

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη και αξιολόγηση των παραγόντων  
που επηρεάζουν τις παρεμβολές στα 5G δίκτυα**

**Συγγραφέας**

Γεώργιος Τζιουμάνης  
ΑΜ: 4823

**Υπεύθυνος καθηγητής**

Καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας

**Επιβλέπων**

Βασίλειος Κόκκινος

Πάτρα, Μάιος 2021

© Copyright συγγραφέας Γεώργιος Τζιουμάνης, 2021

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας, Βασίλειος Κόκκινος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Ι. Μπούρα για την συνεχή καθοδήγηση, ενθάρρυνση και βοήθεια στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας καθώς επίσης και για την πλήρη κατανόηση των προσωπικών ζητημάτων που προέκυψαν κατά την διάρκεια συγγραφής της. Οι γνώσεις του αποτέλεσαν το πλέον καθοριστικό εφόδιο για μένα σε όλη την διάρκεια φοίτησής μου στο τμήμα των Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής.

Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Βασίλειο Κόκκινο όπου με τις συμβουλές, τις υποδείξεις και την πολυετή εμπειρία του με βοήθησε σημαντικά στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την στήριξή του σε όσα ζητήματα προέκυψαν κατά την διάρκεια της συγγραφής της.

Πέρα και πάνω από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή και ανιδιοτελή ψυχολογική και οικονομική στήριξη όλα αυτά τα χρόνια. Αναμφίβολα, αν δεν τους είχα στο πλευρό μου σε αυτή μου την προσπάθεια, δεν θα είχα φτάσει με επιτυχία στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

## Περίληψη

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (Fifth Generation, 5G) αποτελούν το όραμα που γίνεται πράξη με κύριο σκοπό την κάλυψη των αναγκών των χρηστών και των διάφορων εφαρμογών που προκύπτουν. Αυτό μπορούν να το πετύχουν με την θέσπιση και την εφαρμογή ενός συνόλου νέων τεχνολογιών και παροχών, από τις οποίες οι πιο βασικές αναφέρονται στην παροχή πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, στην εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, στην μεγαλύτερη κάλυψη και αξιοπιστία στο δίκτυο και στην μαζικότερη και πιο αποτελεσματική συνδεσιμότητα συσκευών, τεχνολογίες οι οποίες αποτελούν σημαντική βελτίωση στην ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται στους χρήστες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες που παρέχουν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (Forth Generation, 4G LTE).

Για να πραγματοποιηθούν όμως οι συγκεκριμένες βελτιώσεις στις τεχνολογίες που θα μας προσφέρουν τα 5G δίκτυα προκύπτουν ορισμένα ζητήματα όσον αφορά την μεγαλύτερη πύκνωση του δικτύου και την αύξηση του επιπέδου ετερογένειάς του, με κύριο γνώμονα την επαρκή κάλυψη του μεγαλύτερου εύρους των απαιτήσεων που δημιουργούνται. Τα ετερογενή δίκτυα (Heterogenous Networks, HetNets) πολλαπλών επιπέδων αποτελούν την απάντηση στα παραπάνω ζητήματα και η ανάπτυξή τους αποτελεί σημαντικό στοιχείο της υποδομής των 5G δικτύων.

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στα ετερογενή δίκτυα (Heterogenous Networks, HetNets) αποτελεί η σωστή διαχείριση των παρεμβολών τόσο μεταξύ των κυψελών όσο και μεταξύ των διάφορων επιπέδων, είτε αυτές αναφέρονται ως παρεμβολές στο εσωτερικό των κυψελών είτε μεταξύ των διαφορετικών κυψελών. Παράλληλα, η κάλυψη και η ανισορροπία της κίνησης λόγω των διαφορετικών σταθμών βάσης καθιστούν τα προβλήματα διαχείρισης των παρεμβολών και της κατανομής πόρων ακόμα πιο απαιτητικά. Η εισαγωγή τεχνολογιών όπως η συνάθροιση των φορέων, η συνεργασία μεταξύ των σταθμών βάσης (π.χ CoMP) και η δυνατότητα P2P επικοινωνίας περιπλέκουν ακόμα περισσότερο τη δυναμική των παρεμβολών.

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθούν και να αξιολογηθούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν τις παρεμβολές (interferences) στα 5G δίκτυα και να παρουσιάσει / αξιολογήσει τους τρόπους που έχουν προταθεί για την μετριάσή τους.

## ABSTRACT

The fifth generation networks (Fifth Generation, 5G) are the vision that is put into practice with the main purpose of meeting the needs of users and the various applications that arise. They can achieve this by introducing and implementing a set of new technologies and services, the most basic of which are high speed data transmission, extremely low latency, greater network coverage and reliability, and more massive and more effective device connectivity, technologies that are a significant improvement in the quality of services provided to users compared to those provided by fourth generation networks (Forth Generation, 4G LTE).

However, in order to make the concrete improvements in the technologies that 5G networks will offer us, some issues arise regarding the greater density of the network and the increase of its level of heterogeneity, with the main aim of sufficient coverage of the wider range of requirements that are created. Heterogeneous Networks (Heterogenous Networks, HetNets) are the answer to the above questions and their development is an important element of the infrastructure of 5G networks.

One of the biggest challenges in heterogeneous networks (HetNets) is the proper management of interference both between cells and between different levels, whether they are referred to as interference within cells or between different cells. At the same time, traffic congestion and imbalances due to different base stations make interference and resource allocation problems even more demanding. The introduction of technologies such as operator aggregation, base station collaboration (eg CoMP) and P2P communication capability further complicates the dynamics of interference.

The aim of this dissertation is to study and evaluate all the factors that affect interferences in 5G networks and to present / evaluate the ways that have been proposed for their mitigation.

# Περιεχόμενα

<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	10
<b>ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ</b> .....	11
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Δίκτυα 5ης γενιάς (5G)</b> .....	18
<b>1.1</b> Ιστορική αναδρομή.....	18
<b>1.2</b> Δίκτυα 1ης γενιάς (1G).....	19
<b>1.3</b> Δίκτυα 2ης γενιάς (2G).....	19
<b>1.4</b> Δίκτυα 3ης γενιάς (3G).....	20
<b>1.5</b> Δίκτυα 4ης γενιάς (4G).....	20
<b>1.6</b> Δίκτυα 5ης γενιάς (5G).....	21
<b>1.6.1</b> Εισαγωγή στο 5G.....	21
<b>1.6.2</b> Τεχνολογίες στο 5G.....	24
<b>1.6.2.1</b> Νέες ραδιοσυχνότητες.....	24
<b>1.6.2.2</b> Υψηλής απόδοσης MIMO.....	25
<b>1.6.2.3</b> Διαμόρφωση δέσμης (BeamForming, BF).....	25
<b>1.6.2.4</b> D2D (Device-to-Device Communications).....	27
<b>1.6.2.5</b> Συνάθροιση φορέα (Carrier Aggregation, CA).....	29
<b>1.6.2.6</b> Μικρές κυψέλες (Small cells).....	30
<b>1.6.2.7</b> Ετερογενή δίκτυα πολύ υψηλής πυκνότητας (Ultra Dense-HetNets).....	31
<b>1.6.2.8</b> Συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi Point ή CoMP).....	32
<b>1.6.2.9</b> NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access).....	32
<b>1.6.2.10</b> Αμφίδρομη επικοινωνία (Full-Duplex Communication).....	33

1.6.2.11	Επικοινωνία με επίγνωση ενέργειας και συγκομιδή ενέργειας.....	34
1.6.2.12	Αρχιτεκτονικές με επίκεντρο τις συσκευές.....	35
1.6.2.13	Εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου (Network Function Virtualization ή NFV) και καθορισμένο δίκτυο από το λογισμικό (Software-Defined Networking ή SDN).....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.</b>	<b>Παρεμβολές .....</b>	<b>38</b>
2.1	Εισαγωγή.....	38
2.2	Παρεμβολή συν-καναλιού (Co-Channel Interference ή CCI).....	39
2.3	Παρεμβολή μεταξύ κυψελών (Inter-Cell Interference ή ICI).....	40
2.4	Παρεμβολή γειτονικού καναλιού (Adjacent Channel Interference ή ACI).....	41
2.5	Παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference ή MAI).....	42
2.6	Αναλογία του σήματος ως προς την παρεμβολή συν τον θόρυβο (Signal to Inteference plus Noise Ratio ή SINR).....	43
2.7	Παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (Inter-Symbol Inteference ή ISI).....	44
2.8	Παρεμβολή μεταξύ φορέων (Inter-Carrier Inteference ή ICI).....	44
2.9	Παρεμβολές πολλαπλών επιπέδων (Cross-Tier Inteference).....	45
2.10	Παρεμβολές στο ίδιο επίπεδο (Co-Tier Inteference).....	46
2.11	Παρεμβολές άλλων κυψελών (Other-Cell Inteference ή OCI).....	48
2.12	Αυτο-παρεμβολή (Self-Inteference, SI).....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.</b>	<b>Προκλήσεις και τρόποι διαχείρισης παρεμβολών στα 5G δίκτυα.....</b>	<b>51</b>
3.1	Εισαγωγή .....	51
3.2	Βασικές προκλήσεις στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G).....	51
3.3	Τεχνικές ακύρωσης αυτο-παρεμβολής (Self-Interference Cancellation ή SIC).....	54

3.3.1	Τεχνικές παθητικής ακύρωσης SI.....	55
3.3.2	Τεχνικές ενεργητικής ακύρωσης SI.....	56
3.3.2.1	Αναλογική ακύρωση (Analog Cancellation).....	56
3.3.2.2	Ψηφιακή ακύρωση (Digital Cancellation).....	58
3.4	Τρόποι διαχείρισης των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών (Inter-Cell Interference ή ICI).....	59
3.4.1	Ευθυγράμμιση παρεμβολών (Interference Alignment ή IA)...	63
3.4.2	Μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi-point transmission ή CoMP).....	64
3.4.3	Τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης (Beamforming).....	67
3.4.4	Συντονισμένος προγραμματισμός (Coordinated Scheduling ή CS).....	69
3.5	Τρόποι διαχείρισης των παρεμβολών στις D2D επικοινωνίες.....	71
3.6	Προτεινόμενες τεχνικές σύμφωνα με τα πρότυπα 3GPP.....	75
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.</b>	<b>Πειραματικό μέρος-Συνεισφορά του NOMA.....</b>	<b>78</b>
4.1	Εισαγωγή.....	78
4.2	Μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA).....	79
4.3	Σύγκριση σχημάτων OMA και NOMA.....	83
4.4	Συνεισφορά του σχήματος NOMA σε απλό δίκτυο MIMO.....	87
4.5	Σύγκριση σχημάτων NOMA.....	92
4.5.1	Κοινή πρόσβαση πολλαπλών χρηστών (Multi-User Shared Access ή MUSA).....	92
4.5.2	Πολλαπλή πρόσβαση αραιού κώδικα (Sparse Code Multiple Access ή SCMA).....	93
4.5.3	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης μοτίβου (Pattern-Division Multiple Access ή PDMA).....	94
4.5.4	Τεχνικές MPA, SIC και φίλτρου MMSE.....	96



4.5.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	98
4.5.6	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....</b>	<b>102</b>
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	102
5.2	Μελλοντική εργασία.....	103
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>106</b>
<b>ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΑΤΛΑΒ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ .....</b>		<b>113</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1 : Παρουσίαση της εξέλιξης του 5G από το 2015 μέχρι και σήμερα [15].
- Εικόνα 2 : Παρουσίαση του φάσματος καθώς και των FR1 και FR2 [16].
- Εικόνα 3: Παρουσίαση της διαμόρφωσης δέσμης (BF) [20].
- Εικόνα 4: Παρουσίαση της D2D τεχνολογίας που υποστηρίζεται σε ένα κυψελοειδές δίκτυο συμπεριλαμβανομένης και της κυψελοειδούς επικοινωνίας [21].
- Εικόνα 5: Παρουσίαση του Carrier Aggregation (CA) [23].
- Εικόνα 6: Παρουσίαση των μεγεθών των ακτίνων εφαρμογής των κελιών και άλλων χαρακτηριστικών των διαφορετικών σταθμών βάσης [15].
- Εικόνα 7: Παρουσίαση ενός δικτύου συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων (RF-EHN) [14].
- Εικόνα 8: Παρουσίαση παρεμβολών και επαναχρησιμοποίησης φάσματος εντός κυψελοειδών και D2D δικτύων που συγκλίνουν μεταξύ τους [41].
- Εικόνα 9: Παρουσίαση SI παρεμβολών με εφαρμογή της αμφίδρομης τεχνολογίας Full Duplex σε ένα σταθμό βάσης (BS) [31].
- Εικόνα 10: Τρόποι downlink μετάδοσης στα πλαίσια της τεχνικής CoMP [22].
- Εικόνα 11: Παρουσίαση του NOMA μέσω της πολυπλεξίας του τομέα ισχύος [65].
- Εικόνα 12: Σύγκριση απόδοσης OMA και NOMA για τρεις χρήστες.
- Εικόνα 13: Μοντέλο συστήματος MIMO(2x1)-NOMA. [πηγή:  
<https://www.mathworks.com/help/lte/ug/pdsch-throughput-for-non-codebook-based-mu-mimo-transmission-mode-9-tm9.html>]
- Εικόνα 14: Σύγκριση των ρυθμών αθροίσματος των MIMO-NOMA και MIMO-OMA.
- Εικόνα 15: Σύγκριση των ατομικών ρυθμών αθροίσματος των χρηστών.
- Εικόνα 16: Ανίχνευση μέσω φίλτρου MMSE [71].
- Εικόνα 17: Παρουσίαση γραφήματος παραγόντων του MPA [71].
- Εικόνα 18: Αποτέλεσμα του SER ως προς το SNR για την σύγκριση των τριών σχημάτων σε σενάριο υπο-φόρτωσης.
- Εικόνα 19: Αποτέλεσμα του SER ως προς το SNR για την σύγκριση των τριών σχημάτων σε σενάριο πλήρους-φόρτωσης.
- Εικόνα 20: Αποτέλεσμα του SER ως προς το SNR για την σύγκριση των τριών σχημάτων σε σενάριο υπερ-φόρτωσης.

## ΛΙΣΤΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>
<b>1G</b>	First Generation	<b>BF</b>	Beamforming
<b>2.5G</b>	2.5 Generation	<b>BQRD</b>	Block QR Decomposition
<b>2.75G</b>	2.75 Generation	<b>BS</b>	Base Station
<b>2G</b>	Second Generation	<b>CA</b>	Carrier Aggregation
<b>3D</b>	Three Dimensional	<b>CB</b>	Coordinated Beamforming
<b>3G</b>	Third Generation	<b>CCH</b>	Common Control Channel
<b>3GPP</b>	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project	<b>CCI</b>	Co-Channel Interference
<b>4G</b>	Forth Generation	<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>5G</b>	Fifth Generation	<b>CEE</b>	Channel Estimation Error
<b>ABS</b>	Almost Blank Subframe	<b>CIC</b>	Centralized Interference Coordination
<b>ACI</b>	Adjacent channel interference	<b>CMI</b>	Common-Mode interference
<b>ACPR</b>	Adjacent Channel Power Ratio	<b>CoMP</b>	Coordinated Multi Point
<b>ACS</b>	Adjacent Channel Sensitivity	<b>CRR</b>	Coordinated Radio Resource
<b>ADD</b>	Any-Division Duplexing	<b>CS</b>	Coordinated Scheduling
<b>AMPS</b>	Advanced Mobile Phone System	<b>CSI</b>	Channel State Information
<b>APs</b>	Access Points	<b>CUE</b>	Cellular Users' Equipment
<b>AS</b>	Antenna Separation	<b>CW-IC</b>	Code Word Level Interference Cancellation
<b>BER</b>	Bit Error Rate	<b>D2D</b>	Device-2-Device Communication

<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>
<b>DCC</b>	Dedicated Control Channel	<b>GCRS</b>	Graph-Coloring-based Resource Sharing
<b>DIC</b>	Decentralized Interference Coordination	<b>GPSR</b>	Greedy Parameter Stateless Routing Protocol
<b>DL</b>	Downlink	<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communications
<b>DMFR</b>	Dynamic Frequency Reuse	<b>HAP</b>	Hybrid Access Point
<b>DoF</b>	Degree-of-Freedom	<b>HD</b>	Half-Duplex
<b>DUE</b>	D2D User Equipment	<b>HetNets</b>	Heterogeneous Network
<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	<b>IA</b>	Interference Alignment
<b>EE</b>	Energy Efficiency	<b>IACS</b>	IA based CS
<b>eICIC</b>	Enhanced-ICIC	<b>IC</b>	Interference Cancellation
<b>EMI</b>	Electromagnetic Interference	<b>ICI</b>	Inter-Cell Interference
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute	<b>ICIC</b>	Inter-Cell Interference Coordination
<b>FBS</b>	Femto Base Station	<b>ICM</b>	Interference Covariance Matrix
<b>FD</b>	Full-Duplex	<b>ILA</b>	Interference Limited Area
<b>FDD</b>	Frequency-Division Duplexing	<b>IMT-Advanced</b>	International Mobile Telecommunications-Advanced
<b>FDM</b>	Full-Duplex Mode	<b>IMTS</b>	Improved Mobile Telephone Service
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access	<b>IoT</b>	Internet-of-Things
<b>FUEs</b>	Femtocell Users' Equipment	<b>IP</b>	Internet Protocol

<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>
<b>ISI</b>	Inter-Symbol Interference	<b>MMSE</b>	Minimum Mean Square Error
<b>ISP</b>	Internet Service Providers	<b>MMSE-IRC</b>	Minimum Mean Square Error – Interference Rejection Combining
<b>ISS</b>	Interference Sub-Space	<b>mmWave</b>	Millimeter Wave
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union	<b>MTS</b>	Mobile Telephone System
<b>KKT</b>	Karush–Kuhn–Tucker conditions	<b>MU-MIMO</b>	Multiple-User MIMO
<b>LAGPC</b>	Loading Aware Green Powers Control	<b>MUD</b>	Multi-User Detection
<b>LDS-CDMA</b>	Low-Density signature Sequence-CDMA	<b>MUSA</b>	Multi-User Shared Access
<b>LTE</b>	Long-Term Evolution	<b>NAICS</b>	Network Assisted Interference Cancellation and Suppression
<b>LTE-A</b>	LTE Advanced	<b>NFV</b>	Network Function Virtualization
<b>M-eNBs</b>	Macrocell-evolved Nodes B	<b>NLOS</b>	Non Line-Of-Sight
<b>MAI</b>	Multiple Access Interference	<b>NOMA</b>	Nonorthogonal Multiple Access
<b>MBS</b>	Macro-Base Station	<b>NR</b>	New Radio
<b>MD2D</b>	Multiuser D2D system	<b>OBSS</b>	Overlapping Basic Service Set
<b>MEC</b>	Mobile Edge Computing	<b>OCI</b>	Other-Cell Inteference
<b>MIC</b>	Multiple Interference Cancellation	<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output	<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
<b>MMS</b>	Multimedia Messaging Service	<b>OMA</b>	Orthogonal Multiple Access

<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>
<b>P2P</b>	Peer-To-Peer	<b>SIC</b>	Successive Interference Cancellation
<b>P-eNB</b>	Picocell-evolved Node B	<b>SIC</b>	Self-Inteference Cancellation
<b>PBSs</b>	Pico Base Stations	<b>SINR</b>	Signal to Inteference plus Noise Ratio
<b>PDCCHs</b>	Physical Downlink Control Channels	<b>SISO</b>	Single-Input Single-Output
<b>PDMA</b>	Pattern-Division Multiple Access	<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>PF</b>	Proportional Fairness	<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>PFRA</b>	Proportional Fair Resource Allocation	<b>STA</b>	Station
<b>PTT</b>	Push To Talk	<b>SVD</b>	Singular Value Decomposition
<b>QoS</b>	Quality of Service	<b>TAS</b>	Transmit Antenna Selection
<b>RAN</b>	Radio Access Network	<b>TD</b>	Time-Domain
<b>RE-ZFBF</b>	Recursive Estimation-centered Zero-Forcing BF	<b>TD-LTE</b>	Time Division LTE
<b>RF</b>	Radio Frequency	<b>TDD</b>	Time-Division Duplexing
<b>RF-EHN</b>	RF-powered Energy-Havesting Network	<b>TDMA</b>	Time-Division Multiple Access
<b>RRM</b>	Radio Resource Management	<b>TVC</b>	Time Varying Channels
<b>SCA</b>	Successive Convex Approximation	<b>UD-HetNets</b>	Ultra-Dense HetNets
<b>SCMA</b>	Sparse Code Multiple Access	<b>UE</b>	User Equipment
<b>SDN</b>	Software-Defined Networking	<b>UL</b>	Uplink
<b>SE</b>	Spectrum Efficiency	<b>USS</b>	Useful Sub-Space
<b>SI</b>	Self-Inteference	<b>W-MMSE</b>	Weighted-Minimum Mean Square Error

<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Συντόμευση</u>	<u>Επεξήγηση</u>
<b>W-MMSE</b>	Weighted-Minimum Mean Square Error	<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WiMAX</b>	<b>Worldwide Interoperability for Microwave Access</b>	<b>WMMSE</b>	Weighted Minimum Mean Square Error algorithm
<b>WiFi</b>	Wireless Fidelity	<b>ZF</b>	Zero-Forcing

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η νέα γενιά δικτύων 5G δεν αποτελεί μία σταδιακή πρόοδο των δικτύων τέταρτης γενιάς, 4G, αλλά ένα πολύ σημαντικό παράδειγμα αλλαγής με γνώμονα την επίτευξη πολύ υψηλών συχνοτήτων στον φορέα με τεράστιο εύρος ζώνης, ακραίες πυκνότητες που αφορούν τους σταθμούς βάσης και τις διάφορες συνδεδεμένες συσκευές και ένα τεράστιο πλήθος κεραιών. Σε αντίθεση με τους προκατόχους του, το δίκτυο 5G θα παρουσιάζει ενοποιητικό χαρακτήρα που αφορά την αποτελεσματική σύνδεση οποιασδήποτε νέας διεπαφής αέρα και φάσματος μαζί με LTE και WiFi με στόχο την παροχή καθολικής κάλυψης που χαρακτηρίζεται από υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και απρόσκοπτης εμπειρίας με υψηλής ποιότητας υπηρεσίες για τους χρήστες [1].

Τα 5G δίκτυα θα έχουν την δυνατότητα παροχής καινοτόμων αρχιτεκτονικών και τεχνολογιών για την επίτευξη των προαναφερθέντων απαιτήσεων. Σημαντική επίδραση στην υλοποίηση των δικτύων αυτών θα παρουσιάζουν, εκτός του QoS, της μεταβίβασης, της προστασίας του απόρρητου, της πρόσβασης στο κανάλι επικοινωνίας, και οι παρεμβολές [2]. Λόγω αυτού κρίνεται αναγκαία η σωστή διαχείρισή τους με τους κατάλληλους τρόπους και τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί και προταθεί. Στην συγκεκριμένη εργασία θα παρουσιαστούν τόσο τα διάφορα είδη παρεμβολών και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους αλλά και οι τρόποι που έχουν προταθεί για την αποδοτική αντιμετώπισή τους.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την ιστορική αναδρομή από την πρώτη γενιά ασύρματης κυψελοειδούς τεχνολογίας 1G μέχρι και τα σημερινά προηγμένα κυψελοειδή δίκτυα πέμπτης γενιάς. Αναφέρονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία για την κάθε γενιά και στην συνέχεια του συγκεκριμένου κεφαλαίου διατυπώνεται μία πιο λεπτομερής παρουσίαση των 5G δικτύων αλλά κυρίως των νέων τεχνολογιών που παρουσιάζονται στα πλαίσια της νέας αυτής γενιάς ασύρματων κυψελοειδών δικτύων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διάφορα είδη παρεμβολών που αναπτύσσονται τόσο εντός των διάφορων κυψελών όσο και μεταξύ αυτών των κυψελών και μεταξύ των διάφορων επιπέδων από τα οποία αποτελούνται τα δίκτυα 5G. Είναι σημαντικό να υπάρχει ο σωστός διαχωρισμός των παρεμβολών ανάλογα με τον χώρο στον οποίο αναπτύσσονται με στόχο την σωστή αντιμετώπισή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των παρεμβολών στα δίκτυα 5G και αναφέρονται κυρίως στις D2D και CoMP τεχνολογίες, στην ανάπτυξη των ετερογενών δικτύων (HetNets), στο συντονισμένο προγραμματισμό και στις παρεμβολές που παρατηρούνται μεταξύ των κυψελών. Επίσης, αναφέρονται διάφοροι τρόποι για την σωστή διαχείριση, μετρίαση και ακύρωση των διάφορων ειδών παρεμβολών καθώς επίσης και ο βαθμός αποτελεσματικότητάς τους.



Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την συμβολή του σχήματος NOMA στην βελτίωση της απόδοσης των 5G δικτύων. Αναφερόμαστε στην τεχνική της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών που εφαρμόζεται στα πλαίσια ορισμένων σχημάτων NOMA, συγκρίνουμε τα σχήματα NOMA και OMA όσον αφορά την χωρητικότητα που προσφέρουν στους χρήστες, καθώς επίσης και όσον αφορά την συμβολή του σχήματος NOMA στην MIMO τεχνολογία, που αποτελεί βασικό και αναπόσπαστο χαρακτηριστικό στοιχείο της δομής των 5G δικτύων. Τέλος, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σχημάτων SCMA, PDMA και MUSA σε τρία διαφορετικά σενάρια αναλογίας διαθέσιμων πόρων και χρηστών και τα συγκρίνουμε σχετικά με την συνεισφορά του κάθε σχήματος στην βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη των προσομοιώσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στις ενότητες του συγκεκριμένου κεφαλαίου αναφέρονται στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο κάνουμε μία συνοπτική αναφορά στα ζητήματα με τα οποία ασχοληθήκαμε, αναλύσαμε και παρουσιάσαμε στο σύνολο αυτής της διπλωματικής εργασίας, αναφέρουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση του συνόλου των προσομοιώσεων του τέταρτου κεφαλαίου και την μελέτη των αποτελεσμάτων τους και τέλος διατυπώνουμε ορισμένες κατευθύνσεις για την μελλοντική βελτίωση των μεθοδολογιών που συγκρίναμε με γνώμονα την αποδοτική διαχείριση των παρεμβολών και την τελική αύξηση της απόδοσης του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Δίκτυα 5ης γενιάς (5G)

### 1.1 Ιστορική αναδρομή

Η Νότια Κορέα την 1η Δεκεμβρίου του 2018 έγινε η πρώτη χώρα που προσέφερε ένα πρότυπο δικτύου κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς 5G και λόγω αυτού είναι άξιο αναφοράς το γεγονός των εκπληκτικών προόδων που έχουν σημειωθεί στον τομέα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών από την πρώτη τηλεφωνική κλήση που πραγματοποιήθηκε το 1973. Το 2020 αποτέλεσε την χρονιά-στόχο για την εφαρμογή του 5G από τις περισσότερες χώρες παγκοσμίως βοηθώντας στην προώθηση του Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet-of-Thing ή IoT) και των μεγάλων δεδομένων [3].

Η κινητή ασύρματη γενιά (G) αναφέρεται γενικότερα σε μία αλλαγή στην φύση του συστήματος, τις ταχύτητες, τις διάφορες νέες τεχνολογίες, την συχνότητα, την χωρητικότητα δεδομένων, την καθυστέρηση μετάδοσης τους. Η κάθε γενιά χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα πρότυπα που αναφέρονται σε διαφορετικές τεχνικές και τεχνολογίες, διαφορετικές χωρητικότητες, ταχύτητες που την διαφοροποιούν από τις προηγούμενες γενιές. Το δίκτυο ασύρματης επικοινωνίας πρώτης γενιάς (1G) ήταν αναλογικό και η χρήση του αφορούσε μόνο φωνητικές κλήσεις, ο οποίος χαρακτηρίζονταν από χαμηλή ποιότητα ήχου και κακή κάλυψη δικτύου, αργότερα η δεύτερη γενιά (2G) ήταν μία ψηφιακή τεχνολογία που υποστήριζε μηνύματα κειμένου SMS, μηνύματα εικόνας και διάφορων πολυμέσων MMS.

Η τρίτη γενιά ασύρματης τεχνολογίας κινητών τηλεπικοινωνιών (3G) αποτελεί την αναβάθμιση των δικτύων 2.5G και 2.5G GPRS (Greedy Parameter Stateless Routing Protocol) και παρείχε υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη χωρητικότητα, ασύρματη φωνητική τηλεφωνία, πρόσβαση στο διαδίκτυο για κινητές συσκευές, βιντεοκλήσεις και κινητή τηλεόραση. Η τέταρτη γενιά (4G) ενσωματώνει το 3G με σταθερό ίντερνετ με σκοπό την υποστήριξη ασύρματου κινητού internet, την εξυπηρέτηση φωνητικών επικοινωνιών και συνεδρίων πολυμέσων μέσω δικτύων IP όπως το διαδίκτυο, υπηρεσίες παιχνιδιών, κινητή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, τηλεδιάσκεψη και 3D τηλεόραση με αντίληψη βάθους. Επίσης, αυξάνεται το εύρος ζώνης και μειώνεται το κόστος των διάφορων πόρων.

Το 5G αποτελεί το τεχνολογικό πρότυπο πέμπτης γενιάς για τα κινητά δίκτυα και αποτελεί τον διάδοχο των 4G δικτύων που παρέχουν συνδεσιμότητα στα περισσότερα τρέχοντα κινητά τηλέφωνα. Το κύριο πλεονέκτημα των νέων αυτών δικτύων αποτελεί το μεγαλύτερο εύρος ζώνης με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων λήψης. Λόγω αυτού του πλεονεκτήματος τα νέα αυτά δίκτυα αναμένεται να μην εξυπηρετούν μόνο κινητά τηλέφωνα αλλά η χρήση τους θα αφορά την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου για φορητούς και επιτραπέζιους υπολογιστές καθώς και νέων εφαρμογών στο διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things, IoT) [4], [5], [6].

## **1.2 Δίκτυα 1ης γενιάς (1G)**

Το 1G αναφέρεται στην πρώτη γενιά κυψελοειδών τεχνολογιών στις κινητές τηλεπικοινωνίες. Ήταν αναλογικά συστήματα που έκαναν την εμφάνισή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1980, χρησιμοποιούσαν αναλογικά ραδιοφωνικά κύματα και βασίστηκαν σε τεχνολογίες όπως το σύστημα κινητού τηλεφώνου (MTS), το προηγμένο σύστημα κινητού τηλεφώνου (Advanced Mobile Phone System ή AMPS), τη βελτιωμένη υπηρεσία κινητού τηλεφώνου (Improved Mobile Telephone Service ή IMTS) και το Push to Talk (PTT) [6]. Το AMPS ήταν ένα αναλογικό πρότυπο συστήματος κινητού τηλεφώνου που αναπτύχθηκε αρχικά από την Bell Labs και αργότερα τροποποιήθηκε σε μια προσπάθεια συνεργασίας μεταξύ της Bell Labs και της Motorola [7]. Τα μειονεκτήματα ήταν πολλά, όπως η μικρή χωρητικότητα, οι κακές φωνητικές συνδέσεις, το μεγάλο μέγεθος των τηλεφώνων, η μικρή διάρκεια ζωής της μπαταρίας και το πιο σημαντικό, καμία ασφάλεια στις φωνητικές κλήσεις καθώς αυτές αναπαράγονταν σε πύργους ραδιοφώνου καθιστώντας τες ευαίσθητες σε ανεπιθύμητες υποκλοπές από τρίτους [4], [5], [6], [8].

## **1.3 Δίκτυα 2ης γενιάς (2G)**

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2ης γενιάς (2G) κυκλοφόρησαν πρώτη φορά στη Φιλανδία τον Δεκέμβριο του 1991 στο πρότυπο GSM (Global System for Mobile Communications) το οποίο αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Προτύπων Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute ή ETSI) με στόχο να περιγράψει τα πρωτόκολλα για τα κυψελοειδή δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) [9]. Τα βασικότερα οφέλη έναντι του 1G ήταν οι ψηφιακά κρυπτογραφημένες συνομιλίες, τουλάχιστον μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και του κυψελοειδούς σταθμού βάσης, αλλά αυτό δεν σημαίνει πως θα είχε εφαρμογή και στο υπόλοιπο δίκτυο, πλέον με την αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων επιτρέπουν περισσότερους χρήστες ανά ζώνη συχνοτήτων και τέλος οι νέες τεχνολογίες των δικτύων 2G παρέχουν όχι μόνο την δυνατότητα μηνυμάτων κειμένου (SMS) αλλά και μηνυμάτων εικόνας και πολυμέσων (MMS).

Τα ραδιοσήματα στα δίκτυα 2G ήταν ψηφιακά σε σχέση με τα αντίστοιχα αναλογικά σήματα του 1G όμως και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ψηφιακή σηματοδότηση για να συνδέσουν τους ραδιοφωνικούς πύργους με το υπόλοιπο σύστημα κινητών. Το πρότυπο GSM αρχικά περιέγραψε ένα ψηφιακό κυκλικό δίκτυο το οποίο είχε βελτιστοποιηθεί για την επίτευξη της πλήρους αμφίδρομης φωνητικής τηλεφωνίας όμως αυτό επεκτάθηκε με την πάροδο του χρόνου για να συμπεριλάβει επικοινωνίες δεδομένων αρχικά με την μεταφορά κυκλώματος και έπειτα με την μεταφορά πακέτων δεδομένων μέσω της υπηρεσίας GPRS και της Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) στα δίκτυα 2.75G [5], [6], [8].

## **1.4 Δίκτυα 3ης γενιάς (3G)**

Τα ευρυζωνικά δίκτυα 3G βασίζονται στο GSM και κυκλοφόρησαν το 2001. Αποτελούν την αναβάθμιση των δικτύων 2.5G και 2.5G GPRS και στόχος της συγκεκριμένης τεχνολογίας ήταν να προσφέρει ταχύτερη μεταφορά δεδομένων. Η τεχνολογία βελτιώθηκε τόσο ώστε να επιτρέπει ρυθμό μεταφοράς πληροφοριών τουλάχιστον 144 Kbps, σε αντίθεση με τα δίκτυα 2G που οι μέγιστες ταχύτητες έφταναν μόλις τα 40-100 Kbps και μερικά χρόνια αργότερα λόγω των επεκτάσεων σε κάποια βασικά πρωτόκολλα, ο ρυθμός μετάδοσης πληροφοριών έφτασε την ταχύτητα των 10 Mbps [4], [5], [7].

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των 3G δικτύων είναι η αύξηση του εύρους ζώνης και του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων ώστε να φιλοξενήσουν διαδικτυακές εφαρμογές, ήχους και αρχεία βίντεο, η παροχή ταχύτερης επικοινωνίας, η αποστολή και λήψη μεγάλων μηνυμάτων email, οι υψηλές ταχύτητες στο διαδίκτυο, η αυξημένη ασφάλεια και οι μεγάλες ευρυζωνικές δυνατότητες [6].

## **1.5 Δίκτυα 4ης γενιάς (4G)**

Τα 4G δίκτυα αποτελούν την τέταρτη γενιά τεχνολογίας ευρυζωνικών κυψελοειδών δικτύων, διαδέχονται τα 3G δίκτυα, πρωτοεμφανίστηκαν το 2009 και κρίνεται αναγκαία η παροχή υπηρεσιών που ορίζονται από το ITU (International Telecommunication Union) στο IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced). Το ITU έχει λάβει πρωτοβουλίες για παραγωγή νέων τεχνολογιών με εφαρμογή στις παγκόσμιες επικοινωνίες του μέλλοντος, όμως στην πραγματικότητα βασίζονται στις ενέργειες που έχουν πραγματοποιηθεί από φορείς, όπως το WiMAX Forum, το 3GPP και το IEEE. Το 3GPP αποτελεί ένα σύνολο προτύπων τυποποίησης που αφορούν την ανάπτυξη πρωτοκόλλων για τις κινητές τηλεπικοινωνίες.

Χαρακτηριστικά της 4ης γενιάς (4G) είναι η ικανοποίηση των αναγκών του κάθε χρήστη με την εξατομίκευση δεδομένων και λοιπών υπηρεσιών που αφορούν τον ίδιο, με αυτό τον τρόπο γίνεται ακόμα πιο εύκολη η πρόσβαση των χρηστών σε διάφορες εφαρμογές που τους ενδιαφέρουν καθημερινά. Επίσης η απόδοση είναι ιδιαίτερα υψηλή παρέχοντας και τις αντίστοιχες υψηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας και λόγω της επεκτασιμότητας που παρουσιάζει η συγκεκριμένη γενιά δικτύων υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας αρκετών και ετερογενών συσκευών σε διάφορα δίκτυα.

Στα πλαίσια των δικτύων 4G οι ταχύτητες λήψης που αναπτύσσονται είναι της τάξης των 100 Mbps, βασίζεται στο 3G αλλά προφανώς εμπλουτίζεται με νέες υπηρεσίες, οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας από τις πιο παλιές γενιές. Το 4G θεωρείται ως προηγμένο LTE-A(LTE-Advanced), το οποίο αποτελεί μία βελτίωση στο δίκτυο LTE (Long-Term Evolution). Το LTE και LTE-Advanced χρησιμοποιούν επιπλέον φάσμα και πολυπλεξία με στόχο την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων στην μετάδοση δεδομένων, των οποίων η σωστή διαχείριση επιτυγχάνεται με την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος λόγω της συντονισμένης μετάδοσης πολλαπλών σημείων. Τα δίκτυα 4G έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την ικανοποίηση του QoS(Quality-of-Service), αλλά και των απαιτήσεων που θα προκύψουν από διάφορες άλλες εφαρμογές στο μέλλον, όπως η υπηρεσία πολυμέσων, η τηλεοπτική μετάδοση υψηλής ευκρίνειας, οι βιντεοσυνομιλίες, η ψηφιακή μετάδοση βίντεο και όσες άλλες απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης.

Άξιο αναφοράς αποτελεί και το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) το οποίο σχετίζεται με το 4G και μέσω αυτού επιτυγχάνεται υψηλή φασματική απόδοση. Σε συνδυασμό με το WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) η ροή δεδομένων φτάνει στο επίπεδο των 70 Mbps μέσω της τεχνολογίας της ασύρματης περιαγωγής ενώ ο ρυθμός λήψης δεδομένων μπορεί να φτάσει έως και 1 Gbps για τους χρήστες [8], [10], [11].

## **1.6 Δίκτυα 5ης γενιάς (5G)**

### **1.6.1 Εισαγωγή στο 5G**

Τα δίκτυα 5ης γενιάς (5G) όπως και οι προκάτοχοί τους είναι κυψελοειδούς μορφής, η ανάπτυξή τους από τις διάφορες εταιρίες κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησε το 2019 παγκοσμίως και η περιοχή εξυπηρέτησης των συγκεκριμένων δικτύων χωρίζεται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κυψέλες. Το σύνολο των ασύρματων συσκευών που υπάρχουν σε μία κυψέλη συνδέεται και επικοινωνεί στο διαδίκτυο και στο τηλεφωνικό δίκτυο μέσω ραδιοκυμάτων μέσω μίας τοπικής συστοιχίας κεραιών και με ένα αυτοματοποιημένο πομποδέκτη χαμηλής ισχύος στην ίδιο κυψέλη, ενώ οι τοπικές αυτές κεραιές συνδέονται μέσω οπτικής ίνας υψηλού εύρους ζώνης ή ασύρματης οπισθοζευκτικής σύνδεσης με το δίκτυο.

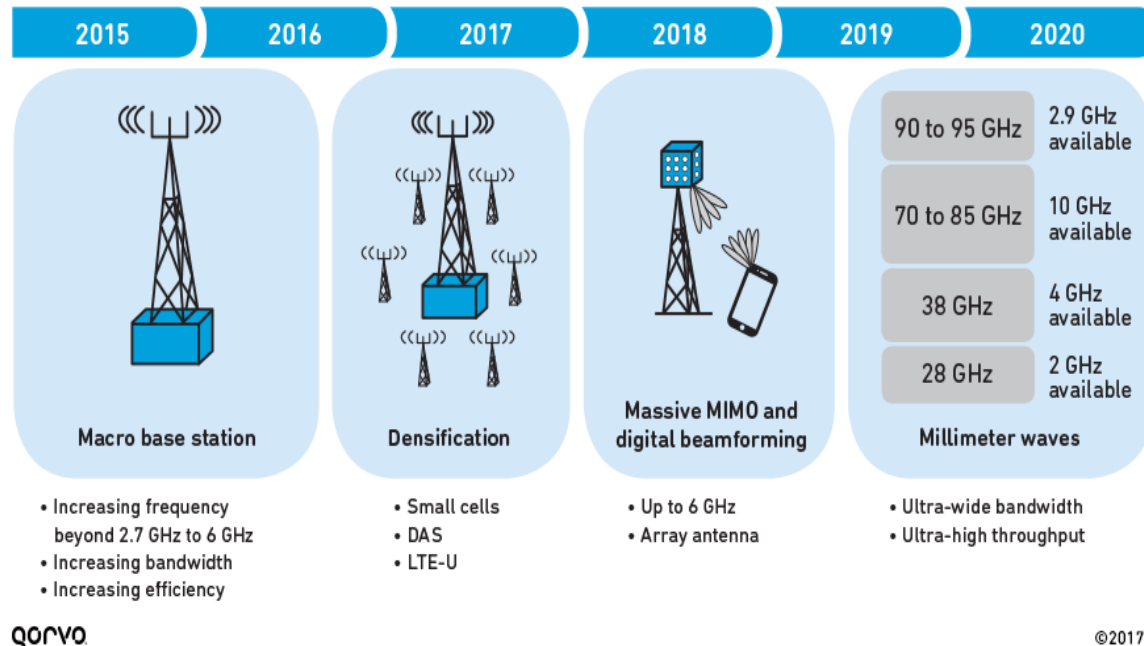
Το κύριο πλεονέκτημα των 5G δικτύων αφορά την ύπαρξη υψηλότερων ταχυτήτων λήψης έως και 10 Gbps λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης, επίσης λόγω του συγκεκριμένου εύρους τα δίκτυα νέα γενιάς θα εξυπηρετούν όχι μόνο κινητά τηλέφωνα αλλά θα λειτουργούν και ως γενικοί πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου (Internet Service Providers ή ISP) για φορητούς και επιτραπέζιους υπολογιστές και επίσης θα παρέχουν την δυνατότητα νέων εφαρμογών στο IoT (Internet-of-Thing).

Το 5G έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει έως ένα εκατομμύριο συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, το οποίο αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με το 4G με την υποστήριξη των 100.000 συσκευών. Επίσης τα δίκτυα πέμπτης γενιάς έχουν την δυνατότητα του 4G LTE από την στιγμή που γίνεται χρήση του 4G για την αρχική σύνδεση με κάποια κυψέλη σε περιοχές στις οποίες δεν είναι διαθέσιμη η πρόσβαση στο 5G.

Η λειτουργία των 5G δικτύων παρατηρείται σε τρεις ζώνες συχνοτήτων, την χαμηλή, την μεσαία και την υψηλή, η αυξημένη ταχύτητα που παρέχουν τα συγκεκριμένα δίκτυα επιτυγχάνεται στις υψηλότερες συχνότητες όμως σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε μικρότερο εύρος ζώνης λόγω των ραδιοκυμάτων και ανάγκη για μικρότερες κυψέλες. Το χαμηλό εύρος ζώνης κυμαίνεται στα 600-700MHz και προσφέρει ταχύτητες λήψης της τάξης των 30-250 Mbps, το μεσαίο εύρος ζώνης κυμαίνεται στα 2.5-3.7 GHz και παρέχει ταχύτητες στα 100-900 Mbps. Το συγκεκριμένο επίπεδο λειτουργίας είναι το πιο διαδεδομένο. Τέλος, όσον αφορά την υψηλή ζώνη παρατηρούμε συχνότητες στα 25-39 GHz με την ταχύτητα λήψης να φτάνει στο 1 Gbps.

Επίσης, τα χιλιοστομετρικά ραδιοκύματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απαιτούν πολλές μικρές κυψέλες έχοντας περιορισμένο εύρος και παρουσιάζουν δυσκολίες στην διάδοσή τους μέσω κάποιων τύπων τοίχων και παραθύρων. Για αυτό τον λόγο καθώς επίσης και λόγω του κόστους οι συγκεκριμένες κυψέλες πρόκειται να αναπτυχθούν σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Επίσης, όσον αφορά τις κυψέλες, το 5G περιλαμβάνει υλοποιήσεις από δίκτυα μέχρι και τριών τύπων κυψελών, κάθε τύπος παρουσιάζει διαφορετική σχέση μεταξύ ταχύτητας λήψης, απόστασης και είδους περιοχής εξυπηρέτησης [12], [13], [14].

## The Evolution of 5G



Εικόνα 1 : Παρουσίαση της εξέλιξης του 5G από το 2015 μέχρι και σήμερα [15].

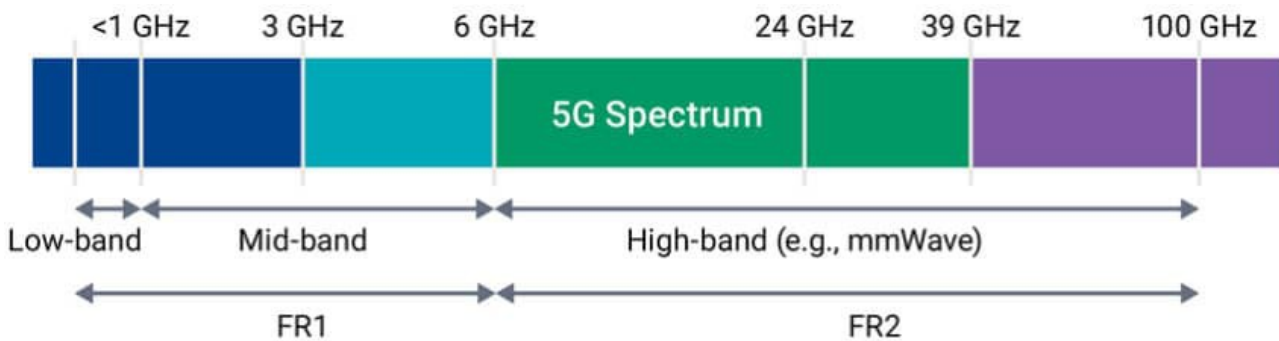
Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται τα στάδια εξέλιξης του δικτύου πέμπτης γενιάς, αρχικά παρατηρούμε να αναφέρεται στην ενσωμάτωση των μάκρο-σταθμών βάσης (Macro-Base Stations, MBSs), με την συνεισφορά των οποίων η συχνότητα μετάδοσης αυξάνεται από τα 2.7 GHz στα 6 GHz, βελτιώνοντας και το εύρος ζώνης του δικτύου και ταυτόχρονα και την αποδοτικότητά του. Συνεχίζοντας από το 2017, στο 2018 και έπειτα στο 2019 παρατηρούμε την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου μέσω της αύξησης του πλήθους των σταθμών βάσης στο εσωτερικό των διάφορων κυψελών από τις οποίες αποτελούνται τα ετερογενή δίκτυα πέμπτης γενιάς και παράλληλα γνωρίζουμε την συνεισφορά των μικρών κυψελών στην υποδομή του συνολικού συστήματος. Έπειτα, ενσωματώνεται ο συνδυασμός των τεχνολογιών του MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) και της ψηφιακής διαμόρφωσης δέσμης (digital Beamforming), που όπως θα αναφέρουμε παρακάτω, συμβάλλει καθοριστικά στην αποτελεσματική και γρήγορη διάδοση της πληροφορίας στους διάφορους χρήστες. Και όσο πλησιάζουμε στο σήμερα παρατηρούμε την περαιτέρω αύξηση του εύρους ζώνης και της διεκπεραιωτικότητας της μετάδοσης δεδομένων, που αφορούν τις συνδεδεμένες συσκευές στο δίκτυο.

## 1.6.2 Τεχνολογίες στο 5G

Τα δίκτυα 5G θα πρέπει να υποστηρίζουν πληθώρα νέων εφαρμογών που παρουσιάζουν ακόμα πιο υψηλές απαιτήσεις όπως μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων, μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης, βελτιωμένη κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους και ενεργειακή απόδοση. Για τον λόγο αυτό στα πλαίσια του 5G αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες και βελτιώθηκαν προϋπάρχουσες ώστε να καταστεί εφικτή η ικανοποίηση των νέων αυτών αναγκών και παρουσιάζονται παρακάτω.

### 1.6.2.1 Νέες ραδιοσυχνότητες

Το 5G NR (New Radio) αποτελεί μία νέα διεπαφή αέρα με σκοπό την εφαρμογή της στο δίκτυο 5G. Στην εικόνα 2 παρατηρούμε ότι περιλαμβάνει δύο ζώνες συχνοτήτων, αυτή των κατώτερων των 6 GHz, την FR1 και αυτή των ανώτερων των 24 GHz, την FR2, όσον αφορά την πρώτη κατηγορία το μέγιστο εύρος ζώνης του καναλιού είναι 100 MHz κάτι το οποίο προκύπτει από την έλλειψη συνεχούς φάσματος ενώ το εύρος των 3.3-4.2 GHz υιοθετείται ευρέως στα 5G δίκτυα. Από την άλλη πλευρά στην δεύτερη κατηγορία το εύρος κυμαίνεται από τα 50 MHz μέχρι και τα 400 MHz ενώ τα 28 GHz και τα 39 GHz χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις ΗΠΑ. Η κοινή παραδοχή αναφέρει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο πιο σημαντική είναι η δυνατότητα υποστήριξης υψηλών ταχυτήτων μεταφοράς πληροφοριών [16].



Εικόνα 2: Παρουσίαση του φάσματος καθώς και των FR1 και FR2 [16].



### **1.6.2.2 Υψηλής απόδοσης MIMO**

Η τεχνολογία του MIMO (Multiple-input multiple-output) έχει αναπτυχθεί από το 2016 στα 4G δίκτυα και η εφαρμογή της τις περισσότερες φορές αφορούσε την χρήση 32 έως 128 μικρών κεραιών σε κάθε κυψέλη, είχε επίσης την δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση μέχρι και 10 φορές με την προϋπόθεση ότι οι συχνότητες που εφαρμόζονται να είναι οι κατάλληλες. Το MIMO αναφέρεται στην χρήση πολύ μεγάλου αριθμού κεραιών στον σταθμό βάσης, οι οποίες είναι περισσότερες από το σύνολο συσκευών ανά πόρο σηματοδότησης και με αυτόν τον τρόπο εξομαλύνονται οι εξαρτήσεις συχνότητας στο κανάλι και παρουσιάζονται τεράστια κέρδη στην φασματική απόδοση [17].

Ο πιο σημαντικός στόχος της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η επίτευξη μεγαλύτερης χωρητικότητας σε κυψελοειδή συστήματα, αυτό θα συμβάλει σημαντικά και στην συνολική κάλυψη του δικτύου καθώς επίσης στον έλεγχο των παρεμβολών στο εσωτερικό των κελιών και στην βελτιστοποίηση του προϋπολογισμού ισχύος. Αποτελεί ένα επεκτάσιμο είδος τεχνολογίας επιτρέποντας την εφαρμογή νέων αρχιτεκτονικών [17], [18].

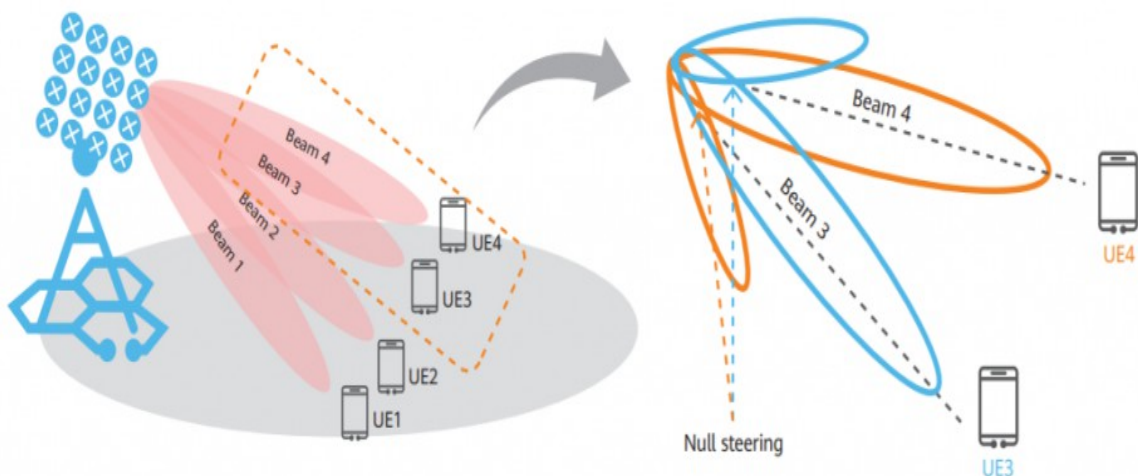
### **1.6.2.3 Διαμόρφωση δέσμης(BeamForming, BF)**

Η διαμόρφωση δέσμης αποτελεί μία από τις καινοτόμες τεχνολογίες που αναπτύσσονται στα πλαίσια των ασύρματων κυψελοειδών δικτύων πέμπτης γενιάς με στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών για υψηλότερες ταχύτητες ροής δεδομένων από τους διάφορους σταθμούς βάσης των κυψελοειδών αυτών δικτύων. Είναι μία τεχνική διαμόρφωσης των ραδιοκυμάτων με στόχο τον έλεγχο της κατεύθυνσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται. Στην ουσία αποτελεί ένα σύστημα σηματοδότησης της ροής των πληροφοριών από τους σταθμούς βάσης ενός κυψελοειδούς δικτύου και επισημαίνει την πιο αποδοτική διαδρομή σχημά με την μετάδοση των πληροφοριών και την παραλαβή τους από έναν συγκεκριμένο χρήστη του δικτύου ενώ αναλαμβάνει να καταπολεμήσει και τις παρεμβολές που δημιουργούνται στους κοντινούς χρήστες κατά την διαδικασία αυτή.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά τις πολύ μεγάλες συστοιχίες MIMO στην γρήγορη και ταυτόχρονη ανταλλαγή των διάφορων πληροφοριών μεταξύ των χρηστών και των σταθμών μετάδοσης ενός δικτύου. Οι συστοιχίες αυτές στην ουσία είναι σταθμοί βάσης που αποτελούνται από πληθώρα κεραιών με στόχο την καλύτερη δυνατή χρήση του διαθέσιμου φάσματος γύρω από αυτές. Σημαντικός παράγοντας για την ομαλή παράλληλη μετάδοση μεγάλης ποσότητας πληροφοριών από το σύνολο των κεραιών των MIMO είναι η αποτελεσματική μείωση των παρεμβολών που αναπτύσσονται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μέσω της διαμόρφωσης δέσμης μπορούν να αποφευχθούν αυτές οι παρεμβολές που παρατηρούνται από το τόσο μεγάλο πλήθος κεραιών σε κάθε συστοιχία MIMO, μέσω της διαδικασίας που εμπεριέχει για την επιλογή της καλύτερης δυνατής διαδρομής μετάδοσης για κάθε συγκεκριμένο χρήστη αλλά και μέσω της εκτίμησης για την στιγμή άφιξης των πληροφοριών που μεταδίδονται στον τελικό παραλήπτη.

Τα χιλιοστομετρικά κύματα χαρακτηρίζονται από υψηλές συχνότητες και ο ρόλος τους είναι καθοριστικός για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Λόγω του κρίσιμου αυτού ρόλου τους γεννάται η ανάγκη επίλυσης βασικών προβλημάτων που παρατηρούνται σε αυτά τα σήματα. Αυτά τα κυψελοειδή σήματα εξασθενούν κατά την διάδοσή τους σε μεγάλες αποστάσεις και παρουσιάζουν ευκολία στον αποκλεισμό τους από κάποια φυσικά εμπόδια. Η τεχνολογία της διαμόρφωσης δέσμης (BF) συμβάλλει στην εστίαση ενός τέτοιου σήματος προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση ενός χρήστη αντί να εκπέμπει παράλληλα σε πληθώρα κατευθύνσεων [19].



Εικόνα 3: Παρουσίαση της διαμόρφωσης δέσμης (BF) [20].

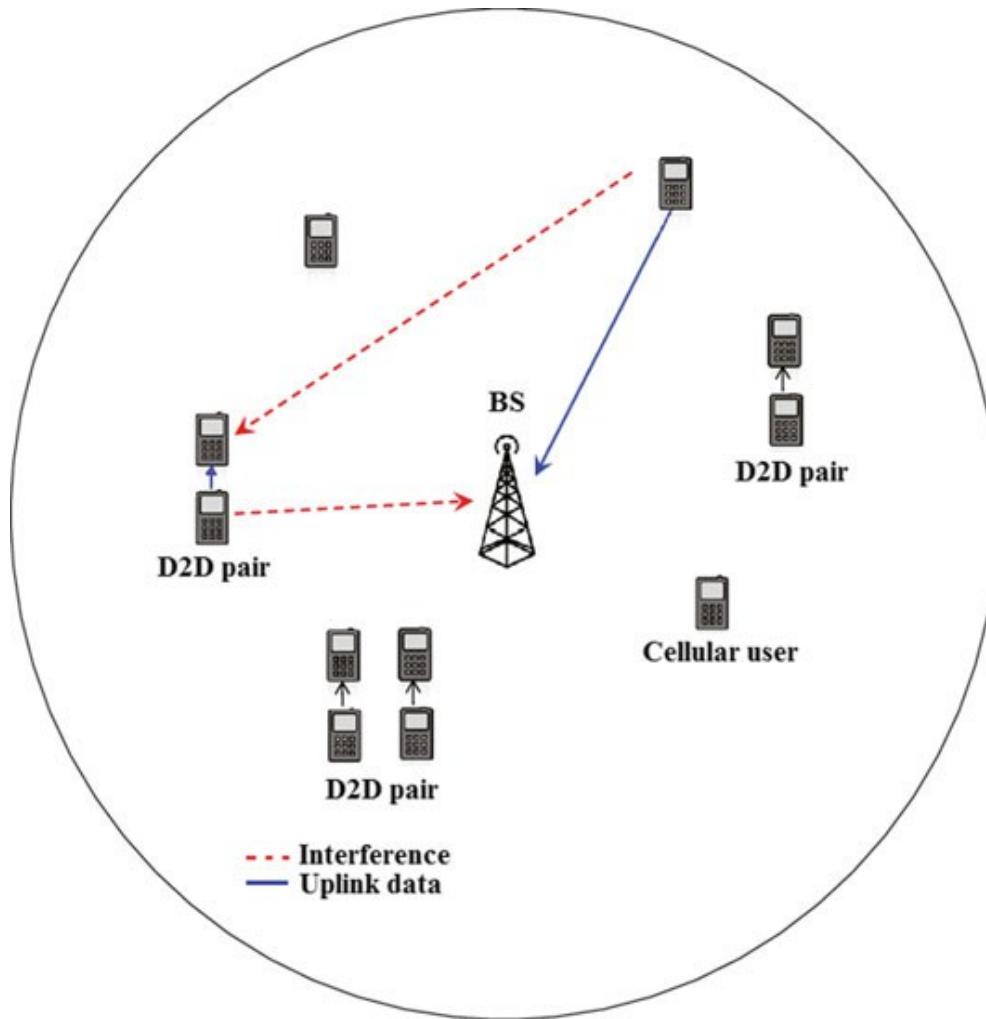
Στην Εικόνα 3 παρατηρούμε την δυνατότητα της BF τεχνολογίας να μετατρέπει τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται από το σύνολο των κεραιών της δομής μαζικού MIMO σε δέσμες και να τις κατευθύνει σε κάθε συσκευή UE των χρηστών του δικτύου με σκοπό την αποδοτικότερη μετάδοση της πληροφορίας με την ταυτόχρονη αποφυγή των παρεμβολών μετάδοσης.

#### **1.6.2.4 D2D (Device-to-Device Communications)**

Το 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) στα πλαίσια της επίτευξης υψηλότερου ρυθμού δεδομένων, μειωμένης καθυστέρησης μετάδοσης, ενισχυμένης χωρητικότητας καναλιού και γενικότερα μέγιστου δυνατού QoS (Quality-of-Service), παρουσιάζει μία νέα τεχνολογία που αναφέρεται ως D2D επικοινωνία. Όπως μαρτυρά και η ονομασία αυτής της τεχνολογίας, παρέχει την δυνατότητα άμεσης ανταλλαγής δεδομένων πληροφορίας μεταξύ των συσκευών των χρηστών χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο ή με οποιονδήποτε σταθμό βάσης. Με την τεχνολογία αυτή οι διάφοροι χρήστες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους σε μικρή απόσταση με την χρήση διάφορων πολλαπλών διεπαφών της υποδομής του κοινόχρηστου δικτύου πρόσβασης.

Οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν σε μεγάλη εμβέλεια σύμφωνα με τα πρωτόκολλα LTE-A(LTE Advanced ), WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ή WLAN (Wireless Local Area Network), αλλά και σε μικρή εμβέλεια με την χρήση Bluetooth ή Wi-Fi πρωτοκόλλου. Στην τυπική D2D επικοινωνία αναφερόμαστε στην επικοινωνία μεταξύ των χρηστών σε μικρή εμβέλεια, όμως τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται παρέχουν σαφώς λιγότερες δυνατότητες μετάδοσης από τα αντίστοιχα στα πλαίσια επικοινωνίας μεγαλύτερης εμβέλειας.

Σύμφωνα με ορισμένες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με την συγκεκριμένη νέα τεχνολογία και γενικότερα με τα κυψελοειδή δίκτυα, γνωστοποιείται ότι το μη αδειοδοτούμενο φάσμα που παρέχουν τα LTE-A κυψελοειδή δίκτυα μπορεί να διαμοιραστεί μεταξύ των χρηστών D2D επικοινωνίας σε παρόμοιο βαθμό πρόσβασης εντός του ίδιου δικτύου μετάδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης του κεντρικού δικτύου στα πλαίσια ενός κυψελοειδούς συστήματος καθώς μέσω της D2D τεχνολογίας παρατηρείται η διευκόλυνση του επίβαρου μετάδοσης στο δίκτυο μετάδοσης.



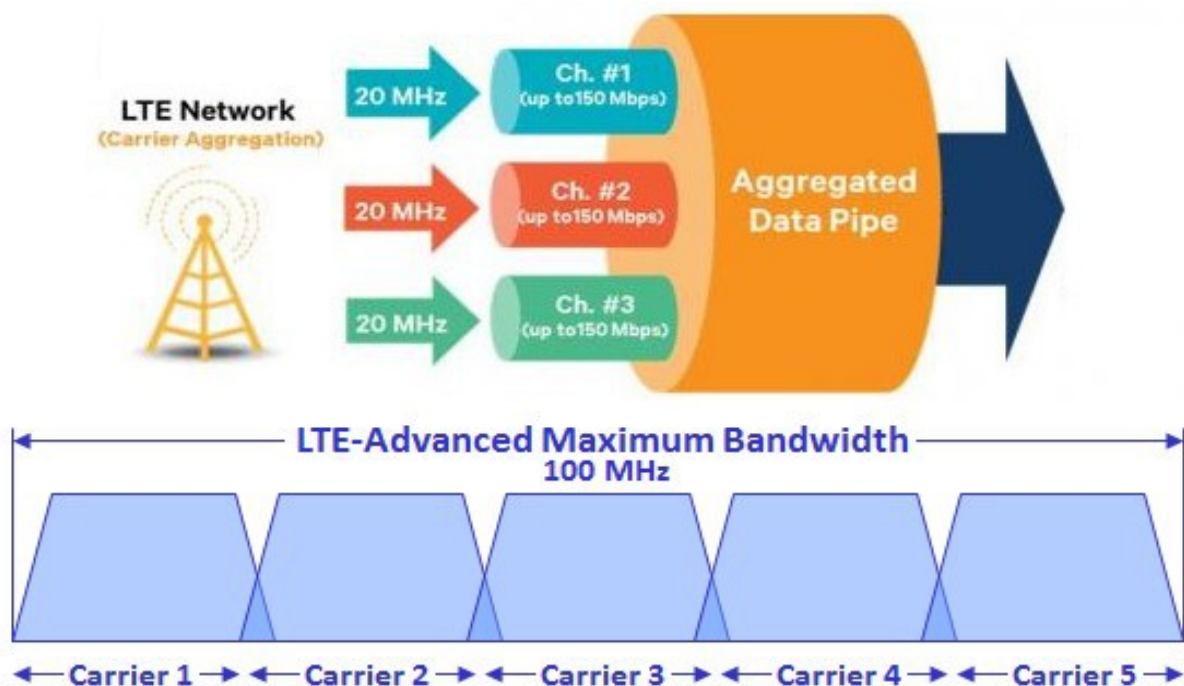
Εικόνα 4: Παρουσίαση της D2D τεχνολογίας που υποστηρίζεται σε ένα κυψελοειδές δίκτυο συμπεριλαμβανομένης και της κυψελοειδούς επικοινωνίας [21].

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας αφορούν την βελτίωση της κυψελοειδούς κάλυψης και της φασματικής απόδοσης, την μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης πληροφορίας και της κατανάλωσης ενέργειας καθώς επίσης και την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας D2D στα πλαίσια των δικτύων αποτελεί έναν ευρηματικό τρόπο που παρέχει την δυνατότητα μεγιστοποίησης των πόρων ανεπαρκούς φάσματος. Και μέσω αυτού, πραγματοποιείται η χρήση του μη αδειοδοτημένου φάσματος μέσω μίας συντονισμένης διαχείρισης ραδιοπόρων CRR (Coordinated Radio Resource). Η συγκεκριμένη λύση θα αναλυθεί στο τρίτο κεφάλαιο [17], [22].

### 1.6.2.5 Συνάθροιση φορέα (Carrier Aggregation, CA)

Το CA αποτελεί ένα είδος μηχανισμού με στόχο την μεγιστοποίηση της απόδοσης του εύρους ζώνης που αναφέρεται σε κάθε χρήστη και είδος συστήματος. Είναι μία τεχνολογία που αναφέρεται στον συνδυασμό δύο ή περισσότερων φορέων ενός καναλιού διάδοσης δεδομένων με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας για την μετάδοση πληροφορίας στα πλαίσια ενός δικτύου. Με την χρήση του διαθέσιμου φάσματος ο μηχανισμός αυτός συμβάλλει στην επίτευξη βελτιωμένων ρυθμών δεδομένων τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη διάδοση.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία σχετικά με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς θα παρέχει την δυνατότητα πολλαπλής συνδεσιμότητας με ασύμμετρου χαρακτήρα μετάδοση και λήψη μέσω της επίτευξης μεγαλύτερου εύρους ζώνης που θα αφορά τον κάθε χρήστη του συστήματος. Η προδιαγραφή του 3GPP, που αφορά το CA, επιτρέπει την συνάθροιση μέχρι και πέντε φορέων των 20 MHz ο καθένας με στόχο την επίτευξη μέγιστου εύρους ζώνης της τάξης των 100 MHz. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ο μηχανισμός CA.



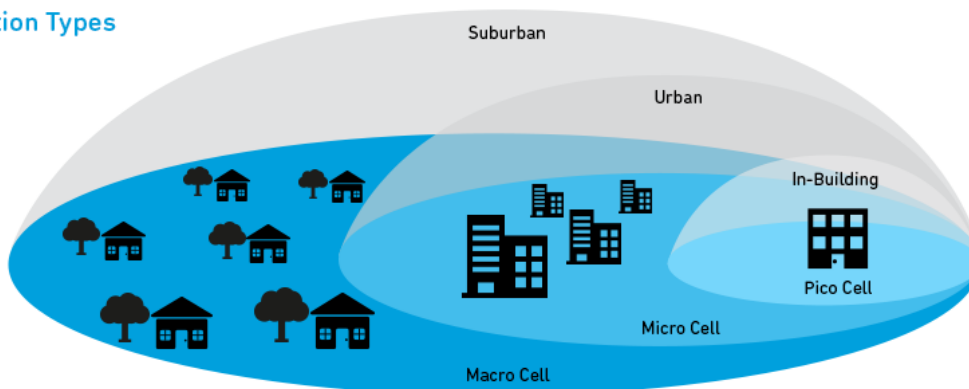
Εικόνα 5: Παρουσίαση του Carrier Aggregation (CA) [23].

### 1.6.2.6 Μικρές κυψέλες (Small cells)

Η τεχνολογία των μικρών κυψελών (small cells) αφορά κυρίως ένα είδος αρχιτεκτονικής των 5G δικτύων και είναι πολύ σημαντική διότι τα ραδιοκύματα που αναφέρονται στο 5G δεν έχουν την δυνατότητα να διαδοθούν αποτελεσματικά σε μεγάλες αποστάσεις λόγω των υψηλότερων συχνοτήτων της συγκεκριμένης γενιάς δικτύων. Τα small cells λειτουργούν ως κόμβοι αναμετάδοσης πληροφοριών και παρέχουν ασύρματη πρόσβαση στο δίκτυο τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους και κατηγοριοποιούνται στις φεμτο-κυψέλες που αποτελούν τις πιο μικρές όσον αφορά την περιοχή κάλυψης αλλά και τις πιο πολυχρησιμοποιημένες, τις πικο-κυψέλες που παρέχουν κάλυψη και εκτός κατοικιών και τέλος οι μικρο-κυψέλες, οι οποία εξυπηρετούν παρόμοιες περιοχές με αυτές των πικο-κυψελών.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι μικρές κυψέλες είναι ο υψηλός ρυθμός δεδομένων, η αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος, η βελτίωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου, η παροχή πολλών υπηρεσιών κατά παραγγελία και η εύκολη μεταβίβαση πληροφορίας. Παρόλα αυτά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα όπως το κόστος εφαρμογής τους αλλά και η αξιοπιστία των λειτουργιών τους καθώς επίσης και η ανάγκη αποδοτικής διαχείρισης των παρεμβολών που παρουσιάζονται στις δομές 5G που αποτελούνται από μικρές κυψέλες [15].

#### Base Station Types



Cell Type	Output Power (W)	Cell Radius (km)	Users	Locations
Femtocell	0.001 to 0.25	0.010 to 0.1	1 to 30	Indoor
Pico Cell	0.25 to 1	0.1 to 0.2	30 to 100	Indoor/Outdoor
Micro Cell	1 to 10	0.2 to 2.0	100 to 2000	Indoor/Outdoor
Macro Cell	10 to >50	8 to 30	>2000	Outdoor

QORVO

©2017 Qorvo, Inc.

Εικόνα 6: Παρουσίαση των μεγεθών των ακτίνων εφαρμογής των κελιών και άλλων χαρακτηριστικών των διαφορετικών σταθμών βάσης [15].



Στην εικόνα 6 μας γνωστοποιούνται ορισμένες παράμετροι σχετικά με τις μικρές κυψέλες και τις υποκατηγορίες τους. Για την παροχή ασύρματης πρόσβασης στο δίκτυο σε εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιούνται τόσο φεμτο-κυψέλες όσο και πίκo και μικρο-κυψέλες. Οι φεμτο-κυψέλες εφαρμόζονται αποκλειστικά σε δίκτυα εσωτερικών χώρων, παρέχουν την δυνατότητα σύνδεσης και εξυπηρέτησης από 1 μέχρι 30 χρήστες, η ακτίνα της περιοχής κάλυψής τους είναι από 10 μέχρι 100 μέτρα και η παραγόμενη ισχύς τους τοποθετείται μεταξύ των 0.001W και 0.25W. Οι πίκo όσο και οι μικρο-κυψέλες αφορούν τόσο τα δίκτυα εσωτερικών όσο και τα δίκτυα εξωτερικών χώρων, παρέχουν την δυνατότητα σύνδεσης και εξυπηρέτησης σε 30 μέχρι 100 χρήστες και από 100 μέχρι και 2000 χρήστες αντίστοιχα. Η ακτίνα της περιοχής κάλυψης των πίκo-κυψελών κυμαίνεται από τα 100 μέχρι τα 200 μέτρα και η παραγόμενη ισχύς είναι της τάξης των 0.25W μέχρι το 1W, ενώ όσον αφορά τις μικρο-κυψέλες η ακτίνα της περιοχής κάλυψής τους κυμαίνεται από τα 200 μέτρα μέχρι τα 2 χιλιόμετρα και η παραγόμενη ισχύς τους από το 1W μέχρι τα 10W. Τέλος, οι μακρο-κυψέλες αφορούν αποκλειστικά την παροχή ασύρματης πρόσβασης στο δίκτυο σε εξωτερικούς χώρους, με την ακτίνα της περιοχής κάλυψής τους να κυμαίνεται από τα 8 χιλιόμετρα μέχρι και τα 30 χιλιόμετρα και η παραγόμενη ισχύς τους από τα 10W μέχρι πάνω από τα 50W, ενώ το πλήθος των υποστηριζόμενων χρηστών μπορεί να είναι μεγαλύτερο του 2000.

#### **1.6.2.7 Ετερογενή δίκτυα πολύ υψηλής πυκνότητας(Ultra Dense-HetNets)**

Το κυψελoειδές δίκτυο 5G είναι ένα ετερογενές δίκτυο πολλαπλών επιπέδων και αποτελείται από μακρο-κυψέλες σε συνδυασμό με ένα μεγάλο πλήθος κόμβων με χαμηλή ισχύ και παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα. Η ετερογένεια που υφίσταται στα είδη κυψελών έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση στην φασματική απόδοση καθώς επίσης και την ευελιξία στο κρίσιμο θέμα της κάλυψης διάφορων περιοχών.

Με την μείωση του μεγέθους των κυψελών παρατηρείται επαναχρησιμοποίηση του υπάρχοντος φάσματος βελτιώνοντας την απόδοση του συνόλου της φασματικής περιοχής ενώ το ποσοστό κάλυψης σημειώνει αύξηση λόγω της χρήσης των μικρών κυψελών σε εσωτερικούς χώρους. Τα ετερογενή δίκτυα (HetNets) παράγουν μικρές κυψέλες, οι οποίες επικαλύπτουν τις μακρο-κυψέλες και η ανάγκη για αποδοτικότερη επαναχρησιμοποίηση του φάσματος χώρου καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη των εξαιρετικά πυκνών ετερογενών δικτύων.

Οι διάφορες συσκευές που υπάρχουν στα μικρές κυψέλες των εξαιρετικά πυκνών ετερογενών δικτύων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα σημεία πρόσβασης (Access Points ή APs) μακρο-επέκτασης και στους πλήρως λειτουργικούς σταθμούς βάσης (Base Stations ή BSs) [13], [18], [24].

### **1.6.2.8 Συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi Point ή CoMP)**

Η βασική ιδέα της συγκεκριμένης τεχνολογίας CoMP (Coordinated Multi Point) είναι τα διάφορα είδη εξοπλισμού/συσκευών ενός χρήστη να έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν αλλά και να εκπέμπουν σήματα από και προς πολλές τοποθεσίες των διάφορων ειδών κυψελών ανεξάρτητα από το αν το συνολικό σύστημα είναι ήδη φορτωμένο. Το 3GPP το παρουσιάζει ως ένα εργαλείο για την βελτίωση της απόδοσης των κυψελών, της κάλυψης και γενικότερα του συνολικού συστήματος.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία που σχετίζεται με την διαχείριση των παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα θα αναλυθεί περαιτέρω στο 3ο κεφάλαιο, στο οποίο θα αναφερθούμε στις τεχνικές που έχουν προταθεί στο πλαίσιο του CoMP για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μέσω της μετρίασης των παρεμβολών που αναπτύσσονται [25].

### **1.6.2.9 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)**

Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί ένα τρόπο πολλαπλής πρόσβασης σε κυψελοειδή συστήματα μέσω κατανομής ισχύος και έχει προταθεί για εφαρμογή στα 5G δίκτυα ως τεχνολογία ραδιοπρόσβασης. Θα υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης πολλών χρηστών με την προϋπόθεση οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου να ακολουθούν μία μη-ορθογώνια κατανομή. Με την τεχνική της πολυπλεξίας που παρουσιάζει το NOMA οι διάφορες συσκευές χρηστών μπορούν να αποκωδικοποιούν τις πληροφορίες τους ενώ τα μηνύματα που τους είναι περιττά έχουν την δυνατότητα να τα θεωρήσουν ως θόρυβο. Η πρακτική της εφαρμογή απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ και για την κατανομή ισχύος σε πραγματικό χρόνο, αλλά και για τους διάφορους αλγορίθμους για την διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών (Successive Interference Cancellation ή SIC). Το NOMA χρησιμοποιεί κωδικοποίηση υπέρθεσης ώστε ο δέκτης SIC να έχει την δυνατότητα διαχωρισμού των χρηστών τόσο στα κανάλια ανερχόμενης ζεύξης (Uplink ή UL) όσο και στα κανάλια κατερχόμενης ζεύξης (Downlink ή DL).

Τα σημερινά κυψελοειδή δίκτυα εφαρμόζουν τεχνικές ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access ή OMA), όπως η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time-Division Multiple Access ή TDMA), η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access ή FDMA) και η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access ή CDMA), όμως καμία από αυτές τις τεχνικές δεν είναι ικανή να ικανοποιήσει τις υψηλές μελλοντικές απαιτήσεις. Όσον αφορά



το TDMA οι πληροφορίες μεταδίδονται σε μη επικαλυπτόμενες χρονοθυρίδες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση για ακριβή συγχρονισμό από τα δίκτυα. Στην πολλαπλή πρόσβαση ορθογωνιακής διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access ή OFDMA), η οποία εντάσσεται στο FDMA, οι πληροφορίες κάθε χρήστη αντιστοιχίζονται σε ένα υποσύνολο υποβαθμιστών. Τέλος, με το CDMA οι χρήστες, στο ίδιο κανάλι μετάδοσης, διαχωρίζονται μεταξύ τους με την χρήση κωδικών.

Το OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σχήμα διαμόρφωσης και το NOMA ως ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης . Στα 4G δίκτυα το OFDMA όπως έχει αναφερθεί παραπάνω χρησιμοποιείται για την εκχώρηση των πληροφοριών του κάθε χρήστη σε ένα υποσύνολο υποβαθμιστών και αποτελεί ένα είδος φυσικής επέκτασης του OFDM, ενώ με το NOMA αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάθε χρήστη.

Η χρήση του ίδιου φάσματος από τους χρήστες επιτυγχάνεται με την αποτελεσματική εφαρμογή του SIC στον δέκτη, ο πομπός συγκεντρώνει όλα τα σήματα πληροφορίας σε μία κοινή κυματομορφή και ενώ αυτά μεταδίδονται στον δέκτη το SIC αναλαμβάνει την αποκωδικοποίηση του συνόλου των σημάτων μέχρι να βρει το επιθυμητό σήμα με την κατάλληλη πληροφορία. Η επιτυχία αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από την σωστή ακύρωση των σημάτων μέχρι να βρεθεί το σωστό ενώ την διαδικασία της διαίρεσης της ισχύος μεταξύ των κυματομορφών αναλαμβάνει ο πομπός, με διαφορετική μεθοδολογία για τα UL και DL κανάλια [12], [26], [27], [28].

#### **1.6.2.10 Αμφίδρομη επικοινωνία(Full-Duplex Communication)**

Τα συστήματα full-duplex (FD) μπορούν να παρέχουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με τα συστήματα half-duplex (HD) και έχουν την δυνατότητα να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά προβλήματα όπως την απώλεια απόδοσης λόγω συμφόρησης και τις μεγάλες καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο. Παρέχουν επίσης την δυνατότητα σε έναν ασύρματο κόμβο να εκτελεί μεταφορά ενέργειας όσο το συγκεκριμένο σύστημα δέχεται uplink μεταδόσεις από UE (User Equipment), επομένως ένας πομποδέκτης σε FD μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει πληροφορία ταυτόχρονα με την ίδια συχνότητα.

Η FD επικοινωνία μπορεί να παρέχει διπλασιασμό της απόδοσης του φάσματος στο φυσικό επίπεδο με την αφαίρεση μιας ξεχωριστής ζώνης συχνοτήτων ή μίας χρονοθυρίδας τόσο στην uplink όσο και στην downlink μετάδοση. Επίσης, μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση μετάδοσης με το να λαμβάνει παράλληλα σήματα ανάδρασης από τον δέκτη καθόλη την διάρκεια επικοινωνίας, τέτοιου είδους σήματα είναι το CSI (Channel State Information) και τα σήματα ελέγχου ARQ/ACK.

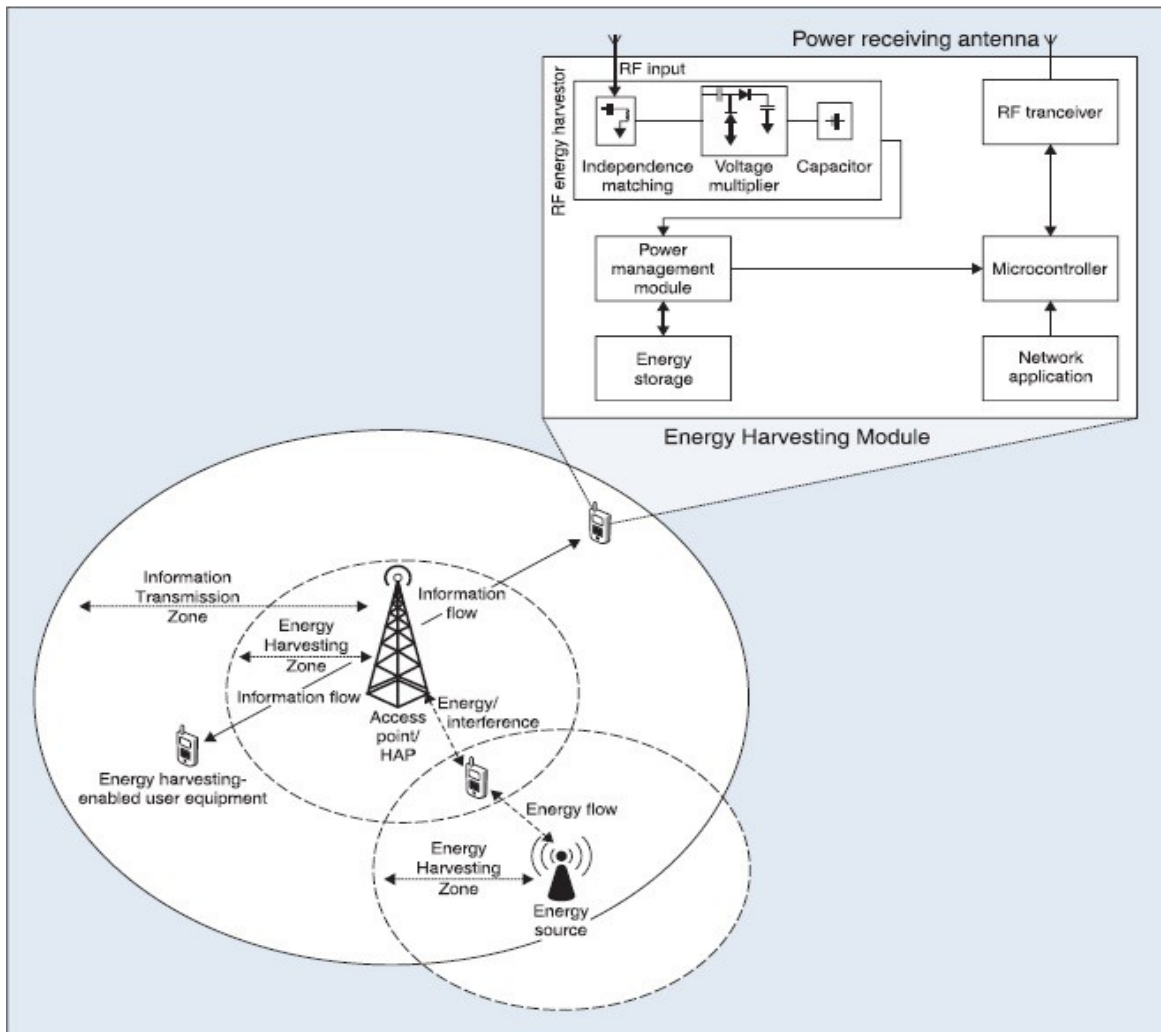
Τέλος, θεωρείται δεδομένη η ανικανότητα ένος ασύρματου κόμβου να αποκωδικοποιήσει το σήμα το οποίο έχει λάβει όσο μεταδίδει σε μία συγκεκριμένη συχνότητα και αυτό οφείλεται σε ένα είδος παρεμβολής μεταξύ πομπού και δέκτη που αναφέρεται ως αυτο-παρεμβολή (self-interference ή SI). Το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής όμως μπορεί να μειωθεί με τον συνδυασμό της ακύρωσης της κεραίας, της RF(Radio Frequency) παρεμβολής και των ψηφιακών παρεμβολών στο πλαίσιο της FD επικοινωνίας [29], [30], [31], [32].

### **1.6.2.11 Επικοινωνία με επίγνωση ενέργειας και συγκομιδή ενέργειας**

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των διάφορων συσκευών που δεσμεύονται με την χρήση μπαταριών αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις στα 5G δίκτυα , με σκοπό την συγκεκριμένη βελτίωση η προσοχή έχει στραφεί στην δέσμευση ενέργειας από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Σημαντική είναι και η εξασφάλιση του quality-of-service (QoS) γι 'αυτό τον λόγο η επιλογή των κατάλληλων εναλλακτικών πηγών είναι κρίσιμη.

Σε ένα δίκτυο συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency-powered Energy-Havesting Network ή RF-EHN), η δέσμευση ενέργειας από τις διάφορες UE(User Equipment) συσκευές μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα υβριδικό σημείο πρόσβασης (Hybrid Access Point ή HAP) με τα κατάλληλα σήματα ραδιοσυχνοτήτων, τα οποία θα είναι υπεύθυνα για την επεξεργασία και μετάδοση των πληροφοριών των UEs. Τα δίκτυα συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων αποτελούνται από RF πηγές ενέργειας, οι οποίες χωρίζονται σε αποκλειστικούς πομπούς RF(Radio Frequency) ενέργειας είτε σε πηγές RF(Radio Frequency) περιβάλλοντος. Τα χαρακτηριστικά της RF μεταφοράς ενέργειας είναι η χαμηλή ισχύς, η μεγάλη απόσταση μετάδοσης και η σταθερή ηλεκτρική τροφοδοσία, η οποία παρατηρείται και στα σημεία πρόσβασης (Access Points ή APs).

Τα πιο βασικά από τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελούνται τα RF-EHN και μπορούμε να διακρίνουμε στην εικόνα 7, είναι ένας χαμηλής ισχύος RF πομποδέκτης όσον αφορά την μετάδοση και λήψη πληροφορίας, ένας χαμηλής ισχύος μικροελεγκτής για την επεξεργασία δεδομένων από το δίκτυο, ένας μηχανισμός αποτελούμενος από μία RF κεραία, μία αντίστοιχη σύνθετη αντίσταση, έναν πολλαπλασιαστή τάσης και έναν πυκνωτή ώστε να συλλέγει την ηλεκτρική ενέργεια από τα RF σήματα και μία μονάδα διαχείρισης ισχύος ούτως ώστε να λαμβάνει την κατάλληλη απόφαση για την χρήση ή την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που έχει ήδη δεσμευτεί [14].



Εικόνα 7: Παρουσίαση ενός δικτύου συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency-powered Energy-Harvesting Network ή RF-EHN) [14].

### 1.6.2.12 Αρχιτεκτονικές με επίκεντρο τις συσκευές

Το σύνολο των κυψελοειδών σχεδιασμών των δικτύων έχουν βασιστεί κατά κύριο λόγο στις κυψέλες. Σύμφωνα με αυτό τον σχεδιασμό, μία συσκευή μπορεί να εξυπηρετηθεί όταν και εφόσον δημιουργηθεί μία σύνδεση με downlink και uplink ροή δεδομένων και υπάρχει έλεγχος για την ροή αυτή και τέλος με την συμβολή του σταθμού βάσης στην ενημέρωση του κελιού για την τοποθεσία της συσκευής.

Υπάρχουν όμως κάποιοι παράγοντες που έρχονται σε αντίθεση με την παραπάνω δομή, στην οποία το επίκεντρο αποτελεί η ίδια η κυψέλη και είναι οι εξής: με την γενικότερη ανάπτυξη των ετερογενών δικτύων παρατηρείται και αύξηση της πυκνότητας του σταθμού βάσης και αυτό απαιτεί την δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας των

δικτύων με αποτέλεσμα να πρέπει να υπάρξουν αλλαγές στην υποδομή των 5G δικτύων, επίσης υπάρχει η ανάγκη για επιπρόσθετο φάσμα, το οποίο επιτυγχάνεται με τον διαχωρισμό των επιπέδων ροής δεδομένων και του ελέγχου, οι πληροφορίες ελέγχου θα αποστέλλονται σε συχνότητες μικροκυμάτων ενώ τα δεδομένα σε συχνότητες χιλιοστοκυμάτων.

Με την χρήση πιο “έξυπνων” συσκευών μπορεί να επηρεαστεί το δίκτυο πρόσβασης, όπως και οι D2D τεχνολογίες και η έξυπνη προσωρινή αποθήκευση. Οι παραπάνω παράγοντες κρίνουν απαραίτητο τον επαναπροσδιορισμό της φύσης της αρχιτεκτονικής δικτύων με επίκεντρο τις κυψέλες και της ανάπτυξης ενός προτύπου όπου οι διάφορες συσκευές θα βρίσκονται στο επίκεντρο. Κάθε συσκευή θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί μέσω της ανταλλαγής πολλαπλών ροών δεδομένων από ένα σύνολο ετερογενών κόμβων [17], [24].

### **1.6.2.13 Εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου (Network Function Virtualization ή NFV) και καθορισμένο δίκτυο από το λογισμικό (Software-Defined Networking ή SDN)**

Η αρχιτεκτονική SDN (Software-Defined Networking) παρουσιάζει την σχέση μεταξύ συσκευών δικτύου και του λογισμικού, το οποίο τις ελέγχει. Ο προγραμματισμός των δικτύων μέσω των διεπαφών καθιστά τον έλεγχο του δικτύου πιο ευέλικτο και προβλέψιμο και διευκολύνει την επέκταση του δικτύου με προηγμένες υπηρεσίες. Τα χαρακτηριστικά των SDN αρχιτεκτονικών αφορούν τον διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου, την διαχείριση του επιπέδου δεδομένων σε συσκευές προώθησης από ένα ελεγκτή και από τις εφαρμογές που εκτελούνται από τον ίδιο και την καλά καθορισμένη διεπαφή προγραμματισμού μεταξύ του επιπέδου δεδομένων και ελέγχου.

Το επίπεδο δεδομένων αναφέρεται στην υποδομή δικτύου που αποτελείται από διασυνδεδεμένες συσκευές προώθησης, που ονομάζεται και ως επίπεδο προώθησης, ενώ το επίπεδο ελέγχου αναφέρεται στον έλεγχο του επιπέδου δεδομένων από τον ελεγκτή, ο οποίος αποτελεί το λειτουργικό σύστημα του δικτύου.

Οι εφαρμογές του SDN ποικίλουν και αναφέρονται στην επαρκή παροχή QoS, στην αξιοποίηση του δικτύου, στην μείωση της κατανάλωσης ισχύος και στην ισορροπία του φορτίου δεδομένων όσον αφορά την μετάδοση δεδομένων, στον έλεγχο, στην σωστή διαχείριση, στην ευελιξία, στην εξισορρόπηση του δικτύου, στην διαλειτουργικότητα μεταξύ των ετερογενών δικτύων και στην δυναμική χρήση φάσματος όσον αφορά τα ασύρματα δίκτυα. Επίσης, το SDN εφαρμόζεται για την κατάλληλη δειγματοληψία και την εκτίμηση της ποσότητας πληροφορίας κατά την επικοινωνία. Ακόμη, παρέχει έλεγχο

πρόσβασης, ανίχνευση διάφορων ανωμαλιών και τοίχο προστασίας στον τομέα της ασφάλειας.

Όσον αφορά το NFV(Network Function Virtualization), ο κύριος στόχος της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η δημιουργία ενός προτύπου αρχιτεκτονικής που ενσωματώνει την διαχείριση αστοχιών σε κάθε σημείο του συστήματος και τα διαχωρίζει για τον περιορισμό των συγκεκριμένων σημείων αποτυχίας. Το NFV παρέχει μειωμένο κόστος εξοπλισμού μέσω της ενοποίησης αυτού και της οικονομικής κλίμακας της βιομηχανίας πληροφορικής, προωθεί μία ποικιλία οικολογικών συστημάτων και ενθαρρύνει την εφαρμογή τους, διαθέτει πολλαπλές εκδόσεις συσκευών δικτύου, επιτρέπει μία ενιαία πλατφόρμα διαφορετικών εφαρμογών και χρηστών, ενθαρρύνει την καινοτομία και την δημιουργία νέων υπηρεσιών, βελτιώνει την απόδοση λειτουργίας αξιοποιώντας την υψηλή ομοιομορφία του φυσικού δικτύου, προσφέρει καινοτομία και δοκιμές νέων υπηρεσιών.

Στα πλαίσια του NFV εισαγεται η έννοια του MEC (Mobile Edge Computing), το οποίο παρέχει δυνατότητες πληροφορικής και cloud-υπολογισμού στο RAN (Radio Access Network), ενώ το RAN προσφέρει ένα περιβάλλον υπηρεσιών με χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και μεγάλο εύρος ζώνης. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα SDN και NFV είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους [33], [34], [35].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Παρεμβολές

### 2.1 Εισαγωγή

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι η μελέτη και η αξιολόγηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις παρεμβολές στα 5G δίκτυα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα είδη παρεμβολών που συναντάμε στα ετερογενή δίκτυα, τόσο μεταξύ των κυψελών όσο και μεταξύ των διαφόρων επιπέδων καθώς και στους τρόπους και τις τεχνικές που έχουν προταθεί για την σωστή διαχείριση και μετρίασή τους, στους οποίους θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο τρίτο κεφάλαιο.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και την εισαγωγή καινοτόμων ιδεών με στόχο την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης πληροφορίας, την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών, την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα παρατηρούμε και ορισμένους παράγοντες που επηρεάζουν την επίτευξη αυτών των στόχων και αρμόδιοι φορείς έχουν κινηθεί δραστικά για να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τα όποια εμπόδια υπάρχουν. Σε όλα τα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας οι διάφοροι χρήστες στέλνουν και λαμβάνουν μεγάλο πλήθος σημάτων σύμφωνα με την ζώνη συχνοτήτων με αποτέλεσμα να παράγεται μεγάλος αριθμός από διαδοχικά κύματα δεδομένων στον συνολικό χώρο.

Η παρεμβολή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών αποτελεί έναν από αυτούς τους παράγοντες που διαταράσσουν ένα σήμα πληροφορίας, με την προσθήκη ανεπιθύμητων σημάτων σε αυτό, καθώς αυτό μεταδίδεται από ένα πομπό σε έναν δέκτη μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας. Υπάρχει ποικιλία στους τύπους και στις μορφές των παρεμβολών που δημιουργούνται στα πλαίσια των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και πιο ειδικά στα δίκτυα 5ης γενιάς (5G). Οι παρεμβολές μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το χώρο και το επίπεδο δράσης τους, στις παρεμβολές που λαμβάνουν μέρος στο εσωτερικό των δικτύων ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και στις παρεμβολές που παρατηρούνται μεταξύ δύο γειτονικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Ανάμεσα σε αυτές τις δύο κατηγορίες οι παρεμβολές στο εσωτερικό ενός δικτύου αποτελούν το πιο σημαντικό πλήγμα στην τελική αποτελεσματική μετάδοση της πληροφορίας διότι η ύπαρξή τους δημιουργεί ακόμα πιο σύνθετα προβλήματα στην επικοινωνία μεταξύ γειτονικών συστημάτων/δικτύων. Επομένως, η σωστή διαχείριση και η μετρίαση τους αποτελεί βασικό και πολύ σημαντικό σκοπό κατά την σχεδίαση του γενικότερου τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

Οι παρεμβολές προκαλούν σοβαρό πλήγμα στην διαθεσιμότητα και στην αξιοπιστία ενός συστήματος και στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε ένα δίκτυο πολλαπλών επιπέδων μπορούμε να τις χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι παρεμβολές που παρατηρούνται μεταξύ των διάφορων στοιχείων ενός δικτύου τα οποία ανήκουν στο ίδιο επίπεδο διαστρωμάτωσης και η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις παρεμβολές που παρουσιάζονται μεταξύ των διάφορων επιπέδων διαστρωμάτωσης του δικτύου. Ένα παράδειγμα, όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, αποτελούν οι παρεμβολές μεταξύ διπλανών φεμτο-κυψελών σε ένα αντίστοιχο δίκτυο φεμτο-κυψελών ενώ οι παρεμβολές που δημιουργούνται μεταξύ μακρο και φεμτο-κυψελών σε ένα ετερογενές δίκτυο αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης κατηγορίας [53].

Οι πιο βασικοί τύποι παρεμβολών που παρατηρούνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και αφορά το είδος διαταραχής του αρχικού σήματος από το σήμα θορύβου είναι η παρεμβολή συν-καναλιού (co-channel interference ή CCI), η παρεμβολή από γειτονικό κανάλι (Adjacent channel interference ή ACI), η αυτο-παρεμβολή (Self-Interference ή SI), η παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης, η παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (Inter-symbol interference ή ISI), οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference ή EMI), οι παρεμβολές μεταξύ φορέων (Inter-Carrier Interference ή ICI) και οι παρεμβολές κοινής λειτουργίας (Common-Mode Interference ή CMI). Με τους συγκεκριμένους τύπους θα ασχοληθούμε παρακάτω καθώς και για τους τρόπους διαχείρισής τους [31], [36], [37], [38].

## **2.2 Παρεμβολή συν-καναλιού (Co-Channel Interference ή CCI)**

Το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής αφορά το crosstalk μεταξύ δύο πομπών οι οποίοι μεταδίδουν πληροφορία χρησιμοποιώντας κοινό κανάλι επικοινωνίας, με τον όρο crosstalk αναφερόμαστε ουσιαστικά στην διαδικασία κατά την οποία ο ένας πομπός “μιλάει” πάνω στον άλλον κατά την μετάδοση δεδομένων και από τους δύο, οπότε μπορούμε να την αναφέρουμε και ως διασταυρούμενη-ομιλία του ενός πομπού στον άλλον ενώ και οι δύο χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι επικοινωνίας, με αυτόν τον τρόπο όπως κρίνεται λογικό μειώνεται η απόδοση του κάθε δέκτη λόγω των σημάτων που φτάνουν σε αυτόν από διάφορους ανεπιθύμητους πομπούς άλλων κυψελών . Αυτό μπορεί να οφείλεται στην επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων για την μετάδοση δεδομένων στα πλαίσια των κυψελοειδών επικοινωνιών [40].



Το φάσμα συχνοτήτων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό παράγοντα στην αξιόπιστη μετάδοση πληροφορίας, χωρίζεται σε συνεχείς αλλά ανεξάρτητες ζώνες που εκχωρούνται σε διαφορετικές κυψέλες του δικτύου. Η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος παρατηρείται μετά από συγκεκριμένες γεωγραφικές αποστάσεις. Αξίζει να αναφέρουμε το γεγονός κατά το οποίο οι παρεμβολές που λαμβάνουν χώρα σε μικρο-κυτταρικά δίκτυα

αποτελούν πιο σοβαρά ζητήματα προς επίλυση σε σχέση με τις αντίστοιχες παρεμβολές στα πλαίσια των μακρο-κυτταρικών δικτύων και αυτό συμβαίνει διότι η ακτίνα του μικρο-κυτταρικού δικτύου καθώς επίσης και η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης είναι πολύ μικρή. Η συχνή επαναχρησιμοποίηση συχνότητας συνεπάγεται και σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε ολόκληρη την έκταση της περιοχής εξυπηρέτησης, το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι χρήστες σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός τις κυψέλης να παρουσιάζουν πορόμοιες εμπειρίες σε απόδοση.

Το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής αναφέρεται επίσης ως παρεμβολή μεταξύ των κυψελών (Inter-Cell Interference ή ICI). Επίσης, θα μπορούσαμε να πούμε ότι δεν είναι ακριβώς ένα είδος παρεμβολής αλλά ένα είδος συμφόρησης. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ώστε να την ελαχιστοποιήσουμε στο πλαίσιο των κυψελοειδών δικτύων, όπως η χρήση μοτίβων σχετικά με την σταθερή επαναχρησιμοποίηση συγκεκριμένου εύρους συχνοτήτων, οι διάφορες τεχνικές MIMO, η προσαρμογή στις παραλλαγές των συγκεκριμένων παρεμβολών και η ευθυγράμμισή τους, τρόποι στους οποίους θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο [38], [39].

### **2.3 Παρεμβολή μεταξύ κυψελών (Inter-Cell Interference ή ICI)**

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα αποτελεί η σωστή διαχείριση και ο μετριασμός της παρεμβολής μεταξύ κυψελών (Inter-Cell Interference ή ICI). Και αυτό διότι με την ύπαρξη του συγκεκριμένου είδους παρεμβολής μπορούμε να παρατηρήσουμε την χαρακτηριστική υποβάθμιση της ενεργειακής και της φασματικής απόδοσης της δομής, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα αισθητό στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της συγκεκριμένης κυψέλης.

Η φασματική απόδοση (Spectrum Efficiency ή SE) αναφέρεται στον βαθμό αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος από το ίδιο το σύστημα, ενώ η ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency ή EE) στον βαθμό της αποδοτικής κατανάλωσης ενέργειας στο σύστημα αυτό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανταλλαγή των κατάλληλων πληροφοριών μεταξύ ενεργειακής και φασματικής απόδοσης είναι πολύ σημαντική στην επίτευξη του αποδοτικού σχεδιασμού ενός συστήματος σε μία δομή πολλαπλών κυψελών [41].



Με στόχο την βελτίωση της ενεργειακής και της φασματικής απόδοσης, που αναφέραμε προηγουμένως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορες τεχνικές μετριασμού της ICI είτε με δυναμικές είτε με στατικές προσεγγίσεις κατανομής των διάφορων πόρων που ήδη υπάρχουν. Οι τεχνικές αυτές όμως δεν έχουν πάντα τα κατάλληλα αποτελέσματα και αρκετές φορές προκαλούν την μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του σταθμού βάσης και με αυτόν τον τρόπο την υποβάθμιση της φασματικής απώλειας.

Για την επίτευξη της πιο αποτελεσματικής μετρίασης αυτού του είδους παρεμβολής έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι αντιμετώπισής της, όπως το να αφαιρέσουμε ή να διαχωρίσουμε τα σημεία που παρουσιάζουν τις πιο ισχυρές παρεμβολές ή το να αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης. Επίσης, η αποδοτική κατανομή πόρων, η διαμόρφωση δέσμης, η συνεταιριστική απόδοση και η ευθυγράμμιση παρεμβολών (Interference Alignment ή IA) είναι διάφορες μέθοδοι για την αποτελεσματική διαχείριση τέτοιου είδους παρεμβολών. Σαφώς, ο κάθε τρόπος προσφέρει διαφορετικά μεγέθη όσον αφορά την αποτελεσματικότητα και διαθέτει τις αντίστοιχες απαιτήσεις όσον αφορά τον συντονισμό [42], [43].

## **2.4 Παρεμβολή γειτονικού καναλιού (Adjacent Channel Interference ή ACI)**

Το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής παρατηρείται κατά την επικοινωνία διάφορων συνδετικών στοιχείων με την χρήση γειτονικών ζωνών συχνοτήτων. Η παρεμβολή παρουσιάζεται μεταξύ των συνδέσμων αυτών, οι οποίοι βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική θέση. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται διότι κάθε πιθανός πομπός, που χρησιμοποιεί μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων για την μετάδοση πληροφορίας, επηρεάζει την διπλανή ζώνη συχνοτήτων διαρρέοντας ενέργεια προς αυτή. Ο δείκτης ισχύος γειτονικού καναλιού ACPR αποτελεί μία ποσότητα, η οποία μπορεί να προσδιορίσει τις συνέπειες των εκπομπών εκτός μιας ζώνης συχνοτήτων.

Από την πλευρά του δέκτη, τα διάφορα σήματα που εντοπίζονται εκτός των ορίων της απαιτούμενης ζώνης συχνοτήτων παράγουν στοιχεία παρεμβολών στις συχνότητες που βρίσκονται εντός της ζώνης του. Ο βαθμός ικανότητας του δέκτη να μπορέσει να αντιμετωπίσει κατάλληλα αυτά τα στοιχεία παρεμβολών εκτός της ζώνης συχνοτήτων του καθορίζεται από την ευαισθησία του γειτονικού καναλιού (Adjacent Channel Sensitivity ή ACS).

Τα γνωρίσματα της τιμής της ευαισθησίας γειτονικού καναλιού (ACS) επηρεάζονται και διαμορφώνονται από ορισμένες από τις ιδιότητες της αλυσίδας ραδιοσυχνότητας. Σε αυτές τις ιδιότητες εμπεριέχονται το πλάτος bit του μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα, η γραμμικότητα των ενισχυτών και των αναμικτών και η ποιότητα των φίλτρων επιλογής καναλιών.

Τα σήματα εκτός της ονομαστικής ζώνης συχνοτήτων δημιουργούν συνιστώσες παρεμβολών στις συχνότητες εντός ζώνης του δέκτη. Η γειτονική ευαισθησία καναλιού (ACS) καθορίζει την ικανότητα του δέκτη για να αντιμετωπίζει τις παρεμβολές που υπάρχουν εκτός ζώνης. Οι ιδιότητες της αλυσίδας RF που συμβάλλουν στα χαρακτηριστικά ACS περιλαμβάνουν: την ποιότητα των φίλτρων επιλογής καναλιών, το πλάτος bit του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό και τη γραμμικότητα των ενισχυτών και των μεικτών [38].

## **2.5 Παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference ή MAI)**

Ένα συχνό φαινόμενο στον τομέα των τηλεπικοινωνιών είναι η ύπαρξη παρεμβολών μεταξύ πολλαπλών σημείων εκπομπής πληροφορίας κατά την μετάδοσή της. Αυτό υφίσταται επειδή τα συγκεκριμένα σημεία μετάδοσης έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους συχνότητας για να μεταφέρουν την πληροφορία στον ίδιο δέκτη. Η παρεμβολή που συμβαίνει κατά την συγκεκριμένη μετάδοση αποτελεί την παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference ή MAI).

Για την καλύτερη κατανόηση του συγκεκριμένου είδους παρεμβολής αξίζει να αναφέρουμε το CDMA(Code Division Multiple Access), το οποίο αναφέρεται στην τεχνολογία κινητών συσκευών και γενικότερα στον κλάδο των διάφορων τεχνολογιών ραδιοεπικοινωνίας ως πολλαπλή πρόσβαση διαιρεμένου κώδικα και αποτελεί μία μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης στα πλαίσια ενός καναλιού επικοινωνίας. Με την συγκεκριμένη μέθοδο πολλοί πομποί σε ένα σύστημα έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν πληροφορίες ταυτόχρονα μέσω του συγκεκριμένου καναλιού επικοινωνίας και αυτό το επιτυγχάνουν χρησιμοποιώντας μία ζώνη συχνοτήτων.

Στα πλαίσια του ασύγχρονου CDMA απαιτείται μία διαφορετική προσέγγιση όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη ακρίβεια στον συντονισμό στις διάφορες συνδέσεις κινητών συσκευών με τον σταθμό βάσης. Σε συστήματα ασύγχρονου CDMA παρατηρείται η χρήση ψευδοτυχαίων ακολουθιών ή ακολουθιών ψευδοθορύβου, οι οποίες αναφέρονται ως αλληλουχίες διάδοσης. Μία τέτοιου είδους αλληλουχία αποτελεί μία δυαδική ακολουθία, αλλά υπάρχει η δυνατότητα να αναπαραχθεί ντετερμινιστικά από τους δέκτες προορισμού. Επίσης, οι αλληλουχίες αυτές προορίζονται για την κωδικοποίηση αλλά και την αποκωδικοποίηση του σήματος σε ασύγχρονο CDMA.

Οι αλληλουχίες διάδοσης στατιστικά δεν εξαρτώνται η μία από την άλλη και το άθροισμα ενός μεγάλου πλήθους από αυτές έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη παρεμβολών MAI. Στην περίπτωση κατά την οποία όλοι οι διαθέσιμοι χρήστες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο ισχύος, τότε η διακύμανση των παρεμβολών MAI αυξάνεται αναλογικά σε σχέση με το πλήθος των χρηστών [30], [38], [44], [45].

## **2.6 Αναλογία του σήματος ως προς την παρεμβολή συν τον θόρυβο (Signal to Inteference plus Noise Ratio ή SINR)**

Στο πλαίσιο των ασύρματων επικοινωνιών μπορούμε να παρατηρήσουμε πολλές φορές θόρυβο κατά την μετάδοση κάποιας πληροφορίας, αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα, όταν ένα πλήθος καναλιών διάδοσης χρησιμοποιείται την ίδια χρονική στιγμή είτε είναι διαθέσιμα ταυτόχρονα προς χρήση, κάποια άλλα κανάλια να παρεμβαίνουν σε αυτή την διαδοση των συγκεκριμένων καναλιών. Για αυτό τον λόγο κρίνεται σημαντική η γνώση της ποσότητας του συγκεκριμένου είδους παρεμβολής που αναφέρεται ως SINR(Signal to Inteference plus Noise Ratio).

Ένα ασύρματο δίκτυο αποτελείται από ένα πλήθος καναλιών διάδοσης πληροφορίας, τα οποία μοιράζονται χώρο και ένα κοινό εύρος συχνοτήτων. Το κάθε κανάλι συγκροτείται από ένα σύνολο πομπών, οι οποίοι έχουν στόχο την διάδοση πληροφορίας σε ένα σύνολο δεκτών. Η πιο απλή μορφή καναλιού διάδοσης πληροφορίας είναι αυτή που αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη με στόχο την μεταφορά πληροφορίας από τον πρώτο στον δεύτερο αντίστοιχα.

Στα κυψελοειδή δίκτυα στην περίπτωση την ανερχόμενης ζεύξης (uplink) μπορούμε να αναφερθούμε στο κανάλι πολλαπλής πρόσβασης, στα πλαίσια του οποίου υπάρχει ένα σύνολο πομπών που διαδίδουν διαφορετικά δεδομένα σε έναν δέκτη ενώ στην περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης (downlink) παρατηρούμε έναν πομπό να στοχεύει στην μετάδοση διαφορετικών δεδομένων σε ένα σύνολο δεκτών στα πλαίσια του καναλιού εκπομπής.

Η παρεμβολή που δημιουργείται από διάφορους πομπούς διάδοσης, όταν αναφερόμαστε σε αρχιτεκτονική καναλιού από ένα σημείο σε ένα άλλο, χαρακτηρίζεται ως θόρυβος. Αρχικά, ο θόρυβος που βασιζόταν σε διαδικασία Poisson είχε μελετηθεί και είχε σταθερή κατανομή. Έπειτα από την συγκεκριμένη παρατήρηση αναπτύχθηκαν επίσης αποτελεσματικές τεχνικές μετασχηματισμού Fourier και Laplace, που αφορούσαν τις παρεμβολές που υπήρχαν στους διάφορους χρήστες σε αρχιτεκτονικές ασυρμάτων δικτύων, στις οποίες οι θέσεις των κόμβων ή των πομπών, που παρουσίαζαν παρεμβολές, καθορίζονταν από μία διαδικασία Poisson [1], [46], [47].

## **2.7 Παρεμβολή μεταξύ συμβόλων (Inter-Symbol Inteference ή ISI)**

Το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής στον ευρύτερο τομέα των τηλεπικοινωνιών αποτελεί ένα είδος παραμόρφωσης που προκαλείται σε ένα σήμα όταν ένα σύμβολό του παρεμβαίνει στα σύμβολα που ακολουθούν. Αυτό το φαινόμενο έχει αρνητική επίδραση στην συνολική επικοινωνία και προφανώς στην απόδοση και στην αξιοπιστία της και αυτό γιατί κάθε σύμβολο επιδρά ως θόρυβος. Οι παρεμβολές υπάρχουν μεταξύ γειτονικών παλμών όταν παρατηρείται η διάδοση του ενός εκτός του προκαθορισμένου χρονικού ορίου του.

Λόγω της συγκεκριμένης παρεμβολής υπάρχουν σφάλματα κατά την διάδοση της πληροφορίας μεταξύ πομπού και δέκτη, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνουμε την σωστή πληροφορία στον δέκτη. Επομένως, κρίνεται αναγκαίος ο αποτελεσματικός σχεδιασμός των κατάλληλων φίλτρων όσον αφορά την μετάδοση και λήψη του σήματος με στόχο την επίτευξη του μικρότερου δυνατού ποσοστού σφάλματος στο τελικό σήμα που φτάνει στον δέκτη [48].

## **2.8 Παρεμβολή μεταξύ φορέων (Inter-Carrier Inteference ή ICI)**

Με την ραγδαία ανάπτυξη που παρατηρείται στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών κρίνεται απαραίτητη η ταυτόχρονη βελτίωση στην ποιότητα των αντίστοιχων υπηρεσιών και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για υψηλότερες ταχύτητες στην διάδοση δεδομένων καθώς επίσης και για αποτελεσματικότερη και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των χρηστών. Με στόχο τις προαναφερθείσες βελτιώσεις παρουσιάζονται βέβαια και ορισμένες προκλήσεις που απαιτούν αποτελεσματικότερη διαχείριση, όπως τις παραλλαγές στον χρόνο του καναλιού και το περιορισμένο φάσμα στο εύρος ζώνης που σχετίζονται με την διάδοση δεδομένων.

Αξίζει να αναφερθούμε στην επίδραση της μετάδοσης της πολυπλεξίας ορθογώνιας διαίρεσης συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing ή OFDM) στην επίτευξη οικονομικών υλοποιήσεων σχετικά με το υλικό και την απλοποίηση των δεκτών στο κανάλι μετάδοσης καθώς αποτελεί ένα φίλτρο στον τομέα των συχνοτήτων με την προϋπόθεση ότι το κανάλι είναι αμετάβλητο του χρόνου εντός ενός μπλοκ μετάδοσης.

Αυτή η προϋπόθεση όμως ενδέχεται να μην μπορεί να ισχύει σε περιπτώσεις πιθανών σφαλμάτων συγχρονισμού ή υψηλών ταχυτήτων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Υπό αυτές τις συνθήκες η απώλεια ορθογωνικότητας των φορέων στους δέκτες έχει ως συνέπεια τις παρεμβολές μεταξύ φορέων ICI, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στην ποιότητα των διάφορων υπηρεσιών στα OFDM συστήματα.

Οι ICI παρεμβολές παρουσιάζουν αρνητική επίδραση στην αποτελεσματική μετάδοση των δεδομένων λόγω της κρίσιμης μείωσης του μεγέθους της αναλογίας του σήματος ως προς την παρεμβολή συν τον θόρυβο (SINR) καθώς το SINR και ο ρυθμός δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί αλληλοσχετίζονται άμεσα [49].

## **2.9 Παρεμβολές πολλαπλών επιπέδων (Cross-Tier Inteference)**

Οι παρεμβολές που αναπτύσσονται στα πλαίσια της D2D επικοινωνίας μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, αυτές που υπάρχουν μεταξύ διαφορετικών καναλιών και σε εκείνες μεταξύ συν-καναλιών επικοινωνίας. Στην πρώτη κατηγορία αναφερόμαστε στις παρεμβολές που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των χρηστών που ανήκουν σε διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας, όπως όταν ένας χρήστης κυψελοειδούς δικτύου παρεμβαίνει σε έναν χρήστη D2D επικοινωνίας. Ενώ στην δεύτερη κατηγορία παρατηρούμε την παρεμβολή μεταξύ δύο χρηστών που κινούνται στο ίδιο φάσμα συχνότητας.

Στις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών καναλιών η από κοινού χρήση φάσματος επικάλυψης μπορεί να αποτελέσει έναν σημαντικό τρόπο ακύρωσης των συγκεκριμένων παρεμβολών. Η σωστή και αποδοτική εφαρμογή του συγκεκριμένου τρόπου είναι καθοριστική καθώς υπάρχει ο κίνδυνος της υποβάθμισης της λειτουργικότητας της D2D επικοινωνίας [21].

Οι παρεμβολές πολλαπλών επιπέδων δημιουργούνται μεταξύ στοιχείων εξοπλισμού χρηστών D2D επικοινωνίας (D2D User Equipment ή DUE) και αντίστοιχων στοιχείων χρηστών κυψελοειδών δικτύων (Cellular Users' Equipment ή CUE). Υπάρχει η πιθανότητα να αναπτύσσονται μεταξύ ενός CUE και ενός DUE ή μεταξύ ενός CUE και πολλαπλών DUEs και συμβαίνουν λόγω της επαχρησιμοποίησης των διάφορων πόρων που είναι διαθέσιμοι σε έναν χρήστη ενός κυψελοειδούς δικτύου από έναν ή περισσότερους αντίστοιχους χρήστες στο πλαίσιο της D2D επικοινωνίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρεμβολής η αρχική πηγή της και ο τελικός δέκτης της εξαρτώνται από την κατεύθυνση της επαναχρησιμοποίησης των διαθέσιμων πόρων [50], [51].

## **2.10 Παρεμβολές στο ίδιο επίπεδο (Co-Tier Inteference)**

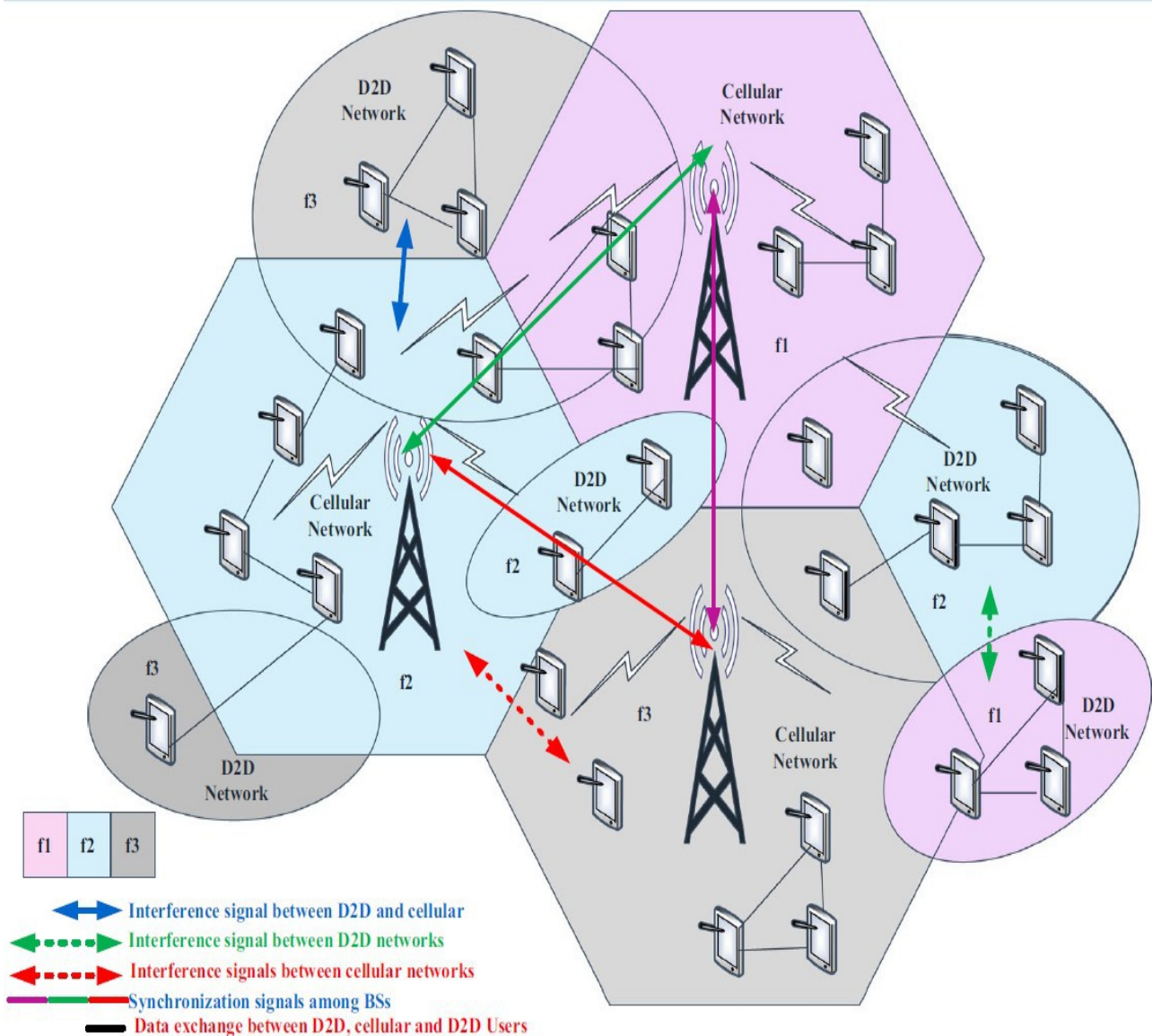
Ως συνέχεια της αναφοράς μας στην D2D επικοινωνία και στις κατηγορίες παρεμβολών που υπάρχουν με βάση το επίπεδο δράσης τους θα παρουσιάσουμε μερικά χαρακτηριστικά των παρεμβολών που αναπτύσσονται μεταξύ των στοιχείων που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο στο δίκτυο. Στην D2D επικοινωνία οι διάφοροι χρήστες μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές μεταξύ αυτών και κάποιων άλλων χρηστών του ίδιου επιπέδου που βρίσκονται κοντά ο ένας στον άλλον.

Καθοριστικό ρόλο στην ύπαρξη σύνδεσης μεταξύ των χρηστών D2D επικοινωνίας αποτελεί η τιμή της αναλογίας μεταξύ του σήματος και της παρεμβολής-συν-τον θόρυβο (SINR). Στην περίπτωση που η συγκεκριμένη τιμή είναι μεγαλύτερη από μία παράμετρο κατωφλίου που είχε προκαθοριστεί τότε οι διάφοροι D2D χρήστες έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν απευθείας μεταξύ τους.

Στην αποδοτική μετρίαση αυτού του είδους των παρεμβολών, που αναπτύσσεται από έναν πομπό στον δέκτη που βρίσκεται κοντά του, μπορούν να συνεισφέρουν διάφοροι τρόποι όσον αφορά την κατάλληλη αντιστοίχιση των διάφορων χρηστών και την ανάθεση συχνότητας.

Τέλος, η συγκεκριμένη παρεμβολή προκαλείται κάθε φορά στον D2D δέκτη από τον αντίστοιχο D2D πομπό στα διάφορα D2D ζεύγη, τα οποία χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους από το κυψελοειδές δίκτυο χωρίς να υπάρχει οποιαδήποτε εξάρτηση από το είδος της επαναχρησιμοποίησης των πόρων είτε ανερχόμενης είτε κατερχόμενης κατεύθυνσης [50].





Εικόνα 8: Παρουσίαση παρεμβολών και επαναχρησιμοποίησης φάσματος εντός κυψελοειδών και D2D δικτύων που συγκλίνουν μεταξύ τους [41].

Στην παραπάνω εικόνα 8 παρουσιάζονται με μπλε γραμμή το σήμα παρεμβολής μεταξύ του D2D και του κυψελοειδούς δικτύου, με πράσινη διακεκομμένη γραμμή το σήμα παρεμβολής μεταξύ των D2D δικτύων, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή το σήμα παρεμβολής μεταξύ των κυψελοειδών δικτύων, με μωβ, πράσινη και κόκκινη γραμμή τα σήματα συγχρονισμού ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και τέλος με μαύρη γραμμή τα δεδομένα που ανταλλάσσονται μεταξύ των D2D και κυψελοειδών δικτύων και των D2D χρηστών.

## **2.11 Παρεμβολές άλλων κυψελών (Other-Cell Inteference ή OCI)**

Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που συναντούν οι διάφοροι χρήστες και κυρίως όσοι από αυτούς βρίσκονται στα όρια των κυψελών αποτελούν οι παρεμβολές. Εμφανίζονται ως παρεμβολές στην ίδια κυψέλη από άλλους χρήστες που βρίσκονται σε αυτή και ως παρεμβολές σε διαφορετική κυψέλη (OCI) από χρήστες που βρίσκονται σε διαφορετικές κυψέλες.

Έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί συγκεκριμένες τεχνικές για την σωστή διαχείρισή τους. Μέσω της πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (Time-Division Multiple Access ή TDMA) και της πολλαπλής πρόσβασης ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access ή OFDMA), η κάθε ξεχωριστή πρόσβαση των διάφορων χρηστών στην ίδια κυψέλη χαρακτηρίζεται ως ορθογώνια ως προς κάποια άλλη, όμως το φαινόμενο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί εφικτό με την ύπαρξη των OCI παρεμβολών, λόγω του αυξημένου επιπέδου πυκνότητας που παρουσιάζει ο εξοπλισμός των διάφορων κυψελοειδών χρηστών (CUE) στα 5G δίκτυα. Και επειδή δεν μπορεί να διασφαλιστεί η ορθογωνικότητα, οι χρήστες διαφορετικών κυψελών έχουν την δυνατότητα να μοιράζονται τους ίδιους πόρους συχνότητας κ χρόνου και με αυτόν τον τρόπο να παράγουν παρεμβολές ανάμεσά τους [51].

## **2.12 Αυτο-παρεμβολή (Self-Inteference, SI)**

Το συγκεκριμένο είδος παρεμβολής υφίσταται λόγω των παρεμβολών που μπορούν να προκληθούν μεταξύ των διάφορων σημάτων που εκπέμπονται από έναν κοινό πομπό σε ένα δίκτυο επικοινωνίας [38].

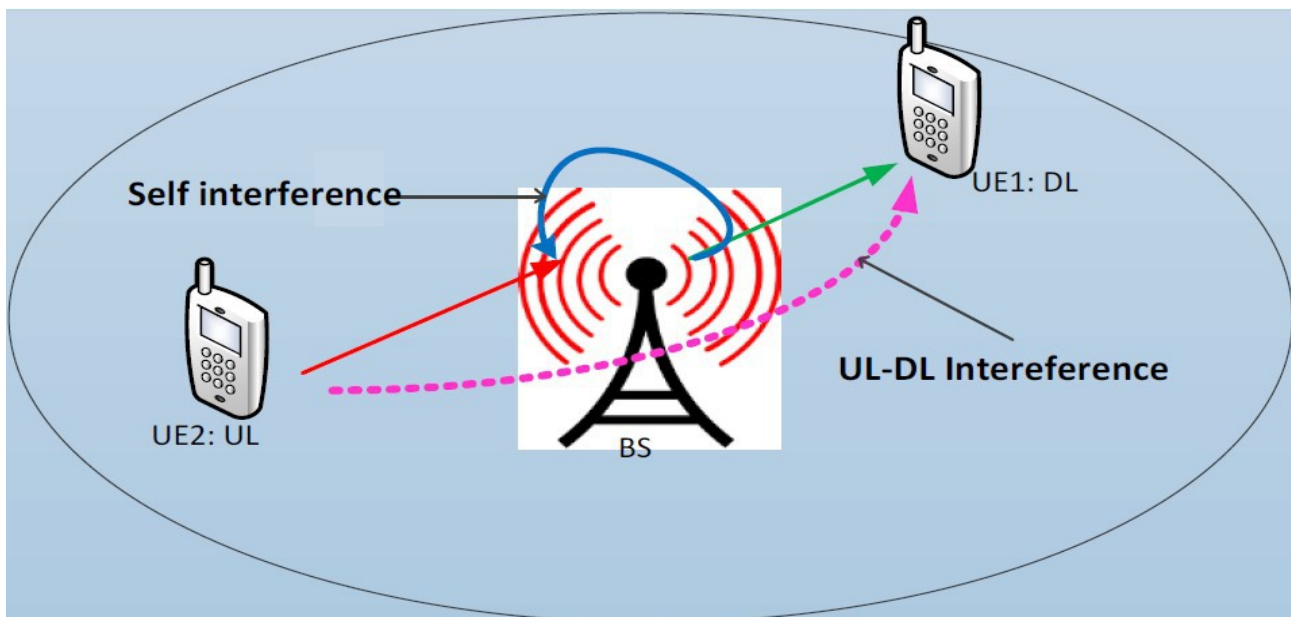
Η συνεχόμενη ανοδική πορεία στον τομέα των τεχνολογιών και ειδικότερα στον τομέα των ασύρματων και κυψελοειδών δικτύων επικοινωνίας σε συνδυασμό με την αμείωτη ζήτηση για προηγμένες ψηφιακές συσκευές έχουν ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της χρήσης “εξυπνων” συσκευών, φορητών υπολογιστών και διάφορων άλλων συσκευών που ικανοποιούν την ανάγκη της εφαρμογής του IoT. Παράλληλα, με την ανάπτυξη και την σταδιακή εφαρμογή του κινητού δικτύου πέμπτης γενιάς 5G κρίνεται απαραίτητη η αποτελεσματική διαχείριση των νέων αναγκών για χωρητικότητα σε δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών με στόχο την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση του μεγάλου πλήθους χρηστών των διάφορων ψηφιακών συσκευών που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Στην ανάγκη που δημιουργείται για αύξηση της χωρητικότητας αλλά και της φασματικής απόδοσης στα ασύρματα συστήματα τηλεπικοινωνιών συμβάλλει σημαντικά η τεχνολογία των Full-Duplex συστημάτων. Με την συγκεκριμένη τεχνολογία οι διάφοροι ασύρματοι ακροδέκτες σε ένα δίκτυο αποκτούν την δυνατότητα της ταυτόχρονης μετάδοσης και λήψης σημάτων χρησιμοποιώντας το ίδιο εύρος συχνοτήτων.

Με την εφαρμογή της παραπάνω τεχνολογίας παρουσιάζονται και οι παρεμβολές SI, στο πλαίσιο των οποίων οι κεραιές που λειτουργούν ως δέκτες στο σύστημα λαμβάνουν τα διάφορα σήματα που εμπεριέχουν παρεμβολές από τους αντίστοιχους πομπούς αλλά και τις χρήσιμες πληροφορίες σε μορφή σημάτων και τις παρεμβολές από άλλα στοιχεία μετάδοσης [31]. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η παρεμβολή που εμφανίζεται μεταξύ UL και DL διάδοσης σημάτων, που έχουν μεταδοθεί σε μία κοινή αμφίδρομη σύνδεση, μπορεί να χαρακτηριστεί ως SI παρεμβολή και ένας τρόπος μετριάσής της είναι η εφαρμογή διπλών φίλτρων [38]. Το σήμα της SI παρεμβολής είναι αρκετά ισχυρότερο από το χρήσιμο σήμα που εμπεριέχει την κατάλληλη πληροφορία και αυτό συμβαίνει επειδή ο πομπός και αντίστοιχος δέκτης βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους σε ένα σταθμό βάσης [31].

Κατά την μετάδοση σύμφωνα με το OFDM, η SI παρεμβολή παρατηρείται μεταξύ των υποφορέων. Αυτό συμβαίνει διότι το φαινόμενο Doppler, οι αναντιστοιχίες που υπάρχουν στους ταλαντωτές καθώς και η ραγδαία εξασθένιση από τις ενέργειες των πομποδεκτών έχουν ως συνέπεια την μετατόπιση συχνότητας. Επίσης η τεχνική που έχει καθολική εφαρμογή στα ασύρματα δίκτυα 5G, το MIMO, θεωρείται μίας από τις πηγές της SI παρεμβολής [38], [30].



Εικόνα 9: Παρουσίαση SI παρεμβολών με εφαρμογή της αμφίδρομης τεχνολογίας Full Duplex σε ένα σταθμό βάσης (BS) [31].

Στην παραπάνω εικόνα 9, δύο συσκευές UE χρησιμοποιώντας την ίδια ζώνη συχνότητας επικοινωνούν με τον σταθμό βάσης με διαφορετικό τρόπο η καθεμία. Ο σταθμός βάσης παρέχει αμφίδρομη δυνατότητα επικοινωνίας και με αυτόν τον τρόπο η συσκευή UE1 χρησιμοποιεί την ανερχόμενη ζεύξη ενώ η UE2 την κατερχόμενη. Η SI παρεμβολή αναπτύσσεται από την διαδρομή μετάδοσης προς την διαδρομή λήψης. Οι χρήστες πρέπει να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά εκτός την SI παρεμβολή και την αντίστοιχη παρεμβολή ανερχόμενης σε κατερχόμενη διαδρομή μετάδοσης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Προκλήσεις και τρόποι διαχείρισης παρεμβολών στα 5G δίκτυα**

### **3.1 Εισαγωγή**

Το κυψελοειδές ασύρματο δίκτυο 5G μέσω των επιμέρους στοιχείων της αρχιτεκτονικής του έχει ως στόχο να παρέχει εξαιρετική απόδοση κάλυψης των διάφορων χρηστών σε κάθε άκρη του συστήματος, πολύ μεγαλύτερα ποσοστά δεδομένων προς διάδοση από τις υπάρχουσες τεχνολογίες, μειωμένο ποσοστό καθυστερήσεων όσον αφορά την μετάδοση δεδομένων καθώς επίσης και λιγότερο κόστος και κατανάλωση ενέργειας κατά τις επικοινωνίες στο εσωτερικό του δικτύου. Με στόχο την επίτευξη των παραπάνω παροχών παρουσιάζονται διάφορες προκλήσεις σχετικά με την αποδοτική διαχείριση των παρεμβολών που αναπτύσσονται στα συγκεκριμένα δίκτυα.

Στο πλαίσιο των προκλήσεων που παρουσιάζονται στην αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών στο πολυεπίπεδο δίκτυο 5G αξίζει να σημειωθεί η πιθανή αδυναμία των σημερινών συστημάτων διαχείρισης παρεμβολών να είναι αποδοτικά στον ίδιο βαθμό όσον αφορά τα προηγμένα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Γνωστές μέθοδοι όπως η κατανομή καναλιών, ο έλεγχος ισχύος, η συσχέτιση κυψελών και η εξισορρόπηση φορτίου δεδομένων ήταν και είναι αποδοτικές σε δίκτυα ενός ή και δύο επιπέδων, επομένως δημιουργείται η ανάγκη για εναπροσδιορισμό διάφορων τεχνικών στις νέες απαιτήσεις των 5G δικτύων.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα διάφορα είδη παρεμβολών που αναπτύσσονται στα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και έχουν εφαρμογή τόσο σε προγενέστερα δίκτυα όσο και στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν οι προκλήσεις στην διαχείριση των παρεμβολών που προκύπτουν στα προηγμένα δίκτυα 5G, οι διάφοροι τρόποι διαχείρισης τους καθώς επίσης και η αποδοτικότητα των συγκεκριμένων τρόπων κατά την εφαρμογή τους [37], [52], [53].

### **3.2 Βασικές προκλήσεις στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G)**

Στα 5G δίκτυα που αποτελούνται από πολλαπλά επίπεδα με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών, όπως η συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi-point transmission ή CoMP) στους διάφορους σταθμούς βάσης (Base Stations ή BSs), η D2D τεχνολογία για την απευθείας σύνδεση και μετάδοση μεταξύ διάφορων χρηστών καθώς και η συσσωμάτωση φορέα, παρατηρείται αύξηση της πολυπλοκότητας των παρεμβολών [37].

Εκτός των συγκεκριμένων τεχνολογιών υπάρχουν και άλλοι λόγοι που επιδρούν στην δυναμική των παρεμβολών και αυτοί μπορεί να είναι ο βαθμός προτεραιότητας για την πρόσβαση σε διαύλους επικοινωνίας με διαφορετικές στρατηγικές για την διαχείριση συχνοτήτων και διαθέσιμων πόρων, ο μεγάλος αριθμός ασύρματων συσκευών με ποικίλα χαρακτηριστικά που συνδέονται στο δίκτυο, οι περιορισμοί στην δυνατότητα πρόσβασης για κάθε επίπεδο του δικτύου καθώς επίσης και η διαφοροποίηση στην δυνατότητα κατερχόμενης μετάδοσης κάθε σταθμού βάσης που έχει ως συνέπεια την αδυναμία εναρμόνισης της κάλυψης και του φορτίου μετάδοσης.

Το σύνολο των παραγόντων που διατυπώθηκαν παραπάνω δημιουργεί την ανάγκη εύρεσης τρόπων και τεχνικών με σκοπό την επίτευξη της αποτελεσματικής διαχείρισης των διάφορων παρεμβολών. Οι νέες αυτές τεχνικές σχετίζονται με την βελτιστοποιημένη οργάνωση της σύνδεσης των κυψελών και του ελέγχου ισχύος, την αποτελεσματική ταυτόχρονη σύνδεση σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης και την αποδοτική λειτουργία και σύμπραξη μεταξύ των διαφορετικών πολλαπλών επιπέδων [53].

Η βελτιστοποίηση της σύνδεσης των κυψελών και του ελέγχου ισχύος μετάδοσης αποτελεί σημαντική τεχνική για τον περιορισμό των παρεμβολών, την κρίσιμη αύξηση της απόδοσης και την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Με αυτή την τεχνική αυξάνεται η απόδοση του φάσματος και μειώνεται σημαντικά η παρεμβολή σε άλλες συνδέσεις λόγω της μείωσης της ισχύος χωρίς να σημειώνεται κάποια υποβάθμιση στην ποιότητα της σύνδεσης. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται η κατάσταση κάθε σταθμού βάσης (BS) και του καναλιού μετάδοσης για κάθε διαφορετικό στοιχείο εξοπλισμού χρήστη (UE).

Η αύξηση του πλήθους των διαθέσιμων σταθμών βάσης σε συνδυασμό με την συνάθροιση φορέα (Carrier Aggregation ή CA) και την δυνατότητα μετάδοσης πολλαπλών σημείων παρέχουν την δυνατότητα ανάπτυξης πλήθους στρατηγικών για την σύνδεση κυψελών και κατανομή πόρων. Η ισχύς μετάδοσης ανερχόμενη ζεύξης επηρεάζεται από την κατάσταση της μπαταρίας των διάφορων χρηστών και δεν σχετίζεται με τον σταθμό βάσης στον οποίο συνδέονται σε αντίθεση με την μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης. Στην ανερχόμενη διάδοση λόγω της ομοιότητας της ισχύος της μπαταρίας των χρηστών δεν παρατηρούνται προβλήματα στην κάλυψη και στην εναρμόνιση του φορτίου μετάδοσης. Επομένως, λόγω της διαφορετικότητας της ουσιαστικής προσφοράς της ανερχόμενης διάδοσης σε σχέση με την κατερχόμενη, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη κοινών τεχνικών για την από κοινού μέγιστη δυνατή απόδοση ανερχόμενης και κατερχόμενης μετάδοσης στο σύνολο του συστήματος. Τεχνικές αυτού του είδους αναμένεται ότι θα αναπτυχθούν και θα εφαρμοστούν στα δίκτυα 5G.

Όσον αφορά την αποτελεσματική σχεδίαση ταυτόχρονης σύνδεσης σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης, η απόδοση του συστήματος θα σημειώνει σημαντική πρόοδο και θα μειωνόταν το ποσοστό διακοπών της μετάδοσης λόγω της αποτελεσματικής διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων. Η συγκεκριμένη σχεδίαση σε συνδυασμό με την κατάλληλη τεχνική για αποδοτική μετάδοση ανερχόμενης και κατερχόμενης κατεύθυνσης που αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί έναν από τους στόχους των δικτύων πέμπτης γενιάς.

Τα ετερογενή δίκτυα που είναι πιο γνωστά ως HetNets (Heterogeneous Networks) παρουσιάζουν μία δυσκολία όσον αφορά την οργάνωση της παράλληλης λειτουργίας των μακρο-κυψελών, των μικρο-κυψελών, των πικο-κυψελών και των φεμτο-κυψελών από τις οποίες αποτελούνται ως δομές. Λόγω της συγκεκριμένης δυσκολίας η αποδοτική αντιμετώπιση των παρεμβολών κρίνεται αναγκαία για την σωστή λειτουργία τους. Στις πιο κοινότερες διαμορφώσεις ενός ετερογενούς δικτύου συναντάμε μία μετατόπιση στην ισχύ μεταβίβασης που λαμβάνει χώρα μεταξύ των μακρο (Macro-Base Stations ή MBSs) και πικο-σταθμών βάσης (Pico-Base Stations ή PBSs) αλλά και μεταξύ των MBSs και άλλων σταθμών βάσης που παρουσιάζουν μικρότερα επίπεδα ισχύος. Αυτό συμβάλλει στην επίτευξη μεγαλύτερης περιοχής κάλυψης για τους σταθμούς βάσης χαμηλότερης ισχύος.

Σύμφωνα με το παραπάνω αποτέλεσμα, τα διάφορα UEs που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης, αλλά εντάσσονται στην περιοχή που καλύπτουν οι σταθμοί βάσης μικρότερης ισχύος, έρχονται αντιμέτωπα με ισχυρές παρεμβολές λόγω μεταδόσεων κατερχόμενης διεύθυνσης από τις μακρο-κυψέλες με συνέπεια την μείωση της απόδοσής τους. Ο σωστός συντονισμός μεταξύ γειτονικών σταθμών βάσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα και παρουσιάζει τις δικές του δυσκολίες όσον αφορά τους κατάλληλους τρόπους χειρισμού του. Για τον λόγο αυτό η μετρίαση των παρεμβολών μεταξύ των διάφορων κυψελών είναι κρίσιμη με στόχο την αύξηση της απόδοσης των χρηστών που βρίσκονται στα όρια των κυψελών αυτών [22].

Επομένως, με την επίτευξη του καλύτερου δυνατού συντονισμού και σύμπραξης των διαφορετικών και πολλαπλών βαθμίδων του δικτύου 5G θα υπάρξει η δυνατότητα να μετριαστεί σημαντικά το σύνολο των παρεμβολών που αναπτύσσονται σε αυτές. Ο αποτελεσματικός αυτός συντονισμός θα επιτευχθεί με την κατάλληλη συνεργασία μεταξύ μακρο-κυψελών και μικρών κυψελών, κατά την οποία παρέχεται στα διάφορα στοιχεία εξοπλισμού χρήστη (UE) η δυνατότητα να συνδέονται και να παραμένουν συνδεδεμένα ταυτόχρονα και στα δύο είδη κυψελών τόσο για την κατερχόμενη όσο και για την ανερχόμενη κατεύθυνση μετάδοσης αλλά και αντίστροφα.

Ένα στοιχείο UE είναι πιθανό να βρεθεί αντιμέτωπο με την μέγιστη δυνατή ισχύ μετάδοσης κατερχόμενης κατεύθυνσης στο πλαίσιο μιας μακρο-κυψέλης ενώ η πιο κοντινή μικρο-κυψέλη να παρέχει το μέγιστο κέρδος κατά την ανερχόμενη κατεύθυνση διάδοσης, έτσι είναι λογικό το στοιχείο UE να αλληλεπιδρά με την μακρο-κυψέλη στην κατερχόμενη διαδρομή και με την μικρο-κυψέλη στην ανερχόμενη. Υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης συστημάτων τα οποία αφορούν την αποδοτική συνεργασία των διάφορων σταθμών βάσης και θα συμβάλλουν στην μετρίαση των παρεμβολών, όμως θα πρέπει να συνυπολογίζονται οι θέσεις των διάφορων χρηστών στο δίκτυο και τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας με στόχο την καλύτερη δυνατή ενεργειακή και φασματική απόδοση όσον αφορά το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο [53].

### **3.3 Τεχνικές ακύρωσης αυτο-παρεμβολής(Self-Interference Cancellation ή SIC)**

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η αυτο-παρεμβολή αποτελεί ένα κρίσιμο είδος παρεμβολής και επηρεάζει καθοριστικά την ανάπτυξη ενός συστήματος που βασίζεται στην Full-Duplex επικοινωνία. Μέσω των διάφορων τεχνικών SIC (Self-Interference Cancellation) παρέχεται η δυνατότητα της περεταίρω εφαρμογής και ανάπτυξης των νέων τεχνολογιών στο πλαίσιο των 5G δικτύων αλλά και σε πυκνότερα ετερογενή δίκτυα στο μέλλον.

Η εφαρμογή της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (SIC) στα διάφορα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας μπορεί να αναφέρεται στην εικονοποίηση φάσματος (Spectrum Virtualization) όπου το SIC αναλαμβάνει να διαχωρίσει κάθε ζεύγος συχνοτήτων που αφορούν την μετάδοση και λήψη σήματος πληροφορίας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό ειδικά στις Full-Duplex επικοινωνίες, κατά τις οποίες επικαλύπτονται συχνά τα κανάλια μετάδοσης κ λήψης. Σε αυτή την περίπτωση το SIC απλοποιεί και ρίχνει το κόστος που αφορά την δυνατότητα χρήσης πολλαπλών κατακερματισμένων συχνοτήτων και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αξιοποίηση του συνολικού κατακερματισμένου φάσματος. Παρέχει αυξημένη χωρητικότητα στην σύνδεση στα συστήματα FD καθώς αξιοποιούνται πλήρως οι διαθέσιμοι πόροι φάσματος σε χρόνο και συχνότητα. Το SIC, επίσης, ακυρώνει την διάκριση μεταξύ της TDD(Time-Division Duplexing) και της FDD(Frequency-Division Duplexing) εισάγοντας την έννοια του ADD(Any-Division Duplexing). Το TDD πλέον αντικαθίσταται από το FD εντός ζώνης και το FDD έχει την δυνατότητα ευέλικτης συσσωμάτωσης φορέα λόγω της διαμόρφωσης του SIC.

Με την παράλληλη επαναχρησιμοποίηση φασματικών πόρων παρέχονται νέες λύσεις αναμετάδοσης. Η αναμετάδοση είναι σχεδόν στιγμιαία και εφαρμόζεται η λειτουργία πλέγματος υψηλής απόδοσης στα ετερογενή δίκτυα. Τέλος, με το SIC παρατηρείται ενίσχυση στον συντονισμό των παρεμβολών με ταυτόχρονη λήψη πληροφοριών ανατροφοδότησης. Ενώ, με τεχνικές όπως η συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων (CoMP) μειώνεται η καθυστέρηση διεπαφής αέρα και ο συγχρονισμός χρόνου και φάσης γίνεται ακόμα πιο κρίσιμος κατά την μετάδοση δεδομένων πληροφορίας [54].

Είναι πολύ σημαντικό να μετρηθεί με ακρίβεια το SI κατά τις FD επικοινωνίες καθώς η ισχύς του σε συνδυασμό με την επαναχρησιμοποίηση φάσματος μπορεί να μειώσει σε σημαντικό βαθμό το κέρδος του FD σε σχέση με αυτό του HD σε ότι αφορά την χωρητικότητα σε επίπεδο δικτύου. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την ακύρωση της παρεμβολής αυτής μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, την παθητική ακύρωση και την ενεργητική ακύρωση. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά σε καθεμία από αυτές [29].

### **3.3.1 Τεχνικές παθητικής ακύρωσης SI**

Το συγκεκριμένο είδος ακύρωσης SI αφορά την εξασθένηση της ισχύος του σήματος που εφαρμόζεται ως συνέπεια της ανυπαρξίας διαδρομής μεταξύ των κεραιών για την εκπομπή και λήψη σημάτων της ίδιας συσκευής λόγω του φυσικού διαχωρισμού μεταξύ των κεραιών αυτών.

Στο πλαίσιο της παθητικής ακύρωσης SI θα παραθέσουμε τις αντίστοιχες τεχνικές με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για την καθεμία.

Αρχικά, θα αναφερθούμε στην τεχνική ακύρωσης SI παρεμβολής με συγκεκριμένη κατεύθυνση. Με αυτή την τεχνική η SI παρεμβολή περιορίζεται σε ένα βαθμό πριν από τις ραδιοσυχνότητες front-end του δέκτη. Η επόμενη τεχνική είναι ο διαχωρισμός κεραιάς (AS) και αφορά την αποτελεσματική μείωση της SI παρεμβολής αυξάνοντας την απώλεια διαδρομής μεταξύ των διάφορων κεραιών που λειτουργούν ως πομπός ή δέκτης.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι συγκεκριμένες τεχνικές αφορούν την μειωμένη SI ως συνέπεια της απώλειας διαδρομής, την μείωση των παρεμβολών μεταξύ των συσκευών, την αύξηση της απόδοσης ισχύος και την αναλογία μεταξύ ποσοστού διαχωρισμού κεραιών και του βαθμού εξασθένησης του SI, δηλαδή όσο μεγαλύτερο το ποσοστό αυτό τόσο πιο σημαντική η εξασθένηση της SI παρεμβολής.

Από την άλλη πλευρά τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων τρόπων έχουν να κάνουν με την υψηλή εξάρτηση της απόδοσης τους από το πρότυπο του AS και της δέσμης, τον μικρό αριθμό εφαρμογών του SISO(Single-Input Single-Output) καθώς και την εξάρτηση του εύρους του AS(Antenna Separation) από την ακρίβεια του υπολογισμού των παρεμβολών του καναλιού αλλά και από το μέγεθος της συσκευής [29].

### **3.3.2 Τεχνικές ενεργητικής ακύρωσης SI**

Η συγκεκριμένη τεχνική αναφέρεται σε ένα πλήθος αναλογικών και ψηφιακών τεχνικών με στόχο την ενεργητική ακύρωση των παρεμβολών. Ο συνδυασμός ακύρωσης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency ή RF) και ψηφιακής επεξεργασίας των διάφορων σημάτων συμβάλλει στην βελτίωση των πομποδεκτών σε πλήρως αμφίδρομες επικοινωνίες. Λαμβάνοντας ορισμένα αναλογικά και ψηφιακά δείγματα από το συνολικό σήμα έχουμε την δυνατότητα αφαίρεσης του παρεμβαλλόμενου σήματος SI από το αρχικό, στο πλαίσιο της ενεργητικής ακύρωσης. Ορισμένοι τρόποι ενεργητικής ακύρωσης SI παρεμβολών μπορούν να χαρακτηριστούν ως επιμέρους τεχνικές αναλογικής ακύρωσης ή ακύρωσης ραδιοσυχνοτήτων διότι η μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή μορφή έπεται της αφαίρεσης του σήματος παρεμβολής από το αρχικό σήμα [30].

Οι μέθοδοι που αφορούν την ενεργητική ακύρωση της SI έχουν την δυνατότητα να συμβάλλουν αποτελεσματικά στην σωστή FD επικοινωνία μέχρι και για απόσταση έξι μέτρων αλλά και με την κατάλληλη ισχύ μετάδοσης των διάφορων WiFi συσκευών. Το σύνολο των μεθόδων για την ενεργητική ακύρωση SI μπορεί να υποδιαιρεθεί στην αναλογική ακύρωση, στην ψηφιακή ακύρωση αλλά και στον συνδυασμό τους. Αυτές οι τεχνικές θα παρουσιαστούν στην συνέχεια καθώς επίσης η συνεισφορά αλλά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά τους [29].

#### **3.3.2.1 Αναλογική ακύρωση(Analog Cancellation)**

Σε αυτή την κατηγορία τεχνικών ακύρωσης του SI εμπεριέχονται αλγόριθμοι για την ακύρωση του χρονικού τομέα (Time-Domain ή TD) που μπορούν να εφαρμοστούν και σε τεχνολογίες μονής-εισόδου μονής-εξόδου (Single-Input Single-Output ή SISO) αλλά και στις αντίστοιχες πολλαπλών-εισόδων πολλαπλών-εξόδων (Multiple-Input Multiple-Output ή MIMO), ένα παράδειγμα συγκεκριμένου αλγόριθμου είναι η training-based μέθοδος. Με τις τεχνικές MIMO παρατηρούμε την αποδοτική ακύρωση των SI παρεμβολών και αυτό είναι απόρροια της χωρικής ποικιλομορφίας που υπάρχει λόγω των πολλαπλών κεραιών που αναφέρονται είτε σε πομπούς, είτε σε δέκτες, είτε και στα δύο είδη.



Οι training-based μέθοδοι που αναφέραμε παραπάνω συμβάλλουν στην σωστή εκτίμηση της SI παρεμβολής και έπειτα στην αποδοτική ακύρωσή της. Η αποδοτικότητα των FD καναλιών αναμετάδοσης βελτιώνεται σημαντικά με την αύξηση της ποσότητας της αναλογίας του σήματος ως προς τον θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio ή SNR) που επιτυγχάνεται με την καλύτερη δυνατή χρήση των βέλτιστων διανυσμάτων βάρους της ακύρωσης του SI.

Αναπτύσσονται νέες λύσεις, που αφορούν την ακύρωση του SI, που βασίζονται στην τεχνολογία των MIMO συστημάτων και στον υψηλό βαθμό ελευθερίας (Degree-of-Freedom ή DoF) που προσφέρουν τα συγκεκριμένα συστήματα λόγω της διάταξης των κεραιών χωροταξικά. Στα FD συστήματα που βασίζονται στην MIMO τεχνολογία η μετάδοση της πληροφορίας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε αν όλες οι διαθέσιμες κεραιές που λειτουργούν σε FDM(Full-Duplex Mode) έχουν χωριστεί σε ομάδες πομπών και δεκτών, είτε αν όλες οι κεραιές βρίσκονται σε λειτουργία κοινής χρήσης και συμβάλλουν αποτελεσματικότερα στην μετάδοση της πληροφορίας αξιοποιώντας τις μεγάλες διαστάσεις των MIMO καναλιών σε συνδυασμό με την αμφίδρομη διαίρεση χρόνου (TDD). Η τεχνική του TDD αποτελεί μια πολύ γνωστή λύση για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης στο σύστημα και καθώς τα δίκτυα πέμπτης γενιάς θα λειτουργούν σύμφωνα και με το MIMO, θα συμβάλλει στην υποστήριξη αμφίδρομης μετάδοσης.

Αξίζει να αναφερθούμε σε ορισμένες βασικές τεχνικές που βασίζονται στην MIMO τεχνολογία και αφορούν την ακύρωση του SI παραθέτοντας και τα βασικά τους πλεονεκτήματα αλλά και μερικά μειονεκτήματα. Μία από αυτές τις τεχνικές είναι η προκωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση που παρέχει προηγμένη βελτιστοποίηση και αυξάνει σημαντικά την χωρητικότητα, όμως προϋποθέτει το SVD(Singular Value Decomposition) των πινάκων του SI καναλιού αλλά και μία εκτίμηση της ποσότητας του SI. Επίσης ο αλγόριθμος block diagonalization παρέχει μορφοποίηση δέσμης ZF (Zero-Forcing) υψηλής απόδοσης αλλά και βέλτιστο ποσοστό αθροίσματος μέσω της προκωδικοποίησης με προσαρμοσμένη κατανομή ισχύος. Από την άλλη πλευρά όμως η εφαρμογή του προϋποθέτει την γνώση των πληροφοριών της κατάστασης λειτουργίας του καναλιού (Channel State Information ή CSI) από τον σταθμό βάσης, επίσης, απαιτεί η κατανομή ισχύος να συμφωνεί με τους ΚΚΤ(Karush–Kuhn–Tucker conditions) όρους και να είναι γνωστό το SVD(Singular Value Decomposition).

Τα φίλτρα ZF(Zero-Forcing) προσφέρουν μεγάλη χωρητικότητα σε περιπτώσεις υψηλού SNR και πολλαπλές χωρικές ροές μέσω της τεχνολογίας MIMO, αλλά παρατηρείται μειωμένη απόδοση σε περιπτώσεις χαμηλού SNR και το SVD είναι αναγκαία συνθήκη για την εφαρμογή τους. Η ισχύς του υπολειπόμενου μέρους της SI παρεμβολής μειώνεται σημαντικά με τον αλγόριθμο της βέλτιστης μορφοποίησης δέσμης Eigen, όμως και στην συγκεκριμένη περίπτωση χρειαζόμαστε το SVD και κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός των πινάκων επιλογής δέσμης.

Ο αλγόριθμος για το μέγιστο SIR(Signal-to-Interference Ratio) έχει την δυνατότητα να βελτιώσει το χρήσιμο μέρος του συνολικού σήματος και συμβάλλει τόσο στην ακύρωση του SI όσο και του θορύβου. Παρουσιάζει, όμως, αυξημένη πολυπλοκότητα στην εξαγωγή βέλτιστων πινάκων και έντονη επιρροή στην απόδοση λόγω της εξασθένησης του καναλιού. Υψηλή πολυπλοκότητα εμφανίζει και το φιλτράρισμα MMSE(Minimum Mean Square Error), αλλά έχει κοινά θετικά χαρακτηριστικά με τον προηγούμενο αλγόριθμο και αυτά αφορούν την βελτίωση του χρήσιμου σήματος και την αποδοτική διαχείριση τόσο του SI όσο και του θορύβου.

Τέλος, ο αλγόριθμος επιλογής κεραίας μετάδοσης (Transmit Antenna Selection ή TAS) παρέχει χαμηλή πολυπλοκότητα, υψηλή προσαρμοστικότητα σε πληθώρα SIRs και με την εφαρμογή του αποφεύγονται οι διάφορες απώλειες σε περιοχές με χαμηλό SNR. Φυσικά, όπως και οι αλγόριθμοι που προαναφέρθηκαν και ο συγκεκριμένος παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα που αφορούν την δυσκολία της καλύτερης δυνατής επιλογής υποσυνόλου κεραιών μετάδοσης σε περιπτώσεις μεγάλων διαστάσεων MIMO αλλά και την αδυναμία εύρεσης της καλύτερης δυνατής επιλογής του υποσυνόλου αυτού για κάθε περίπτωση [29].

### **3.3.2.2 Ψηφιακή ακύρωση(Digital Cancellation)**

Με την εφαρμογή των αναλογικών τεχνικών δεν λαμβάνουμε την εξ'ολοκλήρου ακύρωση του SI, επομένως είναι αναγκαία η εφαρμογή ψηφιακών τεχνικών για την περαιτέρω μετρίαση των παρεμβολών. Στις FD επικοινωνίες το σημαντικότερο πλεονέκτημα, από τα διαθέσιμα ψηφιακά πρωτόκολλα, στο κέρδος ακύρωσης του SI παρουσιάζει το ZigZag. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν εντοπίζεται κάποια σύγκρουση, δεν προκαλεί κάποια μεταβολή στα γνωστά και συμβατικά πρωτόκολλα MAC IEEE 802.11. Αυτό έχει ως συνέπεια την διατήρηση την κατάλληλης αποδοτικότητας τόσο όταν δεν παρατηρούμε διάφορες συγκρούσεις πακέτων πληροφορίας αλλά και όταν προϋπάρχει η οργάνωση των συγκρουόμενων πακέτων σε διαφορετικές χρονοθυρίδες με την παρουσία των συγκρούσεων κατά την μετάδοση.

Στα διάφορα ασύρματα δίκτυα το ποσοστό των ομάδων που αποτελούνται από έναν πομπό και έναν δέκτη η κάθε μία και έρχονται αντιμέτωπες με την συχνή απώλεια πακέτων, λόγω της σύγκρουσης πακέτων που υπάρχουν στο πλαίσιο της πολυπλεξίας των καναλιών επικοινωνίας, φτάνει το 10%. Το πρωτόκολλο ZigZag, επίσης, συμβάλλει στην αποτελεσματική διαχείριση του προβλήματος του υψηλού ποσοστού απώλειας πακέτων (packet loss ratio ή PLR) και αυτό το επιτυγχάνει με την αξιοποίηση του ασύγχρονου

χαρακτήρα των αλληπάλληλων συγκρούσεων που συμβαίνουν. Οι αριθμοί που παρουσιάζει το ZigZag είναι ιδιαίτερα σημαντικοί καθώς με την εφαρμογή του το PLR στα διάφορα κρυφά τερματικά μειώθηκε αισθητά από το 72.6% στο 0.7% περίπου, ενώ η μέση απόδοση αυξήθηκε κατά 25.2% σε σχέση με γνωστά πρότυπα IEEE 802.11.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η εφαρμογή της ψηφιακής ακύρωσης του SI σχετίζονται με την παροχή βελτιωμένης ικανότητας στην καταπολέμηση των συγκρούσεων διάφορων πακέτων, την αντιμετώπιση του προβλήματος των κρυφών τερματικών συσκευών, την δυνατότητα ανεξάρτητης διαμόρφωσης και τελικής ακύρωσης του SI που υπολείπεται μετά την αναλογική επεξεργασία πλέον στον ψηφιακό τομέα.

Αντιθέτως, τα μειονεκτήματα εντοπίζονται στην αδυναμία μείωσης του θορύβου ποσοτικοποίησης, στην περιορισμένη δυνατότητα ακύρωσης και στο γεγονός ότι αν τελικά η αναλογική ακύρωση είναι ισχυρή και αποτελεσματική, αυτό θα χει ως αποτέλεσμα η όποια πιθανή εφαρμογή της ψηφιακής ακύρωσης να μην είναι αναγκαία για ένα αποδοτικό αποτέλεσμα [29], [30].

### **3.4 Τρόποι διαχείρισης των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών (Inter-Cell Interference ή ICI)**

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε ένα κυψελοειδές περιβάλλον το οποίο απαρτίζεται από πολλαπλές κυψέλες ένα από τα κυριότερα προβλήματα που χρήζει αποτελεσματικής διαχείρισης είναι η ύπαρξη της ICI παρεμβολής ειδικότερα σε περιπτώσεις που συμβαίνει η επαναχρησιμοποίηση πλήρους συχνότητας.

Οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών πλήττονται από την μείωση της ενεργειακής και φασματικής απόδοσης λόγω του ICI και με στόχο την μετρίαση των παρεμβολών αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες προσεγγίσεις δυναμικής ή στατικής κατανομής πόρων, μερικές από τις οποίες δεν είναι πάντα το ίδιο αποτελεσματικές με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση του εύρους ζώνης του σταθμού βάσης και κατά συνέπεια να μην μπορεί να αποφευχθεί και η μείωση της φασματικής απόδοσης.

Πρακτικά, αν αφαιρέσουμε ή απομακρύνουμε τις πηγές των ισχυρότερων παρεμβολών ή ακόμα αν απομακρύνουμε τους σταθμούς βάσης θα έχουμε προσεγγίσει μία αποτελεσματική λύση στην σημαντική μείωση του ICI. Αυτό, ταυτόχρονα, θα χει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κέρδους του σήματος ξεπερνώντας την τιμή κατωφλίου.

Μερικές από τις τεχνικές που εφαρμόζονται για την μετρίαση των παρεμβολών είναι η ευθυγράμμιση παρεμβολών (Interference Alignment ή IA), η κατανομή πόρων, η μετάδοση συνεργασίας και η διαμόρφωση δέσμης (Beamforming ή BF). Κάθε μία από

αυτές παρουσιάζει το δικό της ποσοστό επιτυχίας αλλά και την ανάγκη κάλυψης των απαιτήσεων εφαρμογής της. Οι συγκεκριμένες τεχνικές προορίζονται για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του ICI που παρουσιάζεται ακόμα πιο ισχυρό σε περιπτώσεις περίπλοκων δικτύων συνεργασίας. Παρακάτω, θα αναφερθούμε και σε πιο προηγμένους τρόπους μετρίασης του ICI [22].

Ως εικονικό κυψελοειδές δίκτυο αναφέρεται μία από τις διάφορες τεχνικές που έχουν προταθεί σχετικά με την μετρίαση του ICI σε ένα εσωτερικό περιβάλλον. Ο σχεδιασμός της εικονικής αυτής κυψέλης θα πρέπει να γίνει σε ομάδες για την κατανομή των χρηστών και η λειτουργία της θα πραγματοποιείται σε πλήρη συνεργασία μεταξύ των πομπών. Η συγκεκριμένη προσέγγιση είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του ICI αλλά και την αύξηση της απόδοσης του φάσματος [55]. Με τελικό αποτέλεσμα την ελάχιστη δυνατή ύπαρξη παρεμβολών αλλά ταυτόχρονα την αποδοτική κατανάλωση ενέργειας αναφερόμαστε σε μία τεχνική στα πλαίσια της οποίας οι διαθέσιμοι πόροι φάσματος κατανέμονται δυναμικά στους διάφορους χρήστες ενός κυψελοειδούς δικτύου υψηλής πυκνότητας ενώ ο σταθμός βάσης βρίσκεται σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Σε σύγκριση με τεχνικές που βασίζονται αποκλειστικά και μόνο είτε στον έλεγχο των παρεμβολών είτε στην κατάσταση αναστολής λειτουργίας η μέθοδος που προαναφέρθηκε είναι πιο αποτελεσματική στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου [22].

Με στόχο την μετρίαση της επίδρασης του ICI που αναπτύσσεται μεταξύ γειτονικών κυψελών αλλά και βελτίωση της απόδοσης επικοινωνίας στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών έχει προταθεί η μέθοδος ακύρωσης και καταστολής παρεμβολών υποβοηθούμενης από το δίκτυο (Network Assisted Interference Cancellation and Suppression ή NAICS). Αυτή αποτελείται από δύο σχήματα, το πρώτο αφορά την ανταλλαγή της πολιτικής μετάδοσης μεταξύ δύο σταθμών βάσης με σκοπό την οργάνωση της επικοινωνίας αλλά και της διαμόρφωσης των κωδικο-λέξεων και το δεύτερο αφορά τους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης με στόχο την εύρεση των κατάλληλων κωδικο-λέξεων από τους δέκτες μέσω της Bayesian θεωρίας ταξινόμησης αποφάσεων. Τα αποτελέσματα αυτής της τεχνικής που έχει προταθεί είναι σημαντικά και συμβάλλουν στην βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ των κυψελών και στην μετρίαση του ICI [56].

Επίσης, για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου είδους παρεμβολών σε δίκτυα πολλαπλών κυψελών πρέπει να αναφερθούμε στην μέθοδο του συντονισμού των παρεμβολών μεταξύ κυψελών (Inter-Cell Interference Coordination ή ICIC), η οποία αποτελεί τον στατικό συντονισμό κατηγοριοποίησης του ICI, ενώ η ενισχυμένη εκδοχή του ICIC αποτελεί τον δυναμικό συντονισμό κατηγοριοποίησης και αναφέρεται ως eICIC(Enhanced-ICIC).

Στα πλαίσια του στατικού συντονισμού ICIC, ο μακρο-σταθμός βάσης (Macro-Base Station ή MBS) έχει την δυνατότητα, μέσω των διεπαφών υψηλής ταχύτητας οπισθόζευξης, να δέχεται αλλά και να μεταδίδει διάφορες πληροφορίες που σχετίζονται με την ένταση των παρεμβολών, το φορτίο της κυψέλης, την διαχείριση του δικτύου αλλά

και την κατανομή των διαθέσιμων πόρων του συστήματος. Επίσης, σημαντική είναι η συνεισφορά της συγκεκριμένης μεθόδου στον συντονισμό τόσο των εκχωρήσεων πόρων όσο και αυτών της ισχύος που αφορούν τα UEs που βρίσκονται τόσο στο κέντρο της κυψέλης όσο και στα όριά της.

Με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας του γενικότερου συντονισμού που πραγματεύεται η μέθοδος ICIC, όπως προαναφέρθηκε, το πρότυπο 3GPP παρουσιάζει μία ενισχυμένη έκδοση της μεθόδου, την eICIC. Αυτή η τεχνική κάνει χρήση ενός δικτύου συχνότητας με στόχο την μέγιστη δυνατή χρήση φασματικών πόρων στα πλαίσια των δικτύων που αποτελούνται από πληθώρα κυψελών και έχουν στηριχθεί στην διαίρεση χρόνου. Ως μέθοδος, παρέχει την δυνατότητα σε μία δομή πολλαπλών κυψελών να δράσει ως δομή αποτελούμενη από μία κυψέλη και να γνωρίζει το σύνολο των πληροφοριών ανατροφοδότησης. Η πληθώρα σταθμών βάσης, πλέον, θα χει την δυνατότητα να δέχεται και να μεταδίδει πληροφορίες που αφορούν την επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης [22].

Μέσω του eICIC μας γνωστοποιείται και μία άλλη τεχνική που ονομάζεται σχεδόν κενό υποπλαίσιο (Almost Blank Subframe ή ABS) και σχετίζεται με το υποπλαίσιο των μακρο-κυψελών κατερχόμενης ζεύξης. Οι σταθμοί βάσης μικρότερης ισχύος επικαλύπτονται από τον MBS, με συνέπεια την πρόκληση παρεμβολών στα διάφορα UEs, τις συγκεκριμένες παρεμβολές αναλαμβάνει να τις διαχειριστεί το ABS. Το MBS αποκλείει μερικά υποπλάγια από την παροχή δεδομένων και σήματος ελέγχου με στόχο να παρέχει την δυνατότητα συγχρονισμού των σταθμών βάσης μικρότερης ισχύος με τα διάφορα UEs στα προαναφερθέντα υποπλάγια. Η μεθοδολογία αυτή ενισχύει τόσο το συνολικό κέρδος του συστήματος αλλά και την αποδοτικότητα των σταθμών βάσης που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ισχύ παρόλο που είναι πιθανό να μείνουν αναξιοποίητοι ορισμένοι διαθέσιμοι πόροι λόγω της σχετικής απώλειάς τους από το σύστημα [53].

Αρκετές μελέτες έχουν παρουσιαστεί και προωθούν μεθόδους που βασίζονται στο ICIC, μία από αυτές είναι η επαναχρησιμοποίηση ήπιων συχνοτήτων στα πλαίσια κυψελοειδούς δικτύου που βασίζεται στην αναμετάδοση. Η μέθοδος αυτή κατανέμει ορθολογικά τους διαθέσιμους πόρους στους χρήστες του δικτύου με αποτέλεσμα να βελτιώνεται σημαντικά η απόδοση τους στο όλο σύστημα [57]. Μία άλλη μέθοδος που βασίζεται και αυτή στο ICIC και αφορά την επαχρησιμοποίηση ήπιων συχνοτήτων αναφέρεται συγκεκριμένα στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση το φάσμα αξιοποιείται αποτελεσματικά για τους συγκεκριμένους χρήστες στα όρια της κυψέλης, οι οποίοι συμβάλλουν στην επίτευξη υψηλής απόδοσης και κατά την ανερχόμενη διάδοση αλλά και κατά την κατερχόμενη [58].

Οι επόμενες μέθοδοι, στις οποίες θα αναφερθούμε στην συνέχεια, εμπεριέχονται στην εργασία [22]. Στην διαχείριση της ισχύος κατά την μετάδοση εντοπίζεται το σημείο ενδιαφέροντος μίας ICI μεθόδου που έχει προταθεί με στόχο την καλύτερη δυνατή απόδοση επικοινωνίας των διάφορων χρηστών. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που παρουσιάζουν αντίστοιχα αποτελέσματα παρεμβολών με την τεχνική της επαναχρησιμοποίησης κλασματικής συχνότητας και προσδίδει την δυνατότητα βελτίωσης της αποδοτικότητας των χρηστών. Επίσης, μία eICIC μέθοδος που έχει προταθεί είναι βασισμένη στο ABS και αφορά την αύξηση της απόδοσης των πικο-κυψελών αλλά και των μακρο-κυψελών μέσω της κατανομής των υποδοχών με επίκεντρο τις παρεμβολές που υπάρχουν. Αξιοποιείται ένα ανεκμετάλλευτο εύρος φάσματος και αυτό έχει ως συνέπεια να παρατηρείται καλύτερη φασματική απόδοση από αυτή που αποδίδει η τρέχουσα προσέγγιση σταθερού ABS λόγου.

Επίσης, μερικές ακόμα μελέτες που βασίζονται στο eICIC έχουν προταθεί με στόχο την σωστή διαχείριση των παρεμβολών αλλά και την βελτίωση της απόδοσης στα πλαίσια ενός ετερογενούς δικτύου. Η μία αναφέρεται στην οργάνωση των διάφορων σταθμών βάσης με μία τεχνική οριζόντιας διαμόρφωσης δέσμης σε ένα δίκτυο μικρών κυψελών και στα πλαίσια ενός χώρου με πολύ μεγάλη πυκνότητα κτιρίων. Αυτή η μέθοδος απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στον αλγόριθμο προδιαμόρφωσης που βασίζεται σε κωδικούς κλειδιά όσον αφορά την κεραία μετάδοσης, όμως τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι η απόδοση αυξάνεται. Μία άλλη μέθοδος αναφέρεται στην εργασία [59] και με την εφαρμογή της σημειώνει καλύτερη πρόοδο στην απόδοση του εύρους ζώνης αλλά και στην μείωση της καθυστέρησης της διάδοσης των πακέτων δεδομένων σε σχέση με την γνωστή μας κοινότυπη ICIC μέθοδο. Αυτό το επιτυγχάνει με την διανομή των διαφορετικών χρηστών στις διαθέσιμες κυψέλες χωρίς την ανάγκη για κάποιο επιπλέον μήνυμα σηματοδότησης με την κατάλληλη εξισορρόπηση φορτίου μέσω της εφαρμογής ενός δυναμικού αλγορίθμου.

Επιπλέον, μία άλλη eICIC μέθοδος, που θέτει ως στόχο την ακύρωση της ICI παρεμβολής και αναφέρεται στην εργασία [60], ασκεί επιρροή στα φυσικά κανάλια ελέγχου κατερχόμενης διάδοσης (Physical Downlink Control Channels ή PDCCHs) με το να επιχειρεί την εκκένωση δύο συμβόλων OFDM και αφορά την φεμτο-κυψέλη στα πλαίσια ενός ετερογενούς δικτύου. Η μέθοδος αυτή, επίσης, έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει και FDD αλλά και TDD στα πλαίσια του LTE-A. Παρόλα αυτά όταν υπάρχει παρεμβολή από το ίδιο σήμα συχνότητας η απόδοση σημειώνει μείωση. Μία μέθοδος, που διατυπώνεται στην εργασία [22], κάνει χρήση των eICIC και CoMP και βασίζεται στην αρχιτεκτονική καθορισμένου λογισμικού (Software-Defined Networking ή SDN) σχετικά με την διαμόρφωση του ετερογενούς δικτύου. Τα αποτελέσματα μέσω της προσομοίωσης Monte-Carlo έδειξαν ότι υπήρξε βελτίωση στην χωρητικότητα των χρηστών που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης, αλλά είναι απαραίτητο ένα δίκτυο αναμετάδοσης που να είναι πιο ισχυρό και να παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Άλλη μία μέθοδος, στην εργασία [42], αφορά την μετρίαση των παρεμβολών αλλά και την αλληλεπίδραση των κυψελών στα ετερογενή δίκτυα, θέτει ως στόχο την επίτευξη σχετικού κέρδους σχετικά με την απόδοση της επικοινωνίας στο σύστημα. Στα πλαίσια της εκμάθησης ενίσχυσης δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην μέθοδο της παρεμβολής του χρονικού τομέα αλλά και του τομέα συχνότητας με τα αποτελέσματα να είναι καλύτερα συγκριτικά με τις σταθερές ABS μεθόδους. Παρόλο που πετυχαίνει βελτιωμένη απόδοση για το σύστημα παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος περιορίζεται σε μικρότερο ποσοστό κοινής χρήσης των διαθέσιμων μπλοκ πόρων και αυτό γιατί η δυνατότητα παροχής μεγαλύτερου εύρους ζώνης στο σύστημα απαιτεί έναν αλγόριθμο αυξημένης πολυπλοκότητας. Συνεχίζοντας την αναφορά μας στις μεθόδους που παρουσιάζονται στα πλαίσια της εργασίας [22], μία άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί την τεχνική συνεχόμενης ακύρωσης παρεμβολών που αφορά την κινητικότητα των μικρών κυψελών στα πλαίσια μιας προσομοίωσης δικτύου. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς μέσω της τεχνικής αυτής βελτιώθηκε η αποδοτικότητα των διάφορων χρηστών που βρίσκονταν στα όρια της κυψέλης καθώς και η συνολικότερη απόδοση του συστήματος.

Επίσης, σε μία μελέτη χρησιμοποιείται η τεχνική IA, η οποία με την εφαρμογή του σταθμισμένου ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Weighted Minimum Mean Square Error algorithm ή W-MMSE) παρουσιάζεται βελτιστοποιημένη. Αφορά την αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών σε περιοχές που παρατηρείται χαμηλό SNR και τα αποτελέσματα αναφέρουν βελτίωση της χωρητικότητας και λιγότερες επαναληπτικές διαδικασίες στην μετάδοση στις περιοχές με μειωμένο SNR. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά από την στιγμή που η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου προϋποθέτει την ύπαρξη πληροφοριών για την κατάσταση του καναλιού όσον αφορά την προ-κωδικοποίηση των σημάτων διάδοσης. Τέλος, μία άλλη μέθοδος που αναφέρεται στην εργασία [43], πραγματεύεται την επαναχρησιμοποίηση ήπιων συχνοτήτων και την διαχείριση θεμάτων ισχύος και φορτίων μετάδοσης. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου αυξάνει την απόδοση των διάφορων χρηστών σε σχέση με το SINR καθώς επίσης μειώνει το ποσοστό σφάλματος στην μετάδοση μπλοκ δεδομένων και βελτιώνει την συνολική απόδοση του συστήματος.

### **3.4.1 Ευθυγράμμιση παρεμβολών (Interference Alignment ή IA)**

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω η ευθυγράμμιση παρεμβολών (IA) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για την διαχείριση των ICI παρεμβολών με πληθώρα παραλλαγών της να αναπτύσσονται για τον ίδιο λόγο, αυξάνοντας βέβαια την αποδοτικότητα τους. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις παρεμβολών που παρουσιάζουν υψηλό SNR.



Ο βαθμός ελευθερίας (DoF) είναι ένα δείκτης που αναφέρεται στον βαθμό αύξησης του ποσοστού του αθροίσματος όταν παρατηρείται βελτίωση του SNR. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου αναφέρεται στην δυνατότητα που παρέχει σε κάθε χρήστη να επιτύχει υψηλότερο βαθμό ελευθερίας (DoF). Σύμφωνα με το IA, ο υποχώρος κάθε παραλήπτη αποτελείται από το χρήσιμο μέρος του υποχώρου (Useful Sub-Space ή USS) και από τον υποχώρο παρεμβολής (Interference Sub-Space ή ISS). Στόχος της μεθόδου αυτής είναι η ευθυγράμμιση του σήματος της παρεμβολής με τον αντίστοιχο υποχώρο (ISS) του παραλήπτη και έπειτα από αυτό θα πρέπει να επιτευχθεί ο διαχωρισμός του χρήσιμου μέρους του σήματος από αυτού της παρεμβολής.

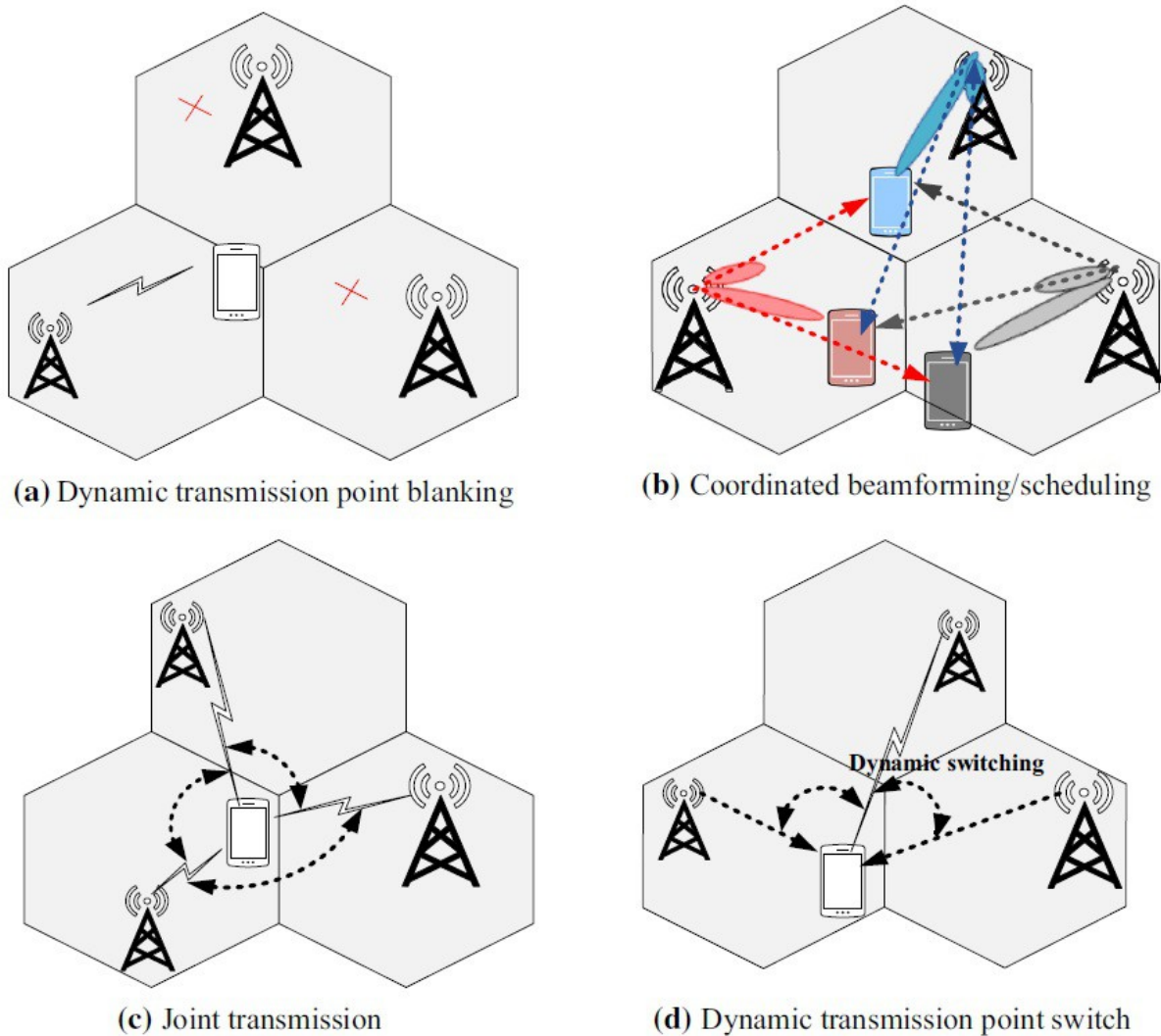
Το IA λειτουργεί ως ο ρυθμιστής του υποχώρου ISS κατά την μετάδοση πληροφορίας αναλαμβάνοντας να επεξεργαστεί το σήμα παρεμβολής που βρίσκεται στον συγκεκριμένο υποχώρο, διατηρώντας το χρήσιμο κομμάτι του σήματος και αποδεδμεύοντας το κομμάτι της παρεμβολής [47], [61].

### **3.4.2 Μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi-point transmission ή CoMP)**

Το CoMP είναι μία τεχνική η οποία έχει εφαρμοστεί σε διάφορες στρατηγικές με στόχο την μετρίαση των παρεμβολών, είτε αυτές αναφέρονται στο ICI που υπάρχει στα υψηλής πυκνότητας ετερογενή δίκτυα που αποτελούνται από πολλαπλές κυψέλες, είτε αναφέρονται στην αντιμετώπιση του CCI που αναπτύσσεται σε περιπτώσεις επαχρησιμοποίησης συχνότητας δίνοντας την δυνατότητα στους διάφορους χρήστες του συστήματος να επικοινωνούν μέσω του ίδιο καναλιού συχνότητας. Στην εργασία [22] αναφέρονται ορισμένες τεχνικές στα πλαίσια του CoMP, οι οποίες θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Η τεχνική του CoMP θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε μελλοντικά δίκτυα, στα πλαίσια των οποίων θα παρατηρείται η ταυτόχρονη ύπαρξη των D2D επικοινωνιών και των κυψελοειδών δικτύων στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Στα επικαλυπτόμενα κυψελοειδή δίκτυα το CoMP έχει την δυνατότητα να διαχειριστεί αποτελεσματικά τις όποιες παρεμβολές μπορούν να αναπτυχθούν μεταξύ των D2D επικοινωνιών και των αντίστοιχων μεταδόσεων στα πλαίσια των κυψελών. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς κάνουν χρήση της μεθόδου αυτής με στόχο την επέκταση της κάλυψης του κυψελοειδούς δικτύου αλλά και την βελτίωση της απόδοσης της χρήσης του διαθέσιμου φάσματος. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι CoMP χρησιμοποιούν είτε συντονισμένο προγραμματισμό (CS) είτε συντονισμένη διαμόρφωση δέσμης (Coordinated Beamforming ή CB) σε συστήματα είτε κοινής μετάδοσης είτε κοινής επεξεργασίας.

Επίσης, η τεχνική αυτή, η οποία εισάγει την δομή της μετάδοσης της πληροφορίας από μία πληθώρα σημείων που βρίσκονται σε διάφορες θέσεις μέσα στο σύστημα, παρέχει την δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης και λήψης πληροφοριών από και προς κοινά UEs στα πλαίσια της προσπάθειας για μετρίαση των παρεμβολών. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ότι η τεχνολογία CoMP παρέχει την δυνατότητα μετάδοσης κατερχόμενη ζεύξης με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι παρουσιάζονται στην εικόνα 10.



Εικόνα 10: Τρόποι downlink μετάδοσης στα πλαίσια της τεχνικής CoMP [22].

Σύμφωνα με την εικόνα 10, ο πρώτος τρόπος που παρουσιάζεται στο (a) αφορά την δυναμική εκκένωση του σημείου μετάδοσης, στα πλαίσια της οποίας γίνεται η επιλογή του καταλληλότερου δυνατού σημείου μετάδοσης πληροφορίας και πραγματοποιείται η όποια μετάδοση δεδομένων προς ένα συγκεκριμένο UE ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται οποιαδήποτε πιθανή ποσότητα παρεμβολής από διάφορους άλλους πομπούς στο δίκτυο.

Στο (b) παρουσιάζονται η συντονισμένη διαμόρφωση δέσμης (CB) και ο συντονισμένος προγραμματισμός (CS), όπου στα πλαίσια των συγκεκριμένων τεχνικών πραγματοποιείται ο διαμοιρασμός πληροφοριών σχετικά με τα CB και CS σε πληθώρα συντονισμένων σημείων που σχετίζονται με την μετάδοση δεδομένων και αυτό έχει ως στόχο την αποτελεσματική μείωση των παρεμβολών.

Συνεχίζοντας με τον τρίτο τρόπο σύμφωνα με την τεχνολογία CoMP, στο (c) της εικόνας 10, αναφερόμαστε στην από κοινού μετάδοση πληροφορίας. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο διάφορα δεδομένα μεταδίδονται από κοινού από μία πληθώρα σημείων μετάδοσης προς ένα συγκεκριμένο UE. Και τέλος, ο τέταρτος τρόπος παρουσιάζεται στο (d) όπου πραγματοποιείται η εναλλαγή του δυναμικού σημείου μετάδοσης. Από πολλαπλά σημεία μετάδοσης πληροφορίας τα οποία συνεργάζονται για την επίτευξη επικοινωνίας θα γίνει δυναμικά η επιλογή του καλύτερου δυνατού σημείου από το αρχικό σύνολο για να επιτευχθεί η τελική μετάδοση της πληροφορίας σε ένα συγκεκριμένο UE.

Είναι ιδιαιτέρως σημαντικά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι διάφορες τεχνικές συντονισμού μέσω της τεχνολογίας του CoMP, όμως είναι ακόμα πιο κρίσιμα τα προβλήματα που εντοπίζονται στην εφαρμογή του CoMP λόγω των παρεμβολών που αναπτύσσονται τόσο εντός όσο και εκτός των κυψελών. Για τον λόγο αυτό αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με στόχο την αντιμετώπιση των ICI παρεμβολών και όχι μόνο, παρακάτω θα αναφερθούν μερικές από αυτές τις μεθόδους. Μερικές από αυτές πραγματεύονται τεχνικές συγχρονισμού συνεργασίας, άλλες την τεχνική επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε συνδυασμό με τις κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης.

Μία από αυτές τις μεθόδους κάνει λόγο για την επαναχρησιμοποίηση δυναμικών συχνοτήτων (Dynamic Frequency Reuse ή DMFR) σε συνεργασία με τεχνικές που αφορούν την διαχείριση των παρεμβολών και την προσαρμοσμένη κατανομή φάσματος. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου αυτής έχουν θετικό πρόσημο στην βελτίωση της απόδοσης τόσο των κυψελών όσο και της συνολικής μετάδοσης της πληροφορίας. Μία άλλη τεχνική που έχει προταθεί και χρησιμοποιεί την τεχνική IA για το CoMP ανερχόμενης ζεύξης πραγματεύεται την εφαρμογή της αποκωδικοποίησης QR μπλοκ (Block QR Decomposition ή BQRD) για την αντιμετώπιση των παρεμβολών που υπάρχουν μεταξύ των διάφορων UEs. Επίσης, μέσω της χρήσης της τεχνικής SIC παρατηρείται μείωση του πλήθους των επαναλήψεων μετάδοσης της πληροφορίας και ως συνέπεια ο ρυθμός σύγκλισης σημειώνει βελτίωση.

### **3.4.3 Τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης (Beamforming)**

Με στόχο την αντιμετώπιση των διάφορων σφαλμάτων στις πληροφορίες της κατάστασης του καναλιού (CSI) σε συνδυασμό με τις παρεμβολές που αναπτύσσονται μεταξύ των διάφορων κυψελών εφαρμόζεται μία τεχνική διαμόρφωσης δέσμης (BF). Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής αφορά την επίτευξη της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης του γενικότερου συστήματος. Αφορά την χρήση διαδοχικών κυρτών προσεγγίσεων (Successive Convex Approximation ή SCA), με την οποία επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και με λίγες απαιτήσεις επίλυσης πολύπλοκων υπολογισμών.

Η συγκεκριμένη τεχνική αναφέρεται στο [62], καθώς επίσης και πληθώρα επιπλέον μεθόδων οι οποίες θα διατυπωθούν στην συνέχεια.

Σχετικά με τα LTE-A συστήματα, έχει γίνει αντικείμενο μελέτης η DL μετάδοση στα MIMO πολλαπλών χρηστών ή αλλιώς MU-MIMOs τα οποία χαρακτηρίζονται από την περιορισμένη ανατροφοδότηση. Εκτός από τις διάφορες τεχνικές, στις οποίες περιλαμβάνονται η προκωδικοποίηση, η λήψη διάφορων πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του καναλιού και η σύνδεση κεραίας λήψης σε συνδυασμό με την οργάνωση των χρηστών, οι διάφορες μελέτες που έχουν διεξαχθεί εστιάζουν στις διάφορες φάσεις της DL μετάδοσης. Με την χρήση προσομοιωτών που ακολουθούν τα πρότυπα LTE-A τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Η αύξηση του πλήθους των κεραιών μετάδοσης σε συνδυασμό με ορισμένους περιορισμούς που εφαρμόστηκαν, όπως η καθυστέρηση διάδοσης του καναλιού και η ατελής λήψη πληροφοριών για την κατάσταση του καναλιού αυτού, είχαν ως συνέπεια την κρίσιμη μείωση της απόδοσης του συστήματος. Συμπερασματικά, κρίνεται απαραίτητη η χρήση πιο περίπλοκων μεθόδων με στόχο την αποτελεσματική αντιμετώπιση των παρεμβολών, της καθυστέρησης αλλά και της περιορισμένης ανατροφοδότησης στα πλαίσια του LTE-A συστήματος.

Επίσης, αναφέρεται μία μέθοδος σχετικά με την αποδοτική διαχείριση των παρεμβολών κατά την DL μετάδοση σε σταθμό βάσης κάποιας φεμτοκυψέλης (FBS) και ειδικότερα όταν παρατηρείται πυκνή στοίχιση από FBS (Femto Base Station) στο σύστημα. Τα δίκτυα φεμτοκυψελών διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο στην δομή των ασύρματων δικτύων πέμπτης γενιάς. Μέσω της φόρτωσης του συστήματος ελέγχου “πράσινης” ισχύος (Loading Aware Green Powers Control ή LAGPC) ένας σταθμός βάσης φεμτοκυψέλης (FBS) έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει έλεγχο στην ισχύ αποκλειστικά και μόνο στην περίπτωση που το πλήθος του εξοπλισμού των χρηστών της φεμτοκυψέλης (Femtocell Users' Equipment ή FUEs) που συνδέεται με άλλους σταθμούς βάσης φεμτοκυψέλης (FBSs) μέσω του αρχικού FBS, είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των FUEs που εξυπηρετούνται μέσω του αρχικού FBS.

Επιπλέον, στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου και με στόχο την αποδοτική διαχείριση των ορίων/άκρων της κυψέλης προτείνεται η εφαρμογή μιας κατευθυντικής κεραιάς. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω των διάφορων προσομοιώσεων δείχνουν ότι οι παρεμβολές που αναπτύσσονται σε δομές φεμτοκυψελών κοινόχρηστου φάσματος κατά την DL μετάδοση μεταξύ συνεπιπέδων μειώνονται σημαντικά. Αυτό βέβαια διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο στην αύξηση της απόδοσης του συστήματος κατά 32.4% και 45.9% σε συνθήκες παροχής 300 FUEs και 400 FUEs αντίστοιχα κατά μέσο όρο.

Αξίζει να αναφερθούν επιγραμματικά και ορισμένες τεχνικές για την αντιμετώπιση των παρεμβολών, καθώς επίσης και τα βασικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματά τους. Με ένα προτεινόμενο σχέδιο διαμοιρασμού των bits ανατροφοδότησης ανάμεσα στο παρεμβαλλόμενο κανάλι και στο επιθυμητό, επιτυγχάνεται η βελτίωση της απόδοσης των ποσοστών αθροίσματος σε συστήματα περιορισμένης ανατροφοδότησης μέσω των αλληπάλληλων ενημερώσεων τόσο των πληροφοριών σχετικά με κατάσταση του καναλιού όσο και με τις ακυρώσεις των κρίσιμων παρεμβολών που υπήρχαν. Δημιουργείται, όμως, η ανάγκη για συχνή ενημέρωση της κατάστασης του καναλιού στο TVC (Time Varying Channels) με στόχο την σωστή κατανόηση της απαιτούμενης ποιότητας των υπηρεσιών (QoS).

Ακόμα, μία μέθοδος για την αντιμετώπιση των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών (ICI) αναφέρεται σε ένα σύστημα το οποίο συνδυάζεται με την δυνατότητα της μετάδοσης διαμόρφωσης δέσμης (BF). Τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλύτερα από τα αντίστοιχα διάφορων μεθόδων, όπως η κοινή χρήση των διαθέσιμων πόρων και ο κοινότυπος μετριασμός παρεμβολών ICI σε ένα αλληλοεπικαλυπτόμενο βασικό σύνολο υπηρεσιών (OBSS). Θα πρέπει, όμως, να αναφερθεί το γεγονός ότι ένας σταθμός δεν έχει την δυνατότητα να εφαρμόσει μία μέθοδο διαφοροποίησης ώστε να ακυρώσει τις ICI παρεμβολές μέσω της κεραιάς μετάδοσης (TA) και των σημείων πρόσβασης (APs).

Επίσης, αναφέρεται μία υβριδική τεχνική με στόχο την κατάλληλη διαχείριση των παρεμβολών, η οποία επικεντρώνεται τόσο στις οργανωμένες μεταδόσεις πολλαπλών σημείων (CoMP) αλλά και στο δυναμικό ενισχυμένο συντονισμό των παρεμβολών μεταξύ κυψελών (eICIC). Η τεχνική αυτή παρουσιάζει το μειονέκτημα του ανίσχυρου σήματος του γειτονικού ηλεκτρονικού κόμβου B πικο-κυψέλης (Pico-cell-evolved Node B ή P-eNB) σε σχέση με την παρεμβολή μεταξύ των ηλεκτρονικών κόμβων B μακρο-κυψελών (Macro-cell-evolved Nodes B ή M-eNBs) με την ανάπτυξη του CoMP. Προτείνεται και μία αναδρομική επικεντρωμένης εκτίμησης Zero-Forcing διαμόρφωση δέσμης (Recursive Estimation-centered Zero-Forcing BF ή RE-ZFBF), η οποία συμβάλλει αποτελεσματικά στην μετρίαση των παρεμβολών τόσο εντός όσο και εκτός των κυψελών και στην ενίσχυση της ZF διαμόρφωσης δέσμης. Από την άλλη πλευρά, όμως, στην ανώτερη περιοχή του SNR, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα φάσματος, η βελτίωση της φασματικής απόδοσης μέσω του CoMP ήταν μικρή.

Τέλος, η ίδια εργασία αναφέρεται και σε μία καινοτόμα αρχή σχεδιασμού αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD) που με την εφαρμογή της παρουσιάζει σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος όταν αξιοποίησε κατάλληλα την ευρετική μέθοδο μειωμένης πολυπλοκότητας TDFLEX με στόχο τον χειρισμό της πιλοτικής μετάδοσης. Με την χρήση του TDFLEX επιτεύχθηκαν καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα αντίστοιχα της εφαρμογής του δυναμικού TD-LTE(Time Division LTE) συστήματος του 3GPP, το οποίο αποτελούσε ένα από τα εξέχοντα χαρακτηριστικά των κυψελοειδών συστημάτων πέμπτης γενιάς. Από την άλλη πλευρά, όμως, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι χρήστες μικρών κυψελών τόσο για την επικοινωνία ανερχόμενης ζεύξης όσο και για την επικοινωνία κατερχόμενης ζεύξης είναι σημαντικά με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου. Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων των συγκεκριμένων χρηστών είναι περιορισμένοι σε μεγάλο βαθμό λόγω της παρεμβολής της διαμόρφωσης δέσμης (BF) που πηγάζει από τους σταθμούς βάσης των μακρο-κυψελών (MBS).

#### **3.4.4 Συντονισμένος προγραμματισμός (Coordinated Scheduling ή CS)**

Η τεχνική της προγραμματισμένης κατανομής των διαθέσιμων πόρων στους χρήστες αυξάνει την πολυπλοκότητα, αλλά μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την χρήση μεθόδων διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων του δικτύου σύμφωνα με την προτεραιότητα των χρηστών που εντάσσονται σε αυτό. Πολλά σχήματα που εμπεριέχουν και βασίζονται στην προαναφερθείσα τεχνική παρουσιάζονται στην εργασία [22] και θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Στα πλαίσια του συντονισμένου προγραμματισμού των διαθέσιμων πόρων παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται η ακύρωση των ICI παρεμβολών με την εφαρμογή είτε του κατάλληλου συντονισμού είτε της σίγασης των χρηστών του δικτύου. Με την έννοια της σίγασης των χρηστών γίνεται αναφορά στην διατήρηση του καναλιού επικοινωνίας χωρίς κάποια ανάθεση σε κάποιον χρήστη και μαζί με την τελική εκχώρηση ενός πόρου/καναλιού αποτελούν τους δύο τρόπους, στα πλαίσια μίας κυψέλης, με τους οποίους μπορεί να αποφευχθεί η παραγωγή παρεμβολών ως προς τις γειτονικές κυψέλες.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι εφικτή με την εφαρμογή της ανεξάρτητης ανάθεσης των φορέων διαμόρφωσης δέσμης σε διαφορετικές διευθύνσεις σε κάθε ξεχωριστή κυψέλη. Είναι σημαντικό, όμως, να αναφερθεί ότι η αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών βασίζεται στον συντονισμό των φορέων διαμόρφωσης δέσμης για ξεχωριστούς σταθμούς βάσης στα πλαίσια ενός συστήματος που υποστηρίζει την συντονισμένη διαμόρφωση δέσμης. Για την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποφάσεων μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού, χρειάζονται ελάχιστες πληροφορίες από τις CS(Coordinated Scheduling) και CB(Coordinated Beamforming) τεχνικές σχετικά με την ποιότητα του καναλιού.

Όταν αναφερόμαστε στην κοινή μετάδοση πληροφορίας, τα διάφορα στατιστικά στοιχεία και οι πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας του καναλιού δεσμεύονται παράλληλα από το σύνολο των συνεργαζόμενων κυψελών και μεταφέρονται στις κεραιές μετάδοσης, στις οποίες επεξεργάζονται. Ο σωστός προγραμματισμός μπορεί θεωρητικά να χρησιμοποιείται όταν οι συνθήκες που υφίστανται στο κανάλι μετάδοσης είναι ισχυρές, στην ουσία όμως δεν επικρατούν πάντα οι κατάλληλες συνθήκες για την ιδανική πληροφόρηση σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του καναλιού. Στα διάφορα σχήματα που έχουν ερευνηθεί και προταθεί, δεν γίνεται προσπάθεια αποκλειστικά και μόνο για την αποτελεσματική μείωση των παρεμβολών αλλά και για τον όσο το δυνατόν δικαιότερο διαμοιρασμό φάσματος στους χρήστες που παρέχονται με περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του καναλιού στο οποίο βρίσκονται.

Σε ότι αφορά την προσπάθεια για την καλύτερη δυνατή μείωση των παρεμβολών αλλά και τον δικαιότερο διαμοιρασμό του φάσματος στους διάφορους χρήστες που αναφέρθηκε παραπάνω, σημειώθηκε σημαντική βελτίωση με την εφαρμογή μιας CS μεθόδου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο σφάλμα εκτίμησης καναλιού (Channel Estimation Error ή CEE) MIMO συστημάτων συντονισμένων σε ανερχόμενη ζεύξη και παρουσιάζει καλύτερη αναλογία μεταξύ φασματικής απόδοσης και δίκαιου διαμοιρασμού του φάσματος. Μία άλλη μέθοδος που βασίζεται στην βελτιστοποίηση της ισχύος αλλά και στον συντονισμένο προγραμματισμό στα διάφορα δίκτυα που έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν την τεχνολογία cloud είχε σημαντικά αποτελέσματα στην βελτίωση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με την κοινότυπη μέθοδο. Είναι μία θεωρητική προσέγγιση γραφημάτων στα πλαίσια της οποίας παρουσιάζεται μία μέθοδος που συνδυάζει τον συντονισμένο προγραμματισμό και τον έλεγχο της ισχύος. Η μέθοδος αυτή αφορά τα διάφορα μεγέθη των συστάδων, οι οποίες δημιουργούνται από ένα σύνολο κορυφών που αναφέρονται στην πιθανή συσχέτιση μεταξύ σταθμών βάσης, πληθώρας χρηστών και επιπέδων ισχύος (Power Levels ή PLs) για ειδικές ζώνες ισχύος (Power Zones ή PZs).

Μία άλλη μέθοδος που παρουσιάζεται στην ίδια εργασία αφορά τον συνδυασμό ελέγχου ισχύος, ενός αλγορίθμου διαμόρφωσης δέσμης (BF) και ενός κοινού προγραμματισμού των χρηστών ανερχόμενης ζεύξης και την εφαρμογή αυτού του συνδυασμού σε μία πληθώρα κυψελών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν την κυριαρχία της συγκεκριμένης μεθόδου σε σχέση με τον αλγόριθμο ελάχιστου σταθμισμένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Weighted Minimum Mean Square Error algorithm ή WMMSE) αλλά και με την προσέγγιση που αφορά τον μη συντονισμένο προγραμματισμό. Επίσης, ένα άλλο σχήμα συντονισμένου προγραμματισμού που βασίζεται στην ευθυγράμμιση παρεμβολών ανερχόμενης ζεύξης (Interference Alignment based Coordinated Scheduling ή IACS), συνδυάζει τον προγραμματισμό των παρεμβολών με τα θετικά χαρακτηριστικά του προγραμματισμού αναλογικής δικαιοσύνης (Proportional Fairness ή PF). Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου προτεινόμενου σχήματος είναι ιδιαίτερα κρίσιμα λόγω της επίτευξης βελτίωσης στην απόδοση ακόμα και σε περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται από ισχυρές παρεμβολές.



Επιπλέον, διατυπώνεται μία προσέγγιση που περιλαμβάνει μεθοδολογίες μικρής πολυπλοκότητας προγραμματισμού για τους συντονισμένους χρήστες σε δομές πολλαπλών κυψελών και χαρακτηρίζεται από χαμηλή πολυπλοκότητα υπολογισμών και από βελτιωμένο συντονισμό μεταξύ των κυψελών. Αφορά τα δίκτυα πολλαπλών κυψελών με παρεμβολές στην μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης και με διαμόρφωση δέσμης ZF. Με την προσέγγιση αυτή η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται σημαντικά σε σχέση με την ανάλογη προσέγγιση του προγραμματισμού αναλογικής δικαιοσύνης (PF). Με την τεχνική του περιορισμένου προγραμματισμού που αφορά τα ετερογενή δίκτυα συντονισμένων παρεμβολών παρατηρείται η επίτευξη της καλύτερης δυνατής ισοστάθμισης απόδοσης και μείωσης της ανατροφοδότησης, με την ελάχιστη δυνατή μείωση της απόδοσης του συστήματος. Αυτό το επιτυγχάνει με την χρήση της μεθόδου της αναλογικής κατανομής πόρων (Proportional Fair Resource Allocation ή PFRA), η οποία βασίζεται σε ένα σχήμα περιορισμένου προγραμματισμού.

Τέλος, μας γνωστοποιούνται ακόμα δύο μέθοδοι. Η μία από αυτές αφορά ένα σχήμα συντονισμένου προγραμματισμού παρεμβολών για δομές πολλαπλών κυψελών και εφαρμόζεται σε αστικό NLOS(Non Line-Of-Sight) κυψελοειδές σύστημα χιλιοστομετρικών κυμάτων. Αποτελεί μία σχεδιαστική προσέγγιση που βασίζεται στα στρώματα μας και παρέχει την δυνατότητα στους διάφορους γειτονικούς σταθμούς βάσης να συνεργάζονται μεταξύ τους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την έννοια της ορθογωνικότητας που αφορά την κατανομή πόρων χωροχρονικού τομέα και με την εφαρμογή της καταφέρνει να αυξήσει την δικαιοσύνη στον τρόπο εξυπηρέτησης των διάφορων χρηστών στο σύστημα και να διατηρήσει υψηλά γνωρίσματα χωρικής επαναχρησιμοποίησης του χιλιοστομετρικού κύματος. Ενώ η επόμενη μέθοδος αποτελεί μία προσέγγιση υποβέλτιστης απόδοσης χρηστών που χρησιμοποιούν από κοινού τον προγραμματισμό δέσμης και έχει ως βασικό δομικό της χαρακτηριστικό έναν γενετικό αλγόριθμο. Μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση του συστήματος συγκριτικά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εφαρμογής του συμβατικού άπληστου αλγορίθμου.

### **3.5 Τρόποι διαχείρισης των παρεμβολών στις D2D επικοινωνίες**

Στον τομέα των D2D επικοινωνιών, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που υπάρχουν και έχουν ήδη αναφερθεί είναι οι παρεμβολές που αναπτύσσονται μεταξύ των διάφορων χρηστών κινητής τηλεφωνίας και των διάφορων συσκευών που χρησιμοποιούν. Η κοινή χρήση των διαθέσιμων πόρων από ζεύγη χρηστών και συγχρόνως και από τις συσκευές που χρησιμοποιούν για να επικοινωνήσουν μέσα σε ένα δίκτυο έχει ως συνέπεια την δημιουργία παρεμβολών. Οι παρεμβολές αυτές επηρεάζουν αρνητικά την αναλογία του SINR, υποβαθμίζουν την ποιότητα της μετάδοσης θέτοντας σε κίνδυνο την επίτευξή της.



Σύμφωνα με την λειτουργία ενός D2D δικτύου μετάδοσης (π.χ uplink ή downlink), το είδος της παρεμβολής με το οποίο έρχονται αντιμέτωποι οι διάφοροι χρήστες μπορεί να υφίσταται είτε στο εσωτερικό της κυψέλης, είτε μεταξύ διαφορετικών κυψελών. Ποικίλοι τρόποι έχουν προταθεί για την διαχείριση των παρεμβολών αυτών, οι οποίοι μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες. Αυτές είναι η αποφυγή των παρεμβολών, ο συντονισμός τους και η ακύρωσή τους, οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια. Στην εργασία [63] διατυπώνονται πολλοί τρόποι που εντάσσονται στις προαναφερθείσες κατηγορίες και θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Πολλοί τρόποι και μεθοδολογίες έχουν προταθεί με γνώμονα τον συντονισμό των παρεμβολών και έχουν ως αποτέλεσμα την βελτίωση της επικοινωνίας ζώνης D2D. Σύμφωνα με την μέθοδο του κεντρικού συντονισμού των παρεμβολών (Centralized Interference Coordination ή CIC) η παρακολούθηση και καταγραφή των παρεμβολών πραγματοποιείται από τον σταθμό βάσης. Από την άλλη πλευρά η μέθοδος αποκεντρωμένου συντονισμού των παρεμβολών (Decentralized Interference Coordination ή DIC) ελαχιστοποιεί την παρατήρηση και την καταγραφή των παρεμβολών μέσω του σταθμού βάσης και εισάγει την συμβολή των D2D κόμβων στην συγκεκριμένη διαδικασία συντονισμού. Οι διάφοροι τρόποι συντονισμού των παρεμβολών αφορούν την αποδοτική διαχείριση των παρεμβολών που αναπτύσσονται ανάμεσα σε κυψελοειδείς και D2D συνδέσεις. Μερικοί από αυτούς τους τρόπους θα αναφερθούν στην συνέχεια.

Σε περιπτώσεις παρεμβολών που εντοπίζονται σε συσκευές πλήρους αμφίδρομης λειτουργίας έχει προταθεί ένα σχήμα κοινής χρήσης πόρων, το οποίο βασίζεται στον χρωματισμό γραφημάτων (Graph-Coloring-based Resource Sharing ή GCRS). Η συγκεκριμένη τεχνική έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση της χρήσης του φάσματος, στο πλαίσιο της εφαρμογής της full-duplex τεχνολογίας σε δίκτυα D2D. Με στόχο την αντιμετώπιση των παρεμβολών που αναπτύσσονται στους διάφορους χρήστες της κυψέλης, λόγω των D2D συνδέσεων που βρίσκονται σε λειτουργία, προτείνεται ένας συνδυασμός της περιορισμένης περιοχής παρεμβολών (Interference Limited Area ή ILA) και ενός αλγόριθμου για τον έλεγχο της ισχύος.

Μέσω του ILA οι συγγραφείς παρήγαγαν διάφορες μαθηματικές εκφράσεις για την μέση πιθανότητα κάλυψης που αφορά τις συνδέσεις κυψέλης και την D2D τεχνολογία, ενώ ο αλγόριθμος που αναφέρθηκε πριν αφορά την κατανομή των διαθέσιμων πόρων και εξαρτάται από τις διάφορες μεταβολές στις τεχνικές ελέγχου της ισχύος. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μία βελτιωμένη μορφή της συμβατικής μεθόδου ειδικά όταν αναφέρεται σε D2D δίκτυο υψηλής πυκνότητας και στο SINR σχετικά με τον ρυθμό δεδομένων αθροίσματος και την πιθανότητα κάλυψης.

Οι τεχνικές αποφυγής παρεμβολών αφορούν τις παρεμβολές που αναπτύσσονται μεταξύ των D2D συνδέσεων και των συνδέσεων του κυψελοειδούς συστήματος. Σε αυτόν τον άξονα προτείνεται μία μέθοδος κατανομής ραδιοπόρων για πολυαλματικές συνδέσεις D2D, η οποία βασίζεται σε μεθόδους αποφυγής των παρεμβολών στα πλαίσια LTE-A δικτύων. Η βασική ιδέα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η επέκταση των συνιστώσεων της τεχνολογίας ενεργοποίησης κλειδιού από τις μονοαλματικές στις πολυαλματικές D2D επικοινωνίες. Με την εφαρμογή των προαναφερθέντων μηχανισμών και σε συνδυασμό με τον κατάλληλο έλεγχο ισχύος παρατηρείται η επαναχρησιμοποίηση της κυψελοειδούς ζώνης από τις D2D συνδέσεις και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των παραγόμενων παρεμβολών από τις συνδέσεις αυτές όσον αφορά την κυψελοειδή επικοινωνία.

Επίσης, μία άλλη προτεινόμενη μέθοδος ονομάζεται MD2D και αναφέρεται σε ένα σύστημα πολλαπλών D2D χρηστών στα πλαίσια των ταυτόχρονων D2D μεταδόσεων. Με στόχο την ακύρωση των παρεμβολών που αναπτύσσονται σε D2D δομές πολλαπλών χρηστών, αξιοποιούνται οι κατάλληλες MIMO τεχνικές. Εφαρμόζονται οι κατάλληλοι έλεγχοι στους συνδυασμούς κεραιών με σκοπό την αντιμετώπιση των παρεμβολών που υπάρχουν μεταξύ αυτών των συνδυασμών και έπειτα εφαρμόζεται ένας bucket-base (DoF) αλγόριθμος για την αποτελεσματική διαμόρφωση της κατάλληλης χρήσης των διαθέσιμων κεραιών με κύριο στόχο την ακύρωση των παρεμβολών. Με την χρήση της μεθόδου MD2D παρατηρείται μία σημαντική βελτίωση της απόδοσης και μία ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση σε προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές αποφυγής των παρεμβολών. Με γνώμονα την ανάγκη ασφάλειας της επικοινωνίας μεταξύ των D2D χρηστών και των αντίστοιχων της κυψέλης έχει προταθεί μία μέθοδος αποφυγής παρεμβολών που ενσωματώνει και την αναγκαία ασφάλεια επικοινωνίας. Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, η τεχνική περιστροφής αστερισμού τροποποιείται κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί η αποδοτική διαχείριση των παρεμβολών. Δεν υπάρχουν οι κατάλληλες πληροφορίες σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου σε περιπτώσεις συνύπαρξης D2D χρηστών και χρηστών κυψέλης στο ίδιο περιβάλλον, ενώ όσον αφορά την αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου δεν λαμβάνονται υπόψιν πιθανά σφάλματα στην εκτίμηση του καναλιού [21].

Σημαντική βελτίωση της απόδοσης παρέχει και μία άλλη μέθοδος σε σχέση με το προτεινόμενο D2D σχήμα και μάλιστα σε μεγάλο βαθμό. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται σε έναν κατάλληλο μηχανισμό για τον έλεγχο των παρεμβολών, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με την δυνατότητα ικανοποίησης των απαιτήσεων στην μετάδοση και στον γενικότερο έλεγχο. Έπειτα, προτάθηκε ένα πλήρως κατανομημένο πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης που αφορά τις συνδέσεις D2D σε κυψελοειδή δίκτυα. Η συγκεκριμένη μέθοδος συμβάλλει στην απαγόρευση παραγωγής παρεμβολών στις περιοχές γύρω από τον D2D δέκτη [63]. Τέλος, σε ότι αφορά τις μεθόδους για την αποφυγή των παρεμβολών αξίζει να αναφερθούμε στο CRR(Coordinated Radio Resource), το οποίο σχολιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο. Η συντονισμένη διαχείριση ραδιοπόρων (CRR) αποτελεί την βασική λύση για την αποφυγή των παρεμβολών που δημιουργούνται μεταξύ

των κυψελών σε ένα κυψελοειδές δίκτυο που παρέχει την δυνατότητα D2D επικοινωνίας. Οι παρεμβολές αυτές αναπτύσσονται μεταξύ D2D και κυψελοειδών δικτύων, αλλά και μεταξύ γειτονικών D2D δικτύων ως συνέπεια της ασάφειας των ορίων του D2D δικτύου αλλά και της κινητικότητας των χρηστών [22].

Σχετικά με την τρίτη κατηγορία των τρόπων αντιμετώπισης των παρεμβολών στις D2D επικοινωνίες και συνεχίζοντας την αναφορά μας στις μεθόδους που παρουσιάζονται στα πλαίσια της εργασίας [63], θα αναφερθούμε σε μερικές μεθόδους που στόχο έχουν την ακύρωση των παρεμβολών αυτών. Αυτές οι μέθοδοι ακυρώνουν τις παρεμβολές που επικρατούν είτε στον κυψελοειδή εξοπλισμό χρήστη είτε στον αντίστοιχο D2D εξοπλισμό χρήστη με τις τεχνικές της κωδικοποίησης και της αποκωδικοποίησης και αυξάνουν καθοριστικά την απόδοση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Αρχικά, γίνεται αναφορά για έναν προτεινόμενο αλγόριθμο που βασίζεται στην στην παροχή της δυνατότητας διαδοχικών ακυρώσεων στους σταθμούς βάσης με στόχο την μείωση των παρεμβολών. Οι χρήστες, που αξιοποιούν τις δυνατότητες της D2D τεχνολογίας, υποχρεούνται να κάνουν χρήση των λειτουργιών της κυψέλης στις περιπτώσεις που βρίσκονται σε κάποια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή εντός αυτής της κυψέλης. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου προσφέρει αύξηση της μέσης απόδοσης ενός UE καθώς και μεγάλες πιθανότητες για την επιτυχή μετάδοση της όποιας πληροφορίας. Στα πλαίσια της μη-ορθογωνίας πολλαπλής πρόσβασης NOMA, στην οποία θα γίνει πιο αναλυτική αναφορά στο 4ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, προτείνεται μία βελτιωμένη προσέγγιση με βάση την NOMA και την διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών (SIC) που εμπεριέχει. Η νέα αυτή τεχνική αναφέρεται ως ακύρωση πολλαπλών παρεμβολών (Multiple Interference Cancellation ή MIC) και παρέχει βελτιωμένη απόδοση και κατανάλωση ισχύος αλλά και χαμηλότερη πολυπλοκότητα στο σύστημα σε σύγκριση με την τεχνική SIC. Επίσης, στην συγκεκριμένη παρουσίαση της μεθόδου MIC δεν αναφέρεται η χαρακτηριστική μείωση της λανθάνουσας καθυστέρησης στο σύνολο του δικτύου.

Αναφέρεται επίσης ένα διομότιμο σύστημα (P2P) με την ονομασία “Lunius”, το οποίο βασίζεται σε μία τεχνική συλλογής δεδομένων από ένα δίκτυο πολυαλματικών επικοινωνιών D2D. Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει την πολυεπίπεδη ενοποίηση των P2P πρωτοκόλλων του επιπέδου εφαρμογής τους, το πρωτόκολλο Bittorrent αλλά και ένα προηγμένο πρόγραμμα πολυαλματικής D2D δρομολόγησης που αναφέρεται ως πρωτόκολλο άπληστης παραμέτρου δρομολόγησης χωρίς κατάσταση (Greedy Parameter Stateless Routing Protocol ή GPSR), ικανοποιεί τις απαιτήσεις των διάφορων χρηστών για υψηλή ποιότητα στις υπηρεσίες που τους παρέχονται (QoS) και όλα αυτά με κύριο στόχο την διατήρηση του μηχανισμού της διαχείρισης ραδιοπόρων (Radio Resource Management ή RRM) και της βελτίωσης της συνολικής απόδοσης των πολυαλματικών επικοινωνιών. Επίσης, αυξάνει σημαντικά την απόδοση της κοινής χρήσης τοπικών P2P αρχείων αλλά και την εμπειρία του χρήστη στα πλαίσια των D2D επικοινωνιών.

Τέλος, η D2D επικοινωνία μελετήθηκε με την χρήση ενός κόμβου αναμετάδοσης προς τα εμπρός και ενός αμφίδρομου αποκωδικοποιητή. Επίσης, μελετήθηκαν και οι τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης και ακύρωσης παρεμβολών και εφαρμόστηκαν σε συμμετρικές και μη πιθανότητες που αφορούν την διακοπή της λειτουργίας της D2D επικοινωνίας. Η μελέτη αυτή αποδεικνύει ότι υπάρχουν μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και ένας από αυτούς είναι η εγκατάσταση μιας πληθώρας κεραιών στον σταθμό βάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η πιθανότητα να διακοπεί η σύνδεση στα πλαίσια της κυψελοειδούς σύνδεσης να είναι μηδέν.

### **3.6 Προτεινόμενες τεχνικές σύμφωνα με τα πρότυπα 3GPP**

Το 3GPP αποτελεί έναν όρο “ομπρέλα” που περικλείει οργανισμούς προτύπων, οι οποίοι αναλαμβάνουν να αναπτύξουν τα κατάλληλα πρωτόκολλα για τις κινητές τηλεπικοινωνίες. Επτά εθνικοί ή περιφερειακοί οργανισμοί προτύπων σχετικά με τις τηλεπικοινωνίες αποτελούν τα αρχικά μέλη της κοινοπραξίας που αναφέρεται ως 3GPP και λειτουργούν κατά κάποιο τρόπο ως οργανωτικοί εταίροι, ενώ μία ποικιλία από διάφορους άλλους οργανισμούς αποτελούν τα υπόλοιπα μέλη και αποτελούν τους εταίρους που σχετίζονται με την εκπροσώπηση της αγοράς. Η συμβολή του 3GPP εντοπίζεται σε τρεις τομείς, στα δίκτυα ραδιοπρόσβασης, στις επόψεις συστημάτων και υπηρεσιών καθώς και στο βασικό δίκτυο και στα τερματικά [64].

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρθηκαν διάφορες προτεινόμενες μέθοδοι με στόχο την αποτελεσματική διαχείριση των διάφορων παρεμβολών που αναπτύσσονται στα πλαίσια των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν ορισμένα σχήματα που έχουν προταθεί στα πλαίσια της συνεργασίας ερευνητών και βιομηχανιών με το 3GPP, αναφέρονται στην εργασία [22] και έχουν ως στόχο την μετρίαση των παρεμβολών και την ικανοποίηση των απαιτήσεων για την ανάπτυξη των μελλοντικών ασύρματων δικτύων.

Μία πρώτη μέθοδος αποτελεί η ταυτοποίηση του σταθμού βάσης στα πλαίσια των ετερογενών δικτύων που παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα. Ένας σταθμός βάσης πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις που σχετίζονται με την σωστή του ενημέρωση και την δυνατότητά του να συνδέεται με τους γειτονικούς του σταθμούς βάσης καθώς και με τους διάφορους χρήστες που αλληλεπιδρούν με αυτούς. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των ICI παρεμβολών καθώς και για την εκτέλεση διάφορων αποφάσεων σχετικά με την μεταπομπή, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν οι διάφορες πληροφορίες σχετικά με τον σταθμό βάσης που λειτουργεί ως παρεμβολέας. Όμως, η ταυτοποίηση, η μετάδοση και ο εντοπισμός του παρεμβαλλόμενου σταθμού βάσης μέσω της παρεμβολής του αέρα αποτελούν δύσκολα εγχειρήματα. Λόγω αυτού, κρίνεται αναγκαία η χρήση της ενεργοποίησης του BS, του εκ των προτέρων σχεδιασμού του σήματος και της διακύμανσης της ισχύος μετάδοσης με στόχο την μετρίαση της δυσκολίας του εγχειρήματος που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Για την σωστή και αποτελεσματική διάκριση μεταξύ του σταθμού βάσης, του σήματος παρεμβολών και του σταθμού βάσης του σήματος πληροφορίας δημιουργείται η ανάγκη σχεδιασμού ενός σήματος αναφοράς. Ο σχεδιασμός αυτός αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που πρέπει να επιλυθεί με τον κατάλληλο τρόπο καθώς επικρατεί μία συνεχής και απρόβλεπτη κατάσταση του καναλιού διάδοσης όσον αφορά το σήμα μετάδοσης. Σύμφωνα με το 3GPP δεν κρίνεται αναγκαίος ο σχεδιασμός ενός σήματος αναφοράς, από την άλλη πλευρά όμως το σήμα αναφοράς αποδιαμόρφωσης χρησιμοποιείται για τα κανάλια συχνότητας και χρόνου ανερχόμενης αλλά και κατερχόμενης ζεύξης.

Η εξοικονόμηση των διαθέσιμων, αλλά περιορισμένων πόρων, αποτελεί σημαντικό ζήτημα στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Με στόχο την επίτευξη της καλύτερης δυνατής εξοικονόμησης αυτών των πόρων κρίνεται απαραίτητη η ταυτοποίηση των καναλιών ελέγχου και σηματοδότησης στο δίκτυο. Ο διαχωρισμός και η απομόνωση του αποκλειστικού καναλιού ελέγχου (Dedicated Control Channel ή DCC) από το κοινό κανάλι ελέγχου (Common Control Channel ή CCH) αποτελούν βασικά ζητήματα που χρήζουν διευθέτησης με σκοπό την μείωση της πιθανότητας απώλειας εντοπισμού των σημάτων παρεμβολών και των σημάτων πληροφορίας. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής που προτείνει το 3GPP γίνεται σαφές ότι η καλύτερη δυνατή απόδοση του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί εφόσον η καθορισμένη μέτρηση του καναλιού αναφοράς, που αναφέρθηκε προηγουμένως, παραμείνει κάτω από την δεδομένη τιμή της αναφοράς κατωφλίου.

Η βασική μεθοδολογία στην οποία βασίζονται τα υπερ-πυκνά ετερογενή 5G δίκτυα αποτελεί η πυκνή ανάπτυξη μικρών κυψελών πάνω σε μία συνηθισμένη μακρο-κυψέλη. Ο μεγάλος αριθμός κόμβων πρόσβασης εισάγει και υψηλότερο αριθμό προκλήσεων με γνώμονα την επίτευξη σωστής διαχείρισης και περαιτέρω ανάπτυξης στο δίκτυο και για αυτό τον λόγο έχουν προταθεί ποικίλες λύσεις οπισθοζεύξης. Η τεχνική των ασύρματων οπισθοζεύξεων (backhauls), σε περιπτώσεις απαίτησης περιορισμένου εύρους επικοινωνίας, μπορεί να συνδυαστεί κατάλληλα με μία αποτελεσματική προσέγγιση που αφορά την διαμόρφωση δέσμης και τα αποτελέσματα της εφαρμογής του συγκεκριμένου συνδυασμού τεχνικών πιθανότατα να είναι ιδιαίτερα θετικά σχετικά με την αύξηση της φασματικής απόδοσης και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών που υπάρχουν.

Στα ετερογενή δίκτυα υψηλής πυκνότητας η επίδραση των γειτονικών αλλά και των πιο απομακρυσμένων παρεμβολών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα κατά την επικοινωνία αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD) και αυτό συμβαίνει γιατί το σήμα που εκπέμπεται από τους διάφορους σταθμούς βάσης (BSs) έχει την δυνατότητα να διαφοροποιηθεί μόνο όσον αφορά το ληφθέν χρονικό παράθυρο του σήματος. Για τον λόγο αυτό η πρόταση του 3GPP αναφέρεται στην εφαρμογή της τεχνικής ακύρωσης των παρεμβολών και υποστηρίζει ότι η επίδραση των παρεμβολών που προέρχονται από έναν απομακρυσμένο σταθμό βάσης είναι υπό εξέταση και αυτό συμβαίνει λόγω της επίπτωσης της κάμψης της τροπόσφαιρας στον κανάλι μετάδοσης της πληροφορίας.

Επίσης, για την βελτίωση της ιδιότητας της ανθεκτικότητας, όσον αφορά τις παρεμβολές αλλά και για την αύξηση του χωρικού κέρδους, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο ενστερνισμός του υπολογισμού κατάταξης. Με την αποδοχή της συγκεκριμένης μεθόδου επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση της ανταλλαγής μεταξύ των πολλαπλών σημάτων που λαμβάνονται από τον δέκτη μέσω του καθορισμού του πλήθους των ανεξάρτητων μεταδιδόμενων ροών πληροφορίας. Μέσω του 3GPP έχουν προταθεί ποικίλες μεθοδολογίες, οι οποίες στοχεύουν στην μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας μέσω ενός αλγορίθμου συντονισμού της κατάταξης μεταξύ των κυψελών, ο οποίος θα πρέπει να έχει επίγνωση των ζητημάτων που σχετίζονται με τις παρεμβολές. Ακόμη, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός αλγορίθμου επιλογής κατάταξης, ο οποίος θα βασίζεται σε άμεση πληροφόρηση για την κατάσταση λειτουργίας του καναλιού όσον αφορά τον πίνακα συνδιακύμανσης των παρεμβολών (Interference Covariance Matrix ή ICM).

Τέλος, στα πλαίσια του 3GPP, έχει προταθεί μία μέθοδος που αφορά την καταστολή και την ακύρωση των παρεμβολών από την πλευρά του χρήστη του συστήματος, όμως, υπάρχει ο περιορισμός της χρήσης κεραίας ενός δέκτη. Η εξασθένηση του σήματος σε ένα δίκτυο πέμπτης γενιάς 5G μπορεί να είναι ιδιαίτερος κρίσιμη λόγω της υποδοχής της υποβάθμισης των παρεμβολών πολλαπλών διαδρομών. Τώρα όσον αφορά την ανάγκη εξομάλυνσης των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών μίας κυψέλης, σύμφωνα με όσα υποστηρίζει το 3GPP σχετικά με τον δέκτη αναφοράς, ο δέκτης ακύρωσης παρεμβολών σε επίπεδο λέξης κώδικα (Code Word Level Interference Cancellation ή CW-IC) έχει την δυνατότητα να συμβάλλει αποτελεσματικά στην ικανοποίηση της συγκεκριμένης ανάγκης. Επίσης, οι τεχνικές εξομάλυνσης των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών, με τον συνδυασμό του ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος και της απόρριψης των παρεμβολών (Minimum Mean Square Error – Interference Rejection Combining ή MMSE-IRC), είναι πολύ σημαντικές τόσο για τους δέκτες βάσης όσο και για τους δέκτες αναφοράς σε περιπτώσεις πολλαπλών κυψελών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Πειραματικό μέρος-Συνεισφορά του NOMA

### 4.1 Εισαγωγή

Η μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) αποτελεί μία από τις πιο βασικές συνιστώσες για τα κυψελοειδή δίκτυα πέμπτης γενιάς. Με την χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου και του συνόλου των σχημάτων που η ίδια περιλαμβάνει επιτυγχάνεται η βελτίωση της φασματικής απόδοσης και η παροχή της μαζικής συνδεσιμότητας των διάφορων χρηστών στο σύστημα μέσω της μη-ορθογώνιας κατανομής των πόρων στο σύστημα [65]. Η εφαρμογή του NOMA στα κυψελοειδή δίκτυα προϋποθέτει υψηλή υπολογιστική ισχύ για την εφαρμογή της κατανομής της ισχύος σε πραγματικό χρόνο αλλά και για την υποστήριξη των διαδοχικών αλγορίθμων ακύρωσης των παρεμβολών.

Στα πλαίσια του NOMA γίνεται η εφαρμογή κωδικοποίησης υπέρθεσης που αφορά τον πομπό με στόχο τον διαχωρισμό των χρηστών του δικτύου, τόσο στα κανάλια κατερχόμενη ζεύξης όσο και στα αντίστοιχα κανάλια ανερχόμενη ζεύξης, μέσω της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (SIC) στον δέκτη. Με την συνεχή ανάπτυξη των 5G δικτύων και των παροχών που προσφέρουν, η υπολογιστική χωρητικότητα τόσο των διάφορων σημείων πρόσβασης όσο και των φορητών συσκευών που συνδέονται σε αυτά τα δίκτυα αναμένεται να είναι αρκετά αυξημένη για την καλύτερη δυνατή εκτέλεση των διάφορων αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στο NOMA [66].

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το σχήμα NOMA και την σύγκρισή του με το σχήμα OMA, επίσης θα αναλυθεί περαιτέρω η τεχνική της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών SIC από την πλευρά του δέκτη, θα αναφερθεί η συνεισφορά του σχήματος NOMA στην τεχνολογία MIMO κατερχόμενη ζεύξης (DL) και τέλος θα συγκρίνουμε βασικά σχήματα στα πλαίσια ενός NOMA συστήματος ανερχόμενη ζεύξης, μονής κυψέλης, η οποία περιλαμβάνει έναν σταθμό βάσης και το σύνολο των ανεξάρτητων χρηστών διαθέτει μία κεραία μετάδοσης. Αυτά τα NOMA σχήματα είναι το SCMA(Sparse Code Multiple Access), το PDMA(Pattern-Division Multiple Access) και το MUSA(Multi-User Shared Access), από τα οποία το PDMA καθώς και το MUSA εμπεριέχουν την γνωστή τεχνική SIC για την διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών. Τα αποτελέσματα των πειραματικών προσομοιώσεων που θα παρουσιαστούν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έχουν εκτελεστεί σε περιβάλλον MATLAB και πιο συγκεκριμένα στο MATLAB R2019b.

## **4.2 Μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA)**

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το NOMA είναι η δυνατότητα να διερευνά τον επιπλέον τομέα ισχύος με στόχο την παροχή υποστήριξης μεγαλύτερου αριθμού χρηστών στο σύστημα. Οι συγκεκριμένοι χρήστες αναγνωρίζονται και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι τους σε ισχυρούς και αδύναμους και με γνώμονα την δίκαιη διαχείρισή τους, η κατανομή της ισχύος στους ισχυρούς χρήστες από τον πομπό είναι μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη στους αδύναμους χρήστες. Με τον συγκεκριμένο τρόπο, προκαλείται η υπέρθεση των σημάτων από τον πομπό, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα ισχύος ενώ ο δέκτης χρησιμοποιεί την διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών (SIC) στους ισχυρούς χρήστες με στόχο την ανίχνευση της ύπαρξης πολλαπλών χρηστών. Η συγκεκριμένη μη ορθογώνια μέθοδος για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων στους χρήστες συμβάλλει στην ικανοποίηση της απαίτησης των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G) για μαζική συνδεσιμότητα, με το κόστος της ελεγχόμενης αύξησης του επιπέδου της πολυπλοκότητας στο σχεδιασμό των δεκτών λόγω της εφαρμογής της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (SIC), κατά την οποία οι ισχυροί χρήστες έχουν την δυνατότητα να πληροφορούνται εκ των προτέρων σχετικά με τα διάφορα μηνύματα άλλων χρηστών λόγω της μεθοδολογίας του συγκεκριμένου αλγορίθμου [67].

Σύμφωνα με τα σχήματα που αναφέρονται στα πλαίσια του συμβατικού OMA, οι διαθέσιμοι ραδιοπόροι, οι οποίοι είναι ορθογώνιοι στον τομέα του χρόνου, της συχνότητας και του κώδικα, κατανέμονται στους διάφορους χρήστες. Λόγω του ορθογώνιου χαρακτήρα του συγκεκριμένου τρόπου κατανομής στο OMA δεν παρατηρούνται παρεμβολές μεταξύ των διάφορων χρηστών του συστήματος, με αποτέλεσμα η ανίχνευση ενός χρήστη να αποτελεί απλό ζήτημα και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα για τον διαχωρισμό των σημάτων των διαφορετικών χρηστών. Είναι επίσης γνωστό ότι στα συμβατικά σχήματα OMA ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων ορθογώνιων πόρων καθώς επίσης και ο λεπτομερής προγραμματισμός της κατανομής τους περιορίζει το πλήθος των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν από το σύστημα.

Συγκριτικά με το OMA, τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το NOMA είναι η παροχή της δυνατότητας μαζικής συνδεσιμότητας, η μειωμένη καθυστέρηση της μετάδοσης και του κόστους σηματοδοσίας καθώς και η βελτίωση της φασματικής απόδοσης (SE) εξυπηρετώντας πολλούς χρήστες ταυτόχρονα με κοινούς πόρους συχνότητας και με την μετρίαση των παρεμβολών μέσω του SIC. Όσον αφορά την μαζική συνδεσιμότητα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το Noma με την μη-ορθογώνια κατανομή των διαθέσιμων πόρων καταρρίπτει τον περιορισμό που υπήρχε στα σχήματα του OMA σχετικά με την αναλογική σχέση μεταξύ του αριθμού των υποστηριζόμενων χρηστών του συστήματος και της ποσότητας των διαθέσιμων πόρων αλλά και του λεπτομερή προγραμματισμού τους. Με αυτόν τον τρόπο μέσω NOMA αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα.

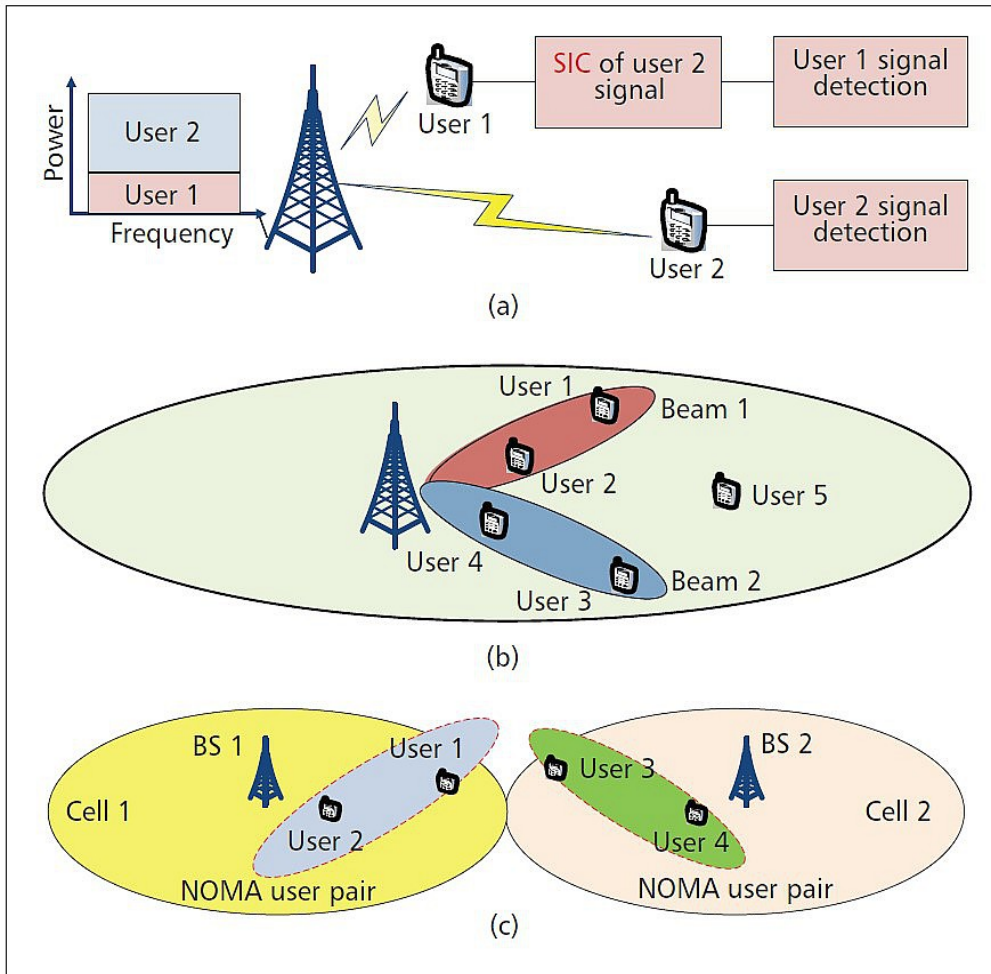


Σχετικά με την χαμηλή καθυστέρηση της μετάδοσης αλλά και του κόστους σηματοδοσίας τα συμβατικά σχήματα του OMA εμπεριέχουν την λειτουργία της μετάδοσης που βασίζεται στην χορήγηση σχετικής άδειας. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου είδους μετάδοσης ένας χρήστης αρχικά οφείλει να στείλει ένα αίτημα προγραμματισμού στον σταθμό βάσης και έπειτα σύμφωνα με το ληφθέν αυτό αίτημα ο σταθμός βάσης εκτελεί τον προγραμματισμό σχετικά με την μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης (UL) και στέλνει σχετική άδεια μέσω του καναλιού κατερχόμενης ζεύξης (DL). Το σύνολο της συγκεκριμένης διαδικασίας προφανώς έχει ως συνέπεια την σημαντική αύξηση της καθυστέρησης του χρόνου μετάδοσης των πληροφοριών αλλά και του κόστους της απαιτούμενης σηματοδοσίας. Η συνέπεια αυτή αποκτά τεράστιες διαστάσεις στα διάφορα σενάρια πολλαπλής συνδεδεσιμότητας των διάφορων χρηστών και συσκευών στα κυψελοειδή δίκτυα 5G. Στην άλλη πλευρά, ο δυναμικός προγραμματισμός δεν κρίνεται απαραίτητος σε μερικά σχήματα ανερχόμενης ζεύξης του NOMA με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της καθυστέρησης της μετάδοσης και του επίβαρου σηματοδοσίας λόγω της απαλλαγής της μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης από των σήματα για την χορήγηση άδειας. Στην συνέχεια του συγκεκριμένου κεφαλαίου θα γίνει η αναφορά στην σύγκριση της χωρητικότητας μεταξύ του OMA και NOMA σχετικά με την βελτιωμένη φασματική απόδοσης του NOMA.

Οι διάφορες μέθοδοι που αφορούν το NOMA μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σε αυτή της πολυπλεξίας του τομέα ισχύος (Power Domain Multiplexing) και της πολυπλεξίας του τομέα κώδικα (Code Domain Multiplexing). Σύμφωνα με την πολυπλεξία του τομέα ισχύος και με στόχο την επίτευξη του μέγιστου δυνατού κέρδους στην απόδοση του συστήματος παρατηρείται η εκχώρηση διαφορετικών επιπέδων ισχύος στους χρήστες σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι τους. Το συγκεκριμένο είδος της κατανομής της ισχύος παρουσιάζει επίσης σημαντικό όφελος όσον αφορά τον διαχωρισμό των διαφορετικών χρηστών, όπου επίσης εφαρμόζεται και η διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών (SIC) με στόχο την ακύρωση των παρεμβολών πολλαπλών χρηστών [65].

Το SIC αποτελεί μία πολύ γνωστή μέθοδο για την ακύρωση των παρεμβολών φυσικού επιπέδου, χρησιμοποιείται επαρκώς σε σχέση με το υπάρχον σχήμα το οποίο προκαλεί την υποβάθμιση του σήματος και η χρήση του συμβάλλει στην ταυτόχρονη λήψη δύο ή περισσότερων σημάτων. Στα πλαίσια της εφαρμογής της μεθόδου SIC, τα πιο ισχυρά σήματα αφαιρούνται από το συνδυασμένο σήμα που λαμβάνεται διαδοχικά το ένα μετά το άλλο από τον δέκτη SIC και στο τέλος της συγκεκριμένης διαδικασίας ο δέκτης SIC εξάγει το επιθυμητό σήμα, αποτελεί μία τεχνική σταδιακής εξάλειψης των παρεμβολών που αναπτύσσονται. Το SIC επίσης χρησιμοποιείται και στο CDMA με στόχο την εξουδετέρωση των παρεμβολών πολλαπλής πρόσβασης (MAI). Η πολυπλεξία του τομέα κώδικα είναι παρεμφερής με το CDMA ή το CDMA πολλαπλών φορέων (Multi-Carrier CDMA ή MC-CDMA), επομένως διαφορετικοί κωδικοί εκχωρούνται σε διαφορετικούς χρήστες και στην συνέχεια, τους εφαρμόζεται πολυπλεξία με ίδιους πόρους σε χρόνο και συχνότητα.[98] Η τεχνική του SIC εφαρμόζεται, επίσης, στο CDMA με στόχο την εξουδετέρωση των παρεμβολών πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access

Interference ή MAI) [68].



Εικόνα 11: Παρουσίαση του NOMA μέσω της πολυπλεξίας του τομέα ισχύος [65].

Στην εικόνα 11 στο (a) παρουσιάζεται το βασικό σχήμα NOMA, το οποίο διαθέτει τον δέκτη SIC κατά την κατερχόμενη ζεύξη όμως μπορεί να εφαρμοστεί και κατά την ανερχόμενη ζεύξη. Στον σταθμό βάσης που λειτουργεί ως πομπός, τα διάφορα σήματα από πληθώρα χρηστών προστίθενται γραμμικά υπό ορισμένες διαμερίσεις ισχύος με στόχο την εξισορρόπηση του ποσοστού του αθροίσματος του συνόλου των χρηστών, που υπόκεινται στην πολυπλεξία, αλλά και της δικαιοσύνης της απόδοσης μεταξύ των μεμονωμένων χρηστών. Η τεχνική του SIC εφαρμόζεται στον δέκτη με στόχο τον εντοπισμό πολλαπλών χρηστών (Multi-User Detection ή MUD) και επίσης εκτελείται στους χρήστες, οι οποίοι παρουσιάζουν σχετικά υψηλό SINR και η εκτέλεσή του αυτή να γίνεται σύμφωνα με την φθίνουσα σειρά του SINR. Το βασικό σχήμα του NOMA με την χρήση του SIC που φαίνεται στην εικόνα 11 στο (a), εκμεταλλεύεται την διαφορά που υπάρχει στο SINR μεταξύ των διάφορων χρηστών είτε αυτό συμβαίνει λόγω της φυσικής απόστασης των χρηστών από τον σταθμό βάσης είτε λόγω της ανομοιομορφίας της κατανομής ισχύος στον σταθμό βάσης που λειτουργεί ως πομπός. Μία αντίστοιχη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί κατά την ανερχόμενη ζεύξη με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας του

συστήματος ανερχόμενης ζεύξης.

Το NOMA σε συνδυασμό με την τεχνολογία πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου για πολλαπλούς χρήστες (Multiple User MIMO ή MU-MIMO), στα MIMO συστήματα, έχει την δυνατότητα να βελτιώσει περαιτέρω την φασματική απόδοση του συστήματος. Στην εικόνα 11 στο (b) απεικονίζεται ένας σταθμός βάσης με πολλαπλές κεραιές μετάδοσης πληροφορίας, με την χρήση των οποίων διαμορφώνονται διαφορετικές δέσμες στο χωρικό πεδίο και στο πλαίσιο της καθεμίας εφαρμόζεται το βασικό σχήμα του NOMA που προαναφέρθηκε. Από την πλευρά του δέκτη, η παρεμβολή μεταξύ των δεσμών μπορεί να αντιμετωπιστεί κατάλληλα με χωρικό φίλτράρισμα και έπειτα για την ακύρωση των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών μπορεί να εφαρμοστεί το SIC που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό της δέσμης. Η φασματική απόδοση μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την επέκταση του NOMA σε μαζικά MIMO συστήματα.

Στην εικόνα 11 στο (c) παρουσιάζεται ένα κυψελοειδές σύστημα που εμπεριέχει δύο κυψέλες και τέσσερις χρήστες. Στα συγκεκριμένα σχήματα NOMA, όπου το καθένα αποτελείται από δύο χρήστες, οι χρήστες 1 και 2 εξυπηρετούνται από τον σταθμό βάσης 1 της κυψέλης 1 και οι χρήστες 3 και 4 εξυπηρετούνται από τον σταθμό βάσης 2 της κυψέλης 2. Η απόδοση του δικτύου NOMA πολλαπλών κυττάρων αναμένεται να υποβαθμιστεί λόγω των ισχυρών παρεμβολών που αναπτύσσονται μεταξύ των χρηστών 1 και 3. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση κατά την οποία η κατανομή της ισχύος μετάδοσης εφαρμόζεται μεροληπτικά απέναντι στους πιο απομακρυσμένους χρήστες στο NOMA κατερχόμενης ζεύξης και αυτό έχει ως συνέπεια οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης να είναι αντιμέτωποι με ισχυρές παρεμβολές.

Η κοινή κωδικοποίηση των σημάτων των χρηστών του NOMA στις γειτονικές κυψέλες αποτελεί μία πιθανή μέθοδο σωστής διαχείρισης και μείωσης των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών, αλλά στα πλαίσια της μεθόδου αυτής γεννάται η απαίτηση της διαθεσιμότητας των δεδομένων του συνόλου των χρηστών αλλά και των πληροφοριών της κατάστασης λειτουργίας του καναλιού σε πολλούς σταθμούς βάσης και η διαδικασία εύρεσης του βέλτιστου κωδικοποιητή είναι ιδιαίτερως σημαντική. Η προκωδικοποίηση πολλαπλών χρηστών που εφαρμόζεται στο NOMA μεμονομένης κυψέλης πιθανόν να μην είναι εφαρμόσιμη το ίδιο αποτελεσματικά στο σενάριο του δικτύου NOMA λόγω της αδυναμίας του προκωδικοποιητή, όσον αφορά τις γεωγραφικά ξεχωριστές κεραιές των σταθμών βάσης, να διαμορφώσει την φυσική δέσμη.

Σχετικά με το NOMA πολυπλεξίας του τομέα κώδικα αξίζει να αναφερθούμε στο CDMA εξάπλωσης χαμηλής πυκνότητας (Low-Density signature Sequence-CDMA ή LDS-CDMA). Το συγκεκριμένο σχήμα βασίζεται στην χρήση αραιών αλληλουχιών διασποράς, σε σχέση με τις πυκνές αλληλουχίες διασποράς που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια του συμβατικού CDMA, με στόχο την μετρίαση των παρεμβολών σε κάθε πλινθίο (chip). Με

την αξιοποίηση των ακολουθιών της

εξάπλωσης χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Sequence ή LDS) στο CDMA, το LDS-CDMA έχει την δυνατότητα να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος μέσω της αποτελεσματικής μείωσης των παρεμβολών που αναπτύσσονται μεταξύ των χρηστών με τον κατάλληλο σχεδιασμό ακολουθίας εξάπλωσης. Η χρήση ενός αλγορίθμου μετάδοσης μηνυμάτων στον δέκτη που αναφέρεται ως MPA(Message Passing Algorithm) παρέχει την δυνατότητα της ανίχνευσης των πολλαπλών χρηστών (MUD) που συνδέονται στον συγκεκριμένο σταθμό βάσης [65].

### **4.3 Σύγκριση σχημάτων OMA και NOMA**

Το σχήμα NOMA, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, επιτρέπει την μετάδοση πολλαπλών δεδομένων χρήστη στον ίδιο φορέα συχνότητας και λόγω αυτού προσφέρει αυξημένη χωρητικότητα και ρυθμό μετάδοσης συγκριτικά με τα σχήματα OMA. Στον σταθμό βάσης που λειτουργεί ως πομπός, εφαρμόζεται κωδικοποίηση υπέρθεσης για την πολυπλεξία των χρηστών στον τομέα της ισχύος, ενώ κατά την λειτουργία του σταθμού βάσης ως δέκτης, εφαρμόζεται η διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών (SIC) για την εξουδετέρωση των παρεμβολών και τον αποδοτικό διαχωρισμό των μηνυμάτων του χρήστη.

#### **Μοντέλο συστήματος**

Ας υποθέσουμε ότι αναφερόμαστε σε επικοινωνία κατερχόμενη ζεύξης με έναν σταθμό βάσης και διάφορους χρήστες, πλήθους  $N$ . Έστω ότι το  $\mathbf{c}_i$  αναφέρεται στο κανάλι του σταθμού βάσης για τον  $i$ -οστό χρήστη και  $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \mathbf{c}_3, \dots, \mathbf{c}_N$  συνολικά τα κανάλια των  $N$  χρηστών. Ας υποθέσουμε ότι ο χρήστης 1 με το  $\mathbf{c}_1$  είναι ο πιο ανίσχυρος χρήστης επειδή είναι ο πιο απομακρυσμένος σε σχέση με τον σταθμό βάσης, ο χρήστης 2 βρίσκεται σχετικά κοντά στον χρήστη 1 πλησιάζοντας τον σταθμό βάσης και επομένως ο χρήστης  $N$  είναι ο πλησιέστερος στον σταθμό βάσης και ταυτόχρονα και ο ισχυρότερος χρήστης. Επομένως, οι συνθήκες των καναλιών επικοινωνίας των χρηστών αναφέρονται ως εξής  $|\mathbf{c}_1|^2 < |\mathbf{c}_2|^2 < \dots < |\mathbf{c}_N|^2$ .

#### **Μοντέλο συστήματος για το NOMA**

Ας υποθέσουμε ότι με τα  $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_N$  αναφερόμαστε στα μηνύματα που θα μεταδοθούν στους διάφορους χρήστες. Ο σταθμός βάσης θα εφαρμόσει κωδικοποίηση υπέρθεσης στα συγκεκριμένα μηνύματα και θα μεταδώσει το παρακάτω σήμα NOMA στο κανάλι επικοινωνίας: 
$$\mathbf{m}_{NOMA} = \sqrt{P} (\sqrt{a_1} \mathbf{m}_1 + \sqrt{a_2} \mathbf{m}_2 + \dots + \sqrt{a_N} \mathbf{m}_N) \quad (1)$$

όπου το  $P$  αναφέρεται στην συνολική ισχύ μετάδοσης και τα  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$  αναφέρονται στους συντελεστές κατανομής ισχύος. Από την στιγμή που τα κανάλια ταξινομούνται ως εξής

$|c_1|^2 < |c_2|^2 < \dots < |c_N|^2$  η ταξινόμηση των συντελεστών κατανομής ισχύος θα πρέπει να γίνει ως εξής  $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_N$ . Η σχέση (1) μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

$$\mathbf{m}_{NOMA} = \sqrt{P} \sum_{i=1}^N \sqrt{a_i} \mathbf{m}_i \quad (2)$$

ενώ το σήμα που έχει ληφθεί από τον χρήστη  $i$  είναι το εξής :

$$s_{i,NOMA} = \mathbf{m}_{NOMA} c_i + \mathbf{w}_i \quad (3)$$

όπου το  $\mathbf{w}_i$  αποτελεί τον πρόσθετο λευκό θόρυβο Gauss (AWGN) με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση ίση με  $\sigma^2$ . Με την αντικατάσταση του  $\mathbf{m}_{NOMA}$  από την (1), έχουμε:

$$s_{i,NOMA} = \sqrt{P} (\sqrt{a_1} \mathbf{m}_1 + \sqrt{a_2} \mathbf{m}_2 + \dots + \sqrt{a_N} \mathbf{m}_N) c_i + \mathbf{w}_i \quad (4)$$

Επομένως, σύμφωνα με την σχέση (4) μπορούμε να αναφέρουμε ότι για τον χρήστη 1 που είναι και ο πιο απομακρυσμένος από το σταθμό βάσης ότι από το  $s_{1,NOMA}$  ο όρος  $\sqrt{a_2} \mathbf{m}_2 + \dots + \sqrt{a_N} \mathbf{m}_N$  αποτελεί την παρεμβολή ενώ ο αρχικός όρος, εντός παρενθέσεως, είναι επιθυμητός και κυρίαρχος στο σήμα. Στην συνέχεια, θα πρέπει να αναφέρουμε τον γενικότερο κανόνα αποκωδικοποίησης για τον χρήστη 1, στον οποίο έχει εκχωρηθεί η πιο υψηλή ποσότητα ισχύος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κυριαρχία του μηνύματος, που προορίζεται για τον ίδιο, στο συνολικό ληφθέν σήμα. Οπότε, λόγω αυτού, εφαρμόζει απλώς αποκωδικοποίηση και αντιμετωπίζει τα μηνύματα των υπόλοιπων χρηστών ως παρεμβολή.

Επομένως, το SINR για την αποκωδικοποίηση του σήματος του χρήστη 1 εκφράζεται

από τον εξής τύπο: 
$$SINR_{1,NOMA} = \frac{a_1 P |c_1|^2}{a_2 P |c_2|^2 + a_3 P |c_3|^2 + \dots + a_N P |c_N|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

Όσον αφορά το σήμα που λαμβάνει ο χρήστης 2, ο πρώτος όρος  $\sqrt{a_1} \mathbf{m}_1$  αποτελεί το κυρίαρχο αλλά μη επιθυμητό μέρος του ληφθέντος σήματος, ο δεύτερος όρος εντός της παρένθεσης  $\sqrt{a_2} \mathbf{m}_2$  αποτελεί το επιθυμητό μέρος του σήματος, ενώ το υπόλοιπο μέρος που βρίσκεται εντός της παρένθεσης αποτελεί την παρεμβολή. Από την στιγμή που ο χρήστης 1 διαθέτει την πιο υψηλή ισχύ, το μήνυμά του θα είναι κυρίαρχο στο σήμα που λαμβάνουν όλοι οι υπόλοιποι χρήστες. Οπότε αρχικά ο χρήστης 2 οφείλει να αποκωδικοποιήσει άμεσα το μήνυμα από τον χρήστη 1 και έπειτα να εκτελέσει το SIC για να το διαχωρίσει από το  $s_{2,NOMA}$  και εφόσον η εφαρμογή του SIC είναι τέλεια, το σήμα που θα προκύψει θα είναι το εξής:

$s'_{2,NOMA} = \sqrt{P}(\sqrt{a_2}m_2 + \dots + \sqrt{a_N}m_N)c_2 + w_2$  μετά την εφαρμογή του SIC το μήνυμα  $\sqrt{a_2}m_2$  του χρήστη 2 αποτελεί τον κυρίαρχο όρο και πλέον έχει την δυνατότητα να αποκωδικοποιηθεί με άμεσο τρόπο το μήνυμά του από το  $s'_{2,NOMA}$  ενώ τα υπόλοιπα μηνύματα των διάφορων χρηστών αντιμετωπίζονται ως παρεμβολή. Επομένως, το SINR για την κωδικοποίηση του σήματος του χρήστη 2 εκφράζεται από τον εξής τύπο:

$$SINR_{2,NOMA} = \frac{a_2 P |c_2|^2}{a_3 P |c_3|^2 + \dots + a_N P |c_N|^2 + \sigma^2}$$
 παρόμοια διαδικασία μπορεί να

εφαρμοστεί και για τους υπόλοιπους χρήστες. Για παράδειγμα, για τον χρήστη 3, αρχικά θα αποκωδικοποιηθεί το μήνυμα του χρήστη 1 έπειτα θα εφαρμόσει το SIC για να το εξουδετερώσει, στην συνέχεια θα αποκωδικοποιηθεί το σήμα του χρήστη 2 και θα εφαρμόσει ξανά το SIC για να το εξουδετερώσει και στο τέλος θα αποκωδικοποιηθεί το δικό του οφέλιμο και κυρίαρχο σήμα. Επομένως, ο γενικότερος τύπος του SINR για την αποκωδικοποίηση του σήματος κάθε χρήστη  $i$  είναι ο εξής:

$$SINR_{i,NOMA} = \frac{a_i P |c_i|^2}{a_{i+1} P |c_{i+1}|^2 + \dots + a_N P |c_N|^2 + \sigma^2}$$
 ενώ το εφικτό ποσοστό για κάθε

διαφορετικό χρήστη μπορεί να εκφραστεί ως εξής:  $R_{i,NOMA} = \log(1 + SINR_{i,NOMA})$  και το ποσοστό αθροίσματος του συνόλου των χρηστών NOMA εκφράζεται από τον εξής

τύπο:  $R_{NOMA} = \sum_{i=1}^N R_{i,NOMA}$  (6)

### Μοντέλο συστήματος για το OMA

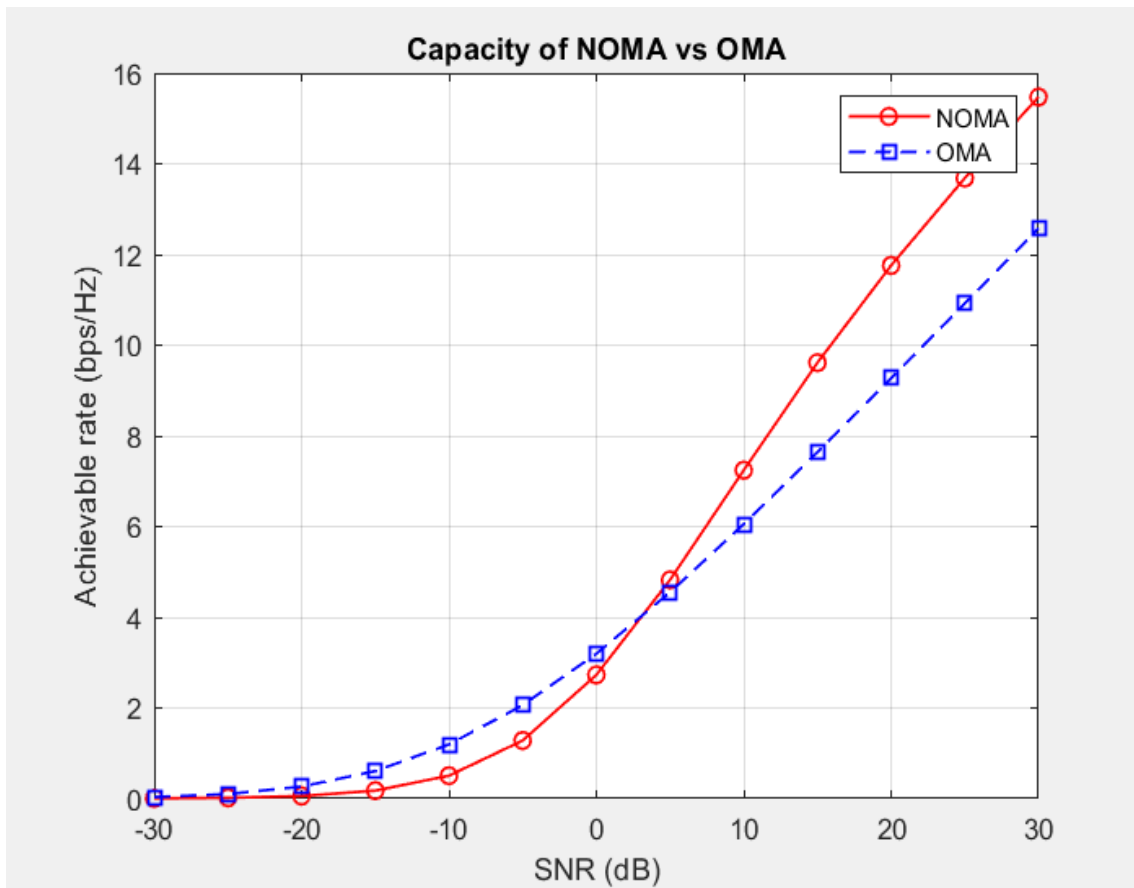
Σχετικά με την κανονική μετάδοση στα πλαίσια του OMA, θα αναφερθούμε στο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (Time-Division Multiple Access ή TDMA). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σχήμα απαιτούνται  $N$  χρονοθυρίδες για την εξυπηρέτηση των  $N$  χρηστών. Κατά την πρώτη χρονοθυρίδα πραγματοποιείται η μετάδοση του σήματος του χρήστη 1, κατά την δεύτερη χρονοθυρίδα πραγματοποιείται η μετάδοση του σήματος του χρήστη 2 και ανάλογα συνεχίζει η συγκεκριμένη διαδικασία μέχρι και τον χρήστη  $N$ . Με την παροδοχή της ίδιας διάρκειας όλων των χρονοθυρίδων, κατά την  $i$ -οστή χρονοθυρίδα μεταδίδεται το σήμα του  $i$ -οστού χρήστη. Έπειτα, το σήμα μετάδοσης εκφράζεται από τον εξής τύπο:  $m_{i,OMA} = \sqrt{P} m_i$  Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (1) και (6), παρατηρούμε ότι το NOMA παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα συγκριτικά με το OMA και αυτό αφορά την δυνατότητα της ταυτόχρονης μετάδοσης με ελεγχόμενες παρεμβολές. Αντίθετα, με το OMA οι χρήστες λαμβάνουν το σήμα χωρίς παρεμβολές. Το ληφθέν σήμα στον  $i$ -οστό χρήστη εκφράζεται ως εξής:  $s_{i,OMA} = \sqrt{P} m_i c_i + w_i$  ενώ το SNR του  $i$ -οστού χρήστη OMA εκφράζεται ως εξής:  $SNR_{i,NOMA} = \frac{P |c_i|^2}{\sigma^2}$  επίσης το εφικτό

ποσοστό του  $i$ -οστού χρήστη OMA δίνεται από τον τύπο

$$R_{i,OMA} = \frac{1}{N} \log(1 + SNR_{i,OMA})$$
 και τελικά το ποσοστό αθροίσματος του OMA

εκφράζεται από τον συγκεκριμένο τύπο:  $R_{OMA} = \sum_{i=1}^N R_{i,OMA}$ . Στο παρακάτω σχήμα

αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της σύγκρισης της χωρητικότητας των NOMA και OMA για πλήθος τριών χρηστών.



Εικόνα 12: Σύγκριση απόδοσης OMA και NOMA για τρεις χρήστες.

Στην εικόνα 12 παρατηρούμε ότι σε χαμηλό SNR το σχήμα OMA παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με το σχήμα NOMA και αυτό είναι συνέπεια των παρεμβολών που αναπτύσσονται στα πλαίσια της ταυτόχρονης μετάδοσης των σημάτων από τους χρήστες σε αντίθεση με το σχήμα OMA κατά το οποίο οι χρήστες δεν είναι αντιμέτωποι με αυτές τις παρεμβολές. Όμως, σε υψηλότερο SNR παρατηρούμε ότι το σχήμα NOMA είναι σαφώς πιο αποδοτικό σε σχέση με το σχήμα OMA προσφέροντας υψηλή χωρητικότητα και χρησιμοποιώντας ελάχιστους πόρους.

Στο συγκεκριμένο σενάριο το σχήμα TDMA του OMA για την ολοκλήρωση της μετάδοσης των σημάτων των τριών χρηστών χρειάζεται τρεις χρονοθυρίδες, σε αντίθεση με το σχήμα NOMA που χρησιμοποιεί μόλις μία χρονοθυρίδα για την ολοκλήρωση της συνολικής μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η κρίσιμη μείωση της καθυστέρησης της μετάδοσης, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα καθοριστικό για τις επόμενες τεχνολογίες επικοινωνιών [69].

#### **4.4 Συνεισφορά του σχήματος NOMA σε απλό δίκτυο MIMO**

Το σχήμα NOMA όπως έχουμε ήδη δει αποτελεί μία ευέλικτη τεχνολογία, η οποία μπορεί να συνδυαστεί με διάφορες άλλες μεθόδους με στόχο την επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης της επικοινωνίας των χρηστών ενός δικτύου καθώς επίσης και την αποτελεσματική αντιμετώπιση των παρεμβολών που αναπτύσσονται στην επικοινωνία των χρηστών με τον σταθμό βάσης του δικτύου, με την εφαρμογή της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (SIC). Σε αυτή την ενότητα θα παρατηρήσουμε πως λειτουργεί το σχήμα NOMA σε ένα απλό δίκτυο MIMO.

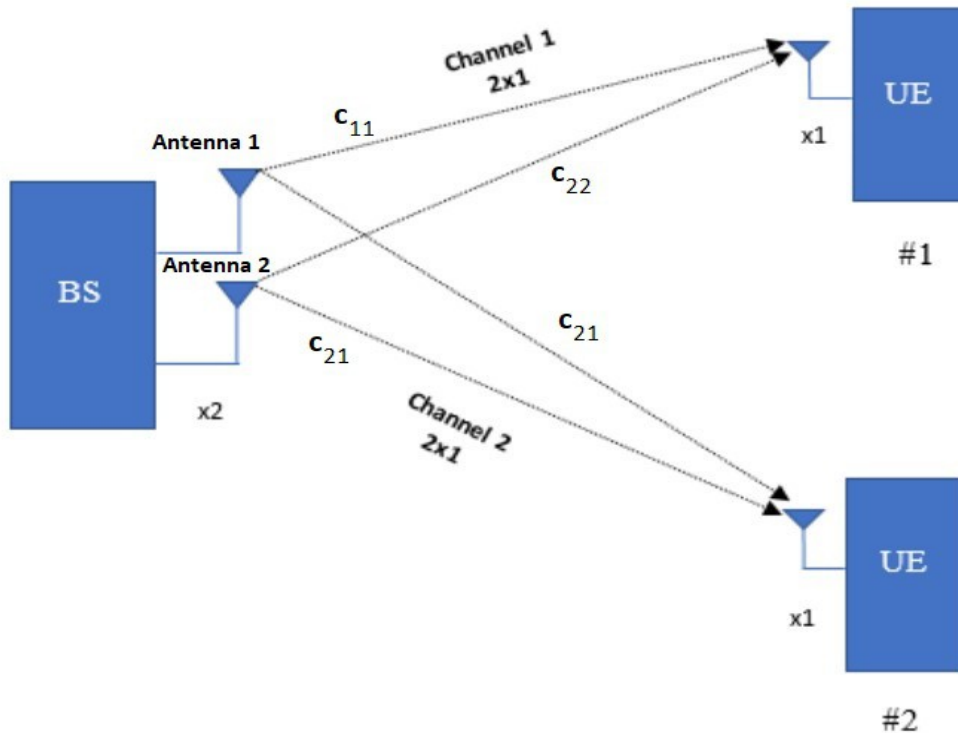
##### **Μοντέλο συστήματος**

Αρχικά, θα αναφερθούμε σε ένα σύστημα MIMO 2x1 κατερχόμενης ζεύξης όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Έστω ότι τα  $d_1$  και  $d_2$  αναφέρονται στην απόσταση του χρήστη 1 (UE#1) και του χρήστη 2 (UE#2) αντίστοιχα από τον σταθμό βάσης MIMO που λειτουργεί ως πομπός. Ας υποθέσουμε ότι ο UE1 αποτελεί τον ανίσχυρο χρήστη και ο UE2 αποτελεί τον ισχυρό, επομένως, θα ισχύει ότι η απόσταση  $d_1$  θα είναι μεγαλύτερη από την απόσταση  $d_2$ .

Το σχήμα MIMO παρέχει την δυνατότητα της αύξησης του επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης μέσω της χωρικής πολυπλεξίας αλλά και της μείωσης του λόγου δυφιακών σφαλμάτων (BER) μέσω της απολαβής διαφορισμού. Στο συγκεκριμένο σενάριο θα χρησιμοποιήσουμε το MIMO με στόχο την επίτευξη της απολαβής διαφορισμού, επομένως θα θεωρήσουμε ότι οι κεραιές 1 και 2 μεταδίδουν τις ίδιες πληροφορίες.

Έστω ότι τα  $\mathbf{m}_1$  και  $\mathbf{m}_2$  αναφέρονται στα μηνύματα/πληροφορίες που προορίζονται για τους χρήστες UE1 και UE2 αντίστοιχα και  $\mathbf{c}_{r,t}$  το κανάλι διαλείψεων Rayleigh μεταξύ της  $t$ -ης κεραιάς μετάδοσης και του  $r$ -ου δέκτη.





Εικόνα 13: Μοντέλο συστήματος MIMO(2x1)-NOMA. [πηγή: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/pdsch-throughput-for-non-codebook-based-mu-mimo-transmission-mode-9-tm9.html>]

### Μοντέλο σήματος

#### >Σήμα μετάδοσης:

Το σήμα που μεταδίδεται και από τις δύο κεραιές μετάδοσης του σταθμού βάσης εκφράζεται ως εξής:  $\mathbf{m} = \sqrt{P}(\sqrt{\alpha_1} \mathbf{m}_1 + \sqrt{\alpha_2} \mathbf{m}_2)$  όπου τα  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  αποτελούν τους συντελεστές της κατανομής ισχύος από το σχήμα NOMA και εφόσον έχει αναφερθεί ότι ο χρήστης UE1 αποτελεί τον ανίσχυρο χρήστη, τότε θα ισχύει ότι  $\alpha_1 > \alpha_2$ .

#### >Ληφθέν σήμα:

Το σήμα  $m$  μεταδίδεται παράλληλα και από τις δύο κεραιές μετάδοσης, οπότε το ληφθέν σήμα στον χρήστη UE1 εκφράζεται ως εξής:  $s_1 = m c_{11} + m c_{12} + n_1 = m(c_{11} + c_{12}) + n_1$  **(1)** και το αντίστοιχο ληφθέν σήμα στον χρήστη UE2 εκφράζεται ως εξής:  $s_2 = m c_{21} + m c_{22} + n_2 = m(c_{21} + c_{22}) + n_2$  **(2)** όπου τα  $\mathbf{n}_1$  και  $\mathbf{n}_2$  αποτελούν δείγματα πρόσθετου λευκού θορύβου Gauss (AWGN) με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση ίση με  $\sigma^2$ .

**>Αποκωδικοποίηση στον χρήστη UE1:**

Ο χρήστης UE1 οφείλει να αποκωδικοποιήσει το  $\mathbf{m}_1$  από το  $\mathbf{s}_1$ . Από την στιγμή που ο UE1 αποτελεί τον ανίσχυρο χρήστη το σήμα του  $\mathbf{m}_1$  παρουσιάζει υψηλότερη ισχύ και ισχύει ότι το  $\alpha_1$  είναι μεγαλύτερο του  $\alpha_2$ . Άρα ο όρος  $\mathbf{m}_2$  μπορεί να αντιμετωπιστεί ως παρεμβολή και ο χρήστης UE1 έχει την δυνατότητα άμεσης αποκωδικοποίησης του  $\mathbf{m}_1$  από το  $\mathbf{s}_1$ . Αντικαθιστώντας το  $\mathbf{m}$  στην εξίσωση (1) θα έχουμε την εξής:  $s_1 = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}m_1 + \sqrt{a_2}m_2)(c_{11} + c_{12}) + n_1$  και επεκτείνοντας την συγκεκριμένη σχέση έχουμε την εξής:  $s_1 = \sqrt{P}\sqrt{a_1}m_1(c_{11} + c_{12}) + \sqrt{P}\sqrt{a_2}m_2(c_{11} + c_{12}) + n_1$  από την οποία ο παράγοντας  $\sqrt{P}\sqrt{a_2}m_2(c_{11} + c_{12})$  αντιμετωπίζεται ως παρεμβολή ενώ ο παράγοντας  $\sqrt{P}\sqrt{a_1}m_1(c_{11} + c_{12})$  αποτελεί το επιθυμητό μέρος του σήματος. Το SINR για την αποκωδικοποίηση του  $\mathbf{m}_1$  από τον χρήστη UE1 εκφράζεται ως εξής:

$$SINR_1 = \frac{P a_1 |c_{11} + c_{12}|^2}{P a_2 |c_{11} + c_{12}|^2 + \sigma^2} \text{ και ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης θα είναι το εξής:}$$

$$R_1 = \log(1 + SINR_1) .$$

**>Αποκωδικοποίηση στον χρήστη UE2:**

Ο χρήστης UE2 οφείλει να αποκωδικοποιήσει το  $\mathbf{m}_2$  από το  $\mathbf{s}_2$ . Από την στιγμή που ο UE2 αποτελεί τον ισχυρό χρήστη το σήμα του  $\mathbf{m}_2$  παρουσιάζει μικρότερη ισχύ και στο  $\mathbf{s}_2$  θα κυριαρχεί η ισχύς του όρου  $\mathbf{m}_1$ . Οπότε, αρχικά ο χρήστης UE2 θα εφαρμόσει άμεση αποκωδικοποίηση στο  $\mathbf{s}_2$  για να δεσμεύσει το  $\mathbf{m}_1$ , έπειτα θα εφαρμοστεί το SIC για να αφαιρεθεί το  $\mathbf{m}_1$  και τέλος αποκωδικοποιείται το  $\mathbf{m}_2$ . Με την αντικατάσταση του  $\mathbf{m}$  στην εξίσωση (2), θα έχουμε:  $s_2 = \sqrt{P}\sqrt{a_1}m_1(c_{21} + c_{22}) + \sqrt{P}\sqrt{a_2}m_2(c_{21} + c_{22}) + n_2$  στην οποία ο πρώτος παράγοντας αποτελεί το κυρίαρχο αλλά ανεπιθύμητο μέρος του σήματος, το οποίο θα αφαιρεθεί στην συνέχεια με την εφαρμογή του SIC ενώ ο δεύτερος όρος αποτελεί το επιθυμητό μέρος του συνολικού σήματος. Το SINR στον χρήστη UE1 για την

άμεση αποκωδικοποίηση του  $\mathbf{m}_1$  εκφράζεται ως εξής:  $SINR_{12} = \frac{P a_1 |c_{21} + c_{22}|^2}{P a_2 |c_{21} + c_{22}|^2 + \sigma^2}$

μετά την εφαρμογή του SIC ο πρώτος όρος θα αφαιρεθεί και το σήμα που θα μείνει θα είναι το εξής  $s'_2 = \sqrt{P}\sqrt{a_2}m_2(c_{21} + c_{22}) + n_2$  από το οποίο ο πρώτος όρος είναι και ο επιθυμητός και πλέον το SNR του UE2 με την αποκωδικοποίηση του σήματός του

εκφράζεται ως εξής:  $SNR_2 = \frac{P a_2 |c_{21} + c_{22}|^2}{\sigma^2}$  και τέλος οι εφικτοί ρυθμοί στον χρήστη

UE2 όσον αφορά την αποκωδικοποίηση των  $\mathbf{m}_1$  και  $\mathbf{m}_2$  εκφράζονται ως εξής:  $R_{12} = \log(1 + SINR_{12})$  και  $R_2 = \log(1 + SNR_2)$

### Μοντέλο του MIMO-OMA

Με στόχο την παρουσίαση της αποτελεσματικότητας του δικτύου MIMO-NOMA θα χρησιμοποιήσουμε το δίκτυο MIMO-OMA ως σημείο αναφοράς. Ας υποθέσουμε ότι η διαδικασία της μετάδοσης των μηνυμάτων πραγματοποιείται σε δύο ίσες χρονοθυρίδες, στην πρώτη χρονοθυρίδα οι δύο κεραιές μεταδίδουν στον UE1 ενώ στην δεύτερη χρονοθυρίδα οι δύο κεραιές μεταδίδουν στον UE2. Κατά την πρώτη χρονοθυρίδα το σήμα που μεταδίδεται στον UE1 αναφέρεται ως  $\mathbf{P}\mathbf{x}_1$  και το σήμα που λαμβάνει ο UE1 εκφράζεται ως εξής:  $s_{1,OMA} = \sqrt{P}m_1(c_{11} + c_{12}) + n_1$  και κατά την δεύτερη χρονοθυρίδα το σήμα που μεταδίδεται στον UE2 αναφέρεται ως  $\mathbf{P}\mathbf{x}_2$  και το σήμα που λαμβάνει ο UE2 εκφράζεται ως εξής:  $s_{2,OMA} = \sqrt{P}m_2(c_{21} + c_{22}) + n_1$ , τα SNR στους UE1 και UE2 εκφράζονται ως εξής:  $SNR_{1,OMA} = \frac{P|c_{11} + c_{12}|^2}{\sigma^2}$  και  $SNR_{2,OMA} = \frac{P|c_{21} + c_{22}|^2}{\sigma^2}$  αντίστοιχα.

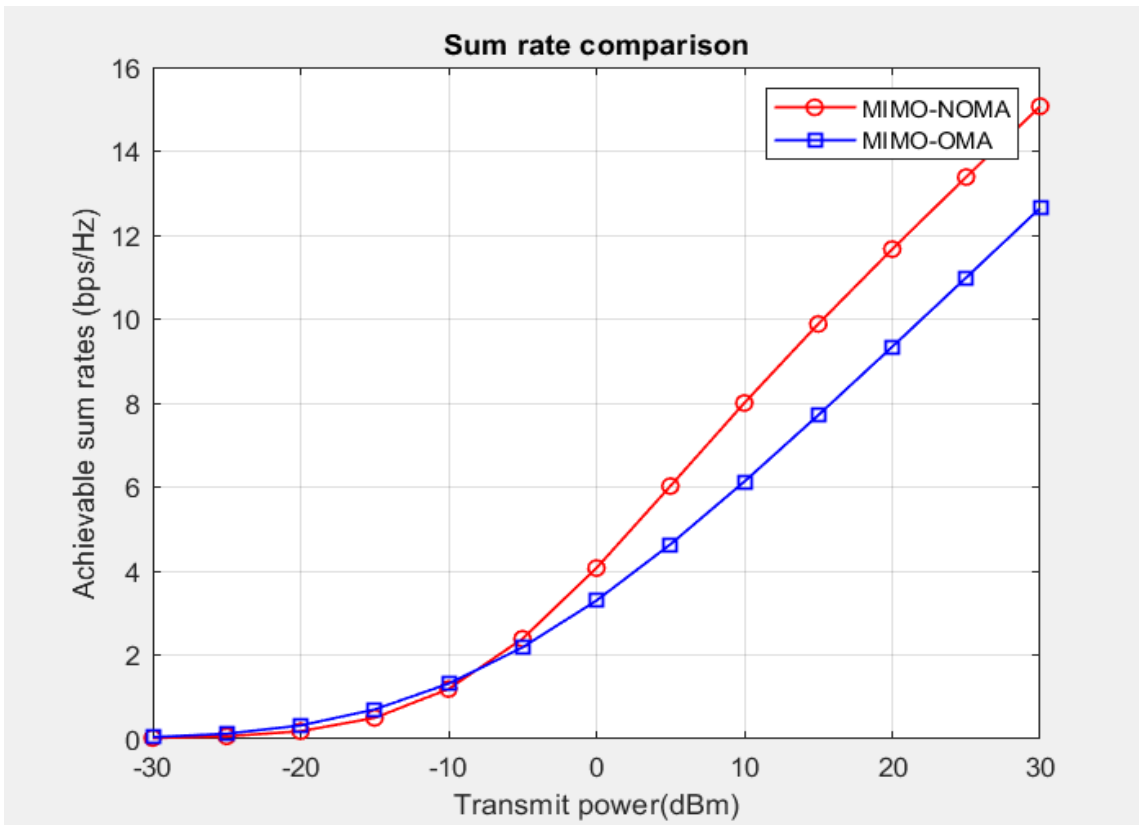
Οπότε, οι εφικτοί ρυθμοί μετάδοσης του δικτύου MIMO-OMA για τους χρήστες UE1 και UE2 εκφράζονται ως εξής:  $R_{1,OMA} = \frac{1}{2} \log(1 + SNR_{1,OMA})$  και  $R_{2,OMA} = \frac{1}{2} \log(1 + SNR_{2,OMA})$  αντίστοιχα. Χρησιμοποιούμε τον όρο  $1/2$  επειδή για την επικοινωνία του κάθε χρήστη χρησιμοποιήθηκε μόνο το ήμισυ της χρονοθυρίδας, σε σύγκριση με το δίκτυο MIMO-NOMA, κατά το οποίο γίνεται χρήση όλης της χρονοθυρίδας για την παράλληλη μετάδοση και στους δύο χρήστες.

<u>Παράμετρος</u>	<u>Τιμή</u>
Αποστάσεις χρηστών	$d_1=700m, d_2=300m$
Εκθετική απώλεια διαδρομής	4
Συντελεστές κατανομής ισχύος	$\alpha_1=0.8, \alpha_2=0.2$
Εύρος ζώνης	1 MHz

Πίνακας 1: Παράμετροι προσομοίωσης.

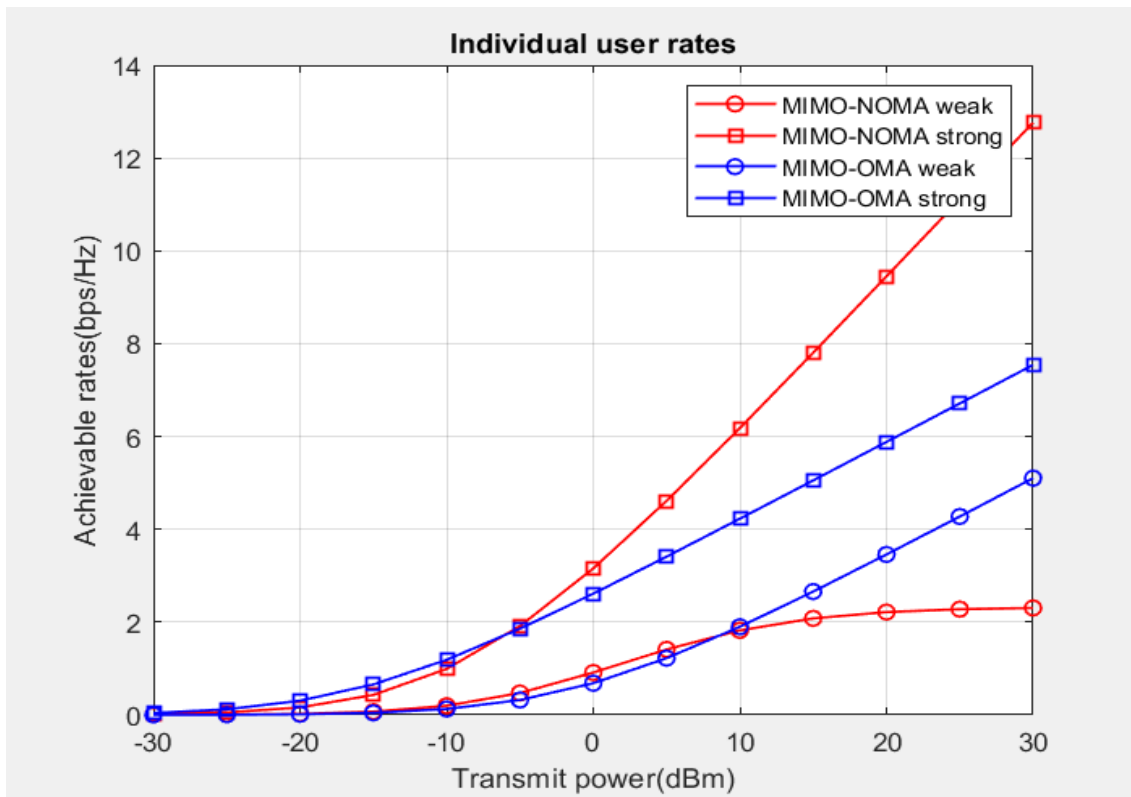
### Ρυθμός αθροίσματος:

Ο εφικτός ρυθμός αθροίσματος του δικτύου MIMO-NOMA είναι το  $\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2$  και του δικτύου MIMO-OMA είναι το  $\mathbf{R}_{1,OMA} + \mathbf{R}_{2,OMA}$ .



Εικόνα 14: Σύγκριση των ρυθμών αθροίσματος των MIMO-NOMA και MIMO-OMA.

**Ατομικοί εφικτοί ρυθμοί:**



Εικόνα 15: Σύγκριση των ατομικών ρυθμών αθροίσματος των χρηστών.

Από την εικόνα 14 της προσομοίωσης των ρυθμών αθροίσματος των δύο δικτύων παρατηρούμε ότι το MIMO-NOMA προσφέρει υψηλότερο ρυθμό αθροίσματος σε σχέση με το MIMO-OMA και αυτό συμβαίνει λόγω της παράλληλης εξυπηρέτησης των χρηστών με τον ίδιο πόρο συχνότητας.

Όσον αφορά την εικόνα 15, παρατηρούμε ότι ο ανίσχυρος χρήστης αντιμετωπίζει το ζήτημα του κορεσμού στον εφικτό ρυθμό του μετά από την ισχύ μετάδοσης της τάξεως των 10 dBm. Αυτό συμβαίνει λόγω των παρεμβολών που αντιμετωπίζει ο ανίσχυρος χρήστης και διατυπώνεται ως κορεσμός στον εφικτό ρυθμό του. Το συγκεκριμένο ζήτημα κορεσμού δεν θα αποτελεί πρόβλημα εφόσον ο απαιτούμενος ρυθμός δεδομένων του ανίσχυρου χρήστη είναι μικρότερος από το όριο κορεσμού. Αντίθετα, στο OMA δεν προκύπτει το συγκεκριμένο ζήτημα λόγω της ανυπαρξίας παρεμβολών στον ανίσχυρο χρήστη μέσω της παράλληλης μετάδοσης [70].

## 4.5 Σύγκριση σχημάτων NOMA

### 4.5.1 Κοινή πρόσβαση πολλαπλών χρηστών (Multi-User Shared Access ή MUSA)

Το σχήμα της κοινής πρόσβασης πολλαπλών χρηστών MUSA αποτελεί ένα άλλο σχήμα NOMA και αναφέρεται στην πολυπλεξία του τομέα κώδικα και θεωρείται ως μία βελτιωμένη έκδοση του σχήματος CDMA που αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου. Το συγκεκριμένο σχήμα μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτωση μέσω της χρήσης ακολουθιών εξάπλωσης χαμηλής συσχέτισης στον πομπό. Στο σχήμα MUSA χρησιμοποιούνται σύντομοι και ειδικοί κωδικοί για την μετάδοση των διαμορφωμένων συμβόλων του κάθε χρήστη και έπειτα μεταδίδονται στα ίδια μπλοκ πόρων.

Έστω ότι ένας χρήστης, από το σύνολο των χρηστών  $\mathbf{U}_M$ , μεταδίδει ένα σύμβολο κάθε φορά και υπάρχουν  $\mathbf{N}_M$  υπο-φορείς, τότε, θα υπάρχει η περίπτωση υποφόρτωσης όταν ισχύει ότι το  $\mathbf{N}_M$  είναι μεγαλύτερο του  $\mathbf{U}_M$  και περίπτωση υπερφόρτωσης όταν το  $\mathbf{N}_M$  είναι μικρότερο του  $\mathbf{U}_M$ . Επομένως, το ληφθέν σήμα στον  $\mathbf{n}$  υπο-φορέα, θα

εκφραστεί ως εξής: 
$$\mathbf{y}_n = \sum_u^{U_M} \mathbf{g}_{n,u} \mathbf{a}_{n,u} \mathbf{x}_u + \mathbf{w}_n \quad (1)$$
 όπου το  $\mathbf{g}_{n,u}$  αποτελεί το κέρδος

του καναλιού εξασθένισης του χρήστη  $\mathbf{u}$  στον  $\mathbf{n}$  υπο-φορέα, το  $\mathbf{a}_{n,u}$  είναι το στοιχείο  $\mathbf{n}$  της ακολουθίας διάδοσης του  $\mathbf{a}_u$  του χρήστη  $\mathbf{u}$  και το  $\mathbf{w}_n$  αποτελεί τον περίπλοκο θόρυβο Gaussian κατανομής, με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση ίση με  $\sigma^2$ , στον υπο-φορέα  $\mathbf{n}$ . Το ληφθέν σήμα από όλους τους υποφορείς μπορεί να συνδυαστεί ως

εξής  $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_{N_M}]^T$ , τα μεταδιδόμενα σήματα και τα στοιχεία θορύβου μπορούν να συνδυαστούν ως εξής  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, \dots, x_{U_M}]^T$  και  $\mathbf{w}=[w_1, w_2, \dots, w_{N_M}]^T$  αντίστοιχα.

Άρα το ληφθέν σήμα  $\mathbf{y}$  μπορεί να εκφραστεί ως  $\mathbf{y}=\mathbf{H}\mathbf{x}+\mathbf{w}$  (2) όπου το  $\mathbf{H}$  είναι το μητρώο ενός καναλιού με μέγεθος  $\mathbf{N}_M \times \mathbf{U}_M$  με τα στοιχεία του  $\mathbf{h}_{n,u}$  στην σειρά  $\mathbf{n}$  και στην στήλη  $\mathbf{u}$  να δίνονται ως εξής:  $\mathbf{h}_{n,u}=\mathbf{g}_{n,u}\mathbf{a}_{n,u}$ .

#### **4.5.2 Πολλαπλή πρόσβαση αραιού κώδικα (Sparse Code Multiple Access ή SCMA)**

Το σχήμα της πολλαπλής πρόσβασης αραιού κώδικα SCMA αποτελεί μία άλλη τεχνική NOMA και βασίζεται σε κωδικο-βιβλίο. Τα διάφορα σχήμα SCMA εφαρμόζουν αραιή ακολουθία εξάπλωσης με στόχο την επίτευξη υπερφόρτωσης και αποτελεί την προηγμένη έκδοση του σχήματος LDS-CDMA. Η κύρια διαφορά μεταξύ του SCMA και του LDS εντοπίζεται στο γεγονός της εφαρμογής εξάπλωσης με υπογραφή χαμηλής πυκνότητας σε συνδυασμό με διάφορες διαδικασίες διαμόρφωσης στα πλαίσια του σχήματος SCMA σε αντίθεση με το LDS στο οποίο δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο.

Στο σχήμα SCMA, οι κάθε κωδικο-λέξεις κάθε ξεχωριστού χρήστη προέρχονται από διαφορετικά κωδικο-βιβλία. Σε ένα δίκτυο SCMA ανερχόμενης ζεύξης (UL) με πλήθος κωδικο-βιβλίων  $\mathbf{U}_s$  που είναι ίσο με τον αριθμό των χρηστών, κάθε κωδικο-βιβλίο περιέχει συνολικά  $\mathbf{J}$  αραιές κωδικο-λέξεις μήκους  $\mathbf{N}_s$ . Το φαινόμενο της σπανιότητας των κωδικο-λέξεων αποτελεί την συνέπεια της ύπαρξης  $\mathbf{L}$  πλήθους μη-μηδενικών στοιχείων που αφορούν κάθε κωδικο-λέξη με μήκος  $\mathbf{N}$  ούτως ώστε να ισχύει οτι  $\mathbf{L} \ll \mathbf{N}_s$ . Όμοια με το σχήμα MUSA, η επίτευξη της υπερφόρτωσης συμβαίνει όταν το  $\mathbf{N}_s$  είναι μικρότερο από το  $\mathbf{U}_s$  ενώ η υποφόρτωση στο SCMA συμβαίνει όταν το  $\mathbf{N}_s$  είναι μεγαλύτερο από το  $\mathbf{U}_s$ . Στην περίπτωση κατά την οποία το σήμα θα μεταδοθεί από τον χρήστη  $\mathbf{u}$  με την χρήση πόρων ή υποφορέων μεγέθους  $\mathbf{N}_s$  θα εκφραστεί ως  $\mathbf{x}_u=[x_{1,u}, x_{2,u}, \dots, x_{N_s,u}]^T$  και το ληφθέν

σήμα στον υποφορέα  $\mathbf{n}$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής  $\mathbf{y}_n=\sum_u^{U_s} \mathbf{h}_{n,u}\mathbf{x}_{n,u}+\eta_n$  (3) όπου

το  $\mathbf{h}_{n,u}$  αναφέρεται στο κέρδος του καναλιού του χρήστη  $\mathbf{u}$  στον υποφορέα  $\mathbf{n}$  και το  $\eta_n$  αναφέρεται σε ένα δείγμα ενός περίπλοκου θορύβου Gaussian κατανομής, με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση ίση με  $\sigma^2$ , στον υποφορέα  $\mathbf{n}$ . Με τον συνδυασμό του ληφθέντος σήματος από το σύνολο των υποφορέων στον σταθμό βάσης σε διανυσματική μορφή

όπως  $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_{N_s}]^T$  η εξίσωση (3) μπορεί να διατυπωθεί ως

$$\mathbf{y}=\sum_u^{U_s} \mathbf{H}_u \mathbf{x}_u + \boldsymbol{\eta} \quad (4)$$

όπου  $\mathbf{H}_u=\text{diag}(\mathbf{h}_u)$  και  $\mathbf{h}_u=[h_{1,u}, h_{2,u}, \dots, h_{N_s,u}]^T$  είναι το διάνυσμα του καναλιού όσον αφορά τον χρήστη  $\mathbf{u}$  και  $\boldsymbol{\eta}$  είναι ο περίπλοκος θόρυβος Gaussian κατανομής, με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση ίση με  $\sigma^2 \mathbf{I}_{N_s}$  και το  $\mathbf{I}_{N_s}$  είναι το ταυτοτικό μητρώο μεγέθους  $N_s \times N_s$ .

Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν αραιές κωδικο-λέξεις, με την χρήση των οποίων κάθε ξεχωριστός χρήστης πρέπει να μεταδώσει τις πληροφορίες του σε ένα μικρό πλήθος υποφορέων, το σύνολο των ενεργών χρηστών θα είναι υψηλότερο από το σύνολο των υπερτιθέμενων σημάτων που αφορά τον κάθε υποφορέα. Επομένως, οι παρεμβολές που αναπτύσσονται μεταξύ του μεγάλου αριθμού χρηστών θα μειωθούν σημαντικά και σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση (3) θα διατυπωθεί ως εξής

$$y_n = \sum_{u \in \xi^{[n]}} h_{n,u} x_{n,u} + \eta_n \quad (5)$$

όπου το  $\xi^{[n]}$  είναι το σύνολο των χρηστών που διαθέτουν μη μηδενικά στοιχεία στον υποφορέα  $\mathbf{n}$  των αραιών κωδικο-λέξεών τους, το οποίο μπορεί να διατυπωθεί ως εξής

$$\xi^{[n]} = [\mathbf{u} : x_{n,u} \neq 0, u \in (1, 2, \dots, U_s)] \quad (6)$$

### **4.5.3 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης μοτίβου (Pattern-Division Multiple Access ή PDMA)**

Το σχήμα της πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης μοτίβου PDMA αποτελεί μία άλλη τεχνική NOMA που βασίζεται και αυτή σε κωδικο-βιβλίο. Το συγκεκριμένο σχήμα, με στόχο την διάκριση των διαφορετικών πληροφοριών του κάθε χρήστη, εφαρμόζει μία τεχνική αντιστοίχισης προτύπων που αφορά τους χρήστες και αναφέρεται στην αντιστοίχιση των διαμορφωμένων συμβόλων του κάθε χρήστη με διάφορα μπλοκ πόρων.

Η πολυπλεξία που πραγματοποιείται στα πλαίσια του συγκεκριμένου σχήματος μπορεί να εφαρμοστεί στον τομέα του κώδικα, στον χωρικό τομέα, στον τομέα ισχύος αλλά και σε έναν οποιονδήποτε συνδυασμό των τριών αυτών τομέων. Στην περίπτωση που η πολυπλεξία εφαρμόζεται στον τομέα του κώδικα είναι παρόμοια με την αντίστοιχη στο SCMA, στην περίπτωση του χωρικού τομέα η διαμόρφωση που αφορά το PDMA έχει την δυνατότητα να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε συνδυασμό με ένα σχήμα πολλαπλών κεραιών και τα διάφορα μοτίβα του PDMA επιλέγονται για να παρέχουν διαφορετικές

εντολές ποικιλομορφίας όσον αφορά την μετάδοση. Και τέλος στην περίπτωση της εφαρμογής της πολυπλεξίας στον τομέα ισχύος δημιουργείται η ανάγκη προσεκτικής εξέτασης της κατανομής ισχύος υπό τον συνολικό περιορισμό της ισχύος.

Με σημείο αναφοράς ένα σύστημα PDMA ανερχόμενης ζεύξης με πλήθος χρηστών ίσο με  $U_p$  και πλήθος υποφορέων ίσο με  $N_p$  η επίτευξη της υπερφόρτωσης μπορεί να συμβεί όταν το πλήθος των χρηστών  $U_p$  είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των υποφορέων  $N_p$  και η υποφόρτωση επιτυγχάνεται όταν το πλήθος των χρηστών  $U_p$  είναι μικρότερο από το πλήθος των υποφορέων  $N_p$ . Το μοντέλο του συστήματος PDMA που αφορά τον τομέα του κώδικα είναι σχεδόν παρόμοιο με το αντίστοιχο του συστήματος MUSA. Τα σύμβολα που διαμορφώνονται στον χρήστη  $u$ ,  $x_u$ , χαρτογραφούνται από τον αποκωδικοποιητή PDMA του τομέα κωδικού, είτε στους διαθέσιμους πόρους είτε στους υποφορείς που με

την σειρά τους δημιουργούν PDMA διανύσματα διαμόρφωσης  $x_u$ . Αυτά τα διανύσματα διαμόρφωσης  $x_u$  του χρήστη  $u$  δεσμεύονται με την διάδοση του συμβόλου διαμόρφωσης του συγκεκριμένου χρήστη, το  $x_u$  σύμφωνα με το PDMA μοτίβο  $d_u$  εκφράζεται ως εξής  $x_u = d_u x_u$  με  $1 \leq u \leq U_p$ . (7)

Το μοτίβο στο (7) είναι ένα δυαδικό διάνυσμα  $N_p \times 1$  που εμπεριέχει "0" και "1" και αυτό σημαίνει ότι όταν τα δεδομένα του χρήστη αντιστοιχίζονται στους αντίστοιχους υποφορείς, τα μη μηδενικά στοιχεία της ακολουθίας εξάπλωσης του χρήστη  $u$  είναι ίσα με "1". Το PDMA μοτίβο του συνόλου των  $U_p$  χρηστών που αντιστοιχίζεται στα αποτελέσματα των συνολικών  $N_p$  υποφορέων στην μήτρα του συνολικού PDMA μοτίβου εκφράζεται ως εξής  $D_{N_p, U_p} = [d_1, d_2, \dots, d_{U_p}]$  (8).

Η ακολουθία εξάπλωσης για το PDMA στο (8) είναι παρόμοια με την αντίστοιχη του συστήματος MUSA που έχει αναφερθεί στο (1) και μπορεί να εκφραστεί ως  $A_{N_M, U_M} = [a_1, a_2, \dots, a_{U_M}]$ . Το συνολικό ληφθέν σήμα από το σύνολο των υποφορέων στον σταθμό βάσης σε μορφή διανύσματος  $y = [y_1, y_2, \dots, y_{N_p}]^T$  μπορεί

να εκφραστεί ως  $y = \sum_u^{U_p} H_u x_u + \psi$  (9) όπου το  $\psi$  αναφέρεται στον θόρυβο και τις παρεμβολές στον σταθμό βάσης,  $H_u = \text{diag}(h_u)$ ,  $h_u = [h_{1,u}, h_{2,u}, \dots, h_{N_p,u}]^T$  αποτελεί το διάνυσμα του καναλιού για τον χρήστη  $u$  και το  $\psi$  αποτελεί τον θόρυβο Gaussian κατανομής, με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση ίση με  $\sigma^2 I_{N_p}$ . Η έκφραση (9) μπορεί να διατυπωθεί ως εξής  $y = H_{PDMA} x + \psi$  (10)

όπου  $x = [x_1, x_2, \dots, x_{U_p}]^T$  και  $H_{PDMA}$  αποτελεί το μητρώο ισοδύναμου PDMA



καναλιού και μπορεί να εκφραστεί ως η παραγωγή στοιχείου προς στοιχείου των δύο πινάκων και του  $H = [h_1, h_2, \dots, h_{U_p}]^T$ .

Με στόχο την απεικόνιση του PDMA μοτίβου και με την υπόθεση της ύπαρξης  $U_p=6$  χρηστών και  $N_p= 4$  υποφορέων, ο πίνακας εξάπλωσης  $D_{N_p, U_p}$  μπορεί να διατυπωθεί

$$\text{ως εξής } D_{4,6} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ επομένως το ληφθέν σήμα με την συμβολή της (9)}$$

μπορεί να εκφραστεί ως εξής (13)

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} & 0 & 0 & 0 \\ h_{2,1} & 0 & 0 & h_{2,4} & h_{2,5} & 0 \\ 0 & h_{3,2} & 0 & h_{3,4} & 0 & h_{3,6} \\ 0 & 0 & h_{4,3} & 0 & h_{4,5} & h_{4,6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{bmatrix}$$

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι και για τα τρία αυτά σχήματα NOMA τα αποτελέσματα της πολυπλεξία του συνόλου των χρηστών  $U$  έναντι του συνόλου των ορθογώνιων πόρων, δηλαδή των υποφορέων  $N$ , σε ποσοστό του συντελεστή υπερφόρτωσης εκφράζεται ως εξής:

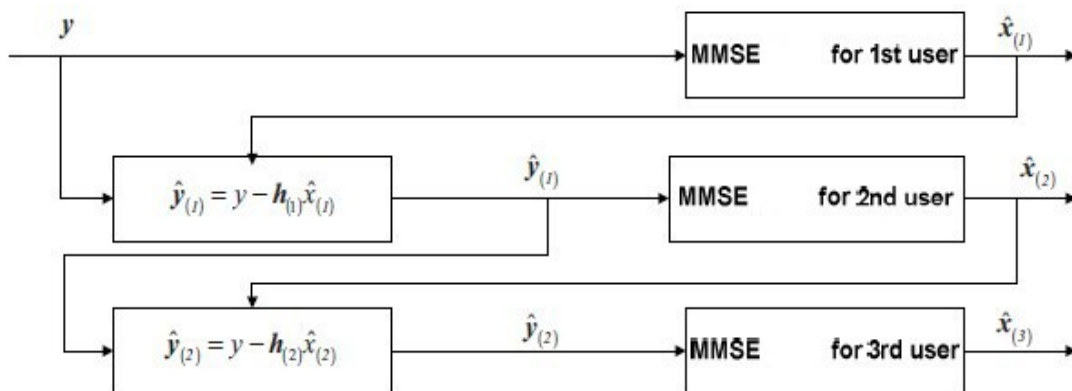
$$\text{Ποσοστό συντελεστή υπερφόρτωσης} = (U/N) * 100\% \quad (14).$$

#### 4.5.4 Τεχνικές MPA, SIC και φίλτρου MMSE

Σε κάθε ένα από τα σχήματα που προαναφέρθηκαν δημιουργείται η ανάγκη για την αποτελεσματική ανίχνευση των πολλαπλών χρηστών (MUD) με στόχο την ανάκτηση του συνόλου των δεδομένων των πολλαπλών αυτών χρηστών. Σχετικά με το σχήμα MUSA η προαναφερθείσα ανάγκη ικανοποιείται με την εφαρμογή της τεχνικής της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών (SIC). Στην περίπτωση του σχήματος SCMA, κατά το οποίο συναντάμε την αραιή δομή των κωδικο-λέξεων, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος μετάδοσης μηνυμάτων (Message Passing Algorithm ή MPA) που συμβάλλει στην αποτελεσματική ανίχνευση των δεδομένων των χρηστών λειτουργώντας ως δέκτης. Ενώ στην περίπτωση του σχήματος PDMA έχουν προταθεί είτε ο συνδυασμός του φίλτρου MMSE (Minimum Mean Square Error) και της τεχνικής SIC είτε ο αλγόριθμος MPA με στόχο την ανάκτηση των δεδομένων των διάφορων χρηστών.

Στην συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος MPA στα σχήματα SCMA και PDMA, ενώ στο σχήμα MUSCA θα εφαρμόσουμε την τεχνική SIC σε συνδυασμό με την εφαρμογή του φίλτρου MMSE για την ανάκτηση των δεδομένων των διάφορων χρηστών του δικτύου.

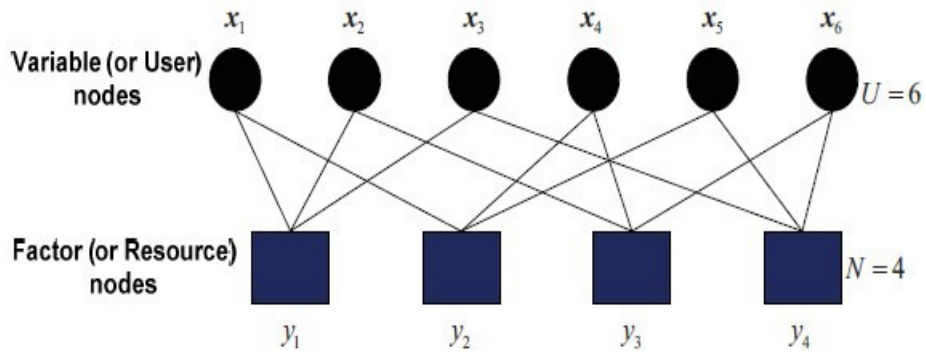
Κατά την διαδικασία της ανίχνευσης μέσω του φίλτρου MMSE το εκτιμώμενο σήμα εκφράζεται ως εξής  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}_{MMSE} \mathbf{y}$  όπου το  $\mathbf{G}_{MMSE}$  είναι το μητρώο βάρους του MMSE και εκφράζεται ως εξής  $\mathbf{G}_{MMSE} = (\sigma_n^2 \mathbf{I} + \mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{H}^H$  όπου το  $\sigma_n^2$  αποτελεί η διακύμανση του θορύβου και το  $\mathbf{I}$  αναφέρεται στο ταυτοτικό μητρώο.



Εικόνα 16: Ανίχνευση μέσω φίλτρου MMSE [71].

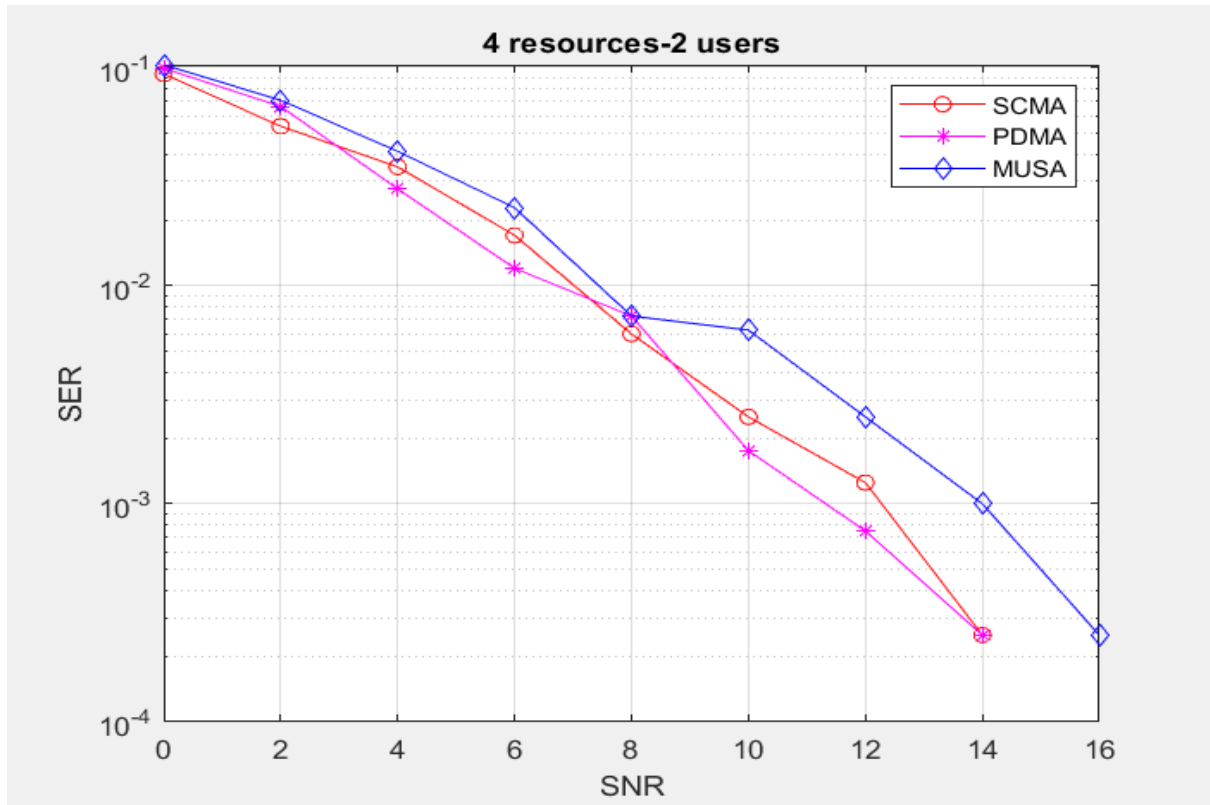
Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται ο αρχικός και κύριος υπολογισμός του λόγου του σήματος ως προς τον θόρυβο των παρεμβολών (SINR) για κάθε ξεχωριστό χρήστη και έπειτα ο χρήστης ο οποίος διαθέτει το πιο υψηλό SINR υποβάλλεται πρώτος στην διαδικασία της ανίχνευσης με την εφαρμογή του φίλτρου MMSE.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο μετάδοσης μηνυμάτων (MPA) θα αναφέρουμε ότι αποτελεί έναν επαναληπτικό αλγόριθμο αποκωδικοποίησης με στόχο την παραγοντοποίηση της καθολικής συνάρτησης πολλαπλών μεταβλητών σε μορφή πιο απλών συναρτήσεων τοπικής εμβέλειας, οι οποίες περιέχουν στοιχεία που αποτελούν υποσύνολο των μεταβλητών. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται η συγκεκριμένη διαδικασία παραγοντοποίησης με την απαιτούμενη χρήση του γραφήματος παραγόντων. Στην συγκεκριμένη εικόνα οι μεταβλητοί κόμβοι (χρήστες) αποτελούνται από κωδικο-λέξεις οι οποίες μεταδίδονται από τους χρήστες πλήθους  $U$  και τα αντίστοιχα ληφθέντα σήματα στους υποφορείς πλήθους  $N$  αναφέρονται ως κόμβοι παραγόντων (υποφορείς) [71].

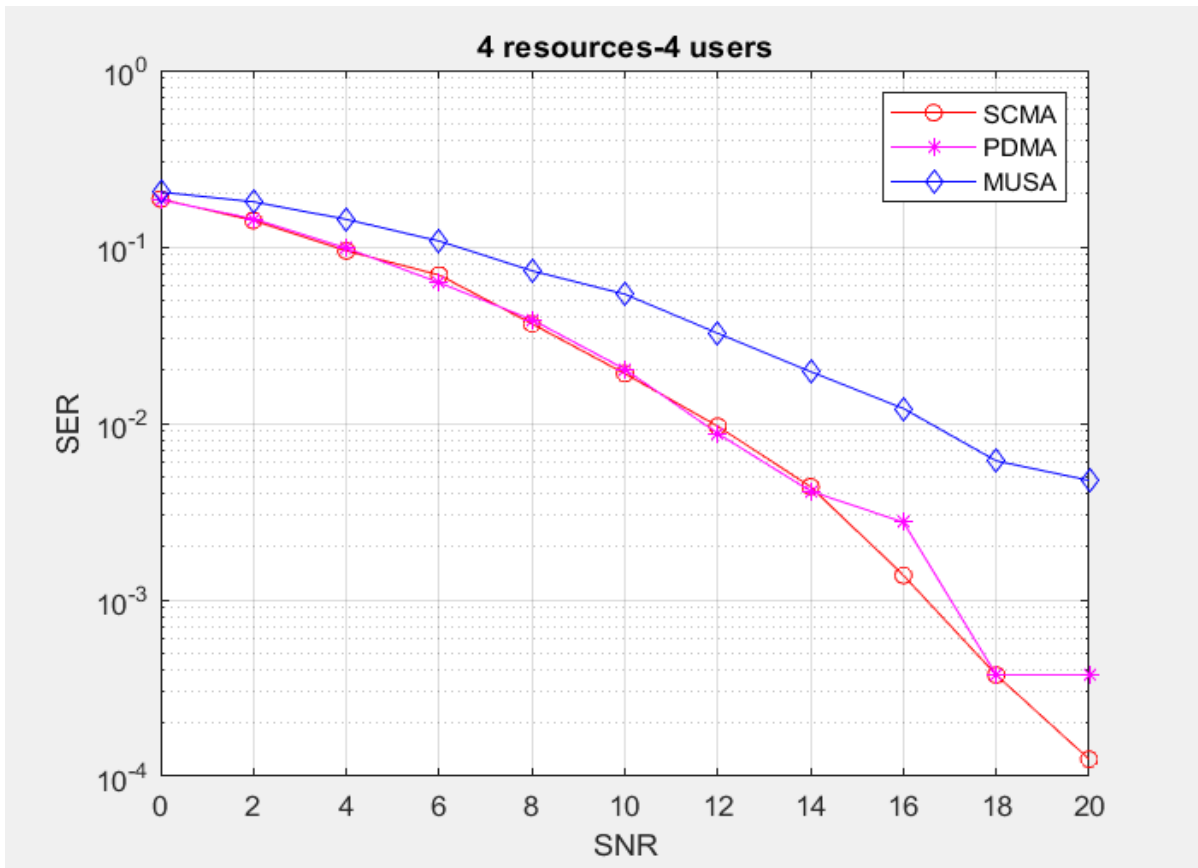


Εικόνα 17: Παρουσίαση γραφήματος παραγόντων του MPA [71].

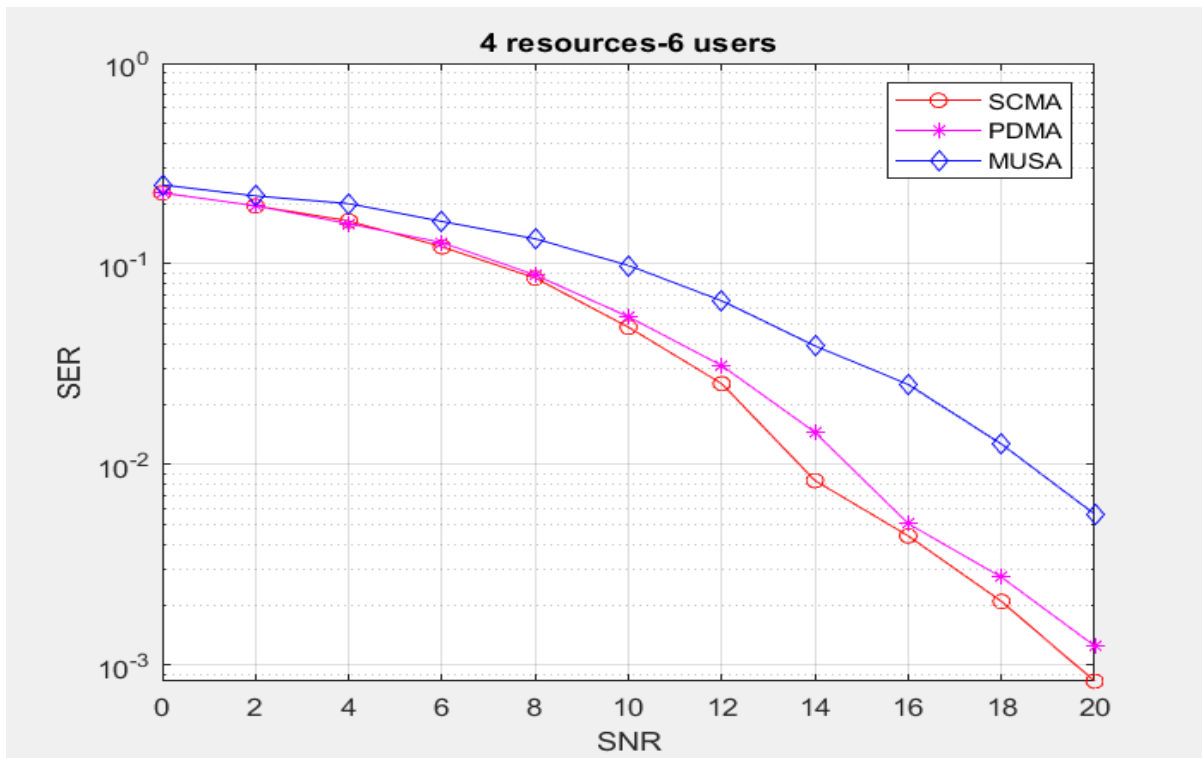
#### 4.5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης



Εικόνα 18: Αποτέλεσμα του SER ως προς το SNR για την σύγκριση των τριών σχημάτων σε σενάριο υπο-φόρτωσης.



Εικόνα 19: Αποτέλεσμα του SER ως προς το SNR για την σύγκριση των τριών σχημάτων σε σενάριο πλήρους-φόρτωσης.



Εικόνα 20: Αποτέλεσμα του SER ως προς το SNR για την σύγκριση των τριών σχημάτων σε σενάριο υπερ-φόρτωσης.

#### 4.5.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για τα συγκεκριμένα τρία σενάρια υπο-φόρτωσης, πλήρους-φόρτωσης και υπερ-φόρτωσης χρησιμοποιήθηκαν μητρώα  $\mathbf{D}_{4,2}=[11;10;01;01]$ ,  $\mathbf{D}_{4,4}=[1110;1001;0101;0010]$  και  $\mathbf{D}_{4,6}=[1111000;100110;010101;001011]$  αντίστοιχα, τα οποία έχουν προκύψει σύμφωνα με το [71]. Στην Εικόνα 18, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατά την οποία χρησιμοποιούνται 4 διαθέσιμοι πόροι για 2 χρήστες σε ένα σενάριο υπο-φόρτωσης και παρατηρούμε ότι το σχήμα PDMA, που χρησιμοποιεί το ίδιο μητρώο  $\mathbf{D}_{4,2}$  που χρησιμοποιεί και το σχήμα SCMA, παρέχει πολύ καλύτερη απόδοση σχετικά με το σχήμα MUSA και ελαφρώς καλύτερη συγκριτικά με το σχήμα SCMA, το οποίο με την σειρά του παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με το σχήμα MUSA.

Στην Εικόνα 19, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατά την οποία χρησιμοποιούνται 4 διαθέσιμοι πόροι για 4 χρήστες σε ένα σενάριο πλήρους-φόρτωσης και παρατηρούμε ότι τα σχήματα PDMA και SCMA, τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο μητρώο  $\mathbf{D}_{4,4}$ , παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα στις επιδόσεις τους και σαφώς οι συγκεκριμένες επιδόσεις είναι πολύ καλύτερες από τις αντίστοιχες του σχήματος MUSA.

Στην Εικόνα 20, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατά την οποία χρησιμοποιούνται 4 διαθέσιμοι πόροι για 6 χρήστες σε ένα σενάριο υπερ-φόρτωσης και παρατηρούμε ότι από τα σχήματα PDMA και SCMA, τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο μητρώο  $\mathbf{D}_{4,6}$ , το σχήμα SCMA παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα επίδοσης σε σύγκριση με τα άλλα δύο σχήματα, ειδικότερα σε υψηλότερο SNR. Και το σχήμα PDMA παρουσιάζεται ως πιο αποτελεσματικό συγκριτικά με το σχήμα MUSA. Αυτό συμβαίνει λόγω της σημαντικής επίδρασης της διάδοσης σφαλμάτων των δεκτών SIC στην συνολική απόδοση του συστήματος. Επίσης, από την σχέση **(14)** προκύπτει ότι:

$$\text{Ποσοστό συντελεστή υπερφόρτωσης} = (U/N)*100\% = (6/4)*100\% = 150\%.$$

Τέλος, παρατηρώντας τις τιμές του SER στις προαναφερθείσες εικόνες, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι επιδόσεις του συνόλου των τριών σχημάτων NOMA στο σενάριο της υπο-φόρτωσης είναι σαφώς καλύτερες σε σύγκριση με το σενάριο της πλήρους-φόρτωσης και της υπερ-φόρτωσης. Αυτή η διαφορά στις επιδόσεις θα μπορούσε να αποδοθεί στον μικρότερο αριθμό παρεμβολών που αναπτύσσονται στα σενάρια υπο-φόρτωσης σε σχέση με τα σενάρια πλήρους-φόρτωσης και υπερ-φόρτωσης, αλλά και στην ικανότητα των

τεχνικών MUD να ανακτούν ευκολότερα τα μεταδιδόμενα δεδομένα στα σενάρια υποφόρτωσης σε σύγκριση με την αποτελεσματικότητα τους στα σενάρια πλήρους-φόρτωσης και υπερ-φόρτωσης. Η απόδοση του SCMA παρουσιάζεται βελτιωμένη συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχήματα, ειδικά στο σενάριο της υπερ-φόρτωσης, και το γεγονός αυτό αποτελεί αποτέλεσμα της ευεργετικής επίδρασης της σχεδόν βέλτιστης διαμόρφωσης των αραιών κωδικο-λέξεων στην βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όπως αναφέραμε και στην περίληψή της, είχε ως στόχο την μελέτη και την αξιολόγηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις παρεμβολές στα πλαίσια των δικύων πέμπτης γενιάς (5G). Εκτός από τα παραπάνω, όμως, στόχος αποτέλεσε και η παρουσίαση και η αξιολόγηση των τρόπων και των μεθόδων που έχουν προταθεί για την καλύτερη δυνατή διαχείριση των παρεμβολών αυτών και την μετριάσή τους. Με γνώμονα τους συγκεκριμένους στόχους, αρχικά παρουσιάσαμε στο πρώτο κεφάλαιο μία ιστορική αναδρομή από τα δίκτυα της πρώτης γενιάς μέχρι και τα σημερινά δίκτυα πέμπτης γενιάς, καθώς επίσης και μερικές βασικές τεχνολογίες που εισάγονται στα πλαίσια των συγκεκριμένων δικτύων 5G. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφερθήκαμε σε πληθώρα διαφορετικών ειδών των παρεμβολών που αναπτύσσονται στα συγκεκριμένα δίκτυα και προχωρήσαμε στην ανάλυσή τους.

Έπειτα, στο τρίτο κεφάλαιο αναφερθήκαμε εκτενώς στις προκλήσεις που προκύπτουν λόγω των παρεμβολών που αναπτύσσονται στα κυψελοειδή ασύρματα δίκτυα πέμπτης γενιάς, στην αυξημένη πολυπλοκότητά τους και στην κρισιμότητα της αποδοτικής διαχείρισής τους. Παρουσιάσαμε διάφορους τρόπους και μεθοδολογίες που έχουν προταθεί για την επίλυση με την καλύτερη δυνατή απόδοση των διάφορων ειδών των παρεμβολών που παρουσιάστηκαν και στο δεύτερο κεφάλαιο. Στο πλαίσιο της παρουσίασης των συγκεκριμένων τρόπων αντιμετώπισης των παρεμβολών, αναφερθήκαμε τόσο στα θετικά τους χαρακτηριστικά όσο και στα χαρακτηριστικά εκείνα κατά τα οποία η αποδοτικότητα των μεθοδολογιών αυτών δεν ήταν η καλύτερη δυνατή.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύσαμε τον ρόλο που διαδραματίζει το σχήμα NOMA και ορισμένες μέθοδοι που εμπεριέχονται σε αυτό για τα δίκτυα νέας γενιάς. Αναφέραμε την τεχνική SIC, που με τον συνδυασμό της αποδοτικής κατανομής πόρων, μπορεί να διαχειριστεί το ζήτημα των παρεμβολών, συγκρίναμε την απόδοση του σχήματος NOMA με την αντίστοιχη απόδοση του σχήματος OMA τόσο σε σχέση με την χωρητικότητα που προσφέρουν στο δίκτυο όσο και στην περίπτωση απλού σεναρίου MIMO, το οποίο αποτελεί μία από τις πιο βασικές τεχνολογίες που σχετίζονται με τα επιμέρους συστατικά στοιχεία των ασύρματων κυψελοειδών δικτύων πέμπτης γενιάς. Στην ενότητα 4.5 του συγκεκριμένου κεφαλαίου παρουσιάσαμε μία συγκριτική μελέτη τριών βασικών σχημάτων NOMA, του PDMA, του SCMA και του MUSA σχήματος. Το σχήμα MUSA όπως και το PDMA εμπεριέχουν το QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) σχηματισμό, τα σχήματα του SCMA και του PDMA εμπεριέχουν τον αλγόριθμο MPA και επίσης εφαρμόζεται η τεχνική SIC στα πλαίσια του σχήματος MUSA και του PDMA για την διαδοχική ακύρωση των παρεμβολών.



Οι συγκρίσεις των τριών συστημάτων του NOMA πραγματοποιήθηκαν σε τρία διαφορετικά σενάρια, αυτό της υπο-φόρτωσης, της πλήρους-φόρτωσης και της υπερ-φόρτωσης. Παρατηρήσαμε ότι το SCMA όπως και το PDMA, στα οποία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος MPA, παρουσιάζουν παρόμοια αποδοτικότητα στο σενάριο της πλήρους φόρτωσης, το PDMA παρουσιάζεται ελαφρώς καλύτερο στο σενάριο της υπο-φόρτωσης, ενώ στο τρίτο σενάριο, αυτό της υπερ-φόρτωσης, το SCMA παρουσιάζεται καλύτερο όλων και αυτό συμβαίνει λόγω του σχεδόν βέλτιστου σχεδιασμού των αραιών κωδικο-λέξεων σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο MPA. Το σχήμα MUSA, το οποίο αναλαμβάνει να διαχειριστεί τις παρεμβολές που αναπτύσσονται μεταξύ των χρηστών κατά την μετάδοση των μηνυμάτων τους σε έναν σταθμό βάσης, δεν παρουσιάζει τα κατάλληλα αποτελέσματα για την βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου σε σχέση με τα άλλα δύο σχήματα σε κανένα σενάριο από τα διαθέσιμα τρία. Αυτό που μπορούμε να αναφέρουμε για το σχήμα MUSA είναι το γεγονός ότι στο σενάριο της υπο-φόρτωσης λειτουργεί πολύ πιο αποδοτικά σε σχέση με την εφαρμογή του στα άλλα δύο σενάρια και το ίδιο ισχύει και για τα σχήματα PDMA και SCMA. Ο σκοπός της αρχής σχεδίασης που αφορά τα μητρώα διάδοσης στο PDMA του τομέα κώδικα είναι να διευκολύνει την ακύρωση των παρεμβολών [72].

Τέλος, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της τελευταίας ενότητας συμπεραίνουμε για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης για το σύστημα NOMA, τα μη-ορθογώνια μοτίβα στο σχήμα PDMA, ο σχεδιασμός των αραιών κωδικο-βιβλίων στο σχήμα SCMA αλλά και οι ακολουθίες εξάπλωσης χαμηλού συσχετισμού στο σχήμα MUSA θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν στο άμεσο μέλλον, κάτι το οποίο είναι πολύ πιθανό με την ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς (5G). Επίσης, κρίνεται αναγκαία η ισχυροποίηση του σταθμού βάσης, κατά την λειτουργία του ως δέκτης, με χαμηλή πολυπλοκότητα για το σχήμα NOMA.

## **5.2 Μελλοντική εργασία**

Τα υπάρχοντα σχήματα NOMA που βασίζονται τόσο στον τομέα της ισχύος όσο και στον τομέα του κώδικα έχουν την δυνατότητα να βελτιώνουν την φασματική απόδοση με την χρήση της μη-ορθογώνιας κατανομής των διαθέσιμων πόρων. Επίσης, συμβάλλουν στην υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας των διάφορων χρηστών στο δίκτυο και αποτελούν πολλά υποσχόμενες μέθοδοι για τα δίκτυα 5G. Σχετικά με το περιεχόμενο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής και με στόχο την βελτίωση της απόδοσης των τεχνικών NOMA μπορούμε να αναφερθούμε στην ανάγκη επέκτασης των NOMA μεθόδων για την καλύτερη δυνατή εφαρμογή τους σε διαμορφώσεις 5G πολλαπλών κυψελών, στην ανάγκη αποδοτικότερης ομαδοποίησης των χρηστών με την θέσπιση ειδικότερων κριτηρίων επιλογής όπως το μέγεθος της παρεμβολής μεταξύ των διάφορων κυψελών και τον ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας

ειδικά σε συστήματα πολύ μεγάλου μεγέθους, όπως το MIMO.

Επίσης, κρίνεται αναγκαία η βελτίωση της αποδοτικότητας των σχημάτων NOMA που συγκρίθηκαν στην ενότητα 4.5 του τέταρτου κεφαλαίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την βελτιστοποίηση του τρόπου διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων για την πληθώρα χρηστών των δικτύων 5G καθώς επίσης και την αποδοτικότερη διαχείριση των μηνυμάτων που λαμβάνονται στους διάφορους σταθμούς βάσης κάθε κυψέλης του δικτύου. Ένας ακόμη παράγοντας που έχει την δυνατότητα μελλοντικά να βελτιωθεί με γνώμονα την βελτίωση της αποδοτικότητας του συνόλου του συστήματος αποτελεί και η βελτίωση τόσο του MPA αλγορίθμου όσο και της τεχνικής SIC, για την καλύτερη δυνατή μείωση των παρεμβολών που αναπτύσσονται.

Η μέθοδος SIC, την οποία παρουσιάσαμε στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζει σημαντικά αποτελέσματα στην διαχείριση των παρεμβολών αλλά και ιδιαίτερη πολυπλοκότητα στην εφαρμογή της, η οποία αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω κατά την χρήση της στα δίκτυα 5G με την πληθώρα χρηστών που θα πρέπει να εξυπηρετηθούν παράλληλα και αποδοτικά. Μία από τις τεχνικές που παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση και μικρότερη πολυπλοκότητα συγκριτικά με την μέθοδο SIC αποτελεί η τεχνική MIC (Multiple Interference Cancellation) και όπως αναφέρεται στην εργασία [63], η τεχνική αυτή βελτιστοποιεί την κατανάλωση της ισχύος του συνολικού συστήματος και αναφέρεται στην εφαρμογή των μεθόδων NOMA στις D2D επικοινωνίες.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. G. Andrews et al., "What Will 5G Be?," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, June 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [2] N. Panwar, S. Sharma, A.K. Singh, A survey on 5G: The next generation of mobile communication, Physical Communication (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2015.10.006>
- [3] <https://www.brainbridge.be/news/from-1g-to-5g-a-brief-history-of-the-evolution-of-mobile-standards>
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_telephony](https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_telephony)
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_mobile\\_phone\\_generations](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_mobile_phone_generations)
- [6] Ms. Lopa J. Vora Lecturer, EC Department, Government Polytechnic, Ahmedabad <https://ijmter.com/papers/volume-2/issue-10/evolution-of-mobile-generation-technology-1g-to-5g-and-review-of-5g.pdf> Scientific Journal Impact Factor (SJIF):1.711
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Mobile\\_Phone\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Mobile_Phone_System)
- [8] S. Kumar, G. Gupta and K. R. Singh, "5G: Revolution of future communication technology," 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCloT), Noida, 2015, pp. 143-147, doi: 10.1109/ICGCloT.2015.7380446.
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/GSM>
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/4G#System\\_standards](https://en.wikipedia.org/wiki/4G#System_standards)
- [11] Ganesh R. Patil et al, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.3 Issue.10 pg. 203-207 Available Online at [www.ijcsmc.com](http://www.ijcsmc.com) International Journal of Computer Science and Mobile Computing "5G WIRELESS TECHNOLOGY " , October- 2014,
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [13] M. Jaber, M. A. Imran, R. Tafazolli and A. Tukmanov, "5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey," in IEEE Access, vol. 4, pp. 1743-1766, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2556011.

- [14] E. Hossain and M. Hasan, "5G cellular: key enabling technologies and research challenges," in IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 11-21, June 2015, doi: 10.1109/MIM.2015.7108393.
- [15] <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>
- [16] <https://wirelesscoverage.com.au/5g-das-distributed-antenna-system/>
- [17] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, February 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746.
- [18] B. Bangerter, S. Talwar, R. Arefi and K. Stewart, "Networks and devices for the 5G era," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 90-96, February 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736748.
- [19] <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-beamforming-explained>
- [20] <https://blog.huawei.com/2020/08/17/the-wonders-of-5g-beamforming/>
- [21] Sarma S.S., Hazra R. (2020) Interference Mitigation Methods for D2D Communication in 5G Network. In: Mallick P., Balas V., Bhoi A., Chae GS. (eds) Cognitive Informatics and Soft Computing. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1040. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1451-7\\_54](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1451-7_54)
- [22] Qamar, F., Hindia, M.H.D.N., Dimiyati, K. *et al.* Interference management issues for the future 5G network: a review. *Telecommun Syst* 71, 627–643 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00578-4>
- [23] Vidhya R and Karthik P, "Dynamic Carrier Aggregation in 5G network scenario," 2015 International Conference on Computing and Network Communications (CoCoNet), Trivandrum, 2015, pp. 936-940, doi: 10.1109/CoCoNet.2015.7411303.
- [24] R. I. Ansari et al., "5G D2D Networks: Techniques, Challenges, and Future Prospects," in IEEE Systems Journal, vol. 12, no. 4, pp. 3970-3984, Dec. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2017.2773633.
- [25] Fantini, R., Zirwas, W., Thiele, L., Aziz, D., & Baracca, P. (2016). Coordinated multi-point transmission in 5G. In M. Dohler & T. Nakamura (Authors) & A. Osseiran, J. Monserrat, & P. Marsch (Eds.), *5G Mobile and Wireless Communications Technology* (pp. 248-276). Cambridge: Cambridge University Press.

doi:10.1017/CBO9781316417744.010

- [26] O. B. H. Belkacem, M. L. Ammari and R. Dinis, "Performance Analysis of NOMA in 5G Systems With HPA Nonlinearities," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 158327-158334, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020372.
- [27] Refik Caglar Kizilirmak (December 14th 2016). Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks, *Towards 5G Wireless Networks - A Physical Layer Perspective*, Hossein Khaleghi Bizaki, IntechOpen, DOI: 10.5772/66048. Available from: <https://www.intechopen.com/books/towards-5g-wireless-networks-a-physical-layer-perspective/non-orthogonal-multiple-access-noma-for-5g-networks>
- [28] E. Iradier et al., "Using NOMA for Enabling Broadcast/Unicast Convergence in 5G Networks," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 66, no. 2, pp. 503-514, June 2020, doi: 10.1109/TBC.2020.2981759.
- [29] Z. Zhang, X. Chai, K. Long, A. V. Vasilakos and L. Hanzo, "Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 128-137, May 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7105651.
- [30] Mohamed B. El\_Mashade, Ashraf Aboshosha, Ehab A. Hegazy. Active and Passive Self-Interference Cancellation Techniques for Full-Duplex Systems in the Next Generation (5G) of Mobile Communication Networks. *Advances in Networks*. Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 14-21. doi: 10.11648/j.net.20170501.12
- [31] C. D. Nwankwo, L. Zhang, A. Quddus, M. A. Imran and R. Tafazolli, "A Survey of Self-Interference Management Techniques for Single Frequency Full Duplex Systems," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30242-30268, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2774143.
- [32] M. Shafi et al., "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
- [33] C. Bouras, P. Ntarzanos and A. Papazois, "Cost modeling for SDN/NFV based mobile 5G networks," 2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Lisbon, 2016, pp. 56-61, doi: 10.1109/ICUMT.2016.7765232.
- [34] F. Z. Yousaf, M. Bredel, S. Schaller and F. Schneider, "NFV and SDN—Key Technology Enablers for 5G Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 11, pp. 2468-2478, Nov. 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2760418.

- [35] Z. Kaleem, Y. Li and K. Chang, "Architecture and features for 5G mobile personal cell," 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, 2015, pp. 164-166, doi: 10.1109/ICTC.2015.7354518.
- [36] Soultan, E.M., Nafea, H.B. & Zaki, F.W. Interference Management for Different 5G Cellular Network Constructions. *Wireless Pers Commun* (2020).  
<https://doi.org/10.1007/s11277-020-07805-1>
- [37] W. Nam, D. Bai, J. Lee and I. Kang, "Advanced interference management for 5G cellular networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 52-60, May 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815893.
- [38] Y.A. Adediran, H. Lasisi & O.B. Okedere | Kun Chen (Reviewing Editor) (2017) Interference management techniques in cellular networks: A review, *Cogent Engineering*, 4:1, DOI: [10.1080/23311916.2017.1294133](https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1294133)
- [39] Sheng Xu (February 6th 2018). Co-Channel Interference Cancellation for 5G Cellular Networks Deploying Radio-over-Fiber and Massive MIMO Beamforming, *Broadband Communications Networks - Recent Advances and Lessons from Practice*, Abdelfatteh Haidine and Abdelhak Aqqal, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.72727. Available from:  
<https://www.intechopen.com/books/broadband-communications-networks-recent-advances-and-lessons-from-practice/co-channel-interference-cancellation-for-5g-cellular-networks-deploying-radio-over-fiber-and-massive>
- [40] [https://en.wikipedia.org/wiki/Co-channel\\_interference](https://en.wikipedia.org/wiki/Co-channel_interference)
- [41] Alsharif, M.H., Nordin, R. Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells. *Telecommun Syst* 64, 617–637 (2017).  
<https://doi.org/10.1007/s11235-016-0195-x>
- [42] M. Simsek, M. Bennis and A. Czylik, "Dynamic Inter-Cell Interference Coordination in HetNets: A reinforcement learning approach," 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 5446-5450, doi: 10.1109/GLOCOM.2012.6503987.
- [43] Iskandar and H. Nuraini, "Inter-cell interference coordination with soft frequency reuse method for LTE network," 2016 2nd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, 2016, pp. 57-61, doi: 10.1109/ICWT.2016.7870852.
- [44] [https://en.wikipedia.org/wiki/Code-division\\_multiple\\_access](https://en.wikipedia.org/wiki/Code-division_multiple_access)

- [45] Y. Zhou, L. Liu, H. Du, L. Tian, X. Wang and J. Shi, "An overview on intercell interference management in mobile cellular networks: From 2G to 5G," 2014 IEEE International Conference on Communication Systems, Macau, 2014, pp. 217-221, doi: 10.1109/ICCS.2014.7024797.
- [46] [https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-interference-plus-noise\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-interference-plus-noise_ratio)
- [47] H. Zhang, S. Chen, X. Li, H. Ji and X. Du, "Interference management for heterogeneous networks with spectral efficiency improvement," in IEEE Wireless Communications, vol. 22, no. 2, pp. 101-107, April 2015, doi: 10.1109/MWC.2015.7096292.
- [48] [https://en.wikipedia.org/wiki/Intersymbol\\_interference](https://en.wikipedia.org/wiki/Intersymbol_interference)
- [49] A. Stamoulis, S. N. Diggavi and N. Al-Dhahir, "Inter-carrier interference in MIMO OFDM," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, no. 10, pp. 2451-2464, Oct. 2002, doi: 10.1109/TSP.2002.803347.
- [50] Mahda Noura, Rosdiadee Nordin, A survey on interference management for Device-to-Device (D2D) communication and its challenges in 5G networks, Journal of Network and Computer Applications, Volume 71, 2016, Pages 130-150, ISSN 1084-8045, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.04.021>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804516300753>)
- [51] L. Yang, W. Zhang, *Interference Coordination for 5G Cellular Networks*, SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, DOI 10.1007/978-3-319-24723-6\_1
- [52] C. Yang, H. Liu and L. Liu, "Interference Modeling and Analysis in Heterogeneous Small-Cell Networks," 2016 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT), Guangzhou, 2016, pp. 294-298, doi: 10.1109/PDCAT.2016.069.
- [53] E. Hossain, M. Rasti, H. Tabassum and A. Abdelnasser, "Evolution toward 5G multi-tier cellular wireless networks: An interference management perspective," in IEEE Wireless Communications, vol. 21, no. 3, pp. 118-127, June 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.6845056.
- [54] S. Hong et al., "Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 114-121, February 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736751.
- [55] D. Chee, J. Kim, W. Ahn, O. Jo, J. Y. Lee and D. Cho, "Design and performance evaluation of virtual cellular networks mitigating inter-cell interference in indoor environments," ICTC 2011, Seoul, Korea (South), 2011, pp. 199-203, doi:



10.1109/ICTC.2011.6082579.

- [56] B. Al-Doori and X. Liu, "Enabling NAICS to mitigate inter-cell interference in evolving wireless networks," MILCOM 2016 - 2016 IEEE Military Communications Conference, Baltimore, MD, USA, 2016, pp. 436-441, doi: 10.1109/MILCOM.2016.7795366.
- [57] Jianguo Liu, Dongyao Wang, Jiyong Pang, J. Wang and Gang Shen, "Inter-cell interference coordination based on soft frequency reuse for relay enhanced cellular network," 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 2304-2308, doi: 10.1109/PIMRC.2010.5671700.
- [58] Y. Han, Y. Chang, J. Cui and D. Yang, "A Novel Inter-Cell Interference Coordination Scheme Based on Dynamic Resource Allocation in LTE-TDD Systems," 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, Taipei, Taiwan, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2010.5494073.
- [59] M. Ezzaouia, C. Gueguen, M. Yassin, M. Ammar, X. Lagrange and A. Bouallegue, "Autonomous and dynamic inter-cell interference coordination techniques for future wireless networks," 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Rome, 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/WIMOB.2017.8115759.
- [60] S. Xu, J. Han and T. Chen, "Enhanced Inter-Cell Interference Coordination in Heterogeneous Networks for LTE-Advanced," 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, Japan, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2012.6240203.
- [61] Z. Wei, C. Masouros, K. Wong and X. Kang, "Multi-Cell Interference Exploitation: Enhancing the Power Efficiency in Cell Coordination," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 1, pp. 547-562, Jan. 2020, doi: 10.1109/TWC.2019.2946818.
- [62] Yadav, R., Tripathi, A. A Survey on Hybrid, 3D, Interference Mitigation and Secure Data Beamforming Techniques for 5G System. *Wireless Pers Commun* 114, 883–900 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07397-w>
- [63] Adnan, Mohd H.; Ahmad Zukarnain, Zuriati. 2020. "Device-To-Device Communication in 5G Environment: Issues, Solutions, and Challenges" *Symmetry* 12, no. 11: 1762. <https://doi.org/10.3390/sym12111762>
- [64] <https://en.wikipedia.org/wiki/3GPP>

- [65] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, I. Chih-lin and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, September 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263349.
- [66] Refik Caglar Kizilirmak (December 14th 2016). Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks, Towards 5G Wireless Networks - A Physical Layer Perspective, Hossein Khaleghi Bizaki, IntechOpen, DOI: 10.5772/66048. Available from: <https://www.intechopen.com/books/towards-5g-wireless-networks-a-physical-layer-perspective/non-orthogonal-multiple-access-noma-for-5g-networks>
- [67] R. Jiao, L. Dai, J. Zhang, R. MacKenzie and M. Hao, "On the Performance of NOMA-Based Cooperative Relaying Systems Over Rician Fading Channels," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 11409-11413, Dec. 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2728608.
- [68] Muhammad Hussain, Haroon Rasheed, "Nonorthogonal Multiple Access for Next-Generation Mobile Networks: A Technical Aspect for Research Direction", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, Article ID 8845371, 17 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8845371>
- [69] Mahmoud Aldababsa, Mesut Toka, Selahattin Gökçeli, Güneş Karabulut Kurt, Oğuz Kucur, "A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 9713450, 24 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9713450>
- [70] Z. Ding, F. Adachi and H. V. Poor, "The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 537-552, Jan. 2016, doi: 10.1109/TWC.2015.2475746.
- [71] O. O. Oyerinde, "Comparative Study of Overloaded and Underloaded NOMA Schemes with Two Multiuser Detectors," 2019 IEEE 2nd Wireless Africa Conference (WAC), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/AFRICA.2019.8843410.
- [72] B. Wang, K. Wang, Z. Lu, T. Xie and J. Quan, "Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G," 2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/BMSB.2015.7177186.

## ΚΩΔΙΚΕΣ MATLAB ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Ο εκτελέσιμος κώδικας Matlab για την παραγωγή της εικόνας 12 στην ενότητα 4.3 σχετικά με την σύγκριση της απόδοσης των NOMA και OMA στην περίπτωση τριών χρηστών, είναι ο ακόλουθος:

```
clc; clear variables; close all;

%% To euros tou SNR
Pt = -114:5:-54; % se dB
pt = db2pow(Pt); % se grammikh klimaka

N = 10^4;

%% Apostash tw n xrhstwn
apostash1 = 5;
apostash2 = 3;
apostash3 = 2;

%% Ekthetikh apwleia diadromhs
eta = 4;

%% Suntelestes dialeipsewn tou kanaliou Rayleigh gia olous tous xrhstes
c1 = (sqrt(apostash1^-eta))*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);
c2 = (sqrt(apostash2^-eta))*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);
c3 = (sqrt(apostash3^-eta))*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);

%% Kerdos tou kanaliou
kerdos1 = (abs(c1)).^2;
kerdos2 = (abs(c2)).^2;
kerdos3 = (abs(c3)).^2;

BW = 10^9; % euros zwnhs

%% Isxus thoruvou
No = -174+10*log10(BW); % se dB
no = (10^-3)*db2pow(No); % se grammikh klimaka

%% Suntelestes katanomhs isxuos
a1 = 0.75;
a2 = (1-a1)*a1;
a3 = (1-(a1+a2))*a1;

C_noma = zeros(1,length(pt));
C_oma = zeros(1,length(pt));
for u = 1:length(pt)

    %% Ypologismos xwrhtikothtas NOMA
```

```

C_noma_1 = log2(1 + pt(u)*a1.*kerdos1./(pt(u)*a2.*kerdos1 + pt(u)*a3.*kerdos1 + no)); % xrhsths 1
C_noma_2 = log2(1 + pt(u)*a2.*kerdos2./(pt(u)*a3.*kerdos1+no)); % xrhsths 2
C_noma_3 = log2(1 + pt(u)*a3.*kerdos2/no); % xrhsths 3
C_noma_sum(u) = mean(C_noma_1 + C_noma_2 + C_noma_3); % sunolikh xwrhtikothta NOMA

%% Ypologismos xwrhtikothtas OMA
C_oma_1 = (1/3)*log2(1 + pt(u)*kerdos1/no); % xrhsths 1
C_oma_2 = (1/3)*log2(1 + pt(u)*kerdos2/no); % xrhsths 2
C_oma_3 = (1/3)*log2(1 + pt(u)*kerdos3/no); % xrhsths 3

C_oma_sum(u) = mean(C_oma_1 + C_oma_2 + C_oma_3); % sunolikh xwrhtikothta OMA

end
SNR = Pt - No;
figure;
plot(SNR,C_noma_sum,'-or','linewidth',1); hold on; grid on;
plot(SNR,C_oma_sum,'--sb','linewidth',1)
xlabel('SNR (dB)');
ylabel('Achievable rate (bps/Hz)');
legend('NOMA','OMA');
title('Capacity of NOMA vs OMA');

```

Ο εκτελέσιμος κώδικας Matlab για την παραγωγή τόσο της εικόνας 14 όσο και της εικόνας 15 στην ενότητα 4.4 σχετικά με την σύγκριση των ρυθμών αθροίσματος των MIMO-NOMA και MIMO-OMA και την σύγκριση των ατομικών ρυθμών αθροίσματος του ισχυρού και του ανίσχυρου χρήστη σύμφωνα με τις περιπτώσεις των MIMO-NOMA και MIMO-OMA αντίστοιχα, είναι ο ακόλουθος:

```

clc; clear variables; close all;

%% Apostaseis tw n xrhstwn
apostash1 = 700;
apostash2 = 300;

%% Suntelestes katanomhs isxuos
a1 = 0.8;
a2 = 0.2;

N = 5*10^5;

%% Ekthetikh apwleia diadromhs
eta = 4;

%% Kanalia dialeipsewn Rayleigh
c11 = sqrt(apostash1^eta)*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);
c12 = sqrt(apostash1^eta)*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);

```

```

c21 = sqrt(apostash2^eta)*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);
c22 = sqrt(apostash2^eta)*(randn(N,1) + 1i*randn(N,1))/sqrt(2);

c1 = c11+c12;
c2 = c21+c22;

%% Kerdos kanaliwn
kerdos1 = (abs(c1)).^2;
kerdos2 = (abs(c2)).^2;

%% Isxus ekpomphs
Pt = -30:5:30; % se dB
pt = (10^-3)*db2pow(Pt); % se grammikh klimaka

BW = 10^6; % euros zwnhs

%% Isxus thoruvou
No = -174 + 10*log10(BW); % se dB
no = (10^-3)*db2pow(No); % se grammikh klimaka

for u = 1:length(pt)
    %% Efiktoi ruthmoi gia to MIMO-NOMA
    R1n = log2(1 + pt(u)*a1.*kerdos1./(pt(u)*a2.*kerdos1 + no));
    R12n = log2(1 + pt(u)*a1.*kerdos2./(pt(u)*a2.*kerdos2 + no));
    R2n = log2(1 + pt(u)*a2.*kerdos2/no);

    %% Efiktoi ruthmoi gia to MIMO-OMA
    R1o = 0.5*log2(1 + pt(u)*kerdos1/no);
    R2o = 0.5*log2(1 + pt(u)*kerdos2/no);

    %% Ruthmoi athroismatwn
    Ruthmos_noma(u) = mean(R1n+R2n); % MIMO-NOMA
    Ruthmos_oma(u) = mean(R1o+R2o); % MIMO-OMA

    %% Atomikoi ruthmoi xrhstwn
    Ruthmos1_noma(u) = mean(R1n); % MIMO-NOMA xrhsths 1 (Adunamos)
    Ruthmos2_noma(u) = mean(R2n); % MIMO-NOMA xrhsths 2 (Isxuros)

    Ruthmos1_oma(u) = mean(R1o); % MIMO-OMA xrhsths 1 (Adunamos)
    Ruthmos2_oma(u) = mean(R2o); % MIMO-OMA xrhsths 2 (Isxuros)

end
figure;
plot(Pt, Ruthmos_noma, '-or', 'linewidth',1); hold on; grid on;
plot(Pt, Ruthmos_oma, '-sb', 'linewidth',1);
legend('MIMO-NOMA', 'MIMO-OMA');
xlabel('Transmit power(dBm)');
ylabel('Achievable sum rates (bps/Hz)');
title('Sum rate comparison');

figure;
plot(Pt, Ruthmos1_noma, '-or', 'linewidth',1); hold on; grid on;

```

```

plot(Pt,Ruthmos2_noma,'-sr','linewidth',1);
plot(Pt,Ruthmos1_oma,'-ob','linewidth',1);
plot(Pt,Ruthmos2_oma,'-sb','linewidth',1);
legend('MIMO-NOMA weak','MIMO-NOMA strong','MIMO-OMA weak', 'MIMO-OMA strong')
xlabel('Transmit power(dBm)');
ylabel('Achievable rates(bps/Hz)');
title('Individual user rates')

```

Οι εκτελέσιμοι κώδικες Matlab για τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην ενότητα 4.5 με την σύγκριση των σχημάτων SCMA, PDMA και MUSA για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αναλογίας χρηστών και διαθέσιμων πόρων θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Για κάθε μία από τις περιπτώσεις της υπο-φόρτωσης, πλήρους-φόρτωσης και υπερ-φόρτωσης παράγεται αντίστοιχα και μία εικόνα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Για την περίπτωση της υπό-φόρτωσης λαμβάνουμε την εικόνα 18, για την περίπτωση της πλήρους-φόρτωσης την εικόνα 19 και για την υπερ-φόρτωση την εικόνα 20. Οι εκτελέσιμοι κώδικες είναι οι ακόλουθοι:

### **Για το σχήμα SCMA:**

```

%% Arxeio eksomoiwshs SCMA

%% Parametroi
S_D_s=4; % Seira diamorfwshs
N_res=4; % Plhthos diathesimwn orthogwniwn porwn
N_usrs=2; % Plhthos xrhstwn

%F=[1 1 1 0 0 0;1 0 0 1 1 0;0 1 0 1 0 1;0 0 1 0 1 1]; % Grafhma paragontwn-D4,6
%F=[1 1 1 0; 1 0 0 1; 0 1 0 1; 0 0 1 0];% Grafhma paragontwn-D4,4
F=[1 1; 1 0; 0 1;0 1];% Grafhma paragontwn-D4,2

%% Diamorfwsh tou x
lamda=(1+sqrt(5))/2;
a=1/sqrt(1+lamda^2);
b=lamda*a;
x1=[-a a];
x2=[-b b];
y1=[-a a];
y2=[-b b];
[p1 q1]=meshgrid(x1,y1);
[p2 q2]=meshgrid(x2,y2);
dm1=[p1(:) q1(:)];
dm2=[p2(:) q2(:)];
A=dm1(:,1)+1i*dm1(:,2);
B=dm2(:,1)+1i*dm2(:,2);

```

```

theta=zeros(1,3);
theta(1)=1;theta(2)=exp(1i*pi/6);theta(3)=exp(1i*pi/3);
A1=A*theta(1);B1=B*theta(1);
A2=A*theta(2);B2=B*theta(2);
A3=A*theta(3);B3=B*theta(3);

X=zeros(N_res,S_D_s,N_usrs);

X(1, :,1)=A1;X(2, :,1)=B1;
X(1, :,2)=A2;X(3, :,2)=B2;
X(1, :,3)=B3;X(4, :,3)=A3;
X(2, :,4)=B2;X(3, :,4)=A2;
X(2, :,5)=A3;X(4, :,5)=B3;
X(3, :,6)=A1;X(4, :,6)=B1;

%% Parametroi eksomoiwshs
SNR_list=0:2:20;
BL=1000;
SER_SCMA=zeros(length(SNR_list),1);
it_max=8;

for snr_count=1:length(SNR_list)
    SNR=SNR_list(snr_count);
    snr=10^(SNR/10);
    for count=1:BL
        %% Afora to x
        aa=rand(N_usrs,1);
        bb=aa*S_D_s+1;
        c=floor(bb);

        x=[X(:,c(1),1),X(:,c(2),2)];% Sthn periptwsh tou D4,2
        %x=[X(:,c(1),1),X(:,c(2),2),X(:,c(3),3),X(:,c(4),4)]; % Sthn periptwsh tou D4,4
        %x=[X(:,c(1),1),X(:,c(2),2),X(:,c(3),3),X(:,c(4),4),X(:,c(5),5),X(:,c(6),6)]; % Sthn periptwsh tou D4,6

        %% Kanali epikoinwnias
        H=abs((randn(N_res,N_usrs)+1i*randn(N_res,N_usrs))/sqrt(2));

        %% Afora to y
        s=H.*x;
        sig=sum(s,2);
        sig_power=sum(abs(sig).^2)/N_res;
        noise_power=sig_power/snr;
        sigma=sqrt(noise_power);
        y=sig+sigma*(randn(N_res,1)+1i*randn(N_res,1))/sqrt(2);

        %% Algorithmos Metadoshs Mhnumatwn (Message Passing Algorithm, MPA)
        u=zeros(N_res,N_usrs,S_D_s);
        v=zeros(N_res,N_usrs,S_D_s);
        for m=1:S_D_s
            u(:, :,m)=F;
        end
    end
end

```

```

for it=1:it_max
    for j=1:N_usrs
        aj=find(F(:,j)~=0);
        t1=length(aj);
        for k=1:t1
            v(aj(k),j,:)=1;
            for l=1:t1
                if l==k
                    continue;
                else
                    v(aj(k),j,:)=v(aj(k),j,:).*u(aj(l),j,:);
                end
            end
        end
    end
    end
    vp=sum(v,3);
    vz=find(vp==0);
    vp(vz)=1;
    for m=1:S_D_s
        v(:,m)=v(:,m)./vp;
    end

    for k=1:N_res
        ak=find(F(k,:)~=0);
        t2=length(ak);
        t3=t2-1;
        tot=S_D_s^t3;
        sx=zeros(tot,t3);
        temp=1:tot;
        for i=1:t3
            d=rem(ceil((temp')/(tot/(S_D_s^i))),S_D_s);
            for nloc=1:S_D_s
                num=rem(nloc,S_D_s);
                loc=find(d==num);
                sx(loc,i)=nloc;
            end
        end
        for j=1:t2
            u(k,ak(j),:)=0;
            sl=0;
            sxt=zeros(tot,1);
            vx=ones(tot,1);
            for i=1:t2
                if i==j
                    continue;
                else
                    sl=sl+1;
                    for h=1:tot
                        sxt(h)=sxt(h)+H(k,ak(i))*X(k,sx(h,sl),ak(i));
                        vx(h)=vx(h)*v(k,ak(i),sx(h,sl));
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



```

        end
        for h=1:tot
            for m=1:S_D_s
                u(k,ak(j),m)=u(k,ak(j),m)+1/(sqrt(2*pi)*sigma)*exp(-1/(2*sigma^2)*(abs(y(k)-
H(k,ak(j))*X(k,m,ak(j))-sxt(h)))^2)*vx(h);
            end
        end
    end
    end
    up=sum(u,3);
    uz=find(up==0);
    up(uz)=1;
    for m=1:S_D_s
        u(:,m)=u(:,m)./up;
    end
end

xp=zeros(N_usrs,S_D_s);
for j=1:N_usrs
    loc=find(F(:,j)~=0);
    for m=1:S_D_s
        xp(j,m)=prod(u(loc,j,m));
    end
end
xb=zeros(N_usrs,1);
for j=1:N_usrs
    [m1 m2]=max(xp(j,:));
    xb(j)=m2;
end
SER_SCMA(snr_count)=SER_SCMA(snr_count)+sum(xb~=c);
end
SER_SCMA(snr_count)

end

SER_SCMA=SER_SCMA/(BL*N_usrs*2);

```

### **Για το σχήμα PDMA:**

```

%% Arxeio eksomoiwshs PDMA

%% Parametroi
S_D_p=4; % Seira diamorfwshs
N_res_p=4; % Plhthos diathesimwn orthogwniwn porwn
N_usrs_p=2; % Plhthos xrhstwn

%F=[1 1 1 0 0 0;1 0 0 1 1 0;0 1 0 1 0 1;0 0 1 0 1 1]; % Grafhma paragontwn-D4,6
%F=[1 1 1 0; 1 0 0 1; 0 1 0 1; 0 0 1 0]; % Grafhma paragontwn-D4,4
F=[1 1; 1 0; 0 1;0 1];% Grafhma paragontwn-D4,2

```

```

B=F;
%% Sxhmatismos QPSK
x1=[-1 1];
[p1 q1]=meshgrid(x1,x1);
dm1=[p1(:) q1(:)];
A=dm1(:,1)+1i*dm1(:,2);

%% Parametroi eksomoiwshs
SNR_list=0:2:20;
BL=1000;
SER_PDMA=zeros(length(SNR_list),1);
it_max=8;

for snr_count=1:length(SNR_list)
    SNR=SNR_list(snr_count);
    snr=10^(SNR/10);
    for count=1:BL
        %% Afora to x
        aa=rand(N_usrs_p,1);
        bb=aa*S_D_p+1;
        c=floor(bb);

        x=[];
        for x_num=1:N_usrs_p
            x=[x;A(c(x_num))];
        end

        %% Kanali epikoinwnias
        H=abs((randn(N_res_p,N_usrs_p)+1i*randn(N_res_p,N_usrs_p))/sqrt(2));

        %% Afora to y
        HS=H.*B;
        sig=HS*x;
        sig_power=sum(abs(sig).^2)/N_res_p;
        noise_power=sig_power/snr;
        sigma=sqrt(noise_power);
        y=sig+sigma*(randn(N_res_p,1)+1i*randn(N_res_p,1))/sqrt(2);

        %% Algorithmos Metadoshs Mhnumatwn (Message Passing Algorithm, MPA)
        u=zeros(N_res_p,N_usrs_p,S_D_p);
        v=zeros(N_res_p,N_usrs_p,S_D_p);
        for m=1:S_D_p
            u(:,:,m)=F;
        end

        for it=1:it_max
            for j=1:N_usrs_p
                aj=find(F(:,j)~=0);
                t1=length(aj);
                for k=1:t1
                    v(aj(k),j,:)=1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

for l=1:t1
    if l==k
        continue;
    else
        v(aj(k),j,:)=v(aj(k),j,:).*u(aj(l),j,:);
    end
end
end
end
vp=sum(v,3);
vz=find(vp==0);
vp(vz)=1;
for m=1:S_D_p
    v(:,:,m)=v(:,:,m)./vp;
end

for k=1:N_res_p
    ak=find(F(k,:)^~=0);
    t2=length(ak);
    t3=t2-1;
    tot=S_D_p^t3;
    sx=zeros(tot,t3);
    temp=1:tot;
    for i=1:t3
        d=rem(ceil((temp')/(tot/(S_D_p^i))),S_D_p);
        for nloc=1:S_D_p
            num=rem(nloc,S_D_p);
            loc=find(d==num);
            sx(loc,i)=nloc;
        end
    end
    for j=1:t2
        u(k,ak(j),:)=0;
        sl=0;
        sxt=zeros(tot,1);
        vx=ones(tot,1);
        for i=1:t2
            if i==j
                continue;
            else
                sl=sl+1;
                for h=1:tot
                    sxt(h)=sxt(h)+HS(k,ak(i))*A(sx(h,sl));
                    vx(h)=vx(h)*v(k,ak(i),sx(h,sl));
                end
            end
        end
        for h=1:tot
            for m=1:S_D_p
                u(k,ak(j),m)=u(k,ak(j),m)+1/(sqrt(2*pi)*sigma)*exp(-1/(2*sigma^2)*(abs(y(k)-
                HS(k,ak(j))*A(m)-sxt(h)))^2)*vx(h);
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
up=sum(u,3);
uz=find(up==0);
up(uz)=1;
for m=1:S_D_p
    u(:,m)=u(:,m)./up;
end
end

xp=zeros(N_usrs_p,S_D_p);
for j=1:N_usrs_p
    loc=find(F(:,j)~=0);
    for m=1:S_D_p
        xp(j,m)=prod(u(loc,j,m));
    end
end
xb=zeros(N_usrs_p,1);
for j=1:N_usrs_p
    [m1 m2]=max(xp(j,:));
    xb(j)=m2;
end
SER_PDMA(snr_count)=SER_PDMA(snr_count)+sum(xb~=c);
end
end

SER_PDMA=SER_PDMA/(BL*N_usrs_p*2);

```

### **Για το σχήμα MUSA:**

```

%% Arxeio eksomoiwshs MUSA

%% Parametroi
S_D_m=4; % Seira diamorfwshs
N_res_m=4; % Plhthos diathesimwn orthogwniwn porwn
N_usrs_m=2; % Plhthos xrhstwn

%% Diadosh akolouthiwn
sun0=zeros(N_res_m,N_usrs_m);
for j=1:N_usrs_m
    a=rand(N_res_m,1);
    br=a*3+1;
    bi=a*3+1;
    cr=floor(br)-2;
    ci=floor(bi)-2;
    sun0(:,j)=cr+1i*ci;
end

```

```

%% Sxhmatismos QPSK
x1=[-1 1];
[p1 q1]=meshgrid(x1,x1);
dm1=[p1(:) q1(:)];
A=dm1(:,1)+1i*dm1(:,2);

%% Parametroi eksomoiwshs
SNR_list=0:2:20;
BL=1000;
SER_MUSA=zeros(length(SNR_list),1);

for snr_count=1:length(SNR_list)

    SNR=SNR_list(snr_count);
    snr=10^(SNR/10);

    for count=1:BL
        %% Afora to x
        a_m=rand(N_usrs_m,1);
        b_m=a_m*S_D+1;
        c=floor(b_m);

        x=[];
        for x_num=1:N_usrs_m
            x=[x;A(c(x_num))];
        end

        %% Kanali epikoinwnias
        H=abs((randn(N_res_m,N_usrs_m)+1i*randn(N_res_m,N_usrs_m))/sqrt(2));

        %% Afora to y
        HS=H.*sun0;
        sig=HS*x;
        sig_power=sum(abs(sig).^2)/N_res_m;
        noise_power=sig_power/snr;
        sigma=sqrt(noise_power);
        y=sig+sigma*(randn(N_res_m,1)+1i*randn(N_res_m,1))/sqrt(2);

        %% Diadoxikh akurwsh paremvolwn(Successive Interference Cancellation, SIC)
        [sic_apot]=SIC_mode(y,HS,noise_power,N_usrs_m);

        SER_MUSA(snr_count)=SER_MUSA(snr_count)+sum(sic_apot.'~x);
    end

end

SER_MUSA=SER_MUSA/(BL*N_usrs_m*2);

```

Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου κώδικα έχουμε και την χρήση δύο συναρτήσεων που η μία καλείται στο εσωτερικό της άλλης, πιο συγκεκριμένα, από το εκτελέσιμο κώδικα του MUSA καλείται η συνάρτηση **SIC\_mode**, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω:

```
function [sic_apot]=SIC_mode(rec_signal,ch_matrix,noise_var,num_Tx_ant)
% Parametroi
% rec_signal: Lhfthen shma
% ch_matrix : Mhtrwo kanaliou
% noise_var : Diakumansh thoruvou
% num_Tx_ant: Plhthos Tx keraiwn

Order=[]; % Seira anixneushs
index_array=[1:num_Tx_ant];
% V-BLAST
for stage = 1:num_Tx_ant
    Wmmse=inv(ch_matrix'*ch_matrix+noise_var*eye(num_Tx_ant+1-stage))*ch_matrix'; % Filtro MMSE
    WmmseH=Wmmse*ch_matrix;
    SINR=[];

    for i=1:num_Tx_ant-(stage-1)
        tmp= norm(WmmseH(i,[1:i-1 i+1:num_Tx_ant-(stage-1)]))^2 + noise_var*norm(Wmmse(i,:))^2;
        SINR(i)=abs(WmmseH(i,i))^2/tmp; % Ypologismos SINR
    end

    [val_max,index_temp] = max(SINR); % Taksinomhsh vash tou SINR
    Order = [Order index_array(index_temp)];
    index_array = index_array([1:index_temp-1 index_temp+1:end]);
    x_temp(stage) = Wmmse(index_temp,:)*rec_signal; % Efarmogh MMSE filtrou

    sic_apot(stage) = QPSK_mode(x_temp(stage),1); % QPSK
    y_tilde = rec_signal - ch_matrix(:,index_temp)*sic_apot(stage); % Afairesh paremvolwn
    H_tilde = ch_matrix(:,[1:index_temp-1 index_temp+1:num_Tx_ant-(stage-1)]); % Neo H
    ch_matrix = H_tilde;
    rec_signal = y_tilde;

end
sic_apot(Order) = sic_apot;
```

Και στο εσωτερικό της συνάρτησης SIC\_mode καλείται και η συνάρτηση **QPSK\_mode**, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω:

```
function [sic_apot] = QPSK_mode(X,N)
b = 0;
c = [-1 1];
[Nr,Nc]=size(X);
```

```

M=Nr*Nc;
X_super = X(:);
complex_X = 0;

if norm(imag(X))>1e-5
    complex_X=1;
    X_super=[real(X_super);
    imag(X_super)];
end

sic_apot(find(X_super<b)) = c(1);
sic_apot(find(b<=X_super)) = c(2);

if complex_X==1, sic_apot = sic_apot(1:M)+j*sic_apot(M+1:2*M);
end

sic_apot = reshape(sic_apot,Nr,Nc);

```

Τέλος, θα χρειαστούμε ένα script με στόχο την εκτέλεση και των τριών σχημάτων για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις που προαναφέραμε και βέβαια με τον κατάλληλο μετασχηματισμό του κώδικα του κάθε σχήματος όπως αναφέρεται και στα σχόλια στους κώδικες των σχημάτων αυτών. Το συγκεντρωτικό αυτό script για την εκτέλεση και των τριών σχημάτων για τις περιπτώσεις της υπο-φόρτωσης, πλήρους-φόρτωσης και υπερ-φόρτωσης παρουσιάζεται παρακάτω:

```

clear all,close all,clc

SCMA;
PDMA;
MUSA;

figure;
semilogy(SNR_list,SER_SCMA,'-or'); hold on;grid on;
semilogy(SNR_list,SER_PDMA,'-*m')
semilogy(SNR_list,SER_MUSA,'-db')
legend('SCMA','PDMA','MUSA')
xlabel('SNR');
ylabel('SER');
%title('4 resources-6 users');
%title('4 resources-4 users');
title('4 resources-2 users');
grid on;

```