοση του δικτύου (Εικόνα 10).

Καταλήγοντας, η αποσύνδεση DL/UL είναι μια ανώτερη τεχνολογία για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των HetNets. Επιτρέποντας τη χρήση διαφορετικών τύπων BS για μεταδόσεις DL και UL, μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα του δικτύου, να μειώσει τις παρεμβολές. Επιπλέον, μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της κάλυψης και της χωρητικότητας των HetNets, κάτι που είναι απαραίτητο για την κάλυψη της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης για υπηρεσίες ασύρματης επικοινωνίας [17], [18], [19],[20].



Εικόνα 10: γραφικής αναπαράσταση ενός ετερογενούς δικτύου 5ης γενιάς

4.2 Τα σημαντικότερα οφέλη της διαχώρισης της ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης.

Τα πλεονεκτήματα της Αποσύνδεσης Downlink/Uplink στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας είναι πολλαπλά, περιλαμβάνοντας μια ολοκληρωμένη σειρά πλεονεκτημάτων που συμβάλλουν στη συνολική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, της κατανομής πόρων και της εμπειρίας χρήστη.

Ενισχυμένη χωρητικότητα δικτύου: Η αποσύνδεση Downlink/Uplink επιτρέπει στους πάροχους δικτύου να αξιοποιούν διαφορετικούς σταθμούς βάσης για μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Διαχωρίζοντας τις διαδρομές μετάδοσης, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να βελτιστοποιήσουν την κάλυψη και τις αντισταθμίσεις χωρητικότητας, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση δεδομένων, μειωμένη συμφόρηση και βελτιωμένη επεκτασιμότητα για την κάλυψη των κλιμακούμενων απαιτήσεων των σύγχρονων ασύρματων εφαρμογών και υπηρεσιών.

Μειωμένες παρεμβολές: Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της Αποσύνδεσης Downlink/Uplink έγκειται στην ικανότητά της να ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές μεταξύ σταθμών βάσης που λειτουργούν σε κοντινή απόσταση. Χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες ή χρονοθυρίδες για μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, οι πάροχοι δικτύου μπορούν να μειώσουν τις παρεμβολές παρακείμενου καναλιού, ενισχύοντας έτσι τη φασματική απόδοση. Αυτή η μείωση των παρεμβολών μεταφράζεται σε υψηλότερη ποιότητα σήματος, βελτιωμένους ρυθμούς δεδομένων και βελτιωμένη συνολική απόδοση του δικτύου, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Δυναμική κατανομή πόρων: Η αποσύνδεση κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης εξουσιοδοτεί τους πάροχους δικτύου να εκχωρούν δυναμικά πόρους με βάση τις απαιτήσεις κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο και τις συνθήκες δικτύου. Κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής κυκλοφορίας, οι πόροι μπορούν να κατανεμηθούν έξυπνα για να δοθεί προτεραιότητα στις μεταδόσεις κατερχόμενης ζεύξης, αξιοποιώντας τους σταθμούς βάσης μακροεντολών για να ικανοποιήσουν την υψηλή ζήτηση δεδομένων. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια περιόδων μειωμένης κίνησης, οι πόροι μπορούν να μετατοπιστούν προς μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση των πόρων και τη βέλτιστη απόδοση του δικτύου. Αυτή η δυναμική κατανομή πόρων διασφαλίζει την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων του δικτύου, ελαχιστοποιώντας τη σπατάλη και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Αυξημένη εμπειρία χρήστη: Η αποσύνδεση κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης συμβάλλει άμεσα σε μια αυξημένη εμπειρία χρήστη βελτιώνοντας τις βασικές μετρήσεις απόδοσης. Η βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς δεδομένων, μειωμένο λανθάνοντα χρόνο και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας, επιτρέποντας απρόσκοπτη ροή πολυμέσων, ομαλές φωνητικές κλήσεις και βιντεοκλήσεις και αποκριτική περιήγηση στον Ιστό. Επιπλέον, η μείωση των παρεμβολών μεταφράζεται σε υψηλότερη αξιοπιστία σήματος, με αποτέλεσμα λιγότερες κλήσεις που απορρίπτονται, λιγότερα σφάλματα μετάδοσης δεδομένων και βελτιωμένη συνολική συνδεσιμότητα. Η δυναμική κατανομή πόρων διασφαλίζει περαιτέρω ότι οι χρήστες λαμβάνουν σταθερή ποιότητα υπηρεσιών, ανεξάρτητα από τις κυμαινόμενες

απαιτήσεις και τις συνθήκες δικτύου. Επιπλέον, η Αποσύνδεση Downlink/Uplink προσφέρει πολλά πρόσθετα πλεονεκτήματα που συμβάλλουν στη σημασία της στα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών:

Βελτιωμένη ευελιξία δικτύου: Η αποσύνδεση Downlink/Uplink επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη του δικτύου. Οι πάροχοι δικτύου έχουν την ελευθερία να επιλέγουν διαφορετικούς τύπους σταθμών βάσης, όπως macrocells, microcells και picocells, για μεταδόσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης βάσει συγκεκριμένων απαιτήσεων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει στους πάροχους να βελτιστοποιούν την αρχιτεκτονική του δικτύου, να προσαρμόζονται σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες και να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τους διαθέσιμους πόρους.

Καλύτερη εξισορρόπηση φορτίου: Με την Αποσύνδεση Downlink/Uplink, οι πάροχοι δικτύου μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματική εξισορρόπηση φορτίου σε όλο το δίκτυο. Διανέμοντας έξυπνα την κίνηση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης, οι πάροχοι μπορούν να μειώσουν τη συμφόρηση του δικτύου και να κατανείμουν ομοιόμορφα το φορτίο, με αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση δικτύου, μειωμένα σημεία συμφόρησης και βελτιωμένη ικανοποίηση των χρηστών.

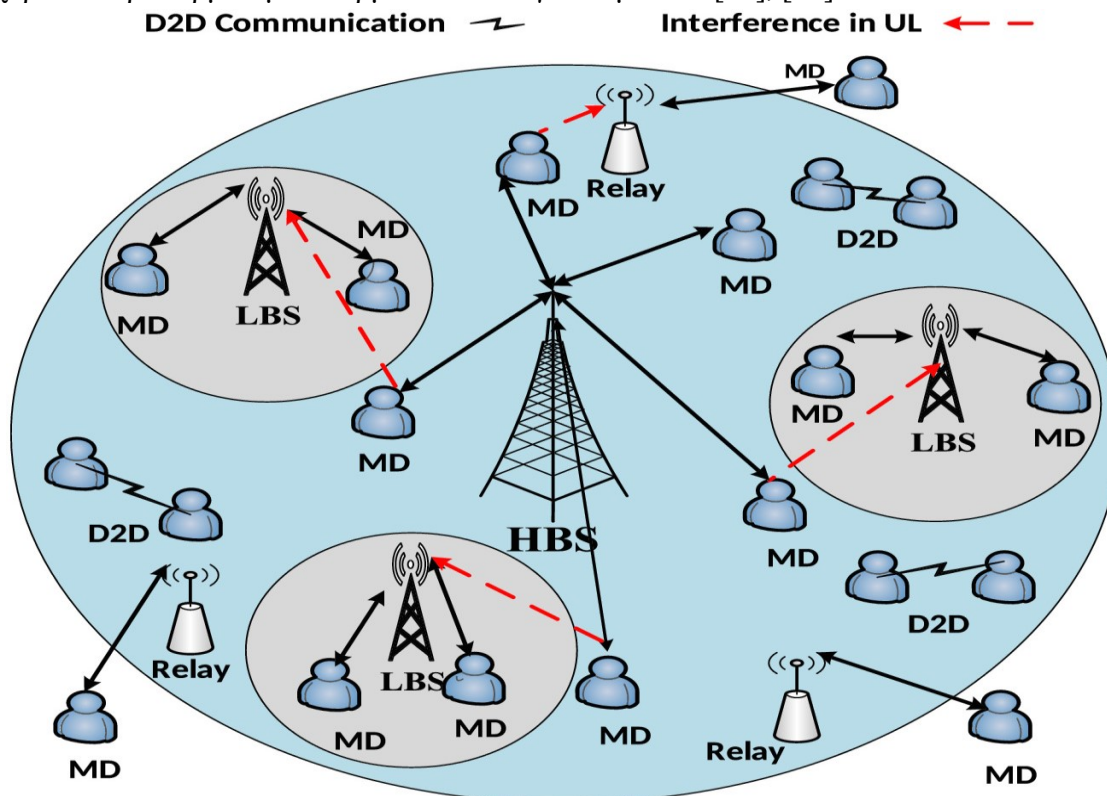
Υποστήριξη για Διαφορετικές Υπηρεσίες: Η Αποσύνδεση Downlink/Uplink διευκολύνει την παροχή διαφορετικών υπηρεσιών και εφαρμογών σε ασύρματα δίκτυα. Διαφορετικοί τύποι σταθμών βάσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν για να καλύψουν συγκεκριμένες απαιτήσεις υπηρεσιών, όπως μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο ή υπηρεσίες φωνής. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους πάροχους δικτύου να προσαρμόσουν την αρχιτεκτονική του δικτύου ώστε να ανταποκρίνεται στις διάφορες απαιτήσεις υπηρεσίας, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση για κάθε τύπο υπηρεσίας.

Βελτιωμένη ανθεκτικότητα δικτύου: Η αποσύνδεση των μεταδόσεων κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης ενισχύει την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Σε περίπτωση αποτυχίας του σταθμού βάσης ή διακοπής του δικτύου, οι πάροχοι του δικτύου μπορούν να ανακατευθύνουν την κυκλοφορία σε εναλλακτικούς σταθμούς βάσης, διασφαλίζοντας αδιάλειπτη διαθεσιμότητα υπηρεσιών. Αυτός ο πλεονασμός και η ανθεκτικότητα είναι ζωτικής σημασίας σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως οι επικοινωνίες με τη δημόσια ασφάλεια και τα σενάρια αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

Προστασία : Η αποσύνδεση κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης προσφέρει πλεονεκτήματα μελλοντικής προστασίας, καλύπτοντας τις εξελισσόμενες ανάγκες των ασύρματων δικτύων. Καθώς η τεχνολογία προχωρά και εμφανίζονται νέες υπηρεσίες, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να προσαρμόσουν την υποδομή του δικτύου τους αναπτύσσοντας σταθμούς βάσης βελτιστοποιημένους για συγκεκριμένες τεχνολογίες ή ζώνες συχνοτήτων. Αυτό διασφαλίζει ότι το δίκτυο παραμένει ικανό να υποστηρίξει τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του και μεγιστοποιώντας την απόδοση της επένδυσης.

Συνοπτικά, η αποσύνδεση Downlink/Uplink στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας παρέχει ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων, όπως βελτιωμένη ευελιξία δικτύου, καλύτερη εξισορρόπηση φορτίου, υποστήριξη για διάφορες υπηρεσίες, βελτιωμένη ανθεκτικότητα δικτύου και δυνατότητες προστασίας από μελλοντικές απειλές (Εικόνα 11). Αυτά τα πλεονεκτήματα δίνουν τη δυνατότητα στους παρόχους δικτύου να βελτιστοποιούν την απόδοση του δικτύου, να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας και να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τις αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες του Downlink/Uplink Decoupling, οι πάροχοι μπορούν να επιτύχουν

αποτελεσματική χρήση πόρων, να βελτιώσουν την εμπειρία χρήστη και να δημιουργήσουν ισχυρά και προσαρμόσιμα ασύρματα δίκτυα για το μέλλον [24], [25].



Εικόνα 11: Γραφική αναπαράσταση της εφαρμογής της τεχνολογίας διαχώρισης της κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης

4.3 Έρευνες συναφείς με την τεχνολογία DUDe.

Η τεχνολογία DUDe διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιστημονική έρευνα που στοχεύει στη βελτιστοποίηση των δικτύων 5G. Η τεχνολογία DUDe εστιάζει στον διαχωρισμό της μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης από το σταθμό βάσης στον χρήστη και της μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης από τον χρήστη στα κανάλια του σταθμού βάσης, προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου και να αντιμετωπίσει τις συγκεκριμένες προκλήσεις που σχετίζονται με κάθε κατεύθυνση επικοινωνίας.

Η ερευνητική εργασία [26] επικεντρώνεται στη σύγκριση της απόδοσης δύο στρατηγικών κατανομής πόρων σε ένα δίκτυο HetNets 5G. Στην προηγούμενη γενιά HetNets 4G, η ήδη εφαρμόζουσα στρατηγική συνδυασμένης πρόσβασης (DUCa) στην κατερχόμενη ζεύξη και ανερχόμενη ζεύξη, όπου ένα κινητός σταθμός (MS) συσχετίζεται σε DL/UL με έναν βασικό σταθμό (BS) για να εξασφαλίσει αποδοτικότητα ενέργειας (Energy Efficiency ή EE) και μεγιστοποίηση της ροής δεδομένων, ήταν μέχρι πρότινος μια μη βέλτιστη λύση. Μια άλλη βέλτιστη λύση όσον αφορά την EE και τη ροή δεδομένων προσφέρεται από τη νέα στρατηγική αποσυζευγμένης πρόσβασης σε DL/UL (DUDa), όπου ένα MS συσχετίζεται σε DL/UL με έναν ή δύο BS στο HetNets της 5G. Αυτή η έρευνα πραγματοποιεί ανάλυση της απόδοσης της στρατηγικής DUCa έναντι της στρατηγικής DUDa για την αποτελεσματική κατανομή πόρων

για να εξασφαλιστεί η ΕΕ στο HetNets. Πρώτα, διατυπώνεται το πρόβλημα μεγιστοποίησης της ΕΕ όσον αφορά την κατανομή πόρων χρησιμοποιώντας τις στρατηγικές DUCa και DUDa στο HetNets. Το διατυπωμένο πρόβλημα ανήκει σε μια κατηγορία μη γραμμικών κλασματικών προγραμματιστικών προβλημάτων. Το διατυπωμένο κλασματικό πρόβλημα μετασχηματίζεται σε ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Charnes-Cooper. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος εξωτερικής προσέγγισης (OAA) για την επίλυση του διατυπωμένου προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης. Πραγματοποιήθηκε επίσης εκτεταμένο πειραματικό έργο για να δείξει την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου. Η προσέγγιση OAA παρέχει εξειδικευμένες λύσεις για πολλές παραμέτρους, όπως οι συσχετιζόμενοι MS, η ελάχιστη απαιτούμενη ρυθμαπόδοση, η ΕΕ και η ροή στα HetNets της DUCa και DUDa.

Στην ερευνητική εργασία [27], διατυπώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης την ένωση της κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης με ένα δυναμικό σύστημα TDD, που στόχο έχουν την ομαλότερη κατανομή πόρων εντός του δικτύου. Το αναμενόμενο πρότυπο του HetNets 5G από την 3GPP αναμένεται να υποστηρίξει βάσεις μικρών κυψελών (SCBSs) που βασίζονται σε υψηλές συχνότητες mmwave για την αύξηση της ρυθμαπόδοσης και της χωρητικότητας του δικτύου. Επιπλέον, η τεχνική DUDe προτάθηκε για το 5G, προκειμένου να αντισταθμιστεί η ανισορροπία της ισχύος μετάδοσης μεταξύ των macro cell και των SCBSs. Δίνοντας ένα γενικευμένο αλγόριθμο προγραμματισμού, προκύπτουν δυναμικές χρόνοι διαιρέσεις TDD και κλάσματα χρόνου προγραμματισμού χρηστών, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται έως και 17% καλύτερη κατανομή χρηστών εντός του δικτύου..

Σε αυτή την έρευνα αρχικά αναλύεται ένας αλγόριθμος κοινής συσχέτισης BS και ανάθεσης υποκαναλιών, βασισμένο σε μια προσέγγιση ταιριάσματος ανάθεσης SPA, για την ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης του δικτύου, ξεπερνώντας τον περιορισμό ότι ένα MD πρέπει να συνδέεται με τον ίδιο BS στην ανερχόμενη/κατερχόμενη ζεύξη, και λαμβάνοντας υπόψη την επικοινωνιακή και υπολογιστική ανισότητα των SBS και MBS cloudlets σε ποικίλα δίκτυα MECH. Αρχικά αναφέρεται ότι η Public mobile edge computing (MEC) αποτελεί έναν καίριο παράγοντα στα δίκτυα 5G, που στόχο έχει να επιλύσει τη σύγκρουση μεταξύ υπολογιστικά απαιτητικών κινητών εφαρμογών και περιορισμένων πόρων κινητών συσκευών MDs, καθώς και να μειώσει την καθυστέρηση στο δίκτυο. Γι' αυτό το λόγο, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για αυτό το θέμα, ειδικά σε περιπτώσεις πολλαπλών χρηστών με ένα διακομιστή να εξυπηρετηθούν και σε ομοιογενείς πολλαπλούς διακομιστές. Ωστόσο, η έρευνα σε ποικίλα σενάρια με πολλαπλούς διακομιστές είναι περιορισμένη, όπου οι διακομιστές βρίσκονται σε SBSs και τα MBSs επιφορτίζονται με διαφορετικές ικανότητες υπολογισμού και επικοινωνίας. Από την άλλη πλευρά, η ανάθεση υπολογιστικών εργασιών περιορίζεται από τον τύπο συνεργασίας MD-BS, με σχεδόν όλες οι προηγούμενες μελέτες να επικεντρώνονται στη μεταφορά υπολογιστικών εργασιών του MD στους διακομιστές MEC/Cloudlets του BS, που εξυπηρετεί τους χρήστες. Ωστόσο, σε περιπτώσεις πολλαπλών συνδέσεων BS προτείνεται η τεχνική DUDe, όπου έχουμε ένα MD να είναι σε θέση να εξυπηρετείται από πολλά BSs και έτσι έχει πολλές επιλογές για τη μεταφορά υπολογιστικών εργασιών. Επιπλέον, προτείνεται ένα βέλτιστο σχήμα ανάθεσης ισχύος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος υπό τον προκαθορισμένο περιορισμό της ποιότητας των υπηρεσιών. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα εφαρμόζοντας της τεχνική DUDe είναι ανώτερο σε σχέση με τις προαναφερθείσες τεχνικές, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση των υπολογιστικών και επικοινωνιακών πόρων σε ποικίλα δίκτυα MEC.[28]

Σε μια άλλη ερευνητική εργασία προτείνεται η χρήση της SINR και της απώλειας πορείας με επέκταση εύρους ως παραγόντων για την επιλογή του κατάλληλου BS για σύνδεση στο κανάλι καθόδου και το ανόδου αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των πόρων των BS, για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση των BS. Επίσης η συγκεκριμένη έρευνα αναδεικνύει ότι στα τρέχοντα κυψελοειδή δίκτυα, η συσχέτιση κυψέλης βασίζεται κυρίως στην ισχύ του σήματος της κατερχόμενης ζεύξης και όλες οι συσκευές συσχετίζονται με τον ίδιο BS στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη. Ενώ μέχρι σήμερα αυτή η τεχνική έχει αποδειχθεί αρκετά αποδοτική σε ομογενή δίκτυα όπου όλοι οι BS έχουν παρόμοια επίπεδα μετάδοσης, σε αυξανόμενα πυκνά ανομοιογενή δίκτυα η ταχύτητα εξαρτάται σημαντικά από το φορτίο, το οποίο μπορεί να διαφέρει σημαντικά από BS σε BS. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων για χρήση πολλαπλών συσκευών σε ανομοιογενή δίκτυα, οι μεγάλες ανισότητες στη κατερχόμενη ζεύξη αποτελούν απειλή για την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται από το δίκτυο και αυτή η τεχνική φαίνεται ξεπερασμένη. Η αποσύνδεση καναλιού ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης είναι η προτεινόμενη λύση, όπου η συσχέτιση του καναλιού κατερχόμενης ζεύξης δεν είναι απαραίτητα βασισμένη στα ίδια κριτήρια με το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης [29].

Η συγκεκριμένη έρευνα καταπιάνεται με την μείωση της μηχανικής μάθησης των οχημάτων. Αρχικά αναφέρεται ότι χάρη στην ισχυρή υποστήριξη των τεχνολογιών 5G/B5G, είναι πολλά υποσχόμενο το γεγονός ότι, σε ένα δίκτυο οχημάτων, οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης μαζί με τις ανησυχίες σχετικά με το απόρρητο μπορούν να ικανοποιηθούν με την εισαγωγή της ομοσπονδιακής μάθησης (Federal Learning ή FL) στα δίκτυα οχημάτων. Ωστόσο, σε ένα τέτοιο δίκτυο οχημάτων κινητής τηλεφωνίας 5G/B5G, οι κατανεμημένοι πελάτες, δηλαδή τα οχήματα, υποφέρουν συνήθως από διακοπτόμενη συνδεσιμότητα με τον BS λόγω της δικτύωσης μικρών κυψελών και της κινητικότητάς τους, και ως εκ τούτου η μαθησιακή απόδοση δεν μπορεί να είναι εγγυημένη. Προκειμένου να διασφαλιστεί ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης και η απόδοση FL, προτείνουμε τη διερεύνηση των σχημάτων επιλογής πελατών στα αποσυνδεδεμένα δίκτυα 5G/B5G ανερχόμενης κατερχόμενης ζεύξης. Λόγω του εκπληκτικού χαρακτηριστικού της τεχνολογίας DUDe, και τον μεγαλύτερων αποδόσεων σε σχέση με άλλες υπάρχουσες τεχνικές, ενσωματώνεται πρώτα ένα ευέλικτο αναλυτικό εργαλείο καθυστέρησης, δηλαδή τη θεωρία martingale, για να χαρακτηρίσουμε την καθυστέρηση πρόσβασης κάθε οχήματος και να την αναπαραστήσουμε με τη μορφή πιθανότητας παραβίασης καθυστέρησης. Στη συνέχεια, δεδομένου ενός ενεργειακού προϋπολογισμού, οι ρυθμιζόμενες παράμετροι βελτιστοποιούνται για τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης εκμάθησης. Υποθέτοντας ότι όλοι οι πελάτες συμμετέχουν στο FL και μπορούν να ξεπεράσουν τη συστηματική απαίτηση απόδοσης FL, οι μέθοδοι επιλογής πελατών με διαφορετικά κριτήρια διερευνώνται περαιτέρω. Ειδικότερα, προτείνουμε έναν αλγόριθμο χαμηλής πολυπλοκότητας για την επιλογή πελατών όσον αφορά τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Παρέχονται αριθμητικά αποτελέσματα για να καταδειχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου επιλογής πελάτη τόσο για την εγγύηση του χρόνου εκτέλεσης FL όσο και για την επίτευξη της συστηματικής απόδοσης μάθησης. Η ενεργειακή απόδοση του συστήματος FL οχημάτων μπορεί επίσης να βελτιωθεί με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου [30].

Η έρευνα [31] ξεκινάει με το ζήτημα της αύξησης της ζήτησης για χωρητικότητα ασύρματης επικοινωνίας μετά την εκτεταμένη χρήση smartphone, tablet και συσκευών που σχετίζονται με το IoT. Ωστόσο, οι συσκευές και οι σταθμοί βάσης διαφοροποιούνται και σταθμοί βάσης διαφόρων μεγεθών αναμειγνύονται. Στα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα, οι ισχύς μετάδοσης των σταθμών βάσης είναι διαφορετικές. Εάν η ισχύς που έλαβε η κατερχόμενη ζεύξη από το σταθμό βάσης που ανήκει στη συσκευή είναι μέγιστη, η ισχύς που έλαβε η ανερχόμενη ζεύξη

από τη συσκευή στο σταθμό βάσης δεν είναι πάντα η μέγιστη. Αυτή η μελέτη μεγιστοποιεί την ισχύ που λαμβάνεται από τη συσκευή μέσω της αποσύνδεσης κατερχόμενης ζεύξης-ανερχόμενης ζεύξης. Το DUDe μπορεί να βελτιώσει τη φασματική απόδοση επιλέγοντας ανεξάρτητα τον σταθμό βάσης κατερχόμενης ζεύξης και τον σταθμό βάσης άνω ζεύξης σε ένα δίκτυο πολλαπλών σταθμών βάσης με διαφορετικές ισχύς μετάδοσης. Αυτή η μελέτη εστιάζει σε δύο τεχνολογίες, το DUDe και την ανάθεση δυναμικού καναλιού (DCA). Προτείνει έναν αλγόριθμο συσχέτισης για την επίλυση του προβλήματος δυναμικής συνδυαστικής βελτιστοποίησης για κυψελωτά δίκτυα άνω και κάτω ζεύξης χωριστά χρησιμοποιώντας DUDe. Όταν φτάνει μια συσκευή χρήστη, συνδέεται πρώτα με το σταθμό βάσης που έχει τη μέγιστη χωρητικότητα εκείνη τη στιγμή. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εκχώρηση σταθμού βάσης εκείνη τη στιγμή ως άτομο, η προτεινόμενη μέθοδος εκτελεί μια πιο βέλτιστη εκχώρηση σταθμού βάσης με DCA χρησιμοποιώντας έναν γενετικό αλγόριθμο. Οι προσομοιώσεις υπολογιστή δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να επιτύχει έως και 140 % υψηλότερη φασματική απόδοση στην εκχώρηση σταθερού καναλιού (Fixed Channel Assignment ή FCA).

Επίσης μια καινοτόμα έρευνα αναφέρει ότι η παγκόσμια αγορά για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles ή UAV) έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία και έχει γίνει ένα υψηλό σημείο οικονομικής ανάπτυξης σε πολλές χώρες. Ως εκ τούτου, η ενοποίηση UAV με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας θεωρείται ζωτικής σημασίας για την αξιοποίηση νέων επιχειρηματικών ευκαιριών για τους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας, ειδικά καθώς η αγορά των smartphone είναι σχεδόν κορεσμένη. Σε αυτό την έρευνα, προτείνετε ένα νέο σχήμα για την αποτελεσματική ενσωμάτωση των UAV σε κυψελωτά συστήματα 5G. Για το σκοπό αυτό, διαχωρίζετε τις ζεύξεις επικοινωνίας ελέγχου UAV και μη ωφέλιμου φορτίου (Control and Non-Payload Communications ή CNPC) από τις συνδέσεις επικοινωνίας δεδομένων υψηλής χωρητικότητας - αποσυνδέοντας την πρόσβαση ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης για να επιτρέψουμε στον εξοπλισμό χρήστη να συνδεθεί με διαφορετικούς σταθμούς βάσης που εκπέμπουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων στο UL και DL, έτσι ώστε η παρεμβολή μεταξύ των UEs εδάφους (General UDP Encapsulation ή GUE) και UAV να μειώνεται σημαντικά. Οι γειώσεις UE-BS αποσυνδέονται επίσης με παρόμοιο τρόπο για περαιτέρω ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επικυρώνουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος και ποσοτικοποιούν τη βελτίωση όσον αφορά τον ρυθμό δεδομένων των UAV και των GUE σε σύγκριση με τα συζευγμένα σημεία αναφοράς [32].

Αυτές οι ερευνητικές συνεισφορές υπογραμμίζουν τη σημασία της βελτιστοποίησης δικτύων 5G χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, όπως η τεχνολογία, για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της συνολικής εμπειρίας χρήστη. Αξιοποιώντας τέτοιες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης, οι πάροχοι δικτύου μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη χωρητικότητα του δικτύου, την κατανάλωση ενέργειας και την ποιότητα της υπηρεσίας, οδηγώντας τελικά σε βέλτιστη απόδοση δικτύου και εμπειρία χρήστη υψηλής ποιότητας.

5

Αξιολόγηση αποσύνδεσης ανερχόμενης/κατερχόμενης ζεύξης .

Για την υλοποίηση των παρακάτω πειραμάτων χρησιμοποιούμε ένα 2X2 ετερογενές δίκτυο 5^{ης} γενιάς , στο οποίο τοποθετούμε στο κέντρο του δίκτυο 2 macro cell κεραίες και στα περιμετρικά της τοπολογίας αυτής τοποθετούμε 4 micro cell και 8 pico cell κεραίες. Σκοπός είναι να αποδείξουμε ότι η τεχνολογία DUDe σε σύγκριση με την τεχνολογία DUCo επιτυγχάνει ομαλότερη κατανομή χρηστών επιτυγχάνοντας όχι μόνο καλύτερη απόδοση του δικτύου και άρα αποδοτικότερη εξυπηρέτηση των χρηστών ,αλλά ταυτόχρονα μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας αφήνοντας έτσι ένα θετικό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Μέσω της σύγκρισής μας μεταξύ των προσεγγίσεων ανάθεσης πόρων DUDe και DUCo, στοχεύουμε να παρέχουμε πολύτιμες γνώσεις και συστάσεις για τη βελτιστοποίηση που προτείνουμε.

5.1 Περιβάλλον Εξομοίωσης

Το HetNets που εφαρμόζεται στις προσομοιώσεις μας περιλαμβάνει macro cell BS (MBs), small cell BS (micro BS και pico BS) και N αριθμό από UE. Πιο συγκεκριμένα, η τοπολογία που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις μας περιλαμβάνει ένα σύνολο MBs ($M = 1,2,3,4, \dots, |M|$), ένα σύνολο small cells (micro $\Rightarrow M_i = 1, 2,3,4, \dots, |M_i|$, pico $\Rightarrow P = 1,2,3,4, |P|$) και ένα σύνολο UE ($U = 1,2,3,4, \dots, |U|$). Υποθέτουμε ότι τα macro BS τοποθετούνται σε υψηλά επίπεδα για να παρέχουν συνεχή και αδιάλειπτη κάλυψη. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι οι σταθμοί με τη μικρότερη κάλυψη τοποθετούνται σε χαμηλότερα επίπεδα μέσα σε μια περιοχή, και ως αποτέλεσμα, η κάλυψη των θέσεων που δεν είναι σε οπτική επαφή είναι όσο το δυνατόν ευρύτερη σε ολόκληρη την περιοχή, ακόμη και σε πιο απομακρυσμένα/εμποδισμένα σημεία για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των στατικών UE που βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση εντός της περιοχής. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του δικτύου είναι η αποτελεσματική κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου έχουμε μεγάλη δραστηριότητα σε εσωτερικούς χώρους (κατοικίες, εταιρείες κ.λπ.).

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ένα Ετερογενές δίκτυο 5G που αποτελείται από 2 macro BS, 4 micro BS και 8 pico BS (όλα τα BS βρίσκονται σε σταθερές θέσεις), το καθένα εξοπλισμένο με ειδική ισχύ εκπομπής σε dBm. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη χωρητικότητα

των macro cell είναι 2000 UEs, η χωρητικότητα των micro cell είναι 200 UEs και η χωρητικότητα των κελιών pico είναι 46 UEs. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για τον προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού UE που μπορεί να εκχωρηθεί σε κάθε τύπο BS. Ένας συνολικός αριθμός N UE κατανέμεται μέσα στο δίκτυο, το καθένα με τη δική του ισχύ εκπομπής σε dBm. Το κέρδος από όλα τα BS, συμπεριλαμβανομένου του εύρους ζώνης και του θορύβου στο δίκτυο, λαμβάνεται επίσης υπόψη.

Για να προσδιορίσουμε την απόσταση μεταξύ ενός UE και ενός BS, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση Matlab nrPathLoss, η οποία λαμβάνει υπόψη την ισχύ εκπομπής και το κέρδος από τις κεραιές στις τρεις κατηγορίες BS (macro, micro, και pico) αντίστοιχα. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι με τον όρο <<καλύτερη απόσταση>>, αναφερόμαστε στις κεραιές που βρίσκονται πιο κοντά στο UE, μεταξύ από τα τρία είδη των κεραιών. Αυτή η συνάρτηση μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε την απώλεια διαδρομής κάθε UE σε σχέση με τους διαφορετικούς τύπους BS. Επιπλέον, το nrPathLoss στο Matlab είναι ένα εργαλείο σχεδιασμένο για τον υπολογισμό της καλύτερης απόστασης ενός σήματος που μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού ασύρματης επικοινωνίας. Η συνάρτηση λαμβάνει εισόδους όπως η συχνότητα του σήματος, η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη και οι ιδιότητες του περιβάλλοντος μέσω του οποίου διαδίδεται το σήμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία γραφικής αναπαράστασης τη τοπολογίας του δικτύου. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων, τη ανάλυση των παρεμβολών και άλλες αξιολογήσεις σε επίπεδο συστήματος.

Αφού υπολογιστεί η καλύτερη απόσταση, προχωράμε στον υπολογισμό του SNR. Χρησιμοποιώντας το υψηλότερο SNR, συνδέουμε κάθε UE με την καλύτερη επιλογή BS από τις τρεις κατηγορίες. Υπολογίζουμε το SNR λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ εκπομπής του UE, τα κέρδη όλων των BS και του UE και την καλύτερη απόσταση του χρήστη από τις κεραιές.

Επιπλέον, αυτή η μελέτη καταδεικνύει τη σημασία της χρήσης της συνάρτησης nrPathLoss και του SNR για την κατανομή των UE σε ένα δίκτυο 5G DUDe. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσέγγιση DUDe επιτυγχάνει καλύτερη κατανομή χρηστών σε σύγκριση με την DUCo. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης μπορούν να χρησιμεύσουν ως αναφορά για μελλοντική έρευνα στον τομέα των δικτύων 5G. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτό το σενάριο, εκτός από θεωρητική αναπαράσταση, έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε ένα πραγματικό σενάριο, καθώς λαμβάνει υπόψη πραγματικούς παράγοντες όπως η συγκεκριμένη θέση των BS, ο τύπος τους, η διαφορά ύψους μεταξύ τους και τα ύψη των κτιρίων στα οποία θα τοποθετηθούν.

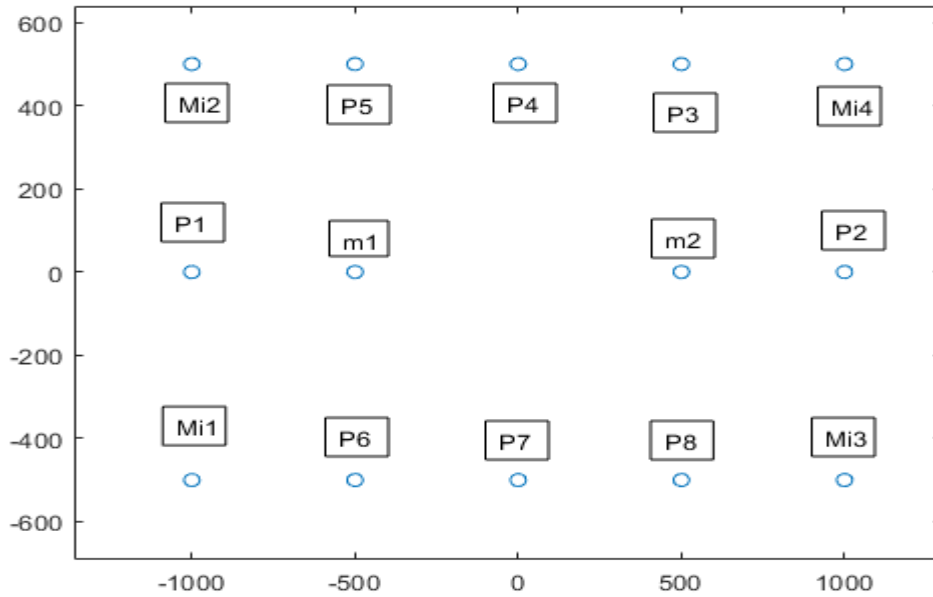
5.1.1 Παράμετροι Εξομοίωσης

Το ετερογενές δίκτυο 5G έχει σχεδιαστεί για να παρέχει αποτελεσματική και αξιόπιστη επικοινωνία σε μια αστική τετραγωνική περιοχή 2 x 2 km, όπως βλέπουμε στην (Εικόνα 12). Το δίκτυο αποτελείται από έναν συνδυασμό διαφορετικών τύπων κεραιών στρατηγικά τοποθετημένων για να καλύπτουν αποτελεσματικά ολόκληρη την περιοχή.

Εντός του δικτύου, υπάρχουν δύο κεραιές macro cell τοποθετημένες σε ύψος 30 μέτρων. Αυτά τα macro cell λειτουργούν ως κύρια σημεία κάλυψης και βρίσκονται κεντρικά εντός της καθορισμένης περιοχής. Η υψηλότερη ισχύς μετάδοσης των 45 dBm, σε συνδυασμό με κέρδος 21 dBi, τους επιτρέπει να παρέχουν ευρεία κάλυψη και να χειρίζονται μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Γύρω από τις κεραιές macro cell, υπάρχουν τέσσερις κεραιές micro cell τοποθετημένες σε ύψος 10 μέτρων. Τα macro cell έχουν χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης 33 dBm και κέρδος 10 dBi, επιτρέποντάς τους να καλύψουν μικρότερη περιοχή κάλυψης σε σύγκριση με τα macro cell. Αυτές οι κεραιές είναι στρατηγικά τοποθετημένες για να καλύψουν τα κενά

κάλυψης και να παρέχουν βελτιωμένη συνδεσιμότητα σε περιοχές όπου τα macro cell ενδέχεται να παρουσιάσουν υποβάθμιση του σήματος. Επιπλέον, το δίκτυο περιλαμβάνει οκτώ κεραίες Pico Cell τοποθετημένες σε ύψος 5 μέτρων. Οι κυψέλες pico έχουν τη χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης 24 dBm και κέρδος 5 dBi. Αυτές οι κεραίες έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν τοπική κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως δρόμους, κτίρια ή δημόσιους χώρους, όπου η ισχύς του σήματος από macro και micro cell ενδέχεται να μην είναι επαρκής. Διανέμοντας στρατηγικά τα pico cell, το δίκτυο στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας και της χωρητικότητας του σήματος σε αυτές τις περιοχές υψηλής ζήτησης. Οι χρήστες εντός του δικτύου εκχωρούνται τυχαία θέσεις, ωστόσο, διατηρείται μια ελάχιστη απόσταση 1 έως 2 μέτρων μεταξύ κάθε χρήστη για την αποφυγή επικαλύψεων και παρεμβολών, διασφαλίζοντας αξιόπιστη επικοινωνία, άλλα και ορθά αποτελέσματα κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων. Τα macro cell έχουν εύρος ζώνης 400 MHz, παρέχοντας ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων για επικοινωνία. Αυτή η κατανομή επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων φάσματος και επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Οι παραπάνω τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 παρακάτω.

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της ανάπτυξης ενός ετερογενούς δικτύου είναι η ενίσχυση της χρήσης των πόρων και η διευκόλυνση της αποτελεσματικότερης επικοινωνίας των χρηστών. Με την ανάπτυξη διαφορετικών τύπων κεραιών με ποικίλες δυνάμεις και κέρδη μετάδοσης, το δίκτυο μπορεί να προσαρμοστεί δυναμικά στον αριθμό και τις τοποθεσίες των χρηστών, βελτιστοποιώντας την κατανομή πόρων και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου. Ο σχεδιασμός του δικτύου ενσωματώνει δυναμική κατανομή πόρων, επιτρέποντας προσαρμογές στο εύρος ζώνης και στο εύρος συχνοτήτων με βάση τον αριθμό και τις τοποθεσίες των χρηστών εντός του δικτύου. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου, διασφαλίζοντας ότι οι χρήστες λαμβάνουν βέλτιστες ταχύτητες συνδεσιμότητας και μεταφοράς δεδομένων. Συνολικά, το σχεδιασμένο ετερογενές δίκτυο 5G με τις στρατηγικά τοποθετημένες κεραίες και τη δυναμική κατανομή πόρων στοχεύει στην παροχή αξιόπιστης, υψηλής ταχύτητας και ευρείας κάλυψης εντός της αστικής περιοχής, ενισχύοντας την εμπειρία επικοινωνίας για τους χρήστες και υποστηρίζοντας διάφορες εφαρμογές και υπηρεσίες.



Εικόνα 12: Γραφική αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου.

Πίνακας 1: Παράμετροι εκτέλεσης των προσομοιώσεων.

Παράμετροι	Τιμές
Μέγιστη ισχύς μετάδοσης(dbm)	UE=20 Macro cell = 45 Micro cell = 33 Pico cell = 24
Ύψος κεραιών (m)	Macro height = 25 Micro height =15 Pico height = 10
Κέρδος κεραίας(dbi)	Macro cell = 17.8 Micro cell = 12 Pico cell = 4

Εύρος ζώνης (MHz)	20
Εύρος ζώνης (macrocell)1 (MHz)	400
Εύρος ζώνης (macrocell)2 (MHz)	400
Θόρυβος	$P_{noise} = -74 + 10 \log(\text{Bandwidth}(\text{hz}))$
Στιγμιότυπα	1000

5.1.1 Ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου των σεναρίων

Αρχικά με την βοήθεια της συνάρτησης της Matlab της nrPathLoss υπολογίζουμε για όλους τους χρήστες την ελάχιστη απόσταση κάθε χρήστη από τα τρία είδη των κεραιών. Η διαδικασία αυτή είναι ζωτικής σημασίας για να εντοπίσουμε ποια κεραία από τις macro, micro και Pico βρίσκεται κοντά στο χρήστη. Το μαθηματικό μοντέλο σύμφωνα με το οποίο ορίζεται η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι το ακόλουθο, αναλυτική περιγραφή του οποίου μπορούμε να βρούμε στην αναφορά TR 38.901 Section 7.4.1 [33].

$$PL_{\text{RMa-LOS}} = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10\text{km} \end{cases} \quad (7)$$

$$PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D} \quad (8)$$

$$C PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10}(d_{3D} / d_{BP}) \quad (9)$$

Στην συνέχεια έχοντας υπολογίσει την ελάχιστη απόσταση από κάθε είδος κεραίας για τον κάθε ένα χρήστη, υπολογίζουμε με την βοήθεια του SNR ποιο από τα τρία είδη κεραιών βρίσκεται σε κοντινότερη απόσταση ώστε να συνδεθεί σε αυτό. Το SNR υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη της παραμέτρους του Πίνακα 1 και την ελάχιστη απόσταση από την συνάρτηση nrPathLoss.

Για τα πειράματα στα οποία ελέγχουμε την κατανομή του εύρους ζώνης υπολογίζουμε το μέγιστο όριο εύρους ζώνης των UE για κάθε τύπο κεραίας, χρησιμοποιώντας το θεώρημα Shannon-Hartley [34]. Το θεώρημα Shannon-Hartley είναι μια αρχή που καθορίζει τον θεωρητικό υψηλότερο ρυθμό με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν πληροφορίες μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας ενός δεδομένου εύρους ζώνης παρουσία θορύβου. Είναι μια πρακτική εφαρμογή του θεωρήματος κωδικοποίησης θορυβώδους καναλιού, που εφαρμόζεται σε ένα τυπικό σενάριο ενός συνεχούς αναλογικού καναλιού επικοινωνίας με θόρυβο Gauss. Το θεώρημα καθορίζει τη χωρητικότητα του καναλιού, η οποία είναι η μέγιστη ποσότητα πληροφοριών χωρίς σφάλματα που μπορεί να μεταδοθεί ανά μονάδα χρόνου με ένα καθορισμένο εύρος ζώνης παρουσία θορύβου, υποθέτοντας ότι η ισχύς του σήματος είναι περιορισμένη και ότι οι ιδιότητες της διαδικασίας θορύβου Gauss είναι γνωστοί. Το θεώρημα πήρε το όνομά του από τους Claude Shannon και Ralph Hartley και είναι μια σημαντική έννοια στη θεωρία της πληροφορίας που χρησιμοποιείται ευρέως στο σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων επικοινωνίας. Το θεώρημα εκφράζει το μέγιστο θεωρητικό όριο πληροφοριών που μπορεί να μεταδοθεί αξιόπιστα μέσω ενός αναλογικού καναλιού επικοινωνίας που υπόκειται σε προσθετικό Λευκό Gaussian θόρυβο (Additive White Gaussian Noise ή AWGN) ισχύος N , δεδομένης μιας συγκεκριμένης μέσης λαμβανόμενης ισχύος σήματος S και ενός αυθαίρετα χαμηλού ποσοστού σφάλματος. Η χωρητικότητα του καναλιού, που συμβολίζεται με C , είναι ένα μέτρο της ικανότητας του καναλιού να μεταφέρει πληροφορίες και αντιπροσωπεύει το πιο στενό άνω όριο στον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Το θεώρημα παρέχει μια μαθηματική σχέση μεταξύ των C , S , N και του εύρους ζώνης του καναλιού, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να βελτιστοποιήσουν τα συστήματα επικοινωνίας για μέγιστη μεταφορά πληροφοριών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τα σφάλματα.

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (10)$$

Όπου η χωρητικότητα καναλιού C , ή οποία μετριέται σε bit ανά δευτερόλεπτο αντιπροσωπεύει το ανώτερο όριο του καθαρού ρυθμού bit που μπορεί να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων. Το εύρος ζώνης B του καναλιού μετριέται σε hertz και για ένα σήμα διέλευσης ζώνης είναι το εύρος ζώνης διέλευσης. Η μέση ισχύς λαμβανόμενου σήματος S είναι η μέση ισχύς του σήματος στο εύρος ζώνης, μετρούμενη σε watt (ή βολτ στο τετράγωνο). Σε μια μετάδοση ζώνης διέλευσης διαμορφωμένη από φορέα, συχνά συμβολίζεται ως C . Η μέση ισχύς του θορύβου και της παρεμβολής στο εύρος ζώνης συμβολίζεται με N και μετράτε σε watt (ή βολτ στο τετράγωνο). Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) ή λόγος φορέα προς θόρυβο (CNR) εκφράζεται ως ένας γραμμικός λόγος ισχύος του σήματος επικοινωνίας προς το θόρυβο και την παρεμβολή στον δέκτη, όχι σε λογαριθμικά ντεσιμπέλ.

5.2 Πειράματα κατανομής χρηστών

5.2.1 Ανάλυση του αλγορίθμου για την υλοποίηση των σεναρίων

Λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα του κάθε BS, υπολογίζεται το SNR για όλους τους χρήστες για 1000 στιγμιότυπα βάσει του καναλιού κατεβάσματος για το DUCo και του καναλιού ανεβάσματος για το DUDe. Όταν ένας χρήστης επιλέγει τον καλύτερο (από άποψη SNR καναλιού κατεβάσματος) από τους 14 BS, πραγματοποιούνται ταυτόχρονα δύο ενέργειες: ή μία είναι ο έλεγχος της χωρητικότητας και η άλλη είναι ο έλεγχος της τιμής του SNR. Στην συνέχεια αφαιρείται μια μονάδα χωρητικότητας για κάθε χρήστη που εισέρχεται στο BS και καταμετράται ο αριθμός των χρηστών που εισέρχονται στο BS. Αυτός ο έλεγχος της χωρητικότητας σε συνδυασμό με τον καταμετρητή των χρηστών σε κάθε BS εξασφαλίζει ότι κανένας BS δεν φτάνει στη μέγιστη χωρητικότητά του, με αποτέλεσμα μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών στο δίκτυο. Όπως παρουσιάζεται παρακάτω, αυτή η προσέγγιση αποφεύγει την ανισότητα όσο αναφορά την κατανομή των χρηστών και την ανεπαρκή εξυπηρέτησή τους, ακόμη και στην περίπτωση που η τεχνική DUCo επιτυγχάνει πολύ χειρότερη ανάθεση χρηστών σε σύγκριση με το DUDe. Η παραπάνω τεχνική παρουσιάζεται στον θεωρητικό αλγόριθμο 1 παρακάτω.

Αλγόριθμος 1 Algorithm for user allocation for DUCo and DUDe scenarios.

For each user:

SNR values = []

For each antenna in [macro, micro, pico]

Calculate the SNR for the antenna for 1000 snapshots based on the downlink channel.

Add the calculated SNR value to the SNR_values list

Return the index of the antenna with the highest SNR value in the SNR_values list

best_antenna = select_best_antenna(SNR_value)

Select the kind of antenna with highest SNR value from list above [macro, micro, pico]

If capacity_check_best_antenna has not reached the maximum capacity

Remove one unit of capacity from antenna

Increment the count of users in the antenna

Else:

Repeat the process of calculating SNR values for all antennas [macro, micro, pico]

Select the best antenna and check its capacity

If the capacity of the best antenna is not at maximum

Allocate_user(user,best_antenna)

Update_capacity(best_antenna)

update_capacity(best_antenna)

update_user_count(best_antenna)

Else:

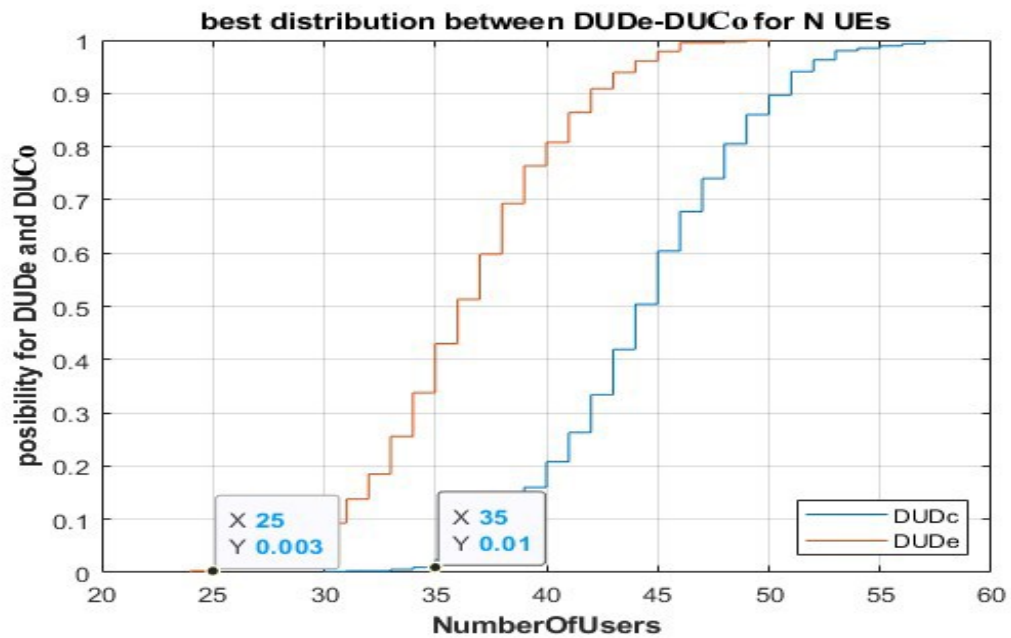
Repeat the process until find the best antenna with capacity and highest SNR

5.2.2 Σύγκριση των τεχνολογιών DUDe και DUCo με βάση την κατανομή χρηστών

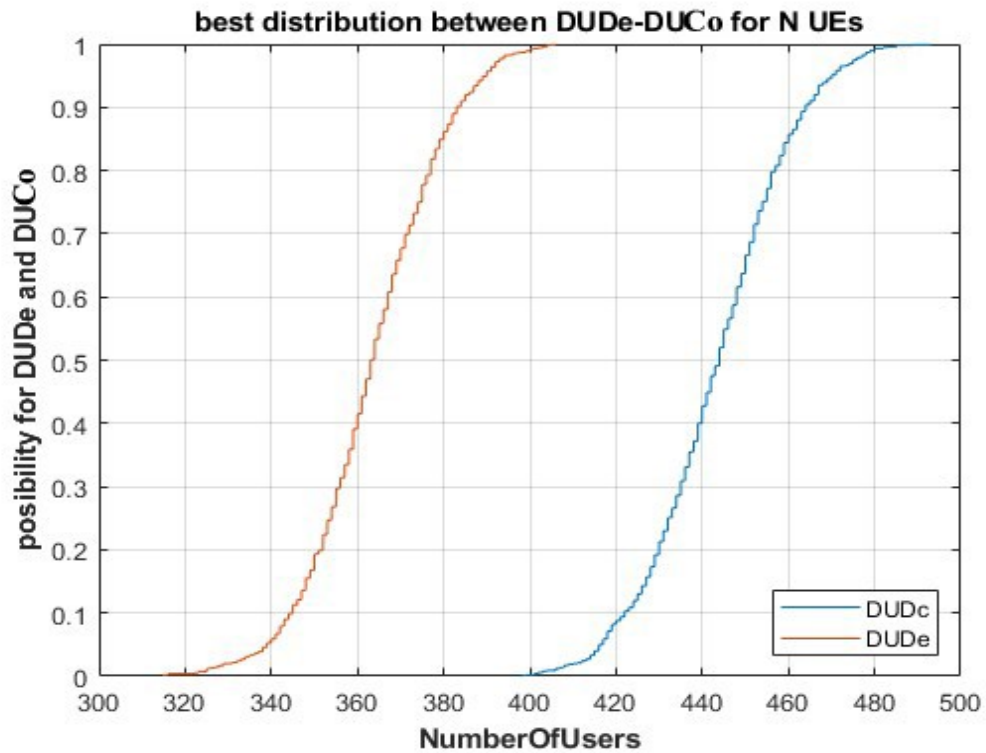
Για να αξιολογήσουμε την κατανομή UE, εκτελέσαμε την προσομοίωση 100 UE, 1000 UE και 2000 UE (Εικ.13 έως Εικ.15). Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν τη μέση χωρητικότητα UE των BS για διαφορετικό αριθμό UE. Εκτελώντας αυτές τις προσομοιώσεις, αποδεικνύουμε ότι η σύγκριση των τεχνικών DUDe και DUCo, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα BS, αναδεικνύει ότι το DUDe έχει πιο ισορροπημένη κατανομή χρηστών σε σύγκριση με το DUCo. Αυτό σημαίνει ότι το DUDe διασφαλίζει ότι κανένα BS δεν θα έχει περισσότερους UE από τη χωρητικότητά του, οδηγώντας τόσο στην αποτελεσματική λειτουργία του BS. Καθώς ο αριθμός των UE στο δίκτυο αυξάνεται, η ανάγκη για την τεχνική DUDe γίνεται πιο εμφανής για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ UE και BS. Η βελτιωμένη κατανομή του UE οδηγεί σε καλύτερη χρήση των BS, παρέχοντας έτσι μια πιο αποτελεσματική υπηρεσία στην UE. Από την παραπάνω ανάλυση καταλαβαίνουμε ότι το DUDe έχει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι του DUCo όσον αφορά τη κατανομή των χρηστών και την απόδοση του δικτύου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Εικόνα 13 έως Εικόνα 15) καταδεικνύουν ξεκάθαρα τα πλεονεκτήματα της τεχνικής DUDe έναντι του DUCo όσον αφορά τη διανομή των χρηστών και την απόδοση του δικτύου. Καθώς ο αριθμός των UEs στο δίκτυο αυξάνεται, η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ UEs και BS καθίσταται ζωτικής σημασίας. Η τεχνική DUDe αντιμετωπίζει αυτήν την πρόκληση παρέχοντας μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των UE σε όλο το δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι οι UE κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη την περιοχή κάλυψης, διασφαλίζοντας ότι κάθε BS δεν εξυπηρετεί μεγαλύτερο αριθμό χρηστών από το όριο χωρητικότητας του UE. Αντίθετα, η τεχνική DUCo, η οποία χρησιμοποιεί έναν ομοιόμορφο προσανατολισμό κυψελών, μπορεί να οδηγήσει σε ομαδοποίηση UEs κυρίως προς τις macro cell κεραιές ενώ άλλες small cell κεραιές δεν χρησιμοποιούνται. Επιτυγχάνοντας μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των UEs, η τεχνική DUDe βελτιστοποιεί τη χρήση των BS. Κάθε BS μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά έναν ισορροπημένο αριθμό UE, αποτρέποντας τη συμφόρηση σε συγκεκριμένες κυψέλες και ελαχιστοποιώντας την ανισορροπία φορτίου μεταξύ των BS. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση δικτύου, μειωμένες παρεμβολές και βελτιωμένη συνολική ποιότητα υπηρεσιών για τους UE. Το πλεονέκτημα της τεχνικής DUDe γίνεται πιο εμφανές καθώς αυξάνεται ο αριθμός των UE στο δίκτυο. Με μεγαλύτερο αριθμό UE, η ανάγκη για έναν αποτελεσματικό και αποδοτικό μηχανισμό διανομής καθίσταται κρίσιμη για τη διασφάλιση δίκαιης κατανομής πόρων και τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου. Η

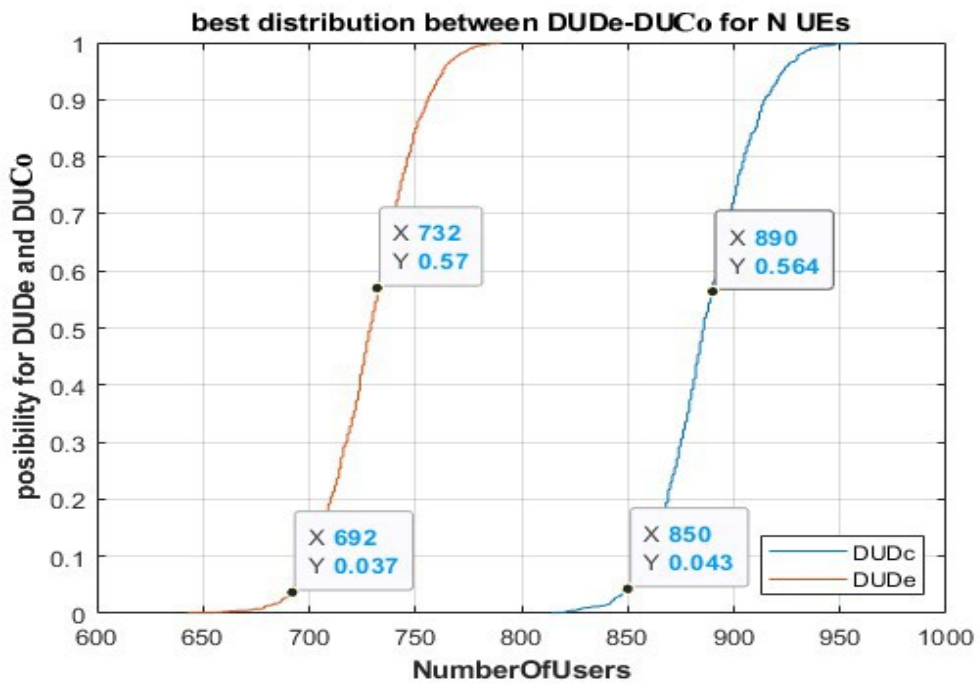
τεχνική DUDe ανταποκρίνεται σε αυτήν την πρόκληση κατανέμοντας UE με τρόπο που προωθεί την ισόρροπη χρήση των διαθέσιμων πόρων δικτύου.



Εικόνα 13: Συγκριτική αναπαράσταση για την μέση κατανομή $N = 100$ UE



Εικόνα 14: Συγκριτική αναπαράσταση για την μέση κατανομή $N = 1000$ UE



Εικόνα 15: Συγκριτική αναπαράσταση για την μέση κατανομή $N = 2000$ UE

Επίσης άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση των 2000 χρηστών ο μέσος όρος κατανομής χρηστών για την τεχνολογία DUDe ξεκινάει από τους 700 χρήστες ενώ για την τεχνολογία DUCo η αντίστοιχη τιμή είναι το 850, βλέπουμε δηλαδή μια διαφορά της τάξης του 19.35% να είναι καλύτερη η DUDe τεχνολογία έναντι της DUCo. Ομοίως και στην περίπτωση των 1000 χρηστών όπου οι μέσοι όροι κατανομής για είναι 320 και 420 αντίστοιχα για την DUDe και την DUCo τεχνολογία ,διαπιστώνουμε ότι η τεχνολογία DUDe είναι αποδοτικότερη κατά 27.07%. Τέλος στην περίπτωση των 100 χρηστών που οι μέσοι όροι κατανομής είναι 25 με 35 , η τεχνολογία DUDe εμφανίζεται καλύτερη κατά 33.3%

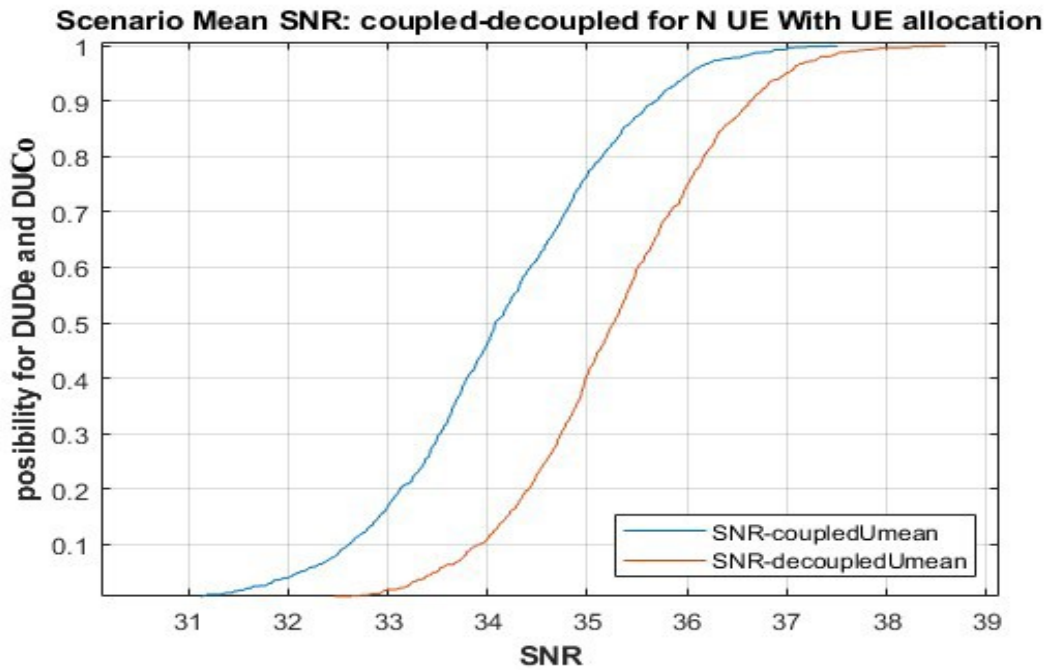
Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπογραμμίζουν τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνικής DUDe έναντι του DUCo όσον αφορά τη διανομή των χρηστών και την απόδοση του δικτύου. Η ικανότητα της τεχνικής DUDe να επιτυγχάνει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των UE οδηγεί σε βελτιωμένη χρήση πόρων, μειωμένη συμφόρηση και βελτιωμένη απόδοση υπηρεσιών. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της χρήσης έξυπνων και προσαρμοστικών τεχνικών, όπως το DUDe, στο σχεδιασμό και τη λειτουργία ετερογενών δικτύων για τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων τους και την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων της κινητής επικοινωνίας.

5.2.3 Σύγκριση της τεχνολογίας DUDe και DUCo με βάση των περιορισμό της χωρητικότητας των κεραιών.

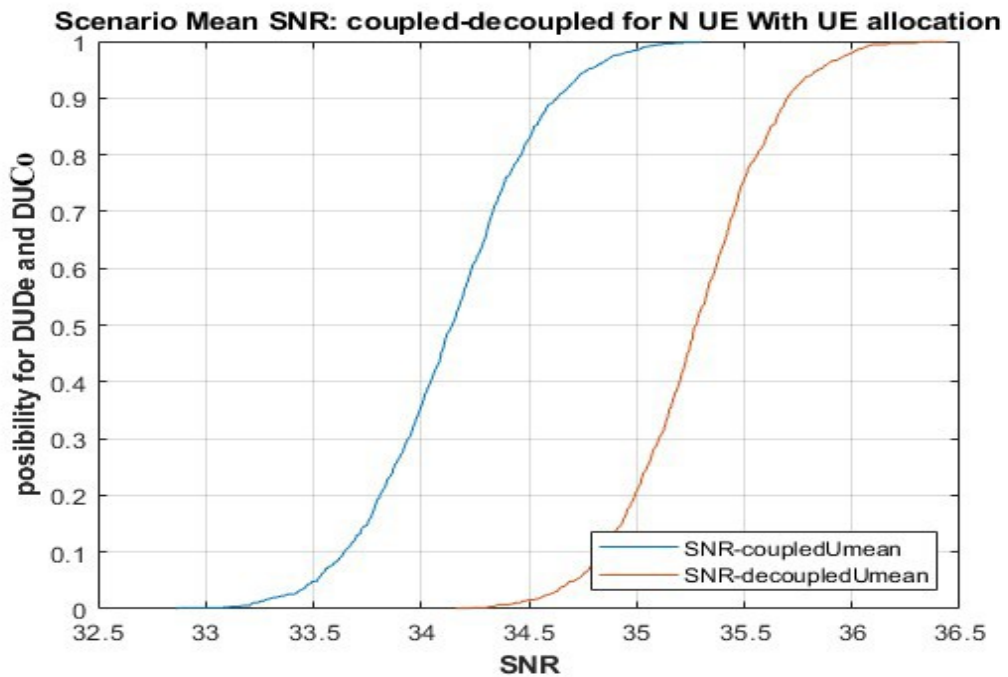
Οι προσομοιώσεις εκτελούνται για 100 UE, 1000 UE και 2000 UE. Αυτές οι προσομοιώσεις λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς χωρητικότητας των macro, micro και pico BS, οι οποίοι είναι 2000, 200 και 46 αντίστοιχα. Οι UE βρίσκονται σε μια περιοχή με 14 BS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χαμηλότερες τιμές SNR αυξάνουν την πιθανότητα αποτελεσματικής σύζευξης λόγω του υψηλού κέρδους της κεραίας BS, ενώ οι υψηλότερες τιμές SNR αυξάνουν την αποτελεσματικότητα της τεχνικής DUDe. Τέλος, η δυνατότητα αποτελεσματικής σύζευξης μειώνεται σημαντικά πάνω από τα 30dB.

Η αξιολόγηση των τιμών UE σε διάφορα σενάρια οδήγησε επίσης στο εξής συμπέρασμα: η επιλογή μεταξύ των τεχνικών DUCo και DUDe για σύνδεση δικτύου εξαρτάται από την ισχύ του σήματος (SNR). Για ασθενή σήματα (χαμηλές τιμές SNR), η τεχνική DUCo είναι πιο αποτελεσματική λόγω του υψηλότερου κέρδους της κεραίας BS κεραίας macro. Ωστόσο, για ισχυρά σήματα (υψηλές τιμές SNR), η τεχνική DUDe είναι πιο αποτελεσματική και η τεχνική DUCo είναι μη αποτελεσματική για τιμές SNR μεγαλύτερες από 36db. Επιπροσθέτως καθώς ο αριθμός των UE στο δίκτυο αυξάνεται, η ανάγκη για την τεχνική DUDe γίνεται πιο εμφανής για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ UE και BS. Η βελτιωμένη κατανομή του UE οδηγεί σε καλύτερη χρήση των BS, παρέχοντας έτσι μια πιο αποτελεσματική υπηρεσία στον UE.

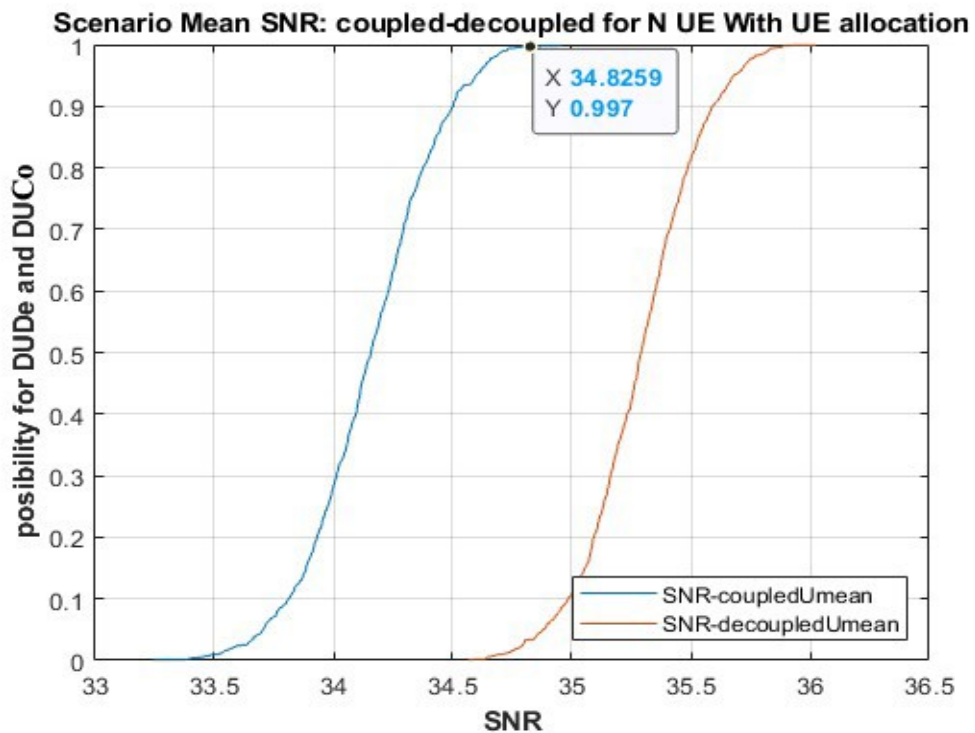
Η επιλογή μεταξύ των τεχνικών DUCo και DUDe για σύνδεση δικτύου σε δίκτυα 5G καθορίζεται από την ισχύ του σήματος, όπως μετράτε από το SNR. Για ασθενή σήματα με χαμηλές τιμές SNR, η τεχνική DUCo είναι πιο αποτελεσματική λόγω του υψηλότερου κέρδους της κεραίας Macro. Το υψηλότερο κέρδος της κεραίας macro έχει ως αποτέλεσμα ισχυρότερο σήμα που μπορεί να διεισδύσει μέσα από εμπόδια και να παρέχει καλύτερη κάλυψη, καθιστώντας την τεχνική DUCo κατάλληλη για αδύναμα σήματα. Από την άλλη πλευρά, για ισχυρά σήματα με υψηλές τιμές SNR, η τεχνική DUDe είναι πιο αποτελεσματική. Σε αυτό το σενάριο, η τεχνική DUDe μπορεί να παρέχει πιο σταθερό και υψηλότερο ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με την τεχνική DUCo. Ως εκ τούτου, για τιμές SNR μεγαλύτερες από 36dB, η τεχνική DUCo δεν είναι βιώσιμη καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση του δικτύου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το όριο SNR των 36dB είναι απλώς μια γενική κατευθυντήρια γραμμή και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες και απαιτήσεις του δικτύου. Ως εκ τούτου, η τακτική αξιολόγηση και βελτιστοποίηση της υποδομής δικτύου είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης για όλους τους UE σε ένα δίκτυο 5G. Χαρακτηριστικό είναι να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση των 100 χρηστών για SNR 35dB DUDe έχει πιθανότητα επιτυχίας μεγαλύτερη του 85% για τους UE όταν το DUCo έχει βαθμό επιτυχίας μικρότερη του 25%. Επίσης αντίστοιχα για την περίπτωση των 1000 χρηστών και για τιμή SNR 36 dB το ποσοστό επιτυχίας της DUDe τεχνολογίας φτάνει στο 100% ενώ για την αντίστοιχη τεχνολογία DUCo το ποσοστό επιτυχίας είναι μηδενικό (Εικόνα 16 έως Εικόνα 18).



Εικόνα 16: Σύγκριση DUCo/DUDe για N=100 UE.



Εικόνα 17: Σύγκριση DUCo/DUDe για N=1000 UE.



Εικόνα 18: Σύγκριση DUCo/DUDe για $N=2000$ UE

Εκτελώντας αυτές τις προσομοιώσεις, αποδεικνύουμε ότι η σύγκριση των τεχνικών DUDe και DUCo, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα BS, αποκαλύπτει ότι το DUDe έχει πιο ισορροπημένη κατανομή χρηστών σε σύγκριση με το DUCo. Αυτό σημαίνει ότι το DUDe διασφαλίζει ότι κανένα BS δεν θα έχει περισσότερη UE από τη χωρητικότητά του, οδηγώντας τόσο σε αποτελεσματική λειτουργία των BS όσο και σε βελτιωμένη απόδοση δικτύου.

5.3 Πειράματα κατανομής εύρους ζώνης (bandwidth)

Ο σκοπός των συγκεκριμένων πειραμάτων είναι να αποδείξει ότι η τεχνολογία DUDe επιτυγχάνει πιο αποτελεσματική και ομαλότερη κατανομή εύρους ζώνης σε σχέση με την τεχνολογία DUCo, ανεξάρτητα από τον αριθμό των χρηστών εντός του δικτύου. Άμεση

συνέπεια αυτού είναι ότι μικρότερες ποσότητες εύρους ζώνης καταναλώνονται από τις macro cell κεραιές και κατά συνέπεια υπάρχουν πόροι για την καλύτερη εξυπηρέτηση των ήδη υπαρχόντων χρηστών και των πιθανών νέων χρηστών που θα εισέλθουν στο δίκτυο.

Για την επίτευξη των σεναρίων δημιουργούμε τυχαία έναν αριθμό UE και εκχωρούμε σε κάθε UE μία από τις υπηρεσίες που περιγράφονται στον Πίνακα 2. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2, οι τιμές κυμαίνονται από 1 έως 25 Mbps για λειτουργίες κατερχόμενης ζεύξης (Downstream) και 0,5 έως 2 Mbps για τις λειτουργίες ανερχόμενης ζεύξης (Upstream).

Πίνακας 2: Τιμές για τις υπηρεσίες των χρηστών.

Υπηρεσίες	Κατερχόμενη ζεύξη	Ανερχόμενη Ζεύξη
Browsing/Email	5 Mbps	2 Mbps
HDTV	16 Mbps	0.5 Mbps
Video Streaming	25 Mbps	1 Mbps
Podcasts	2 Mbps	0.5 Mbps
VoIP	1 Mbps	1 Mbps

Στη συνέχεια, για να πραγματοποιήσουμε τις προσομοιώσεις μας, αναπτύξαμε ένα ετερογενές δίκτυο 5G. Ο σκοπός της δημιουργίας ενός ετερογενούς δικτύου είναι να παρέχει μια πιο αποτελεσματική κατανομή των πόρων εντός του δικτύου, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Για να διασφαλίσουμε την επιτυχία των προσομοιώσεων, καταναίμαμε τους χρήστες σε τυχαίες θέσεις εντός του δικτύου. Ωστόσο, διατηρήσαμε μια ελάχιστη απόσταση 1 έως 2 μέτρων μεταξύ κάθε χρήστη για να αποτρέψουμε την επικάλυψη και να εξασφαλίσουμε αξιόπιστη επικοινωνία. Το δίκτυο σχεδιάστηκε για να επιτρέπει τη δυναμική κατανομή πόρων, πράγμα που σημαίνει ότι το εύρος ζώνης και το εύρος συχνοτήτων μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τον αριθμό και τη θέση των χρηστών στο δίκτυο.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της μεταβλητής B για κάθε χρήστη, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για να κρατήσει ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων από την κεραιά για την αποτελεσματική εκτέλεση των υπηρεσιών UE χωρίς παρεμβολές. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τροποποιημένο τύπο που λαμβάνει υπόψη την τιμή SNR και μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου για τη μεταβλητή C . Η φράση "προκαθορισμένο" αναφέρεται σε τυχαία εκχωρημένη τιμή εύρους ζώνης για χρήστες μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας. Οι διαθέσιμες υπηρεσίες περιγράφονται παραπάνω στο κείμενο και μπορούν να βρεθούν στον πίνακα 2

5.3.1 Ανάλυση του αλγορίθμου των σεναρίων

Ο αλγόριθμος 2 συγκρίνει την απόδοση δύο διαφορετικών τεχνολογιών για την κατανομή εύρους ζώνης σε ένα σενάριο δικτύου 5G. Οι δύο τεχνολογίες είναι η DUCo και η DUDe. Ο αλγόριθμος υποθέτει ότι υπάρχει ένας αριθμός macro cell κεραιών, ένας αριθμός micro cell κεραιών και ένας αριθμός pico cell κεραιών στο δίκτυο. Δημιουργεί επίσης τυχαίες τιμές εύρους ζώνης για κάθε UE στο δίκτυο. Με βάση το μαθηματικό μοντέλο που συζητήθηκε προηγουμένως, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του θεωρητικού μέγιστου εύρους ζώνης (σε hertz) που μπορεί να παρέχει μια κεραιά για κάθε χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο

σήματος προς θόρυβο (SNR) και τη συγκεκριμένη υπηρεσία που απαιτούν. Αυτός ο υπολογισμός επιτρέπει την αποτελεσματική και αποδοτικότερη παροχή υπηρεσιών για κάθε χρήστη.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει το συνολικό εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο στο δίκτυο αθροίζοντας τις τιμές εύρους ζώνης που δημιουργούνται για το UE. Κάθε UE επιλέγει τυχαία μια υπηρεσία από τον Πίνακα 2. Στη συνέχεια, υπολογίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κεραία και για τις τεχνολογίες DUCo και DUDe. Για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης και στα δύο σενάρια (DUDe/DUCo) χρησιμοποιούμε τις τιμές μεταφόρτωσης και λήψης για τις υπηρεσίες που αναφέρονται στον Πίνακα 2. Οι χρήστες επιλέγονται με βάση την καλύτερη τιμή SNR, διατηρώντας παράλληλα την αρχή της τεχνολογίας DUDe ότι κανένας χρήστης δεν θα συνδεθεί για τη κατερχόμενη ζεύξη σε μια κεραία μικρής κυψέλης και για την άνω ζεύξη σε μια macro cell κεραία. Γνωρίζοντας αυτήν την κατανομή των χρηστών στις κεραίες δικτύου, αρχικά ορίζουμε ένα ποσό εύρους ζώνης για τις δύο macro cell κεραίες. Κάθε φορά που ένας χρήστης συνδέεται σε μία από τις δύο macro cell κεραίες, οι πόροι αφαιρούνται από αυτές. Αυτή η διαδικασία εκτελείται και για τα δύο σενάρια και το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει από την εκτέλεσή τους είναι ποια από τις δύο τεχνολογίες έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη κατανάλωση εύρους ζώνης στις macro cell κεραίες. Αυτό είναι πιο αποτελεσματικό αφού επιτυγχάνει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών και των απαιτήσεών τους εντός του δικτύου, με άμεση συνέπεια την αύξηση της απόδοσης στο δίκτυο συνολικά. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος υπολογίζει το συνολικό εύρος ζώνης που κατανέμεται σε όλους τους χρήστες και για τις δύο τεχνολογίες. Για το σενάριο DUCo, ο αλγόριθμος κάνει βρόχους μέσω κάθε χρήστη και κατανέμει το εύρος ζώνης του στην κεραία στην οποία είναι συνδεδεμένος, διασφαλίζοντας ότι το εισερχόμενο εύρος ζώνης δεν υπερβαίνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κεραία. Για το σενάριο DUDe, ο αλγόριθμος κάνει βρόχους μέσω κάθε χρήστη και εκχωρεί το εύρος ζώνης του τόσο στις κεραίες ανερχόμενης όσο και κατερχόμενης ζεύξης με τις οποίες είναι συνδεδεμένες, διασφαλίζοντας ότι το εισερχόμενο εύρος ζώνης δεν υπερβαίνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κεραία είτε για την ανερχόμενη είτε για την κατερχόμενη ζεύξη. Τέλος, ο αλγόριθμος συγκρίνει το συνολικό εύρος ζώνης που κατανέμεται σε όλους τους χρήστες και για τα δύο σενάρια (DUDe και DUCo). Εάν το συνολικό εύρος ζώνης που καταναλώνεται με την τεχνολογία DUDe είναι μικρότερο από το συνολικό εύρος ζώνης που καταναλώνεται με την τεχνολογία DUCo, ο αλγόριθμος εκτυπώνει ένα μήνυμα που υποδεικνύει ότι η τεχνολογία DUDe επιτυγχάνει καλύτερη κατανομή εύρους ζώνης σε αυτόν τον αριθμό κεραιών και επομένως προσφέρει μια πιο αποτελεσματική λύση για δίκτυα 5G. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος εκτυπώνει ένα μήνυμα που υποδεικνύει ότι η τεχνολογία DUCo επιτυγχάνει καλύτερη κατανομή εύρους ζώνης σε αυτόν τον αριθμό κεραιών και ως εκ τούτου προσφέρει μια πιο αποτελεσματική λύση για τα δίκτυα 5G.

Αλγόριθμος, 2 Algorithm for calculating bandwidth for DUCo and DUDe scenarios.

```
// Initialize variables
decoupling_total_bandwidth_macro = 0
coupling_total_bandwidth_macro = 0
num_ues = N
occurrences_for_scenarios = 1000
// Generate random bandwidth for each UE
for i in range(num_ues):
```

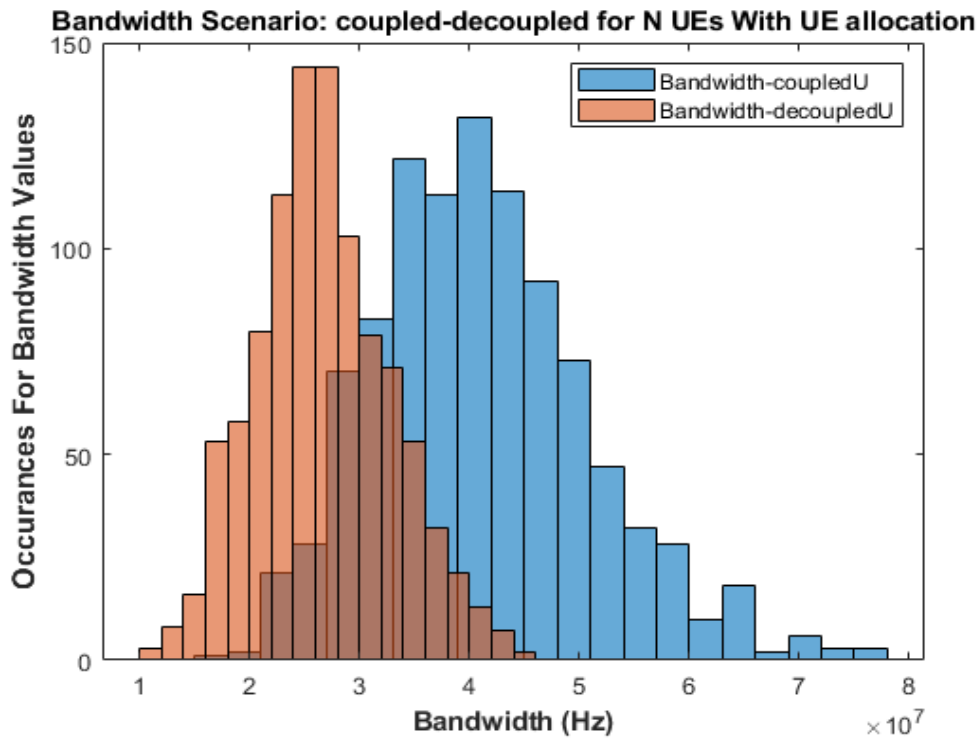
```
bandwidth_values = randomly_select_bandwidth ()
total_bandwidth += bandwidth
// generate bandwidth from mathematical type above
for i in range(num_ues):
    C = bandwidth_values.
    Bandwidth_for_Macro_UE = C/log2(1+SNR)
end_for
// Calculate bandwidth allocation for downlink/uplink decoupling and
Downlink/uplink coupling
//DUCo Since the macro antenna is in closer proximity, it is likely to provide a stronger SNR
compared to other types of antennas, so the user should connect to it.
for i in range(num_ues):
    for j in range(occurrences_for_scenarios):
        If (snrMacro_UE>snrMicro_UE) && (snrMacro_UE>snrPico_UE)
            coupling_total_bandwidth_macro = coupling_total_bandwidth_macro -
            Bandwidth_for_Macro_UE
        end_for
    end_for
//DUDe Since the macro antenna is in closer proximity, it is likely to provide a stronger SNR
compared to other types of antennas, so the user should connect to it.
for i in range(num_ues):
    for j in range(occurrences_for_scenarios):
        If (snrMacro_UE>snrMicro_UE) && (snrMacro_UE>snrPico_UE)
            decoupling_total_bandwidth_macro = decoupling_total_bandwidth_macro -
            Bandwidth_for_Macro_UE
        end_for
    end_for
if decoupling_total_bandwidth_macro > coupling_total_bandwidth_macro:
    print ("Downlink/uplink decoupling achieves better bandwidth allocation and lower
    bandwidth consumption.")
else:
    print ("Downlink/uplink coupling does not achieve as good bandwidth allocation as
    downlink/uplink decoupling and results in higher bandwidth consumption.")
```

5.3.2 Σύγκριση της τεχνολογίας DUDe με DUCo για την κατανομή του εύρους ζώνης.

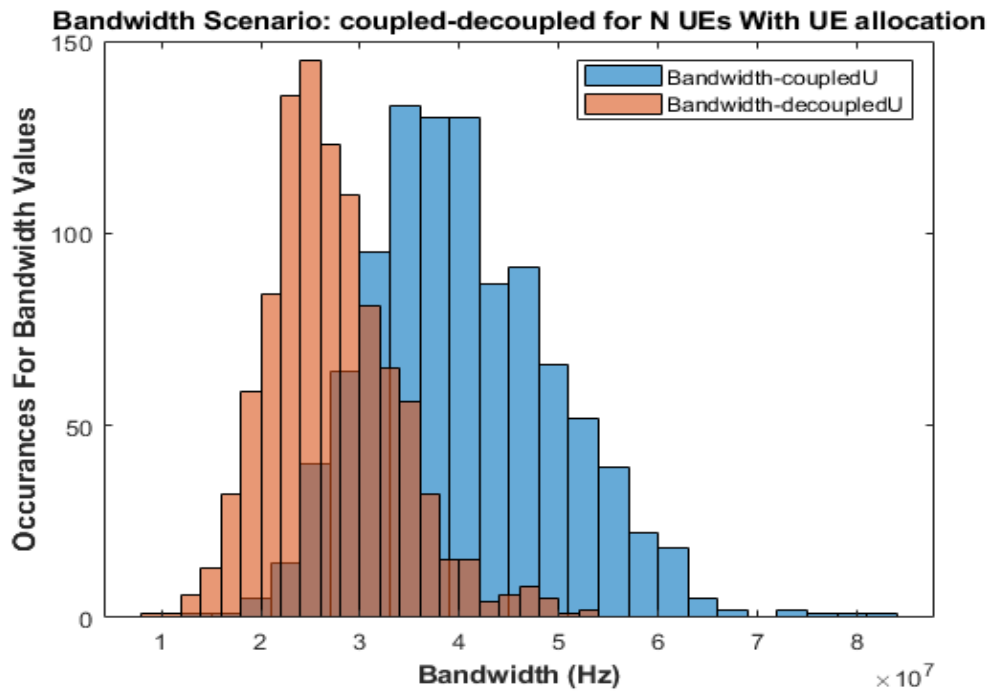
Η έρευνά μας είχε ως στόχο να συγκρίνει την απόδοση δύο διαφορετικών τεχνολογιών, της DUCo και της DUDe, σε δύο κεραίες macro cell σε αυτά τα διαφορετικά σενάρια. Ο στόχος ήταν να διερευνηθεί ποια τεχνολογία είναι πιο αποτελεσματική όσον αφορά τη χρήση και διανομή εύρους ζώνης όταν συνδέονται πολλαπλοί UE σε ένα δίκτυο. Στη μελέτη μας, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις με ποικίλους αριθμούς χρηστών και συγκρίναμε την κατανάλωση εύρους ζώνης των τεχνολογιών DUCo και DUDe.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με 100, 200 και 400 UEs αντίστοιχα για την προσομοίωση διαφόρων επιπέδων συμφόρησης δικτύου. Ο σκοπός των προσομοιώσεων ήταν να καταδειχθεί ότι η τεχνολογία DUDe οδηγεί σε καλύτερη κατανομή των χρηστών και του εύρους ζώνης εντός του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση πόρων από τις κεραίες Macro Cell, επιτρέποντάς τους να εξυπηρετούν νέους χρήστες ή άτομα με μεγαλύτερες ανάγκες. Αυτό τελικά αυξάνει τη χωρητικότητα και την απόδοση του δικτύου. Οι προσομοιώσεις ήταν κρίσιμες για την ανάδειξη της χρησιμότητας και της σημασίας της τεχνολογίας DUDe. Αυτή η τεχνολογία έχει σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου και την απελευθέρωση πόρων από τις κεραίες Macro Cell. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζει μια πιο αποτελεσματική κατανομή των πόρων εντός του δικτύου, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστη και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Αξίζει να σημειωθεί ότι για να έχουμε αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας, πραγματοποιήσαμε τις προσομοιώσεις μας για συνολικά 1000 στιγμιότυπα και παρουσιάζουμε τις τιμές αθροίσματος.

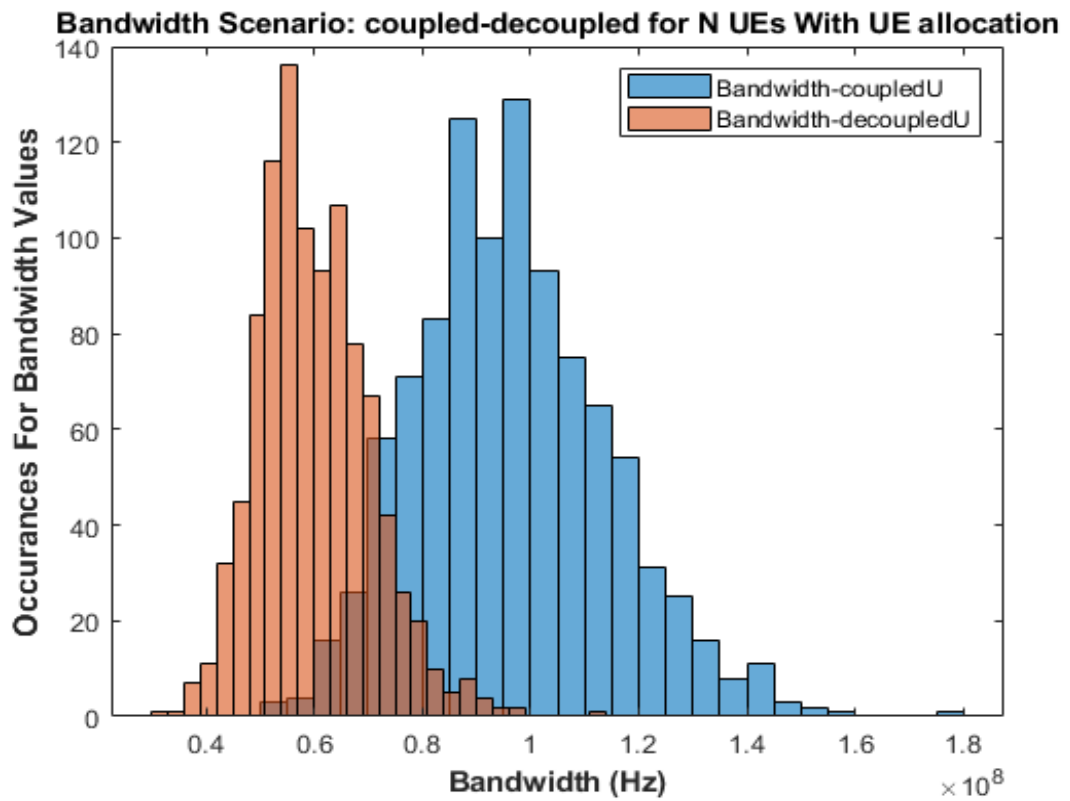
Για την ανάλυση των δεδομένων, παρουσιάσαμε τα παρακάτω γραφήματα από την (Εικόνα 19 έως την Εικόνα 24), όπου για την καλύτερη κατανόηση τους, θα θέλαμε να επισημάνουμε ορισμένες σημαντικές λεπτομέρειες σχετικά με τα γραφήματα μας. Επίσης μέρος κώδικα της υλοποίησης μπορείτε να δείτε στο Παράρτημα Α.



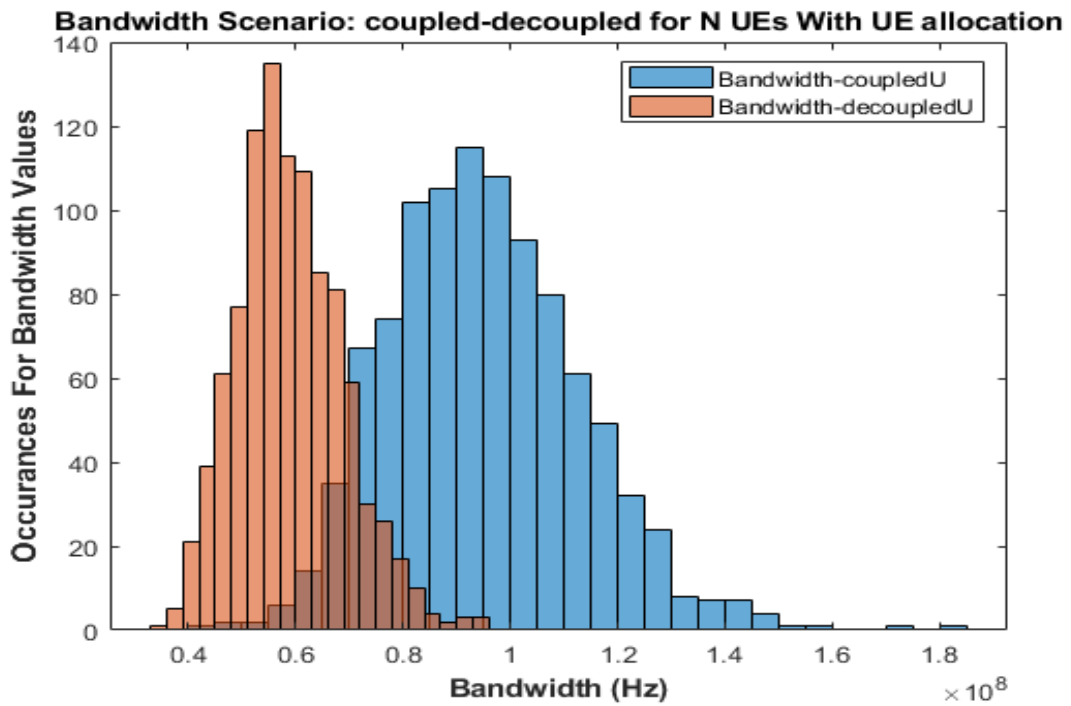
Εικόνα 19: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 1 και $N=100$ UE.



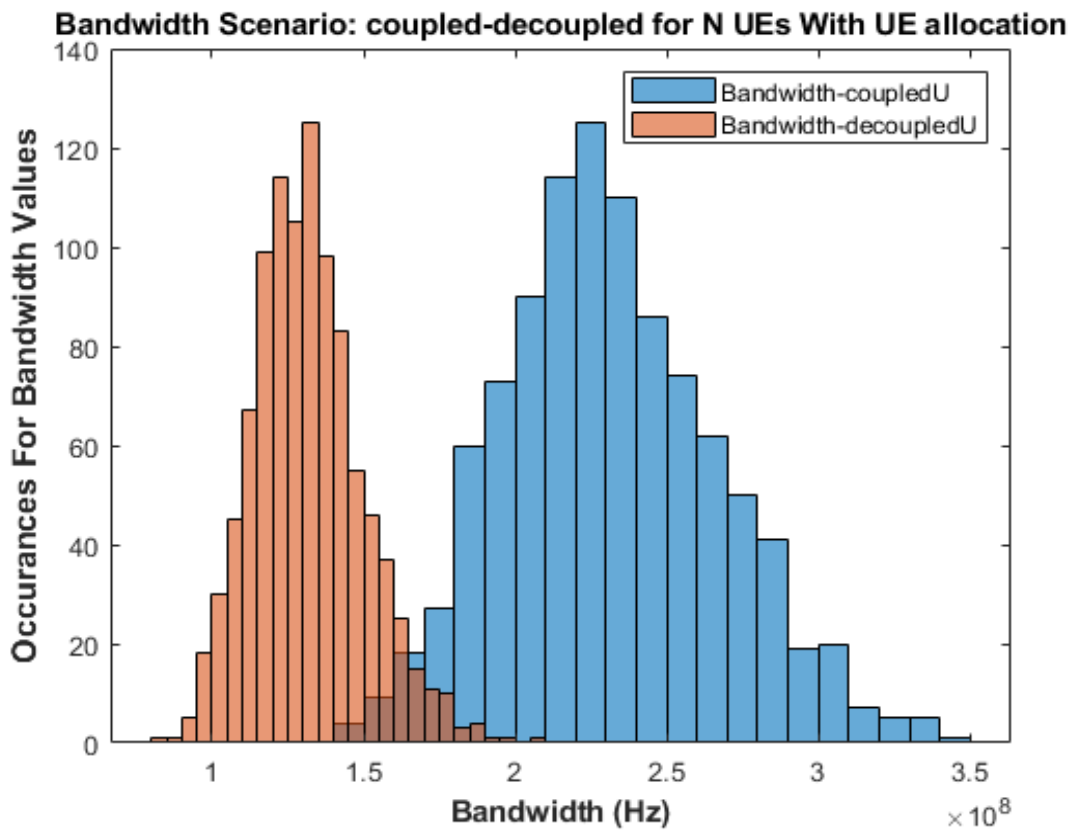
Εικόνα 20: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 2 και $N=100$ UE.



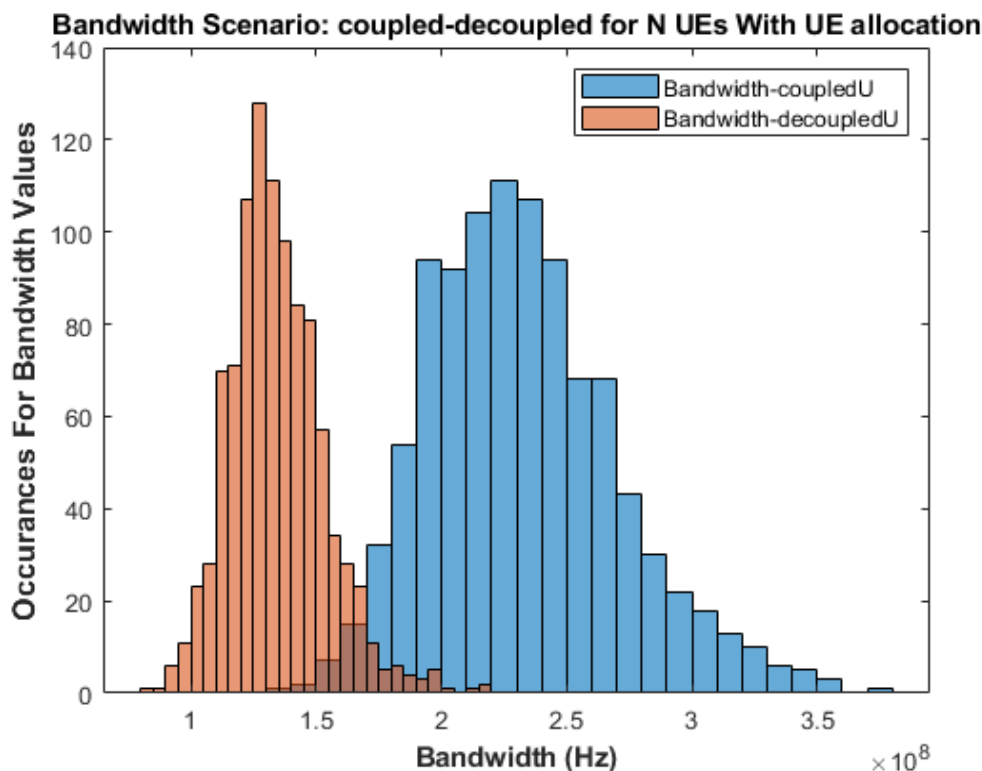
Εικόνα 21: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 1 και $N=200$ UE.



Εικόνα 22: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 2 και $N = 200$ UE.



Εικόνα 23: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 1 και $N = 400$ UE.



Εικόνα 24: Συγκριτική γραφική αναπαράσταση για την κατανάλωση του εύρους ζώνης για την macro 2 και $N=400$ UE.

Η ανάλυση των διαγραμμάτων αποκαλύπτει ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας DUDe οδηγεί σε αξιοσημείωτη μείωση της κατανάλωσης εύρους ζώνης σε σύγκριση με την τεχνολογία DUCo όταν είναι συνδεδεμένοι πολλαπλοί UEs σε ένα δίκτυο. Τα διαγράμματα που δείχνουν ξεκάθαρα την ουσιαστική διαφορά στη χρήση του εύρους ζώνης μεταξύ των σεναρίων DUDe και DUCo. Αυτή η έντονη αντίθεση σημαίνει ότι η τεχνολογία DUDe διευκολύνει μια πιο δίκαιη κατανομή των χρηστών και του αντίστοιχου εύρους ζώνης τους, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης στις κεραίες κυψελών macro.

Ο άξονας x αντιπροσωπεύει το υπόλοιπο εύρος ζώνης που μετράτε σε Hz μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ενώ ο άξονας y αντιπροσωπεύει τη συχνότητα των διαδοχικών πειραμάτων που δίνουν συγκεκριμένες τιμές εύρους ζώνης για τις κεραίες. Ο συνδυασμός χρωμάτων που χρησιμοποιείται στα γραφήματα διακρίνει το σενάριο σύζευξης, που απεικονίζεται με μπλε χρώμα, από το σενάριο αποσύνδεσης, που απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα. Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε επιτυχώς επαληθεύει την αρχική υπόθεση ότι η τεχνολογία DUDe παρουσιάζει ανώτερη απόδοση τόσο όσον αφορά τη χρήση του εύρους ζώνης όσο και τη διανομή όταν πολυάριθμοι UEs είναι συνδεδεμένοι σε ένα δίκτυο. Το πλεονάζον εύρος ζώνης που αποκτάται μέσω της υλοποίησης του DUDe μπορεί να αξιοποιηθεί για να βελτιωθεί η ποιότητα της υπηρεσίας για τους υπάρχοντες χρήστες ή να φιλοξενήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών στο δίκτυο. Ενώ τα γραφήματα μπορεί να φαίνονται οπτικά παρόμοια, αντιπροσωπεύουν πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με ποικίλες ποσότητες χρηστών, συγκεκριμένα 100, 200 και 400, για να υποστηρίξουν την υπόθεση και να καταδείξουν τη συνοχή της κεντρικής ιδέας ακόμη και με έναν αυξανόμενο αριθμό χρηστών. Τα γραφήματα

απεικονίζουν την αναγκαιότητα της τεχνολογίας DUDe για τη διασφάλιση μιας πιο ομοιόμορφης κατανομής των χρηστών και του εύρους ζώνης σε όλο το δίκτυο. Επιπλέον, το σενάριο σύζευξης εμφανίζει μεγαλύτερη κατανάλωση εύρους ζώνης, εξαντλώντας έτσι τους διαθέσιμους πόρους στις κεραιές κυψελών macro. Έτσι, η παρουσίαση και των δύο κατανομών κεραιάς κυψελών macro χρησιμεύει για την επικύρωση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Μετά από σχολαστική ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος, γίνεται προφανές ότι η τεχνολογία DUDe υπερτερεί σημαντικά της τεχνολογίας DUCo όσον αφορά τη χρήση πόρων κεραιάς σε διαφορετικές ποσότητες χρηστών. Σημειωτέων, για 400 UE, η τεχνολογία DUDe παρουσιάζει βελτίωση 71% σε σχέση με την τεχνολογία DUCo, ενώ για 200 UE αποδεικνύεται 73% πιο αποτελεσματική και για 100 UE δείχνει 50% αύξηση στην απόδοση. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν την κρισιμότητα της ενσωμάτωσης αυτής της τεχνολογίας σε ετερογενή δίκτυα 5ης γενιάς και υπογραμμίζουν τη σημασία αυτής της έρευνας στο πεδίο. Αξίζει να επισημανθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κεραιές που χρησιμοποιούν τεχνολογία DUCo πλησίασαν επικίνδυνα να εξαντλήσουν τους πόρους τους όταν εξυπηρετούσαν 400 χρήστες, με αποτέλεσμα την κατώτερη εξυπηρέτηση των υπαρχόντων χρηστών και χωρίς δυνατότητα συμμετοχής νέων χρηστών. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη εντοπισμού πιο αποτελεσματικών τεχνολογιών για την υποδοχή μεγάλου αριθμού χρηστών στα σύγχρονα δίκτυα.

Αυτά τα ευρήματα συμβάλλουν σε μια νέα προοπτική στην υπάρχουσα έρευνα εύρους ζώνης στον τομέα 5G. Η μελέτη υπογραμμίζει τα πιθανά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας DUDe για τη βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης και την πρακτική εφαρμογή της σε κεραιές μακροκυτταρικών κυψελών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ειδικά σε πυκνοκατοικημένες ή συμφορημένες περιοχές. Συνολικά, αυτή η μελέτη παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την αποτελεσματικότητα διαφορετικών τεχνολογιών για τη βελτιστοποίηση του δικτύου και τονίζει τη σημασία της ανάπτυξης καινοτόμων τεχνολογιών για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Η συμβολή στην επιστημονική κοινότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αναδεικνύει την αναγκαιότητα εφαρμογής της τεχνολογίας DUDe σε δίκτυα 5ης γενιάς. Με την καλύτερη κατανομή των πόρων, μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη απόδοση δικτύου, να αυξήσουμε τη χωρητικότητά του και να μειώσουμε την καθυστέρηση.

6

Συμπεράσματα και Προοπτικές

6.1 Σύνοψη

Το Κεφάλαιο 6 παρέχει μια περιεκτική περίληψη των ευρημάτων της έρευνας και των συνεισφορών σχετικά με την κατανομή πόρων σε δίκτυα 5ης γενιάς χρησιμοποιώντας την καινοτόμο τεχνική αποσύνδεσης κατερχόμενης ζεύξης (DUDe). Το κεφάλαιο ξεκινά επανεξετάζοντας τους ερευνητικούς στόχους και τονίζοντας τη σημασία της αποτελεσματικής κατανομής πόρων για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των δικτύων 5G. Στη συνέχεια, συνοψίζει τα βασικά σημεία που συζητήθηκαν σε κάθε ένα από τα προηγούμενα κεφάλαια, προσφέροντας μια συνοπτική και συνεκτική επισκόπηση της διπλωματικής.

Η έρευνα εισήγαγε την τεχνική DUDe ως μια νέα προσέγγιση για την κατανομή πόρων, με στόχο να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των υπάρχουσών τεχνικών αξιοποιώντας παράλληλα την εγγενή ευελιξία και επεκτασιμότητα που προσφέρει η αποσύνδεση κατερχόμενης ζεύξης. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας εμβαθύνει στις προκλήσεις που σχετίζονται με την κατανομή πόρων στα δίκτυα 5G, υπογραμμίζοντας την πιεστική ανάγκη για προηγμένες τεχνικές. Το επόμενο κεφάλαιο σχετικά με το μοντέλο του συστήματος και τις εκτιμήσεις σχεδιασμού παρουσίασε μια λεπτομερή και εμπειριστατωμένη εξήγηση της τεχνικής DUDe, διευκρινίζοντας τις βασικές αρχές και τους μηχανισμούς της. Το κεφάλαιο αξιολόγησης απόδοσης και αποτελεσμάτων ενίσχυσε περαιτέρω την αποτελεσματικότητα, την προσαρμοστικότητα και την επεκτασιμότητα της τεχνικής κατανομής πόρων που βασίζεται στο DUDe μέσω μιας εκτεταμένης σειράς προσομοιώσεων. Τέλος, το κεφάλαιο συζήτησης και ανάλυσης παρείχε διορατικές παρατηρήσεις σχετικά με τα δυνατά σημεία, τις αδυναμίες και τις πρακτικές επιπτώσεις της προτεινόμενης τεχνικής.

6.2 Τελικά συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική, έχουμε ασχοληθεί με το κρίσιμο ζήτημα της κατανομής πόρων σε δίκτυα 5ης γενιάς 5G χρησιμοποιώντας την τεχνική DUDe. Ο στόχος μας ήταν να σχεδιάσουμε ένα ισχυρό και αποτελεσματικό σύστημα κατανομής πόρων που βελτιστοποιεί τη χρήση των

πόρων του δικτύου, καλύπτοντας παράλληλα τις ποικίλες και απαιτητικές απαιτήσεις των εφαρμογών 5G. Μέσω μιας εις βάθος ανάλυσης και αξιολόγησης, καταδείξαμε την αποτελεσματικότητα και τα οφέλη της τεχνικής DUDe στη βελτίωση της κατανομής πόρων σε δίκτυα 5G.

Η τεχνική DUDe, η οποία αποσυνδέει τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης από την ανερχόμενη ζεύξη, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις κατανομής πόρων, όπως η σύζευξη κατερχόμενης/ανερχόμενης ζεύξης. Αξιοποιώντας τις βιβλιοθήκες της matlab, καταφέραμε και υλοποιήσαμε μια προσομοίωση με πραγματικά δεδομένα ενός δικτύου 5ης γενιάς, μέσω του οποίου αναδείξαμε ότι η τεχνική DUDe επιτρέπει δυναμικές και ακριβείς αποφάσεις κατανομής πόρων, ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα και την προσαρμοστικότητα του δικτύου.

Καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μας, πραγματοποιήσαμε εκτενείς προσομοιώσεις και αξιολογήσεις απόδοσης για να επικυρώσουμε την αποτελεσματικότητα της τεχνικής DUDe. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές βελτιώσεις στη χρήση πόρων, στη χωρητικότητα του δικτύου και στην παροχή Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS). Η τεχνική DUDe επέτρεψε την αποτελεσματική κατανομή των πόρων με βάση τις συνθήκες δικτύου σε πραγματικό χρόνο και τις απαιτήσεις εφαρμογής. Η δυνατότητα κατανομής πόρων τόσο στα στάδια πριν από τη μετάδοση όσο και στο στάδιο της μετάδοσης βοήθησε στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και στη διασφάλιση καλύτερης εμπειρίας χρήστη.

Επιπλέον, διερευνήσαμε τις προκλήσεις και τις σκέψεις που σχετίζονται με την εφαρμογή της τεχνικής DUDe σε πρακτικά δίκτυα 5G. Εξετάσαμε διάφορα σενάρια ανάπτυξης, με ποικίλο αριθμό χρηστών, και αναλύσαμε τον αντίκτυπο του στο δίκτυο, της κινητικότητας των χρηστών και του φόρτου κυκλοφορίας στην απόδοση κατανομής πόρων. Τα ευρήματά μας παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές ανάπτυξης και τους πιθανούς συμβιβασμούς απόδοσης που σχετίζονται με την τεχνική DUDe.

Συμπερασματικά, το πρόβλημα κατανομής πόρων στα δίκτυα 5G είναι ένα περίπλοκο και κρίσιμο ζήτημα που απαιτεί καινοτόμες λύσεις για να ξεκλειδώσει πλήρως το δυναμικό του δικτύου. Η τεχνική DUDe που προτείνεται σε αυτή τη διπλωματική προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης. Με την αποσύνδεση της μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης, παρέχει έναν ευέλικτο και αποτελεσματικό μηχανισμό κατανομής πόρων που μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες δικτύου και απαιτήσεις εφαρμογής. Οι εμπειρικές αξιολογήσεις έχουν δείξει ότι η τεχνική DUDe βελτιώνει τη χρήση των πόρων, τη χωρητικότητα του δικτύου και την παροχή QoS, που είναι κρίσιμοι παράγοντες για την επιτυχή ανάπτυξη και λειτουργία των δικτύων 5G

6.3 Μελλοντική Εργασία

Σε αυτό το κεφάλαιο, συζητάμε τις μελλοντικές εργασίες και τις πιθανές κατευθύνσεις για έρευνα στον τομέα της κατανομής πόρων σε δίκτυα 5G χρησιμοποιώντας την DUDe. Η τεχνική DUDe έχει δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της απόδοσης της κατανομής πόρων στην επικοινωνία κατερχόμενης ζεύξης. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετοί τομείς που μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητάς του και την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την κατανομή πόρων στα δίκτυα 5G.

Ένας τομέας μελλοντικής έρευνας είναι η ανάπτυξη βελτιωμένων και εξελιγμένων μοντέλων πρόβλεψης καναλιών για ακριβέστερη εκτίμηση των συνθηκών καναλιών. Η ακριβής πρόβλεψη καναλιών είναι υψίστης σημασίας για την αποτελεσματική κατανομή πόρων στα δίκτυα 5G. Ενσωματώνοντας προηγμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, τεχνικές βαθιάς εκμάθησης και εξελιγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος, οι ερευνητές μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια των μοντέλων πρόβλεψης καναλιών, επιτρέποντας έτσι την ακριβέστερη κατανομή των πόρων ραδιοφώνου.

Μια άλλη οδός για μελλοντική έρευνα είναι η εξερεύνηση δυναμικών και προσαρμοστικών στρατηγικών κατανομής πόρων σε δίκτυα 5G. Η τεχνική DUDe παρέχει μια σταθερή βάση για αποτελεσματική κατανομή πόρων, αλλά υπάρχει σημαντικό περιθώριο βελτίωσης όσον αφορά τη δυναμική προσαρμογή της διαδικασίας κατανομής με βάση τις ποικίλες συνθήκες δικτύου και τις απαιτήσεις των χρηστών. Με την ανάπτυξη ευφύων αλγορίθμων που μπορούν να προσαρμόσουν δυναμικά την κατανομή πόρων σε πραγματικό χρόνο, η συνολική απόδοση του δικτύου μπορεί να βελτιστοποιηθεί, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών για τους χρήστες.

Ο τεμαχισμός δικτύου είναι ένα βασικό και μετασχηματιστικό χαρακτηριστικό των δικτύων 5G που επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων σε μια ενιαία φυσική υποδομή. Η μελλοντική έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στην απρόσκοπτη ενσωμάτωση της τεχνικής DUDe με τον τεμαχισμό δικτύου για να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική κατανομή πόρων σε διαφορετικά τμήματα. Αυτή η ολοκλήρωση θα περιλαμβάνει την ανάπτυξη μηχανισμών για τη δυναμική κατανομή πόρων σε διαφορετικά τμήματα με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και προτεραιότητές τους. Η πρόκληση έγκειται στην αποτελεσματική διαχείριση της κατανομής πόρων σε πολλαπλά τμήματα, διασφαλίζοντας παράλληλα δικαιοσύνη, εγγυήσεις QoS και αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Η ενεργειακή απόδοση είναι μια κρίσιμη πτυχή των μελλοντικών ασύρματων δικτύων και οι ερευνητές μπορούν να εξερευνήσουν τρόπους βελτιστοποίησης της κατανομής των πόρων σε δίκτυα 5G χρησιμοποιώντας την τεχνική DUDe, ενώ παράλληλα εξετάζουν την κατανάλωση ενέργειας ως βασική μέτρηση. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων που όχι μόνο βελτιστοποιούν την κατανομή των πόρων από άποψη απόδοσης, αλλά και ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας, προωθώντας έτσι τις πράσινες και βιώσιμες λειτουργίες δικτύου. Οι στρατηγικές κατανομής πόρων με επίγνωση της ενέργειας μπορούν να λαμβάνουν υπόψη τα ενεργειακά προφίλ διαφορετικών συσκευών, προσαρμόζοντας δυναμικά την κατανομή πόρων για να εξισορροπηθεί η απόδοση και η ενεργειακή απόδοση.

Η τεχνική DUDe εστιάζει κυρίως στην κατανομή πόρων στο φυσικό επίπεδο. Ωστόσο, η μελλοντική έρευνα μπορεί να επεκτείνει την τεχνική DUDe για να ενσωματώσει στρατηγικές κατανομής πόρων πολλαπλών επιπέδων. Λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις υψηλότερου επιπέδου, όπως απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS), μοτίβα κυκλοφορίας και περιορισμούς για συγκεκριμένες εφαρμογές, οι ερευνητές μπορούν να αναπτύξουν αλγόριθμους κατανομής πόρων που βελτιστοποιούν την απόδοση σε πολλαπλά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων δικτύου. Αυτή η ολιστική προσέγγιση για την κατανομή πόρων διασφαλίζει ότι οι αποφάσεις κατανομής ευθυγραμμίζονται με τους συνολικούς στόχους και απαιτήσεις του συστήματος.

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της τεχνικής DUDe και των προτεινόμενων βελτιώσεων, η μελλοντική εργασία θα πρέπει να περιλαμβάνει εκτεταμένες μελέτες αξιολόγησης απόδοσης και προσομοίωσης. Οι ερευνητές μπορούν να πραγματοποιήσουν λεπτομερείς προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας ρεαλιστικά σενάρια δικτύου, ποικίλες παραμέτρους και δοκιμές μεγάλης κλίμακας για να αξιολογήσουν την απόδοση της τεχνικής DUDe υπό διαφορετικές συνθήκες. Επιπλέον, οι συγκρίσεις με τους υπάρχοντες

αλγόριθμους κατανομής πόρων μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τα δυνατά σημεία και τους περιορισμούς της τεχνικής DUDe και τις δυνατότητές της για ανάπτυξη σε πραγματικό κόσμο. Η αξιολόγηση της απόδοσης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη μετρήσεις όπως η απόδοση, η καθυστέρηση, η δικαιοσύνη, η αποδοτικότητα του φάσματος, η κατανάλωση ενέργειας και η επεκτασιμότητα για να διασφαλιστεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των χαρακτηριστικών απόδοσης της τεχνικής DUDe.

Αυτές οι ερευνητικές κατευθύνσεις στοχεύουν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες στην κατανομή πόρων 5G και να συμβάλουν στην πρόοδο των ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς. Η εξερεύνηση αυτών των οδών θα ανοίξει το δρόμο για πιο αποτελεσματικούς, έξυπνους και βιώσιμους μηχανισμούς κατανομής πόρων στα μελλοντικά δίκτυα 5G.

Βιβλιογραφία- Αναφορές

- [1]. "Η ιστορία της κινητής τηλεφωνίας", Σαν σήμερα,[Online]. Available: "<https://www.sansimera.gr/articles/241>"
- [2]. J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo and G. Seco-Granados, "Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 2, pp. 1124-1148, Secondquarter 2018
- [3]. Q. K. Ud Din Arshad, A. U. Kashif and I. M. Quershi, "A Review on the Evolution of Cellular Technologies," 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 989-993,
- [4]. Sood, Roopali, and Atul Garg. "Digital society from 1G to 5G: a comparative study." International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM) 3.2 (2014): 186-193.
- [5]. M.Gawas. "An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1G-6G." International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication 3.5 (2015): 3130-3133.
- [6]. Balapuwaduge, A.Indika, and Y.Frank. "Cellular networks: an evolution from 1g to 4g." Centre for Integrated Emergency Management (2018).
- [7]. S.Pankaj, "Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network." International Journal of Computer Science and Mobile Computing 2.8 (2013): 47-53.
- [8]. T.Santosh ,Sachine D. Panchal, and D. T. Kushnure. "Evolutionary steps from 1G to 4.5 G." International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering 3.4 (2014): 6163-6166.
- [9]. "Signal-to-noise-Ratio,"Wikipedia,7-May-2023[Online].Available:«
https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio ».
- [10]. Nee, Richard van, and Ramjee Prasad. "OFDM for wireless multimedia communications". Artech House, Inc., 2000
- [11]. Hanzo, Lajos, Choon Hin Wong, and Mong-Suan Yee. "Adaptive wireless transceivers: turbo-coded, turbo-equalised and space-time coded TDMA, CDMA and OFDM systems". John Wiley & Sons, 2002
- [12]. S. Gautam, E. Lagunas, S. Chatzinotas and B. Ottersten, "Relay Selection and Resource Allocation for SWIPT in Multi-User OFDMA Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 5, pp. 2493-2508, May 2019
- [13]. F. S. Samidi, N. A. M. Radzi, W. S. H. M. W. Ahmad, F. Abdullah, M. Z. Jamaludin and A. Ismail, "5G New Radio: Dynamic Time Division Duplex Radio Resource Management Approaches," in IEEE Access, vol. 9, pp. 113850-113865, 2021

- [14]. Zhang, Junwei, et al. "Receive-diversity-aided power-fading compensation for C-band IM/DD OFDM systems." *Optics Letters* 48.9 (2023): 2237-2240.
- [15]. 3GPP, TR 36.842 V12.0.0 "Study on Small Cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN; Higher layer aspects" (Release 12), Dec. 2013-12
- [16]. S. Chitra, S. Ramesh, B.Jackson and, S. Mohanraj, "Performance enhancement of generalized frequency division multiplexing with RF impairments compensation for efficient 5G wireless access " in ScienceDirect, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2020 Vol 127
- [17]. S.Ruiza,et al, "5G and beyond networks " in ScienceDirect, *Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond*, 2021, pp. 141-186
- [18]. H.Elshaer, F.Boccardi, M.Dohler, and R.Irmer "Downlink and Uplink Decoupling: A disruptive architectural design for 5G networks", 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, USA, 2014, pp. 1798-1803
- [19]. A. I. Aravanis, O.Muoz, A. Pascual-Iserte and J. Vidal, "Analysis of downlink and uplink decoupling in dense cellular networks", 2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Toronto, ON, Canada, 2016, pp. 219-224.
- [20]. K. Swetha and B. N. Subrahmanyam, "Interference management and resource allocation for communications underlying downlink/uplink decoupling (DUDe) heterogeneous networks," 2017 International Conference on Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies (IMPACT), Aligarh, India, 2017, pp. 60-64
- [21]. Y.Hu, R.MacKenzie and M. Hao, "Expected Q-learning for Self-Organizing Resource Allocation in LTE-U with Downlink-Uplink Decoupling," *European Wireless 2017; 23th European Wireless Conference*, Dresden, Germany, 2017, pp. 1-6.
- [22]. T. Uekumasu, M. Kobayashi, S. Saruwatari and T. Watanabe, "An access strategy for downlink and uplink decoupling in multi-channel wireless networks," 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Montreal, QC, Canada, 2017, pp. 1-6
- [23]. H. Z. Khan et al., "Resource Allocation and Throughput Maximization in Decoupled 5G", 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Seoul, Korea (South), 2020, pp.1-6
- [24]. A Khan, et al. "Secure resource management in beyond 5G heterogeneous networks with decoupled access." *Ad Hoc Networks* 125 (2022): 102737.
- [25]. Ali, Sundus, et al. "Uplink Performance of Narrowband Internet-of-Things Devices in Downlink-Uplink Decoupled-Based Heterogeneous Networks", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering* (2022): 1-15.
- [26]. H. Z. Khan, M. Ali, I. Rashid, A. Ghafoor and M. Naeem, "Cell Association for Energy Efficient Resource Allocation in Decoupled 5G Heterogeneous Networks", 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-5

- [27]. Y. Ramamoorthi and A. Kumar, "Dynamic Time Division Duplexing for Downlink/Uplink Decoupled Millimeter Wave-Based Cellular Networks", in IEEE Communications Letters, Vol. 23, no. 8, pp. 1441-1445, Aug. 2019
- [28]. Y. Shi, Emad Alsusa and Mohammed W. Baidas "On the application of uplink/downlink decoupled access in heterogeneous mobile edge computing", in ScienceDirect, Computer Networks, Volume 223, March 2023, 109593
- [29]. C. Bouras, G. Dileas, R. Kalogeropoulos, "An Energy Efficient Mechanism for Downlink and Uplink Decoupling in 5G Networks", In: Barolli, L., Hellinckx, P., Enokido, T. (eds) Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications. BWCCA 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 97. Springer, Cham.
- [30]. T. Liu, H. Zhou, J. Li, F. Shu and Z. Han, "Uplink and Downlink Decoupled 5G/B5G Vehicular Networks: A Federated Learning Assisted Client Selection Method," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 2, pp. 2280-2292, Feb. 2023
- [31]. M. Kobayashi, T. Uekumasu, S. Saruwatari and T. Watanabe, "Dynamic Channel Assignment for Downlink and Uplink Decoupling in Wireless Networks," in IEEE Access, vol. 11, pp. 38631-38642, 2023
- [32]. Y. Shi, E. Alsusa and M. W. Baidas, "Downlink-Uplink Decoupled Access in Heterogeneous Cellular Networks with UAVs," 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, London, UK, 2020, pp. 1-6
- [33]. 3GPP, TR 38.901 Section 7.4.1 "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz." (Release 17), March 2022-31
- [34]. Shannon–Hartley theorem," Wikipedia, 29-Mar-2023. [Online]. Available: "https://en.wikipedia.org/wiki/Shannon%E2%80%93Hartley_theorem". [Accessed: 28-Apr-2023]

Παράρτημα Α: <Μέρος κώδικα της διπλωματικής>

```
clc;
clear;
%Set parameters of network
bandwidth=20;
NOISE=-174+10*log10(bandwidth*1000000);

N=100;%number of users
snap=1000;%number of snapshots

% Define the set of fixed bandwidth values
fixed_values = [16000000, 5000000, 25000000, 2000000, 1000000];

% Initialize an array to store the bandwidth values for each user and snapshot
bandwidth_values = zeros(snap,N);

% Loop through each snapshot
for i = 1:snap
    % Generate random indices from the set of fixed values
    random_indices = randi(length(fixed_values), [1, N]);

    % Select the corresponding bandwidth values for each user
    bandwidth_values(i,:) = fixed_values(random_indices);
end

hbsm=30;%height for Macro Cell
hbsm1=10;%height for Micro Cell
hbsm2=5;%height for Pico Cell

ptmall=45;% transmit power of macro cell in dBm (for all the BW)
ptpall=33;% transmit power of micro cell in dBm (for all the BW)
ftpall=24;% transmit power of pico cell in dBm (for all the BW)
```

```
Gm=21; %macro base station antenna gain in dBi
Gp=5; %pico base station antenna gain in dBi
Gmic=10; %Micro base station antenna gain in dBi
Gue=0; %user equipment antenna gain in dBi
ptue=20;% transmit power of user equipment in dBm (for all the BW)

ptm=ptmall-10*log10(N);% transmit power from macro cell per user in dBm
ptp=ptpall-10*log10(N);% transmit power from Micor cell per user in dBm
ftp=ftpall-10*log10(N);% transmit power from pico cell per user in dBm
for i=1:snap

nue = N;
ue = zeros(3,nue);
ue(1:2,:) = 2e3*(rand(2,nue)-0.5);
ue(3,:) = 1 + rand(1,nue);

%scenario Macro cell for 80 UE
pathlossconf = nrPathLossConfig;
pathlossconf.Scenario = "UMa";
pathlossconf.BuildingHeight = hbsm;
pathlossconf.StreetWidth = 7;
freq = 3.5e9;
bs = [500 -500; 0 0 ; 50 50];
nbs = size(bs,2);
los = randi([0 1],nbs,nue);
pathloss1 = nrPathLoss(pathlossconf,freq,los,bs,ue);
pathlossM=[pathlossM;pathloss1];
matrixtest1 = min(pathloss1);
PLm=[PLm;matrixtest1];
[M,I]= min(pathloss1);
MINPATHLOSSM = [M;I];
LASTMINPATHLOSSM = [LASTMINPATHLOSSM;MINPATHLOSSM];
%end of scenario

%scenario Pico cell for 80 UE
pathlossconf = nrPathLossConfig;
pathlossconf.Scenario = "UMi";
pathlossconf.BuildingHeight = hbsm1;
pathlossconf.StreetWidth = 7;
freq = 3.5e9;
bs = [1000 1000 -1000 -1000; 500 -500 500 -500; 20 20 20 20];
nbs = size(bs,2);
los = randi([0 1],nbs,nue);
```

```
pathloss2= nrPathLoss(pathlossconf,freq,los,bs,ue);
pathlossP=[pathlossP;pathloss2];
matrixtest2 = min(pathloss2);
PLp = [PLp;matrixtest2];
[M,I]= min(pathloss2);
MINPATHLOSSP = [M;I];
LASTMINPATHLOSSP = [LASTMINPATHLOSSP;MINPATHLOSSP];
%end of scenario

%scenario femto cell for 80 UE
ppathlossconf = nrPathLossConfig;
pathlossconf.Scenario = "UMi";
pathlossconf.BuildingHeight = hbsm2;
pathlossconf.StreetWidth = 7;
freq = 3.5e9;
bs = [1000 -1000 500 500 -500 -500 0 0; 0 0 500 -500 500 -500 500 -500; 5 5 5 5 5 5 5 5];
nbs = size(bs,2);
los = randi([0 1],nbs,nue);
pathloss3= nrPathLoss(pathlossconf,freq,los,bs,ue);
pathlossF=[pathlossF;pathloss3];
matrixtest3 = min(pathloss3);
PLf = [PLf;matrixtest3];
[M,I]= min(pathloss3);
MINPATHLOSSF = [M;I];
LASTMINPATHLOSSF = [LASTMINPATHLOSSF;MINPATHLOSSF];
%end of scenario
end

%uplink
for b = 1:snap*2
    for p = 1:N
        prm1(b,p)=ptue+Gm+Gue-pathlossM(b,p); % received power from macro cell for transmit power
        SNRmU1(b,p)=prm1(b,p)-NOISE;
    end
end

for c = 1:snap*4
    for a = 1:N
        prp1(c,a)=ptue+Gmic+Gue-pathlossP(c,a); %power received from Micro for transmit power
        SNRpU1(c,a)=prp1(c,a)-NOISE;
    end
end
```

```
for h = 1:snap*8
    for k = 1:N
        prf1(h,k)=ptue+Gp+Gue-pathlossF(h,k); %power received from Pico for transmit power
        SNRfU1(h,k)=prf1(h,k)-NOISE;
    end
end
```

```
%uplink
for i=1:snap
    for j=1:N
        prm(i,j)=ptue+Gm+Gue-PLm(i,j); % received power from macro cell for transmit power
        SNRmU(i,j)=prm(i,j)-NOISE;
```

```
prp(i,j)=ptue+Gmic+Gue-PLp(i,j); %power received from Micro for transmit power
        SNRpU(i,j)=prp(i,j)-NOISE;
```

```
prf(i,j)=ptue+Gp+Gue-PLf(i,j); %power received from Pico for transmit power
        SNRfU(i,j)=prf(i,j)-NOISE;
    end
end
```

```
Bandwidth_for_Macro = [];
```

```
Bandwidth_for_Macro1 = [];
```

```
SNRuemD1 = 10.^(SNRuemD/10);
```

```
for i=1:snap
    for j=1:N
```

```
        Bandwidth_for_Macro(i,j) = bandwidth_values(i,j)/log2(1+SNRuemD1(i,j));
```

```
    end
end
```

```
for i=1:snap
    for j=1:N
```

```
        Bandwidth_for_Macro1(i,j) = round(Bandwidth_for_Macro(i,j),3,"significant");
```

```
    end
```

end

CounterResourceUEC1=0;
CounterResourceUEC2=0;

CounterResourceUEPC1=0;
CounterResourceUEPC2=0;
CounterResourceUEPC3=0;
CounterResourceUEPC4=0;

CounterResourceUEFC1=0;
CounterResourceUEFC2=0;
CounterResourceUEFC3=0;
CounterResourceUEFC4=0;
CounterResourceUEFC5=0;
CounterResourceUEFC6=0;
CounterResourceUEFC7=0;
CounterResourceUEFC8=0;
a=2;

ResourceallocationC = snap:14;

bandwidth_M1 = [];
bandwidth_M2 = [];

bandwidth_MIC1 = [];
bandwidth_MIC2 = [];
bandwidth_MIC3 = [];
bandwidth_MIC4 = [];

bandwidth_P1 = [];
bandwidth_P2 = [];
bandwidth_P3 = [];
bandwidth_P4 = [];
bandwidth_P5 = [];
bandwidth_P6 = [];
bandwidth_P7 = [];
bandwidth_P8 = [];

bandwidth_Macro_CM1 = [];

```
bandwidth_Macro_CM2 = [];  
  
counter = 400000000;  
counter1 = 400000000;  
  
%coupled σενάριο  
for i=1:snap  
for j=1:N  
  
if SNRuemD(i,j)>=SNRuepD(i,j) && SNRuemD(i,j)>=SNRuefD(i,j)  
  
if LASTMINPATHLOSSM(a,j) == 1  
UserResourceM1=UserResourceM1-1;  
CounterResourceUEC1=CounterResourceUEC1+1;  
bandwidth_M1(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
counter = counter - Bandwidth_for_Macro1(i,j);  
else  
UserResourceM2=UserResourceM2-1;  
CounterResourceUEC2=CounterResourceUEC2+1;  
bandwidth_M2(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
counter1 = counter1 - Bandwidth_for_Macro1(i,j);  
end  
SNRcoupledU(i,j)=SNRmU(i,j);  
  
ResourceallocationD = snap:14;  
  
bandwidth_M1_1 = [];  
bandwidth_M2_2 = [];  
  
bandwidth_MIC1_1 = [];  
bandwidth_MIC2_2 = [];  
bandwidth_MIC3_3 = [];  
bandwidth_MIC4_4 = [];  
  
bandwidth_P1_1 = [];  
bandwidth_P2_2 = [];  
bandwidth_P3_3 = [];  
bandwidth_P4_4 = [];  
bandwidth_P5_5 = [];  
bandwidth_P6_6 = [];  
bandwidth_P7_7 = [];  
bandwidth_P8_8 = [];
```



```
bandwidth_Macro_DM1 = [];  
bandwidth_Macro_DM2 = [];  
  
counter = 400000000;  
counter1 = 400000000;  
  
%decoupled uplink σενάριο  
for i=1:snap  
for j=1:N  
if SNRmU(i,j)>=SNRpU(i,j) && SNRmU(i,j)>=SNRfU(i,j)  
  
if LASTMINPATHLOSSM(a,j) == 1  
UserResourceM1=UserResourceM1-1;  
CounterResourceUED1=CounterResourceUED1+1;  
bandwidth_M1_1(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
counter = counter - Bandwidth_for_Macro1(i,j);  
else  
UserResourceM2=UserResourceM2-1;  
CounterResourceUED2=CounterResourceUED2+1;  
bandwidth_M2_2(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
counter1 = counter1 - Bandwidth_for_Macro1(i,j);  
end  
SNRdecoupledU(i,j)=SNRmU(i,j);  
  
elseif SNRpU(i,j) >= SNRfU(i,j) && SNRpU(i,j) > SNRmU(i,j)  
  
if LASTMINPATHLOSSP(a,j) == 1  
UserResourceP=UserResourceP-1;  
CounterResourceUEPD1=CounterResourceUEPD1+1;  
bandwidth_MIC1_1(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
  
elseif LASTMINPATHLOSSP(a,j) == 2  
  
UserResourceP2=UserResourceP2-1;  
CounterResourceUEPD2=CounterResourceUEPD2+1;  
bandwidth_MIC2_2(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
  
elseif LASTMINPATHLOSSP(a,j) == 3  
  
UserResourceP3=UserResourceP3-1;  
CounterResourceUEPD3=CounterResourceUEPD3+1;  
bandwidth_MIC3_3(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSP(a,j) == 4
```

```
UserResourceP4=UserResourceP4-1;  
CounterResourceUEPD4=CounterResourceUEPD4+1;  
bandwidth_MIC4_4(i,j) = bandwidth_values (i,j);  
end
```

```
SNRdecoupledU(i,j)=SNRpU(i,j);
```

```
elseif SNRfU(i,j) > SNRpU(i,j) && SNRfU(i,j) > SNRmU(i,j)
```

```
if LASTMINPATHLOSSF(a,j)==1
```

```
UserResourceF1=UserResourceF1-1;  
CounterResourceUEFD1=CounterResourceUEFD1+1;  
bandwidth_P1_1(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)==2
```

```
UserResourceF2=UserResourceF2-1;  
CounterResourceUEFD2=CounterResourceUEFD2+1;  
bandwidth_P2_2(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)== 3
```

```
UserResourceF3=UserResourceF3-1;  
CounterResourceUEFD3=CounterResourceUEFD3+1;  
bandwidth_P3_3(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)== 4
```

```
UserResourceF4=UserResourceF4-1;  
CounterResourceUEFD4=CounterResourceUEFD4+1;  
bandwidth_P4_4(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)== 5
```

```
UserResourceF5=UserResourceF5-1;  
CounterResourceUEFD5=CounterResourceUEFD5+1;  
bandwidth_P5_5(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)== 6
```

```
UserResourceF6=UserResourceF6-1;  
CounterResourceUEFD6=CounterResourceUEFD6+1;  
bandwidth_P6_6(i,j) = bandwidth_values (i,j);
```

```
elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)== 7
```

```
UserResourceF7=UserResourceF7-1;
CounterResourceUEFD7=CounterResourceUEFD7+1;
bandwidth_P7_7(i,j) = bandwidth_values (i,j);

elseif LASTMINPATHLOSSF(a,j)== 8
    UserResourceF8=UserResourceF8-1;
    CounterResourceUEFD8=CounterResourceUEFD8+1;
    bandwidth_P8_8(i,j) = bandwidth_values (i,j);
end

SNRdecoupledU(i,j)=SNRfU(i,j);

end

ResourceallocationD(i,1) = CounterResourceUED1;
ResourceallocationD(i,2) = CounterResourceUED2;

ResourceallocationD(i,3) = CounterResourceUEPD1;
ResourceallocationD(i,4) = CounterResourceUEPD2;
ResourceallocationD(i,5) = CounterResourceUEPD3;
ResourceallocationD(i,6) = CounterResourceUEPD4;

ResourceallocationD(i,7) = CounterResourceUEFD1;
ResourceallocationD(i,8) = CounterResourceUEFD2;
ResourceallocationD(i,9) = CounterResourceUEFD3;
ResourceallocationD(i,10) = CounterResourceUEFD4;
ResourceallocationD(i,11) = CounterResourceUEFD5;
ResourceallocationD(i,12) = CounterResourceUEFD6;
ResourceallocationD(i,13) = CounterResourceUEFD7;
ResourceallocationD(i,14) = CounterResourceUEFD8;
end
a=a+2;
CounterResourceUED1=0;
CounterResourceUED2=0;

CounterResourceUEPD1=0;
CounterResourceUEPD2=0;
CounterResourceUEPD3=0;
CounterResourceUEPD4=0;

CounterResourceUEFD1=0;
CounterResourceUEFD2=0;
CounterResourceUEFD3=0;
```

```
CounterResourceUEFD4=0;  
CounterResourceUEFD5=0;  
CounterResourceUEFD6=0;  
CounterResourceUEFD7=0;  
CounterResourceUEFD8=0;
```

```
bandwidth_Macro_DM1(i)= counter;  
bandwidth_Macro_DM2(i)= counter1;
```

```
counter = 400000000;  
counter1 = 400000000;  
end
```

```
for i = 1:snap  
bandwidth_Macro_DM1(i) = counter - bandwidth_Macro_DM1(i) ;  
bandwidth_Macro_DM2(i) = counter1 - bandwidth_Macro_DM2(i);  
end
```

```
%plot best mean between Coupled-Decoupled for UE  
for i=1:snap  
ResourceallocationC1(i)=mean(sort(ResourceallocationC(i)));  
ResourceallocationD1(i)=mean(sort(ResourceallocationD(i)));  
end  
figure(11)  
cdfplot(ResourceallocationC1)  
hold  
cdfplot(ResourceallocationD1)  
xlabel('NumberOfUsers','FontWeight','bold')  
ylabel('possibility for DUDe and DUDc','FontWeight','bold')  
legend('DUCo','DUDe')  
title('best distribution between DUDe-DUDc for N UEs')
```

```
figure(15)  
x = [ 500 -500 1000 1000 -1000 -1000 1000 -1000 500 500 -500 -500 0 0];  
y = [ 0 0 500 -500 500 -500 0 0 500 -500 500 -500 500 -500 ] ;  
plot(x,y,'o');  
axis([-1000 1000 -500 500]);
```

```
%plot για μέση τιμή SNR
```

```
for i=1:snap  
SNRcoupledUmean(i)=mean(sort(SNRcoupledU(i,:),2));  
SNRdecoupledUmean(i)=mean(sort(SNRdecoupledU(i,:),2));
```

Σύντομο Βιογραφικό Συγγραφέα



Γεννήθηκα στην «Κάτω Πτέρη», ένα μικρό χωριό κοντά στην Πάτρα, το 1993. Απέκτησα το δίπλωμα μου από το τμήμα εφαρμοσμένης πληροφορικής και πολυμέσων στο ΑΤΕΙ Ηρακλείου Κρήτης το 2017. Αργότερα έγινα δεκτός στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Υπολογιστική δεδομένων και Αποφάσεων» στο Πανεπιστήμιο Πατρών και τον Ιούνιο του 2022 απέκτησε το Μεταπτυχιακό μου Δίπλωμα. Είμαι μέλος του Εργαστηρίου Κατανεμημένων Συστημάτων και Τηλεματικής του Τμήματος Μηχανικών Υπολογιστών και Πληροφορικής από το 2022. Τα ερευνητικά μου ενδιαφέροντα περιλαμβάνουν δίκτυα δεδομένων, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5ης γενιάς με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση και την τεχνητή νοημοσύνη, και Κυβερνοασφάλεια.