



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πλάνο Διαχείρισης (Μη)-Ορθογώνιων Πόρων σε  
Πολυκυψελωτά Δίκτυα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ

Νικόλαος Κ. Πριόνας

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

Αθήνα Δεκέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Πλάνο Διαχείρισης (Μη)-Ορθογώνιων Πόρων σε Πολυκυψελωτά Δίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ

Νικόλαος Κ. Πριόνας

**Επιβλέπουσα :** Δήμητρα-Θεοδώρα Ι. Κακλαμάνη

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2022

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

Βενιέρης Στ. Ιάκωβος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Παναγόπουλος Αθανάσιος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα Δεκέμβριος 2022

.....  
Νικόλαος Κ. Πριόνας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Κωνσταντίνου Πριόνας, 2022.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Η έννοια της ασύρματης επικοινωνίας εξελίχθηκε ραγδαία ανά τα χρόνια σε σημεία όπου η μαζική επικοινωνία χωρίς περιορισμούς πλέον θεωρείται δεδομένη. Από την εφαρμογή του ηλεκτρομαγνητισμού στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μέχρι και την εμπορική χρήση των δικτύων 5G η πορεία ήταν ως επί το πλείστον ανοδική. Χάρη στις καινοτομίες που εισήχθησαν με κάθε γενιά τηλεπικοινωνίας ο τρόπος ζωής εργασίας και ψυχαγωγίας άλλαξε ριζικά. Το κύριο ζήτημα πλέον τίθεται στο πόσο αποδοτικά μπορούν να αξιοποιηθούν οι διαθέσιμοι ενεργειακοί και φασματικοί πόροι, διατηρώντας παράλληλα τα ίδια επίπεδα παροχής υπηρεσιών που τέθηκαν από τις προηγούμενες γενιές.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, η παρούσα εργασία μελετά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων μορφών πολυκυψελωτών δικτύων, και εξετάζει την απόδοση τεχνικών διαμοιρασμού διαθέσιμου φάσματος και ισχύος. Συγκεκριμένα, στο *Κεφάλαιο 1*, γίνεται μία σύντομη αναδρομή στην ιστορία των πρώτων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, φτάνοντας έως και τις γενιές 5G και 6G. Στο *Κεφάλαιο 2*, εξετάζονται οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και διαμόρφωσης (FDMA, TDMA, SDMA, CDMA, OFDMA) και περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους ως προς την κατανομή και αξιοποίηση πόρων (π.χ. συχνότητα, χρόνος). Στο *Κεφάλαιο 3*, μελετώνται τα χαρακτηριστικά των δικτύων MIMO και massive-MIMO και πώς αυτά βοηθούν στην αντιμετώπιση των αναγκών για μαζική συνδεσιμότητα και βέλτιστη φασματική και ενεργειακή απόδοση. Στο *Κεφάλαιο 4*, ορίζεται προσομοιωτής επιπέδου συστήματος – ζεύξης ενός κατανεμημένου πολυκυψελωτού δικτύου, το οποίο αξιοποιεί OMA ως προς την συχνότητα χάρη στην OFDMA καθώς και NOMA ως προς την ισχύ. Χάρη στην συνδυαστική αξιοποίηση κατανομής ορθογώνιων (συχνότητα) και μη-ορθογώνιων (ισχύς) πόρων, η προτεινόμενη πλατφόρμα προσομοίωσης πολυκυψελωτού συστήματος επιτυγχάνει τον μετριασμό παρεμβολών των ομοδιαυλικών κινητών τερματικών. Το προκύπτον συμπέρασμα αποτελεί προϊόν ικανοποιητικού αριθμού προσομοιώσεων σεναρίων διαφορετικού φόρτου και αξιολογείται εκτενώς στο *Κεφάλαιο 5*. Τέλος, στο *Κεφάλαιο 6* συνοψίζεται το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας και προτείνονται περιοχές για μελλοντική έρευνα και μελέτη.

**Λέξεις-κλειδιά:** Ασύρματες Επικοινωνίες, Ομοδιαυλικές Παρεμβολές, Massive MIMO, NOMA, OFDMA, Φασματική Απόδοση.



## Abstract

The achievement of massive and global connectivity led to the need of higher speed connections, larger capacity and flexibility in communication services. Each mobile communication generation added new technologies that improved the exchange of information and data, in levels that drastically changed our way of life, work and entertainment. That steady but quick progress almost depleted the existing communication resources. For these reasons, the fifth generation (5G), adopted new methods in order to redefine the architecture of wireless networks and also the energy and spectrum allocation techniques.

Towards this direction, this thesis studies the characteristics of various multicellular networks and examines the performance of spectrum and frequency allocation techniques in combination with the distributed massive-MIMO architecture. Specifically, in *Chapter 1*, the history of telecommunication systems is described briefly, from the first ones, up to the fifth (5G) and sixth generation (6G). In *Chapter 2*, the main multiple access techniques are presented (FDMA, TDMA, SDMA, CDMA) and also the parameters that determine their resource allocation and utilization. In *Chapter 3*, the attributes of MIMO and massive MIMO networks are studied and also, how they help cover the need for massive connectivity and optimal spectrum and energy efficiency. In *Chapter 4*, the simulation of a distributed multicellular network is presented, which applies OMA thanks to the OFDMA technique and non-orthogonal access techniques in the power domain because of the different power levels per channel and user. Thanks to the combination of orthogonal (frequency) and non-orthogonal (power) methods, the suggested platform of the simulated multicellular massive-MIMO network successfully leads to the mitigation of inter-cell and intra-cell interferences presented at the mobile terminals' end. The above mentioned conclusion is thoroughly examined after a sufficient number of simulation iterations of different workload scenarios in *Chapter 5*. Finally, in *Chapter 6*, the thesis' aim and findings are summed-up, and suggestions of further research and study are presented.

**Key-words:** Wireless Communications, Co-Channel Interference, Massive MIMO, NOMA, OFDMA, Spectral Efficiency.





## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 στην σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα που με δική τους συνεισφορά και καθοδήγηση ολοκληρώθηκε αυτή η εργασία.

Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια κα. Δήμητρα – Θεοδώρα Κακλαμάνη, η οποία μου επέτρεψε να ασχοληθώ με αυτό το τόσο ενδιαφέρον θέμα και που μου έδωσε την ευκαιρία να διευρύνω τις γνώσεις μου προς αυτήν την κατεύθυνση.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην Ερευνήτρια Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών, Δρ. Σεϊμένη για την διαθεσιμότητά της καθ'όλη την διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους, την πολύτιμη καθοδήγηση της, την αδιάλειπτη βοήθειά της και για τον χρόνο που διέθεσε πρόθυμα για την επίλυση αποριών και όποιων άλλων τεχνικών και πρακτικών θεμάτων προέκυψαν. Η υποστήριξή της και η συνεισφορά της αποτέλεσαν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση και σύνταξη της παρούσας εργασίας και την ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα που μέσω της παρουσίας τους και της ένθερμης υποστήριξής τους, με βοηθούν καθημερινά στην υλοποίηση των στόχων μου.



## **Acknowledgements**

This thesis was carried out during the academic year 2021-2022 at the school of Electrical and Computer Engineering of the National Technical University of Athens. At this point, I would like to thank the people that with their contribution guided and supported me to complete this thesis.

Specifically, I would like to thank Professor Dimitra-Theodora Kaklamani, who gave me the opportunity to deal with this interesting topic and helped me widen my knowledge towards this direction.

Furthermore, I would like to express my gratitude to Dr. Seimeni, for her availability during the whole academic year, her valuable guidance, her unceasing help and for the time she dedicated to provide me with answers and clarifications on related technical topics. Her support was of great importance for the completion and documentation of this work and for that reason I want to thank her sincerely.

Finally, I want to thank my family and my close friends and people who through their presence and support help me achieve my goals daily.



## Ακρόνυμα

0G	Zero Generation Mobile Communication System
1G	First Generation Mobile Communication System
2.5G	2.5 Generation Mobile Communication System
2.75G	2.75 Generation Mobile Communication System
2G	Second Generation Mobile Communication System
3G	Third Generation Mobile Communication System
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation Communication System
5G	Fifth Generation Communication System
6G	Sixth Generation Communication System
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AMTS	Advanced Mobile Telephone System
AI	Artificial Intelligence
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
C-MIMO	Centralized MIMO
CA	Carrier Aggregation
CCI	Co-Channel Intereference
CD	Code Domain
CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA	Code Division Multiple Access
CDPD	Cellular Digital Packet Data
CoMP	Coordinated MultiPoint Transmission/Reception
CRE	Cell Rage Extension
CS/CB	Coordinated Scheduling/Beamforming (CS
CSI	Channel State Information
D-MIMO	Distributed MIMO
D2D	Device-to-Device
DFT	Discrete Fourier Transform
DS-CDMA	Direct Spectrum CDMA
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data Rates for Global System Mobile Evolution
eICIC	enhanced Inter-Cell Interference Coordination
FBS	femto BS
FDD	Frequency Division Duplexing

FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency re-use
FFT	Fast Fourier Transform
FRF	Frequency Reuse Factor
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Position System
GSM	Global System for Mobile Communication
HET NET	Heterogeneous Networks
HPA	High Power Amplifier
IBI	Inter-Block Intereference
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IOT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Intereference
JP	Joint Processing
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evoution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced
M2M	Machine-to-Machine
MBS	Macro Base Stations
MC	Monte Carlo
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MT	Mobile Terminal
MU-MIMO	Multiuser MIMO
NMT	Nordisk Mobile Telephony
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
OSI	Open System Interconnection
OTP	Open Transport Protocol
OWA	Open Wireless Architecture
PARP	Peak to Average Power Ratio
PBS	pico BS
PD	Power Domain
PDA	Personal Digital Assistant

PF	Probability Failure
PTT	Push to talk
RBS	relay BS
RS	Relay Stations
SDMA	Space Division Multiple Access
SFR	Soft Frequency Reuse
SIC	Successive Interference Cancellation
SNIR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single-In-Single-Out
SMS	Short Messaging Service
TACS	Total Access Communication System
TDMA	Time Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access





## Περιεχόμενα

<b>1. Ιστορική Αναδρομή και γενιές τηλεπικοινωνίας απο 0G έως 5G-6G ...</b>	<b>1</b>
1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	1
1.2 Εισαγωγή στην ασύρματη επικοινωνία .....	1
1.2.1 Γενιά 0G .....	2
1.2.2 Γενιά 1G .....	2
1.2.3 Γενιά 2G, 2.5G και 2.75G .....	3
1.2.4 Γενιά 3G .....	4
1.2.5 Γενιά 4G .....	6
1.2.5.1 LTE-Advanced .....	7
1.2.5.2 Αρχιτεκτονική Ετερογενών Δικτύων (HET NET).....	7
1.2.5.3 Αναμετάδοση (Relaying) .....	11
1.2.5.4 Coordinated Multipoint Transmission/Reception(CoMP).....	11
1.2.5.5 Συνάθροιση Υποφορέων (Carrier Aggregation).....	12
1.2.5.6 Συντονισμός Ενδοκυψελικών Παρεμβολών (enhanced Inter-Cell Interference Coordination) .....	13
1.2.5.7 Επέκταση εύρους κυψελών (Cell Range Extension) .....	16
1.2.5.8 Τεχνολογία Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) .....	18
1.2.5.9 WiMAX.....	19
1.2.5 Γενιά 5G .....	21
1.2.7 Γενιά 6G .....	26
<b>2. Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης .....</b>	<b>29</b>
2.1 OMA (Orthogonal Multiple Access).....	29
2.1.1 FDMA .....	29
2.1.2 TDMA.....	31
2.1.3 CDMA .....	32
2.1.4 SDMA .....	33
2.1.5 OFDMA .....	34

2.2 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access).....	40
2.2.1 Πλεονεκτήματα NOMA έναντι OMA.....	41
2.2.2 Downlink NOMA.....	42
2.2.3 Uplink NOMA.....	44
<b>3. MIMO και Massive MIMO συστήματα .....</b>	<b>47</b>
3.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία MIMO .....	47
3.2 Massive MIMO διατάξεις.....	49
3.3 Κατηγορίες massive MIMO διατάξεων.....	53
3.4 Προκλήσεις Massive-MIMO Τεχνολογίας.....	54
3.5 NOMA και MIMO.....	56
<b>4. Αρχιτεκτονική Προσομοιωτή Πολυκυψελωτού Δικτύου .....</b>	<b>60</b>
4.1 Παράμετροι και Στάδια Προσομοίωσης.....	60
4.2 Αλγόριθμοι ανάθεσης φερόντων .....	66
4.2.1 Σειριακός Αλγόριθμος (Round-Robin).....	66
4.2.2 Ψευδοτυχαίος Αλγόριθμος (Pseudo-Random Algorithm) .....	67
4.3 Εκτίμηση Ισχύος.....	69
<b>5. Σχολιασμός και Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης .....</b>	<b>73</b>
<b>6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία .....</b>	<b>91</b>



# **1. Ιστορική Αναδρομή και γενιές τηλεπικοινωνίας απο 0G έως 5G-6G**

## **1.1. Ιστορική Αναδρομή**

Η εμφάνιση των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών τον 19ο αιώνα συνδέεται άμεσα με την ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού η οποία έθεσε τις βάσεις για νέες αποτελεσματικές μεθόδους με όραμα την μετάδοση πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις. Περαιτέρω πρόοδος σημειώθηκε κατά την επίτευξη μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και κατά την υιοθέτηση τους στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα [1].

Ο Claude Chappe (1763–1805) ξεκίνησε την εποχή της τηλεπικοινωνίας με την επιτυχημένη εφαρμογή του ηλεκτρονικού τηλεγράφου, ανάμεσα σε Παρίσι και Λίλ τον Αύγουστο του 1749. Ο ηλεκτρονικός τηλεγράφος είχε πολλούς πατέρες οι οποίοι παρουσίασαν όλοι τους διαφορετικές χρήσεις. Σε παγκόσμια κλίμακα ο τηλεγράφος του Samuel Finley Breese Morse (1791–1872) είχε την μεγαλύτερη επιρροή και χρήση ανά τα χρόνια. Η τηλεφωνική εποχή, ξεκινάει το 1876, με την πρώτη τηλεφωνική γραμμή να ολοκληρώνεται μεταξύ Βοστόνης και Κέμπριτζ στην Μασαχουσέτη, με μήκος δύο μίλια. Η καινοτομία αυτή επιτεύχθει χάρη σε συσκευή φτιαγμένη από τον Alexander Graham Bell (1847–1922). Ο Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894), έθεσε τις βάσεις για την ραδιοεπικοινωνία διεξάγοντας επιτυχημένα πειράματα το 1877-1889 αποδεικνύοντας την ύπαρξη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και την ομοιότητα της με την συμπεριφορά του φωτός. Ο Guglielmo Marconi (1874–1937) ήταν αυτός που δύο χρόνια μετά τον θάνατο του Hertz έφερε την εποχή του ραδιοφώνου. Συγκεκριμένα κατάφερε να πραγματοποιήσει την πρώτη επιτυχημένη μετάδοση ραδιοσήματος με εμβέλεια ορισμένων χιλιομέτρων στην Μπολόνια το 1896. Μετέπειτα οι εφευρέσεις του συνδυάστηκαν και με εμπορική εφαρμογή [1].

## **1.2. Εισαγωγή στην ασύρματη επικοινωνία**

Η δημιουργία και η εξέλιξη της βιομηχανίας κυψελωτών δικτύων ξεκίνησε στις αρχές του 1970. Η πρόοδος που σημειώθηκε αυτές τις δεκαετίες φαίνεται συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά των γενεών και μοντέλων επικοινωνίας ανά τα χρόνια. Η πρώτη γενιά επέτρεψε την μετάβαση από την

ενσύρματη επικοινωνία (0G) στην ασύρματη (1G) με την εμφάνιση των πρώτων κινητών τηλεφώνων με ταχύτητες της τάξεως των 2.4kbps χρησιμοποιώντας αναλογικά συστήματα. Η δεύτερη γενιά (2G) σε αντίθεση με την πρώτη εφάρμοσε ψηφιακές τεχνικές και εισήγαγε την δυνατότητα γραπτών μηνυμάτων (text messaging) αυξάνοντας έτσι την ζήτηση και την απαίτηση για καλύτερη συνδεσιμότητα. Η τρίτη γενιά εμφανίστηκε το 1998 και οι υπηρεσίες της έδιναν τη δυνατότητα επικοινωνίας με ταχύτητες των 200kbps. Περαιτέρω εξέλιξη της τρίτης γενιάς οδήγησε στην τετάρτη γενιά (4G), η οποία πρόσφερε υπερευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο και έθεσε τις βάσεις για την πέμπτη γενιά (5G) [2].

### **1.2.1. Γενιά 0G**

Η γενιά 0G αναφέρεται σε εποχές πριν τα κυψελωτά δίκτυα, όπου ο αριθμός καναλιών και συνδέσεων ήταν περιορισμένος. Τα κινητά ραδιοτηλέφωνα συγκεκριμένα ήταν η εισαγωγή στην κινητή τηλεφωνία και την πρώτη γενιά (1G) και για αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως η γενιά μηδέν (0G). Ορισμένες τεχνολογίες που εφαρμόστηκαν κατά αυτή τη γενιά είναι οι PTT (Push to Talk), MTS (Mobile Telephone System) και AMTS (Advanced Mobile Telephone System) [3].

### **1.2.2. Γενιά 1G**

Η πρώτη γενιά (1G) αναφέρεται στα ασύρματα κινητά τηλέφωνα τα οποία πρωτοεμφανίστηκαν την δεκαετία του 80. Η γενιά αυτή χαρακτηρίζεται από τη χρήση αναλογικών προτύπων και συστημάτων. Η φωνή κατά την μετάδοση διαμορφώνεται με συχνότητες των 150MHz και μεταδίδεται με τη βοήθεια ραδιοπύργων [3]. Το κύριο χαρακτηριστικό της πρώτης γενιάς είναι ότι η γεωγραφική περιοχή κάλυψης είναι χωρισμένη σε κυψέλες, εμβέλειας 10-25 χλμ. με κάθε κυψέλη να έχει τον δικό της σταθμό βάσης [2]. Ορισμένες τεχνολογίες που πλαισίωσαν την γενιά αυτή ήταν οι NMT (Nordisk Mobile Telephony), AMPS (Advance Mobile Phone Service ) και CDPD (Cellular Digital Packet Data) [3].

Η γενιά 1G χρησιμοποιούσε αποκλειστικά αναλογικά συστήματα και όλα ήταν βασισμένα στην διαμόρφωση συχνοτήτων (Frequency Modulation). Παράλληλα επέτρεπαν μόνο επικοινωνία μέσω φωνής [4].

## Πλεονεκτήματα της 1G

- Ήταν η πρώτη τεχνολογία αυτής της κατηγορίας και οδήγησε στην εφαρμογή πρωτοκόλλων (Telecommunication Standards) για τα δημόσια δίκτυα.
- Επέτρεψε στους χρήστες να μπορούν να επικοινωνούν εν κινήσει.
- Διέθετε μία περιοχή συχνότητας σε κάθε χρήστη.
- Το κόστος ήταν μικρότερο σε σύγκριση με τα συστήματα που έκαναν δικτύωση μέσω καλωδίων [5].

## Μειονεκτήματα της 1G

- Η ποιότητα ήχου ήταν χαμηλή.
- Η ασφάλεια ήταν μειωμένη και οι παρεμβολές και υποκλοπή των γραμμών ήταν συχνές και σχετικά εύκολες.
- Αποκλειστική παροχή φωνητικών υπηρεσιών και όχι δεδομένων.
- Οι εναλλαγές κατά την μετάδοση (handoff) ήταν χαμηλής ποιότητας.
- Η χωρητικότητα του συστήματος ήταν μειωμένη καθώς για τον κάθε χρήστη έπρεπε να δοθεί μία συγκεκριμένη συχνότητα.
- Το μέγεθος και το βάρος των κινητών τηλεφώνων αποθάρρυναν την χρήση τους [5].

### 1.2.3. Γενιά 2G, 2.5G, 2.75G

Βασιζόμενη στην ψηφιακή μετάδοση η δεύτερη γενιά παρουσιάστηκε στα τέλη του 1980 [2]. Παρουσίασε πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με την πρώτη γενιά. Χάρη στις μεθόδους πολλαπλής πρόσβασης κώδικα (CDMA, Code Division Multiple Access) και χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) δόθηκε η δυνατότητα να συμπιεστούν περισσότερα δεδομένα χωρίς την αύξηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος [3]. Ακόμη, ήταν πιο ανθεκτική στις υποκλοπές χάρη στην δυνατότητα ψηφιακής κωδικοποίησης. Παράλληλα εισήγαγε και υπηρεσίες ηλεκτρονικής αλληλογραφίας (e-mail) καθώς και γραπτών μηνυμάτων (text messaging), ενώ οι ενεργειακές δαπάνες ήταν μειωμένες [2].

Φυσικά υπήρχαν περιθώρια βελτίωσης, καθώς τα ψηφιακά συστήματα ήταν πιο επιρρεπή σε καιρικές συνθήκες και εξωτερικούς παράγοντες σε αντίθεση με τα αναλογικά τα οποία ήταν πιο στατικά [2]. Ακόμη ήταν σύνθητες

ένα ψηφιακό σήμα να μην έχει την απαραίτητη ισχύ για να φτάσει στον επιθυμητό σταθμό βάσης.

### Πλεονεκτήματα

- Με την γενιά 2G ξεκίνησε η παροχή ψηφιακής μετάδοσης.
- Λόγω εκπομπών χαμηλής ισχύος άρχισαν να λαμβάνονται υπόψη θέματα υγείας σχετικά με την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
- Ψηφιακές υπηρεσίες όπως SMS (Short Messaging Service) text messaging και e-mail έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση [5].

### Μειονεκτήματα

- Σε αραιοκατοικημένες περιοχές με λίγους σταθμούς βάσης τα ασθενή σήματα πολλές φορές αποτύγγαναν να μεταδοθούν με επιτυχία [5].

Η γενιά 2.5 είναι μία ασύρματη κυψελωτή τεχνολογία ανεπτυγμένη χρονικά ανάμεσα στην δεύτερη και τρίτη γενιά. Η έναρξη αυτής της γενιάς σηματοδοτείται από την εισαγωγή της υπηρεσίας General Packet Radio (General Packet Radio Service, GPRS) η οποία βασίζεται σε πρωτόκολλα ανταλλαγής πακέτων. Ακόμη παρείχε μεγαλύτερες ταχύτητες κατά την παροχή διαδικτυακών υπηρεσιών αλλά και την δυνατότητα χρέωσης αναλόγως της χρήσης δεδομένων και όχι της διάρκειας της σύνδεσης. Η υπηρεσία GPRS αποτέλεσε και το πιο σημαντικό βήμα προς την έναρξη της 3ης γενιάς.

Η γενιά 2.75 χαρακτηρίζεται από την τεχνολογία EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution or Enhanced GPRS), η οποία είναι μία βελτιωμένη έκδοση της τεχνολογίας GPRS. Η τεχνολογία EDGE επέτρεψε γρηγορότερη μετάδοση πληροφορίας και δεδομένων ενώ το μεγαλύτερο της πλεονέκτημα ήταν ότι δεν χρειαζόταν εγκατάσταση περαιτέρω λογισμικού ούτε παραπάνω χρέωση [3].

## **1.2.4. Γενιά 3G**

Η 3η γενιά αποτέλεσε την εξέλιξη της 2ης. Βασίστηκε αρχικά στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA) ενώ για την εφαρμογή περαιτέρω υπηρεσιών χρησιμοποιήθηκε και πολλαπλή πρόσβαση μέσω διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) αλλά και

χρόνου (TDMA). Μία από τις εφαρμογές που εισήγαγε η 3η γενιά ήταν η κινητή τηλεόραση δηλαδή η δυνατότητα τηλεοπτικής μετάδοσης μέσω κινητών συσκευών. Η καινοτομία αυτή συνδυάστηκε με την πρόσθεση της βιντεοδιάσκεψης και την πραγματοποίηση κλήσεων με βιντεοκάμερες αλλά και με συστήματα GPS (Global Position Systems). Η χρήση της 3ης γενιάς επέτρεψε αποδοτική μετάδοση και ανταλλαγή πακέτων δεδομένων και πληροφορίας σε μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων. Συγκριτικά με την 2η γενιά επιτεύχθει μεγαλύτερη φασματική αποδοτικότητα ενώ προσφέρθηκαν στους χρήστες κινητών τηλεφώνων πιο ανεπτυγμένες υπηρεσίες [3].

### Πλεονεκτήματα

- Η ταχύτητα δεδομένων είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές 2G, 2.5G και 2.75G.
- Η γενιά 3G εισήγαγε την βιντεοδιάσκεψη ως υπηρεσία και βελτίωσε την ποιότητα των κλήσεων και βιντεοκλήσεων.
- Μπορούσε να υποστηρίξει τηλεοπτική μετάδοση μέσω πρόσβασης στο διαδίκτυο.
- Κάτι που την διαφοροποιεί από τις προηγούμενες γενιές είναι ότι παρείχε υπηρεσίες βασισμένες στην τοποθεσία του χρήστη (GPS).
- Η χρήση πολυμέσων καθώς και ο χώρος του video-gaming αναπτύχθηκε αισθητά χάρη στην 3G γενιά.
- Η γενιά 3G κάλυψε το κενό της διαλειτουργικότητας (interoperability) το οποίο είχαν ως ελάττωμα οι γενιές 1G και 2G.
- Εισήγαγε την IP συνδεσιμότητα (Internet Protocol) βασιζόμενη σε υπηρεσίες δεδομένων με την χρήση πακέτων [5].

### Μειονεκτήματα

- Λόγω αύξησης των προτοκόλλων και του δεσμευμένου ραδιοφάσματος τόσο οι κινητές συσκευές όσο και οι σταθμοί βάσης έπρεπε να αναβαθμιστούν για να υποστηρίξουν 3G δίκτυα, το οποίο και αποτέλεσε μεγάλο και δαπανηρό έργο.
- Λόγω της διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης υψηλής πολυπλοκότητας αλλά και λόγω της αυξημένης ροής δεδομένων οι ανάγκες και τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας αυξήθηκαν σημαντικά.



- Η γενιά 3G απαιτεί σταθμούς βάσης πιο κοντά στους χρήστες για την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση κάτι το οποίο είναι επίσης δαπανηρό.
- Η δυνατότητα αποστολής φωνής και δεδομένων παράλληλα δεν υπήρχε, ενώ σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης έβγαινε από την εμβέλεια ενός σημείου πρόσβασης και έμπαινε σε ένα άλλο (roaming) υπήρχαν προβλήματα στην ποιότητα καθώς και διακοπές στη μετάδοση [5].

### **1.2.5. Γενιά 4G**

Με στόχο την επίτευξη συνεχούς πρόσβασης σε υψηλό φάσμα συχνοτήτων, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη μαζικής συνδεσιμότητας, η αρχιτεκτονική των δικτύων επικοινωνίας έπρεπε να ακολουθήσει μία ετερογενή αρχιτεκτονική. Τα κινητά δίκτυα της 3ης γενιάς βασίζονται στην ομογενή φιλοσοφία κάλυψης μίας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής, δηλαδή τον σχεδιασμό δικτύων ίδιας λειτουργίας καθ'όλη την εμβέλεια τους. Η τέταρτη γενιά συνδύασε την αύξηση της εμβέλειας με την συνεργασία υποδικτύων τα οποία φέρουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και εκτελούν διαφορετικό ρόλο. Παράδειγμα αποτελεί η συνύπαρξη της Local Area Network (LAN) τεχνολογίας με πολυκυψελωτά δίκτυα [6].

Η γενιά 4G, η οποία έκανε την εμφάνιση της το 2009, παρείχε μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων, υψηλότερο ρυθμό δεδομένων τάξεως ανώτερης των 200Mbps, αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης καθώς και ανεπτυγμένη διαλειτουργικότητα [7]. Τα δίκτυα 4ης γενιάς χαρακτηρίζονται από την ανάγκη να υποστηρίζουν ετερογενή τερματικά με διαφορετικά μεγέθη καθώς και υπολογιστική δύναμη. Ένα ομογενές δίκτυο αποτελείται από πανομοιότυπους κόμβους μετάδοσης. Αντιθέτως, στην ετερογενή αρχιτεκτονική δικτύων υπάρχουν δύο και πολλές φορές παραπάνω κατηγορίες κόμβων οι οποίοι με σκοπό την ομαλή τους επικοινωνία τηρούν μια ιεραρχία στο συνολικό δίκτυο [8].

Τα συστήματα 4G γενιάς βασίζονται στην IP αρχιτεκτονική κατά την οποία κάθε κινητή συσκευή λειτουργεί όχι μόνο σαν δέκτης αλλά και ως δρομολογητής (router) σε αντίθεση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική κόμβων και ακτίνων κυψελωτών δικτύων της 2ης και 3ης γενιάς. Η κύρια διαφορά είναι ότι η γενιά 4G δεν υποστηρίζει δίκτυα μεταγωγής κυκλωμάτων, αντιθέτως, βασίζεται αποκλειστικά σε IP πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων, ενώ η αρχιτεκτονική GPRS της 2.5G και 3G επέτρεπε και τα δύο για παροχή υπηρεσιών κλήσεων και δεδομένων. Πέρα από την καθολική χρήση του IP

πρωτοκόλλου η άνοδος της τέταρτης γενιάς συνδυάστηκε με τις παρακάτω τεχνολογίες [2].

### **1.2.5.1. LTE-Advanced**

Η πρώτη κυκλοφορία της τεχνολογίας LTE (Long Term Evolution) έγινε το 2009 στο Όσλο της Νορβηγίας και στην Στοκχόλμη της Σουηδίας. Η γενιά 4G βασίζεται αποκλειστικά σε IP πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων. Η εφαρμογή του IP πρωτοκόλλου σημαίνει ότι όλες οι μορφές πληροφορίας από σταθμό βάσης σε τερματικό και αντίστροφα είναι της μορφής δεδομένων χωρισμένα σε αυτόνομα πακέτα. Η επικοινωνία σε ένα δίκτυο βασίζεται σε συνεχόμενες ροές των παραπάνω πακέτων. Αυτό σημαίνει και την κατάργηση των παραδοσιακών κυκλωμάτων μεταγωγής που διαθέτουν μονάχα μία και μοναδική γραμμή σύνδεσης ανάμεσα σε δύο τερματικούς. Η ανάπτυξη στον τομέα των κινητών δικτύων είναι ανάλογη και της αύξησης της χρήσης δεδομένων η οποία αυξάνεται ακόμα παραπάνω με την πρόσθεση όλο και παραπάνω χρηστών και εφαρμογών. Η τεχνολογία LTE-Advanced με στόχο να ανταποκριθεί στις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις για συνδεσιμότητα και χρήση δεδομένων έθεσε μια σειρά από εργαλεία [2].

### **1.2.5.2. Αρχιτεκτονική Ετερογενών Δικτύων (HET NET)**

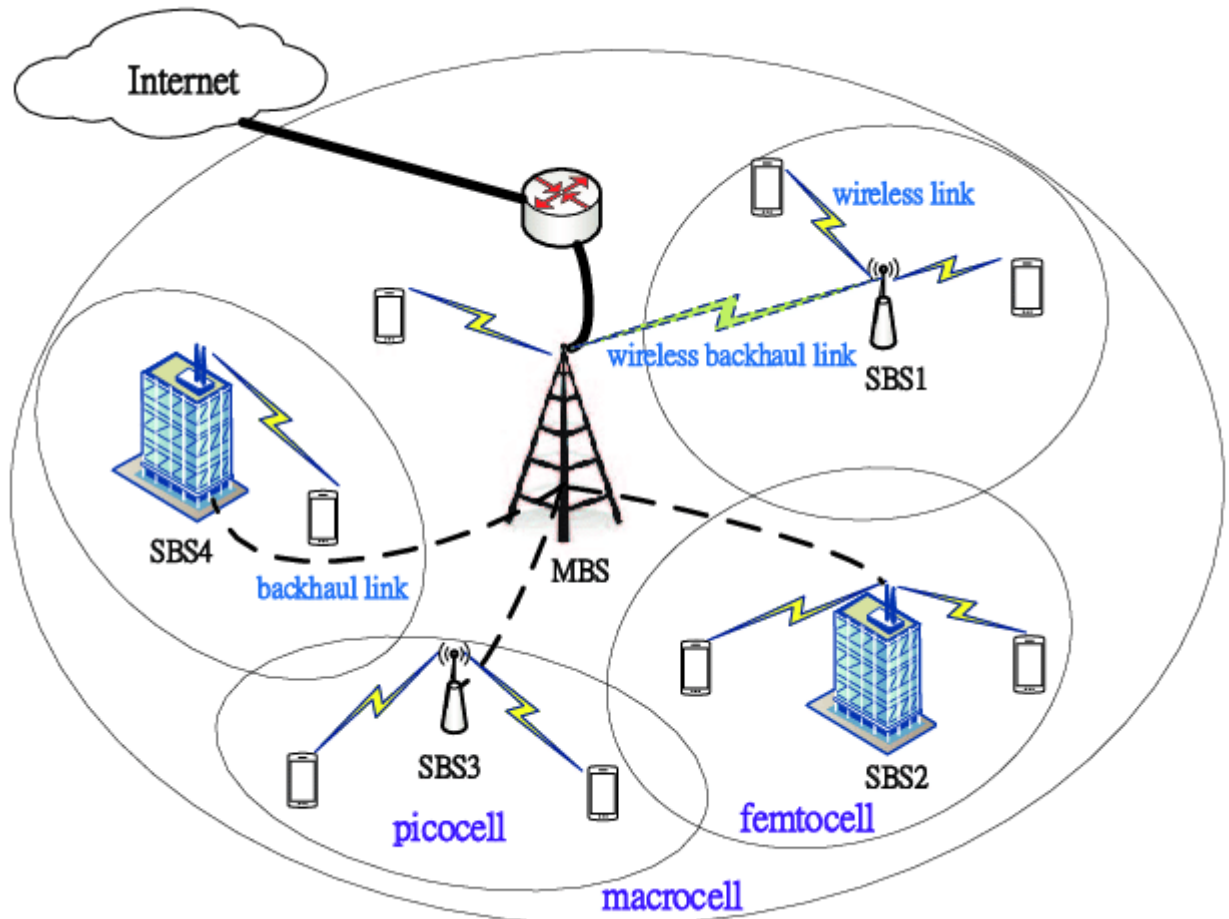
Τα ετερογενή δίκτυα εισήχθησαν από την 3GPP (Third Generation Partnership Project) με στόχο να ενισχύσουν την εφαρμογή της LTE-A τεχνολογίας. Περιλαμβάνουν την χρήση κυψελών (cells) διαφόρων μεγεθών, από macro cell έως pico-cells και femto-cells, με στόχο να αυξήσουν την εμβέλεια σε απομακρυσμένες περιοχές και σταθμούς αναμετάδοσης (**Εικόνα 1.1**). Στόχος των ετερογενών δικτύων είναι η βελτίωση της υπάρχουσας χωρητικότητας και η αποδοτικότερη μεγέθυνση της εμβέλειας με την τοποθέτηση περαιτέρω κόμβων [2].

Κατά την ομογενή φιλοσοφία δικτύων, υπάρχει ομοιογένεια ως προς τη λειτουργία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν ένα συνολικό δίκτυο [9]. Η ετερογένεια στην ασύρματη επικοινωνία αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών κόμβων επικοινωνίας οι οποίοι δεν ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Ένα ετερογενές δίκτυο ευρείας κάλυψης περιλαμβάνει ποικιλία κυψελών ονόματι, macrocells, picocells και femtocells, με στόχο την κάλυψη ανόμοιων περιοχών με ενδεχομένως διαφορετικές ανάγκες η κάθε μια.

Για παράδειγμα διαφορετική αντιμετώπιση χρειάζεται μία εσωτερικού χώρου περιοχή (εργασιακό περιβάλλον), μία υπόγεια περιοχή ή μία κατοικία. Η συνύπαρξη όλων αυτών των επιμέρους υποδικτύων τα οποία διαφέρουν ως προς την εμβέλεια, την απαιτούμενη ισχύ και την χωρητικότητα δημιουργούν ένα ετερογενές δίκτυο.

Αναλόγως τις περιοχές κάλυψης και τις περιπτώσεις συνδεσιμότητας τα υποδίκτυα σε ένα ετερογενές δίκτυο χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- **Macrocell Networks:** Τα macrocell δίκτυα παρέχουν κάλυψη μεγάλης έκτασης μέσω της χρήσης σταθμών βάσεων υψηλής ενέργειας. Οι σταθμοί βάσης αυτοί συνήθως τοποθετούνται σε υψηλά σημεία έχοντας καθαρό οπτικό πεδίο των γειτονικών εμποδίων και κτιρίων. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη εμβέλεια μετάδοσης και ακτίνα κάλυψης 1-25km. Ακόμη, οι σταθμοί βάσης αυτών των δικτύων τοποθετούνται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους ενώ χρήστες που είναι τοποθετημένοι στα όρια των κυψελών υπομένουν παρεμβολές λόγω των φαινομένων εξασθένησης (fading) και πολλαπλών ροών σήματος (multipath).
- **Microcell Networks:** Ένα microcell δίκτυο εξυπηρετείται από σταθμό βάσης χαμηλής ισχύος και εντοπίζεται σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές όπως εμπορικά κέντρα. Η ακτίνα κάλυψης είναι στα 200m έως και 1km. Λόγω του μικρού μεγέθους χαρακτηρίζονται και από αυξημένη κινητικότητα και πυκνότητα συνδέσεων.
- **Picocell Networks:** Ένα picocell δίκτυο καλύπτει περιοχές εκτάσεως 100-200m. Συνήθως αξιοποιούνται στο εσωτερικό κτιρίων και βοηθούν στην βελτίωση της κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους.
- **Femtocell Networks:** Βοηθούν στην κάλυψη περιοχών στις οποίες υπάρχει απώλεια σήματος σε εσωτερικούς χώρους. Έχουν ως ρόλο την συμπλήρωση κάλυψης που προσφέρουν τα Picocell Networks και εξυπηρετούν αρκετά μικρότερο αριθμό χρηστών από τα προηγούμενα [10].



**Εικόνα 1.1:** Απεικόνιση ετερογενούς δικτύου [12].

Στην πιο συμβατική τους μορφή τα ετερογενή δίκτυα διαθέτουν σταθμούς βάσης και χρήστες με ένα μόνο κεραιοστοιχείο χωρίς την παρουσία κόμβων αναμετάδοσης. Εμπεριέχουν τουλάχιστον δύο κατηγορίες υποδικτύων όπως macrocells και femtocells. Σε αυτήν την περίπτωση τα macrocells είναι τα κύρια υποδίκτυα και είναι εκείνα που κατέχουν και τους φασματικούς πόρους όλου του δικτύου. Τα δευτερεύοντα δίκτυα femtocells χρησιμοποιούν αποκλειστικά πόρους που διαθέτουν τα macrocells, και ο ρόλος τους είναι να περιορίζουν τις παρεμβολές που παρατηρούνται στις περιοχές όπου υπάρχει αλληλοκάλυψη κυψελών και υποδικτύων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται cross-tier interference και τα femtocells είναι υπεύθυνα να διατηρούν υψηλή την ποιότητα μετάδοσης για τους χρήστες που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές [10].

Ο τρόπος κατά τον οποίο οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στο ετερογενές δίκτυο χρειάζεται να καθορισθεί αντίστοιχα. Υπάρχουν δύο κύρια μοντέλα πρόσβασης, το μοντέλο ανοιχτής πρόσβασης (open access) και το μοντέλο κλειστών ομάδων (closed subscriber groups).

Κατά την ανοιχτή πρόσβαση οι χρήστες συνδέονται με μία κυψέλη αναλόγως της περιοχής κάλυψης του δικτύου και της γεωγραφικής τους θέσης. Για παράδειγμα εάν ένας χρήστης είναι εντός εμβέλειας μιας μικρο-κυψέλης (micro-cell) τότε ιδανικά επικοινωνεί με αυτή. Αντιθέτως, εάν δεν μπορεί να εντοπιστεί από μία μικρο-κυψέλη αλλά γεωγραφικά ανήκει σε μία μεγαλύτερης τάξεως τότε συμμετέχει στην ροή πληροφορίας της τελευταίας.

Κατά το closed subscriber groups μοντέλο, οι χρήστες μικρο-κυψελών επικοινωνούν αποκλειστικά με μικρο-κυψέλες. Παρομοίως, οι χρήστες οι οποίοι έχουν κατανεμηθεί για επικοινωνία με μακροκυψέλες (macro-cell) επικοινωνούν αποκλειστικά με αυτές ακόμα και αν ανήκουν στην εμβέλεια μιας μικρο-κυψέλης.

Για την ομαλή λειτουργία είναι απαραίτητες οι διαδικασίες διαβίβασης (handover, handoff), έτσι ώστε κατά την εναλλαγή ενός χρήστη από το ένα υποδίκτυο στο άλλο να μην διακόπτεται η σύνδεση. Συνεπώς, η ετερογένεια των δικτύων βασίζεται άμεσα και από το πόσο καλή είναι η επικοινωνία και η διαλειτουργικότητα ανάμεσα στα επιμέρους υποδίκτυα [10]. Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες handoff τεχνικών, η οριζόντια (Horizontal Handoff) και η κάθετη (Vertical Handoff).

Κατά την Vertical Handoff ο χρήστης κινείται ανάμεσα σε ασύρματα δίκτυα τα οποία ενδέχεται να έχουν διαφορετική τεχνολογία πρόσβασης ακόμα και διαφορετική φασματική χωρητικότητα. Παράλληλα, το ετερογενές δίκτυο καλείται να διατηρήσει την ποιότητα της σύνδεσης όταν ο χρήστης κινείται από ένα δίκτυο χαμηλής κάλυψης σε ένα δίκτυο μεγάλης κάλυψης και αντίστροφα. Αντιθέτως, κατά την Horizontal Handoff ο χρήστης κινείται ανάμεσα σε δίκτυα τα οποία έχουν την ίδια μέθοδο πρόσβασης και διαμοιρασμού φάσματος [10].

Μετά την επισκόπηση των τεχνικών χαρακτηριστικών των ετερογενών δικτύων είναι πιο εμφανή τα πλεονεκτήματά τους. Αυτά είναι:

- Βελτίωση χωρητικότητας συστήματος: Πολλοί κινητοί σταθμοί με διαφορετικές μεθόδους πρόσβασης μπορούν να συνυπάρχουν στην ίδια περιοχή κάλυψης αυξάνοντας αισθητά την χωρητικότητα του δικτύου.
- Πυκνότητα δικτύου: Προκειμένου να επιτευχθεί μαζική συνδεσιμότητα πολλοί χρήστες με διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα κατανέμονται σε μικρότερες περιοχές οι οποίες καλύπτονται από μικρότερου μεγέθους κυψέλες. Ως αποτέλεσμα η δομή του δικτύου είναι πιο πυκνή.
- Μείωση περιοχών ασθενούς κάλυψης: Με την χρήση αυξημένου αριθμού μικρο-κυψελών καλύπτονται περιοχές που υπό άλλες συνθήκες θα είχαν

μειωμένη συνδεσιμότητα και κακές συνθήκες καναλιού. Παράλληλα αυξάνεται και το συνολικό εύρος κάλυψης του δικτύου.

- Μείωση απωλειών και καθυστερήσεων: Εάν δεν υπήρχαν οι μικρο-κυψέλες σε μια μεγάλη περιοχή θα υπήρχαν μεγάλες απώλειες κατά την μετάδοση (path losses) και μειωμένο κέρδος τόσο στο επίπεδο των σταθμών βάσεων όσο και των τερματικών. Μέσω χρήσης μικρο-κυψελών και υποδικτύων βελτιώνονται οι backhaul συνδέσεις μεταξύ σταθμών και τερματικών υπό μικρότερες απώλειες (path loss).
- Βελτίωση της φασματικής απόδοσης: Με την συνύπαρξη πολλών κυψελών ανά δίκτυο επιτυγχάνεται καλύτερη φασματική απόδοση. Ακόμη ο συνδυασμός πολλών δικτύων μπορεί να καλύψει συνδέσεις από το έδαφος έως και διαστημικές συνδέσεις [10].

### 1.2.5.3. Αναμετάδοση (Relaying)

Οι ασύρματοι κόμβοι αναμετάδοσης (Relay Stations, RS) μειώνουν τα κενά κάλυψης και βελτιώνουν την ποιότητα επικοινωνίας υπό συνθήκες υψηλής κινητικότητας. Χωρίζονται σε κατηγορίες βάση των επιπέδων ισχύος που καταναλώνουν. Το χαρακτηριστικό αυτό συνδέεται άμεσα με την εμβέλεια τους αλλά και την ιεραρχία τους στο συνολικό δίκτυο. Για παράδειγμα, συναντάμε RSs με πλήρη έλεγχο της κυψέλης τους αλλά και RSs των οποίων ο ρόλος είναι καθαρά συμπληρωματικός όπως στην περίπτωση των χρηστών στα όρια κυψελών (cell-edge users). Οι RSs συνδέονται με τα macro-cells μέσω ασύρματου μέσου, ενώ οι παράμετροι που καθορίζουν την απόδοσή τους είναι η γεωγραφική τους θέση και η διαχείριση της κινητικότητας. Η αποδοτικότητα του ασύρματου δικτύου αυξάνεται όχι μόνο με την αντικατάσταση ενός μακρινού κόμβου με πολλαπλούς κόμβους μικρότερης εμβέλειας, αλλά και χάρη στην δυνατότητα παράκαμψης εμποδίων μεταξύ συνδρομητικών σταθμών και σταθμών βάσης που προκαλούν παρεμβολές κατά την μετάδοση [2].

### 1.2.5.4. Coordinated MultiPoint Transmission/Reception (CoMP)

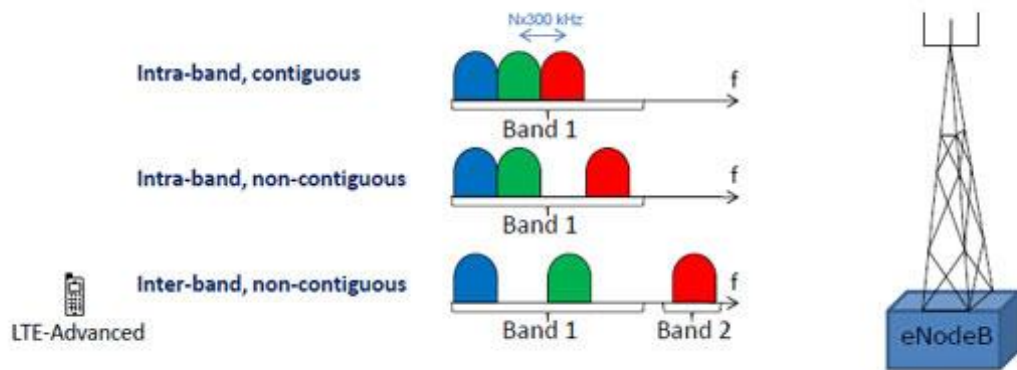
Η CoMP (Coordinated MultiPoint Transmission/Reception) είναι η βασική τεχνική για την βελτίωση του ρυθμού δεδομένων και της ποιότητας σύνδεσης για τους cell-edge users και χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, την Joint Processing (JP) και την Coordinated Scheduling/Beamforming (CS/CB). Η JP παρέχει στον χρήστη πολλαπλές επιλογές σύνδεσης ανάμεσα σε σταθμούς

βάσης που είναι σε επικοινωνία μεταξύ τους. Αντιθέτως, η CS/CB παρέχει μονάχα μία πιθανή σύνδεση, η οποία καθορίζεται από τον συντονισμό των γειτονικών κυψελών, οδηγώντας μέσω κατευθυντικών κεραιών (beamforming) τον χρήστη στην βέλτιστη πιθανή ζεύξη. Η βασική ιδιότητα της CoMP είναι η συνεργασία των γειτονικών κυψελών και σταθμών βάσης με στόχο την μετατροπή των παρεμβολών σε ωφέλιμο σήμα.

Η CoMP είναι ένα εργαλείο ώστε να διατηρηθεί ο υψηλός ρυθμός δεδομένων σε οριακές περιοχές κάλυψης (cell-edge), αλλά και σε περιπτώσεις που οι συνθήκες δεν το επιτρέπουν. Ακόμη, επιτρέπει παραπάνω από έναν σταθμό βάσης να μεταδίδει δεδομένα σε έναν και μόνο χρήστη ταυτόχρονα. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, η CoMP απαιτεί υψηλής ταχύτητας backhaul συνδέσεις ανάμεσα στους σταθμούς βάσης. Επίσης, με σκοπό η μετάδοση δεδομένων να είναι επαρκής για όλους τους χρήστες, η χρήση της CoMP πρέπει να περιοριστεί σε όσο το δυνατόν μικρότερα επίπεδα ισχύος [2].

#### **1.2.5.5. Συνάθροιση Υποφορέων (Carrier Aggregation)**

Η LTE-A εισήγαγε την λογική της συνάθροισης φορέων (Carrier Aggregation, CA) με στόχο την επίτευξη ενός φάσματος μετάδοσης της τάξεως των 100MHz. Η τεχνολογία CA επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να συνδέονται ταυτόχρονα σε πολλαπλούς υποφορείς συχνοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό επιμέρους φορέων (Component Carriers, CC) μικρότερου συγκριτικά εύρους από το συνολικά διαθέσιμο, της τάξεως των 20MHz και κάτω. Ανάλογα με το αν αυτοί οι φορείς είναι συνεχόμενοι ή διακοπτόμενοι στο πεδίο της συχνότητας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Οι κατηγορίες είναι οι intra-band contiguous, intra-band non-contiguous and inter-band non-contiguous. Στην πρώτη περίπτωση (intra-band contiguous), οι CC παρέχουν στήριξη υπό την ίδια συχνότητα λειτουργίας, σχηματίζοντας ένα συνεχόμενο φάσμα. Λόγω μεταβλητών συνθηκών και του διαχωρισμού συχνότητας αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Έτσι, κατά την δεύτερη και τρίτη κατηγορία (intra-band non-contiguous, inter-band non-contiguous) οι CC πολλές φορές παρουσιάζουν ένα ή παραπάνω κενό μεταξύ τους με αποτέλεσμα να λειτουργούν υπό διαφορετικά φάσματα (**Εικόνα 1.2**). Ως αποτέλεσμα, η CA προστατεύει τα καναλιών που λειτουργούν σε γειτονικές συχνότητες [2].



Εικόνα 1.2: Κατηγορίες Component Carriers [13].

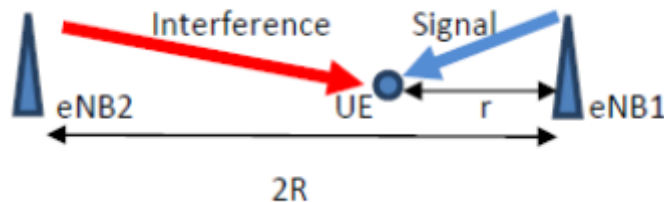
### 1.2.5.6. Συντονισμός ενδοκυψελικών παρεμβολών (enhanced Inter-Cell Interference Coordination)

Οι παρεμβολές που παρατηρούνται μεταξύ κυψελών είναι από τα κύρια προβλήματα που επηρεάζουν τις υπηρεσίες ασύρματων δικτύων ειδικά κατά τις περιπτώσεις OFDMA διαμόρφωσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται όταν χρήστες αξιοποιούν τους ίδιους φασματικούς πόρους. Ένας τρόπος να τεθούν υπό έλεγχο οι ενδοκυψελικές παρεμβολές είναι να οριστούν περιορισμοί τόσο στο επίπεδο συχνότητας-χρόνου όσο και στο επίπεδο κατανάλωσης ισχύος για κάθε επικοινωνιακό πόρο και σταθμό βάσης ξεχωριστά. Για παράδειγμα, απαγορεύοντας σε μία κυψέλη την πρόσβαση σε συγκεκριμένους φορείς συχνοτήτων και περιορίζοντας την μέγιστη τιμή της ισχύος μετάδοσης της, οι παρεμβολές με γειτονικές και μη κυψέλες μπορούν να μειωθούν αισθητά. Σύμφωνα με αυτήν την λογική οι μηχανισμοί της eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination) χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, την κατηγορία διαχείρισης στο επίπεδο του χρόνου, στο επίπεδο συχνοτήτων και στο επίπεδο ισχύος [2].

Ένας από τους βασικούς στόχους της LTE-A είναι η βελτίωση του ρυθμού δεδομένων και της ποιότητας του συστήματος για τους cell-edge χρήστες. Τα κυψελωτά δίκτυα που εφαρμόζουν πολλαπλή πρόσβαση με διαχωρισμό κώδικα (CDMA) συνήθως έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στις ενδοκυψελικές παρεμβολές. Αντιθέτως για OFDM κυψελωτά δίκτυα (WiMAX, LTE, LTE-A) οι παρεμβολές είναι πιο έντονες στα όρια των κυψελών και ειδικά όταν όλα τα διαθέσιμα κανάλια είναι δεσμευμένα [2].



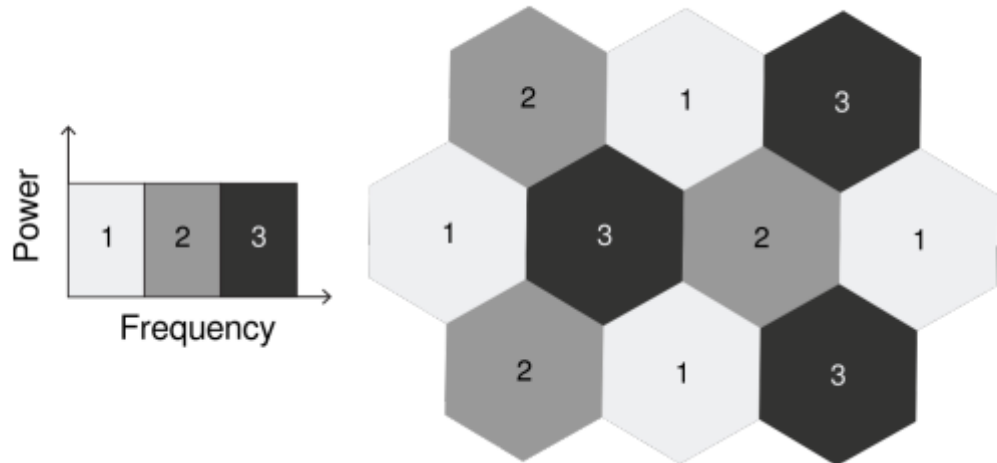
Όταν ένας χρήστης απομακρύνεται από το κέντρο μίας κυψέλης, ο σηματοθορυβικός του λόγος SNIR (Signal to Interference plus Noise Ratio) μειώνεται για δύο λόγους. Αρχικά, με την αύξηση της απόστασης από τον σταθμό βάσης αυξάνεται η απώλεια διάδοσης (Path Loss) άρα η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μειώνεται. Ο άλλος λόγος είναι το φαινόμενο που απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.3**. Οι ενδοκυψελικές παρεμβολές αυξάνονται όταν ο χρήστης είναι συνενδεδεμένος σε έναν σταθμό βάσης και πλησιάζει σε έναν γειτονικό. Θεωρώντας ότι και οι δύο σταθμοί αξιοποιούν την ίδια συχνότητα, το σήμα που λαμβάνεται από τον μακρινό σταθμό αντιμετωπίζεται ως παρεμβολή, καθώς ο χρήστης είναι συνενδεδεμένος στον σταθμό με την μικρότερη απώλεια διάδοσης. Για να περιοριστούν οι παρεμβολές αυτές εφαρμόζονται τεχνικές οι οποίες διαμοιράζουν το διαθέσιμο φάσμα αναλόγως την θέση του χρήστη σε κάθε κυψέλη [14].



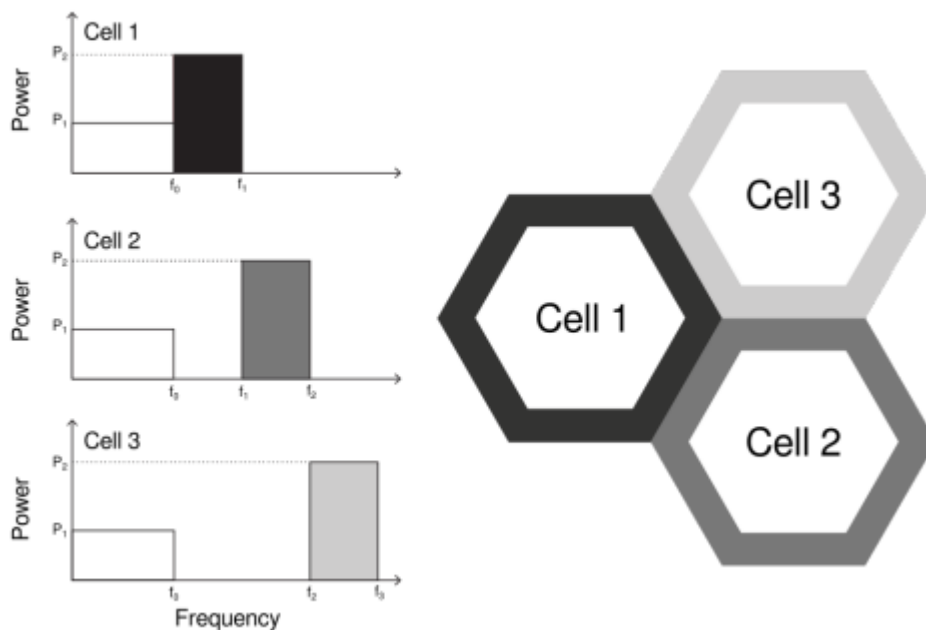
**Εικόνα 1.3:** Παρεμβολές κατά την κίνηση χρήστη ανάμεσα σε σταθμούς βάσης [14].

Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνεται μέσω μοντέλων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (Frequency re-use models). Η πιο απλή περίπτωση επαναχρησιμοποίησης είναι το μοντέλο Reuse-3, όπου το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές με την καθεμία να αντιστοιχεί σε μία κυψέλη για όλους τους χρήστες (**Εικόνα 1.4**). Με στόχο τον έλεγχο των πιο ακραίων συνθηκών για έναν χρήστη (cell-edge users) εφαρμόστηκε το μοντέλο FFR (Fractional Frequency re-use) (**Εικόνα 1.5**). Κατά αυτό το μοντέλο, η απόδοση συχνοτήτων πραγματοποιείται μέσω του FRF (Frequency Reuse Factor), ενός δείκτη ο οποίος κυμαίνεται από το 1 έως το 3. Οι χρήστες με τον υψηλότερο SNIR λαμβάνουν χαμηλή τιμή FRF ενώ αυτοί με τις χειρότερες συγκριτικά συνθήκες λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές. Κάθε τιμή αντιστοιχεί σε μία φασματική περιοχή της οποίας το μέγεθος αναλογεί με το  $1/\text{FRF}$  ποσοστό του συνολικού φάσματος. Δηλαδή για edge-cell χρήστες με  $\text{FRF}=3$  αποδίδεται το  $1/3$  του συνολικού φάσματος στις αντίστοιχες περιοχές. Περαιτέρω διαχωρισμός μπορεί να γίνει και με γνώμονα την ισχύ με τη χρήση των μοντέλων SFR (Soft Frequency Reuse) και Strict FR (Strict Frequency Reuse).

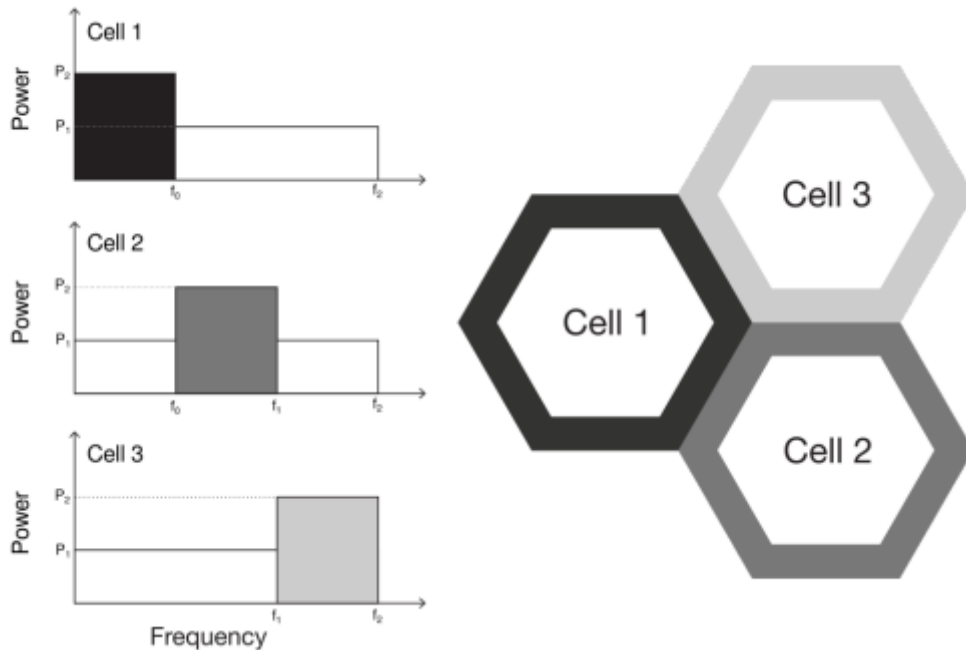
Με βάση αυτά, στους cell-edge χρήστες αναλογεί μικρότερο μέρος του φάσματος, όμως μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος συγκριτικά με τους inner-cell χρήστες (**Εικόνα 1.6**) [15].



**Εικόνα 1.4:** Μοντέλο User-3 [15].



**Εικόνα 1.5 :** Μοντέλο FFR [15].



Εικόνα 1.6: Μοντέλο SFR [15].

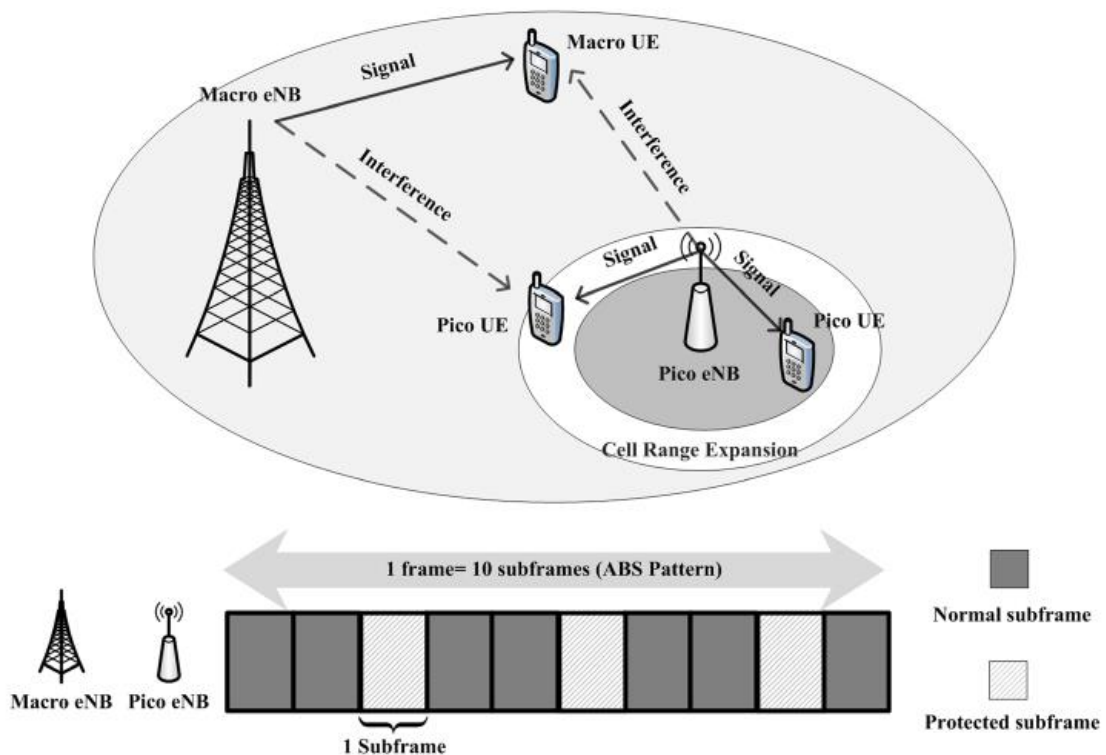
### 1.2.5.7. Επέκταση εύρους κυψελών (Cell Range Extension)

Επειδή η ισχύς μετάδοσης ενός σταθμού αναμετάδοσης (RS) είναι σχετικά χαμηλή, ο σηματοθορυβικός λόγος SNIR του χρήστη είναι εξίσου χαμηλός κάνοντας δύσκολη την επικοινωνία με τον αντίστοιχο σταθμό βάσης. Η Cell Range Extension (CRE) αυξάνει το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων για τους χρήστες, ειδικά εκείνων που συνδέονται με macro-κυψέλες, αυξάνοντας παράλληλα τον ρυθμό μετάδοσης bit του συστήματος. Η CRE είναι μία τεχνική διαχείρισης του φορτίου και κινητικότητας ενός δικτύου, καθώς και των παραμέτρων του αφορούν τον διαμοιρασμό φάσματος και δεδομένων [2].

Η κατανόηση της CRE είναι ευκολότερη μέσω της παρατήρησης ετερογενών δικτύων (Εικόνα 1.7). Οι κύριοι σταθμοί βάσης MBSs (Macro Base Stations) δεν επαρκούν πλέον για την κάλυψη των ανάγκων μεγάλου αριθμού συνδέσεων. Με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας χωρίς επέκταση του φάσματος προστέθηκαν διαφορετικά είδη σταθμών βάσης όπως pico BS (PBS), femto BS (FBS) και relay BS (RBS). Οι ρόλοι αυτών των σταθμών είναι διαφορετικοί το ίδιο και τα επίπεδα ισχύος τους. Η εμβέλεια τους είναι εμφανώς μικρότερη από αυτή του MBS καθώς παρέχουν στήριξη σε περιοχές με αυξημένη χωρητικότητα ή σε περιοχές που οι διαβιβάσεις (handoff) είναι πιο συχνές. Ως αποτέλεσμα δεν υπάρχει ομοιογένεια όσον αφορά τις εμβέλειες των

επιμέρους σταθμών. Για παράδειγμα η εμβέλεια ενός PBS είναι δεκάδες μέτρα ενώ ενός MBS είναι στα εκατοντάδες μέτρα έως και χιλιόμετρα [16].

Ας υποθέσουμε ότι σε μια περιοχή υψηλής κινητικότητας υπάρχει ένας PBS και ένας MBS. Έαν η εμβέλεια του PBS καλύπτει εκείνη την περιοχή ο χρήστης θα συνδεθεί σε αυτόν και όχι στον MBS. Το φαινόμενο αυτό είναι και ο λόγος ύπαρξης του PBS, όμως αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Υπό συνθήκες μεγάλης κινητικότητας και παρουσίας πολλών συνδέσεων, ο PBS υπερφορτώνεται με αποτέλεσμα οι χρήστες να καταλήγουν να συνδέονται με τον MBS. Η CRE είναι μια τεχνική η οποία σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαβίβαση (handover) μεταξύ MBS και PBS κατευθύνει τον χρήστη στον PBS με στόχο την στήριξη και την αποφυγή υπερφόρτωσης του κύριου σταθμού. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέοντας μία τιμή ισχύος στο σήμα που λαμβάνεται από τον PBS προς τον χρήστη, αυξάνοντας κατ'επέκταση το εύρος του. Το πρόβλημα που εμφανίζεται είναι ότι το σήμα από τον MBS πλέον αντιμετωπίζεται ως παρεμβολή. Συνεπώς η CRE είναι αναγκαίο να πλαισιώνεται πάντοτε από τεχνικές ICIC [16].



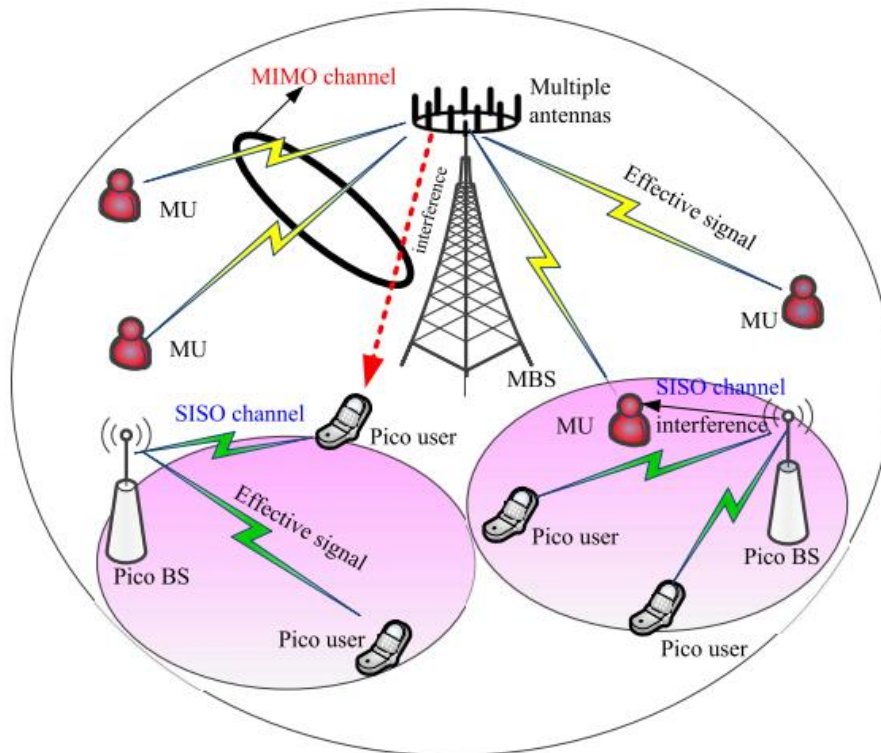
Εικόνα 1.7: Αναπαράσταση CRE [17].

### 1.2.5.8. Τεχνολογία Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

Η τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output) αναφέρεται σε επικοινωνιακά συστήματα τα οποία φέρουν πολλαπλές κεραιές τόσο στο επίπεδο του δέκτη όσο και σε αυτό του πομπού [2]. Καθώς οι γενιές τηλεπικοινωνίας εξελίσσονται, τα ασύρματα δίκτυα καλούνται να υποστηρίξουν υψηλή χωρητικότητα και ταχύτητα κατά την μετάδοση. Η τεχνολογία MIMO εφαρμόστηκε ως μέσο αύξησης της χωρητικότητας των δικτύων και του ρυθμού δεδομένων χωρίς την περαιτέρω αύξηση του διαθέσιμου φάσματος. Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι η LTE και η LTE-A καθιέρωσε την SU-MIMO (Single User MIMO) και κατ'επέκταση την MU-MIMO (Multi-user MIMO) προσέγγιση. Η MU-MIMO αρχιτεκτονική παρέχει πρόσβαση σε πολλαπλά χωρικά κανάλια σε πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα τόσο στην κάτω όσο και στην άνω ζεύξη. Οι χρήστες λαμβάνουν σήμα μέσω των ίδιων ραδιοπόρων και ως αποτέλεσμα βελτιώνεται η φασματική απόδοση και αυξάνεται η εμβέλεια και η χωρητικότητα του συστήματος. Με στόχο την αποφυγή παρεμβολών που ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα σύνδεσης, ο διαχωρισμός των επιμέρους καναλιών είναι ορθογωνικός, τουλάχιστον για την LTE-A προσέγγιση. Οι όροι ορθογωνικότητα αλλά και τα MIMO συστήματα περιγράφονται πιο αναλυτικά στο *Κεφάλαιο 2* και *Κεφάλαιο 3* αντίστοιχα [18].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο συνδυασμός MIMO αρχιτεκτονικής με την ετερογενή προσέγγιση δικτύων. Τα ετερογενή δίκτυα βασιζόμενα στην MIMO αρχιτεκτονική αποτελούν ακόμη μία μέθοδο για την βελτίωση της φασματικής απόδοσης και χωρητικότητας του συστήματος βασιζόμενα στην χωρική πολυπλεξία. Η διαφορά που τα ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα ετερογενή δίκτυα είναι η χρήση πολλαπλών κεραιοστοιχείων είτε στον σταθμό βάσης είτε στον χρήστη. Η χρήση παραπάνω κεραιοστοιχείων μειώνει την παρουσία θορύβου, τις ενδο-κυψελικές παρεμβολές καθώς και την εξασθένιση μεγάλης κλίμακας. Ο σχεδιασμός τους περιέχει σταθμούς βάσης που ανήκουν σε macrocell δίκτυα οι οποίοι μεταδίδουν μέσω πολλών κεραιών σε πολλαπλούς χρήστες που ανήκουν στην εμβέλεια microcell δικτύου. Περαιτέρω υποδίκτυα όπως picocell και femtocell διαθέτουν SISO (Single-In-Single-Out) κεραιοστοιχεία και εξυπηρετούν την δική τους ομάδα χρηστών. Μία πρόκληση κάτω από αυτήν την αρχιτεκτονική είναι οι παρεμβολές που παρατηρούνται ανάμεσα σε χρήστες που ανήκουν σε διαφορετικά υποδίκτυα καθώς όπως φαίνεται και από την **Εικόνα 1.8** η χρήση μίας massive-MIMO

διάταξης σε ένα πρωτεύον macrocell δίκτυο κάνει αυτό το φαινόμενο πιο συχνό. Η λύση είναι η βελτίωση των τεχνικών beamforming κατά τον σχεδιασμό του δικτύου [11].



**Εικόνα 1.8:** Δίκτυο που εφαρμόζει συνδυασμό MIMO και ετερογενής αρχιτεκτονικής [11].

### 1.2.5.9. WiMAX

Η τεχνολογία WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) αποτελεί ένα σταθερό ευρυζωνικό σύστημα ασύρματης πρόσβασης (fixed Broadband Wireless Access system, BWA) βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.16. Η WiMAX χρησιμοποιείται για σταθερή και για κινητή επικοινωνία. Για σταθερή επικοινωνία μπορεί να προσφέρει εύρος πρόσβασης έως και 50 χλμ με ταχύτητες της τάξεως των 40Mbit/s-1Gbit/s και στην κινητή επικοινωνία προσφέρει ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση με εμβέλεια 5-15km. Χαρακτηριστικό της τεχνολογίας WiMAX είναι η δυνατότητα που προσφέρει σε συσκευές όπως φορητών υπολογιστών, PDAs (Personal Digital Assistant), να παραμείνουν συνενδεδεμένα στο δίκτυο παρά την κίνηση τους ενώ η δυνατότητα της διασύνδεσης επιτρέπει την επικοινωνία με πολλαπλούς σταθμούς ταυτόχρονα.

Μία αναγκαία συνθήκη για την πλαισίωση της τέταρτης γενιάς, είναι η πρόσθεση τεχνικών που αφορούν συστήματα κεραιών με στόχο την επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης, χωρητικότητας και αξιοπιστίας του δικτύου. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν:

- Smart Antenna Technology, συγκεκριμένα Beam forming, κωδικοποίηση στο πεδίο του χρόνου και του χώρου (Space-Time Code) και χωρική πολυπλεξία (Spatial Multiplexing).
- Fractional frequency reuse, δηλαδή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.
- Υπηρεσίες πολλαπλής διάδοσης (Multicast) και αναμετάδοσης [2].

### Πλεονεκτήματα

- Πολύ υψηλές ταχύτητες τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη.
- Αισθητή αλλαγή στην ποιότητα φωνής κατά την μετάδοση.
- Ευκολότερη πρόσβαση με μειωμένες καθυστερήσεις .
- Συγκριτικά μεγαλύτερο φασματικό εύρος από την γενιά 3G [5].

### Μειονεκτήματα

- Ανάγκη πρόσθεσης εξαρτημάτων στους ήδη υπάρχοντες σταθμούς βάσης.
- Η υπηρεσίες δεδομένων έγιναν πιο ακριβές προς τους καταναλωτές.
- Για την χρήση 4G υπηρεσιών οι χρήστες ήταν αναγκασμένοι να αλλάξουν συσκευές καθώς τα μοντέλα 3G επικοινωνίας δεν ήταν πλέον συμβατά με την 4G γενιά [5].
- Λόγω της ανόδου των φορητών ασύρματων συστημάτων και εφαρμογών, η αναφορά σε πιθανές επιπτώσεις υγείας (ερεθισμοί ματιών, μορφές καρκίνου κα.) εξαιτίας της έκθεσης σε ΗΜ πεδία έχει γίνει όλο και πιο συχνή. Επίσης η αρχιτεκτονική όλο και πιο πυκνών ασύρματων δικτύων, η αξιοποίηση όλο και περισσότερων περιοχών συχνοτήτων και η εγγύτητα που έχει ο ανθρώπινος πληθυσμός σε ΗΜ πηγές (ασύρματες συσκευές, συστήματα κεραιών κα) έχει θέσει την έκθεση σε ΗΜ κύματα και πεδία σε διαρκή μελέτη και εξέταση [19].

## 1.2.6. Γενιά 5G

Η γενιά 5G (2021-) στοχεύει σε συστήματα εξαιρετικά μεγάλης χωρητικότητας και ταχύτητας με ρυθμό μετάδοσης της τάξεως του 1Gbps, καθώς και με απαιτήσεις για μειωμένες λειτουργικές δαπάνες. Η πέμπτη γενιά οραματίζεται όχι μόνο την εφαρμογή μίας τεχνολογίας αλλά την δημιουργία ενός οικοσυστήματος τεχνολογιών ασύρματων δικτύων (**Εικόνα 1.8**) [12]. Οι κινητές συσκευές μπορούν να συνδυαστούν με δυνατότητες όπως ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο και χρήση πολυμέσων [13], ενώ οι υψηλές ταχύτητες επεξεργασίας και πρόσβασης ωθούν τις κινητές συσκευές πιο κοντά στις δυνατότητες ενός φορητού υπολογιστή [20].

Η 5η γενιά συμβαδίζει με το Internet of Things (IOT) το οποίο βασίζεται σε συσκευές οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω της σύνδεσης τους στο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα μέσω της 5ης γενιάς υποστηρίζεται η επικοινωνία ετερογενών συσκευών χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Τα παραπάνω ενδέχεται να αλλάξουν την καθημερινή καθώς και επαγγελματική ζωή ριζικά και κατ' επέκταση και την παγκόσμια οικονομία [21]. Έχει υπολογιστεί ότι το 2021 περίπου 28 δισεκατομμύρια έξυπνες συσκευές είναι συνενδεδυμένες παγκοσμίως ενώ 15 δισεκατομμύρια από αυτές συνδέονται μέσω machine to machine (M2M) τεχνολογίες. Επίσης 7 δισεκατομμύρια από αυτές συνδέονται μέσω κυψελωτών τεχνολογιών όπως 2G, 3G, και 4G οι οποίες δεν είναι πλήρως συμβατές με το IOT [21].



**Εικόνα 1.9:** Παράγοντες που αυξάνουν την κινητικότητα και χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς [22].



Το πλεονέκτημα της 5ης γενιάς έναντι της 4ης είναι η αύξηση του φάσματος περίπου κατά 400 φορές με την εφαρμογή smart antenna συστημάτων, ραδιοσυστημάτων βασιζόμενα σε ανάπτυξη λογισμικού, ευελιξία και κωδικοποίηση. Όσο ο αριθμός των συνενδεδεμένων συσκευών αυξάνεται η αξιοποίηση μη αδειοθετημένων περιοχών συχνοτήτων θα είναι όλο και πιο σημαντική στην εξισορρόπηση του δικτύου όσο και στην κάλυψη εξόδων. Για αυτόν τον λόγο η γενιά 5G στοχεύει σε συμβατότητα με ετερογενή δίκτυα μεγάλης κινητικότητας με στόχο να εκπληρώσει τις ανάγκες για ομαλή σύνδεση και διαλειτουργικότητα.

Η αρχιτεκτονική δικτύων πέμπτης γενιάς συνδυάζεται με τεχνολογίες όπως η νανοτεχνολογία, συστήματα ραδιοπρόσβασης (radio access networks, RANs), συσσωρευτές (accumulators), IP δίκτυα μεταγωγής πακέτων και cloud computing. Το cloud computing χρησιμοποιεί απομακρυσμένους διαδικτυακούς διακομηστές (servers) με στόχο την αποθήκευση δεδομένων και εφαρμογών των διαφόρων χρηστών. Επιτρέπει πρόσβαση σε αρχεία από όλο τον κόσμο χωρίς περαιτέρω εγκατάσταση λογισμικού αλλά μόνο με τη χρήση διαδικτύου. Το σύνολο πρωτοκόλλων 5G αποτελείται από τέσσερις στρώσεις (**Εικόνα 1.9**) [23].

Η Open Wireless Architecture (OWA) είναι σχεδιασμένη ανάμεσα στην physical layer του συστήματος και την User Application and Operating System layer (OS). Ο σκοπός της είναι να ξεχωρίζει τις εφαρμογές της OS layer, από την διαδικασία της ασύρματης μετάδοσης την οποία ελέγχει η physical layer. Περαιτέρω ρόλοι της είναι η ομαλή εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων Radio Transmission Technologies (RTTs) του συστήματος, αλλά και η στήριξη υπολογιστικού φορτίου κατά την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στις OS πλατφόρμες [24].

Η δεύτερη στρώση ονομάζεται Network Layer. Το επίπεδο δικτύου χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την άνω στρώση δικτύου και την κάτω στρώση δικτύου. Ο σκοπός αυτού του επιπέδου είναι η ανακατεύθυνση των δεδομένων από το στρώμα IP στις επιθυμητές συσκευές του δικτύου. Είναι το πιο σημαντικό επίπεδο καθώς είναι υπεύθυνο για την κινητικότητα των IP πακέτων κατευθύνοντας τα μέσω buffer router και έχει μία καθαρή εικόνα γειτονικών δικτύων.

Η τρίτη στρώση είναι η Application Layer η οποία μετατρέπει την πληροφορία στην επιθυμητή μορφή. Χρησιμοποιείται τόσο για κωδικοποίηση όσο και για αποκωδικοποίηση. Ακόμη μπορεί να διακρίνει ποιά είναι η καλύτερη δυνατή ασύρματη σύνδεση για κάθε συγκεκριμένη υπηρεσία.



εγκατεστημένων σε τερματικά χρηστών και σε σταθμούς βάσης. Ο στόχος είναι η αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης του συστήματος.

**Big Data και Cloud Computing:** Οι συνηθισμένοι τρόποι αποθήκευσης δεδομένων θα αντιμετωπίσουν μεγάλες εξελίξεις λόγω της υψηλής χωρητικότητας των δικτύων καθώς και της εκθετικής αύξησης στην ροή δεδομένων. Λόγω αυτών των φαινομένων η τεχνική cloud storage βοηθάει στην ευελιξία των δικτύων 5G καθώς και στην αποθήκευση πληροφορίας χωρίς περαιτέρω εγκατάσταση λογισμικού και εφαρμογών [23].

### Πλεονεκτήματα

- **Ρυθμός Δεδομένων:** Η γενιά 5G παρέχει ταχύτητες της τάξεως των 10Gbps η οποίες είναι περίπου εκατό φορές υψηλότερες από αυτές της τέταρτης γενιάς.
- **Καθυστέρηση μετάδοσης:** Τα δίκτυα 5G χαρακτηρίζονται από καθυστέρηση 1ms σε αντίθεση με τα 10ms καθυστέρησης που παρατηρούνται στα συστήματα 4 γενιάς.
- **Συνδεσιμότητα:** Παροχή συνδεσιμότητας για τεχνολογίες όπως Internet of Things, M2M.
- **Διαδραστικότητα κατά την χρήση:** Η εμπειρία του χρήστη κατά την αλληλεπίδραση με συστήματα 5G γίνεται πιο διαδραστική μέσω της εφαρμογής τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI), τεχνολογιών VR (Virtual Reality) και Augmented Reality.
- **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Τα συστήματα 5G στοχεύουν σε κατά 90% καλύτερη απόδοση ενέργειας συγκριτικά με την γενιά 4G.
- **Συνδεσιμότητα σχεδόν σε κάθε δυνατή τοποθεσία:** Η γενιά 5G παρέχει τεράστιας εμβέλειας συνδεσιμότητα, με την δυνατότητα υποστήριξης έως και 65.000 συνδέσεων, εκατό φορές παραπάνω από αυτές της τέταρτης γενιάς.
- **Διάρκεια μπαταρίας:** Η γενιά 5G παρέχει έως και δέκα χρόνια διάρκεια μπαταρίας για χαμηλής ισχύος συσκευές συμβατές με την Internet of Things αρχιτεκτονική.

### Προκλήσεις

- **Ζώνες Συχνοτήτων:** Για τα συστήματα 5G δεσμεύονται συχνότητες της τάξεως των 300GHz. Αυτές οι ζώνες συχνοτήτων είναι δαπανηρές και

χρειάζονται έξοδα της τάξεως των εκατομμυρίων για απόκτηση και χρήση αυτού του φάσματος.

- **Κάλυψη:** Κύματα πολύ υψηλών συχνοτήτων χαρακτηρίζονται από μικρό μήκος κύματος με αποτέλεσμα να μην μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλη απόσταση. Επομένως χρειάζονται περισσότεροι σταθμοί βάσης ανά περιοχή με σκοπό την παροχή αξιόπιστης σύνδεσης. Περαιτέρω σταθμοί βάσης αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα των δικτύων.
- **Συμβατότητα με 5G συσκευές:** Πολλές συσκευές οι οποίες προορίζονται για την ενσωμάτωση σε ένα 5G οικοσύστημα δεν είναι σχεδιασμένες για την χρήση αυτή. Ως αποτέλεσμα οι κατασκευαστές χρειάζεται να ανακαλύψουν τρόπους για την εξέλιξη των συσκευών σε ένα πλαίσιο όπου η πλειοψηφία των χρηστών θα μπορεί να ανταπεξέλθει οικονομικά.
- **Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα:** Παρόλο που η γενιά 5G χρησιμοποιεί την τεχνική Authentication and Key Agreement (AKA), είναι ακόμα ευάλωτη όσον αφορά τον εντοπισμό της τοποθεσίας του χρήστη αλλά και σε επιθέσεις middle man, όπου η επικοινωνία γίνεται εν τέλη με χρήστη κρυφής ταυτότητας και όχι με τον επιθυμητό δέκτη.
- **Διαθεσιμότητα:** Προσθέτοντας όλο και πιο πολλές συσκευές τόσο μέσω της αύξησης του ραδιοφάσματος όσο και με τις τεχνολογίες όπως Internet of Things και M2M, γίνεται πιο έντονο το πρόβλημα της συμφόρησης και υπερφόρτωσης των συστημάτων, φαινόμενο που δυσκολεύει την πρόσβαση προς όλους τους χρήστες.
- **Κυβερνοέγκλημα (Cybercrime):** Υπό αυξημένες ταχύτητες και υψηλές χωρητικότητες δικτύου είναι αναμενόμενη και η αύξηση του ρυθμού των διαδικτυακών επιθέσεων. Επομένως χρειάζεται βελτίωση της προστασίας μέσω καινούριων συστημάτων και νόμων [23].

## Five Challenges & Scenarios



Εικόνα 1.10: Δοκιμασίες και σενάρια κατά την 5G γενιά [26].

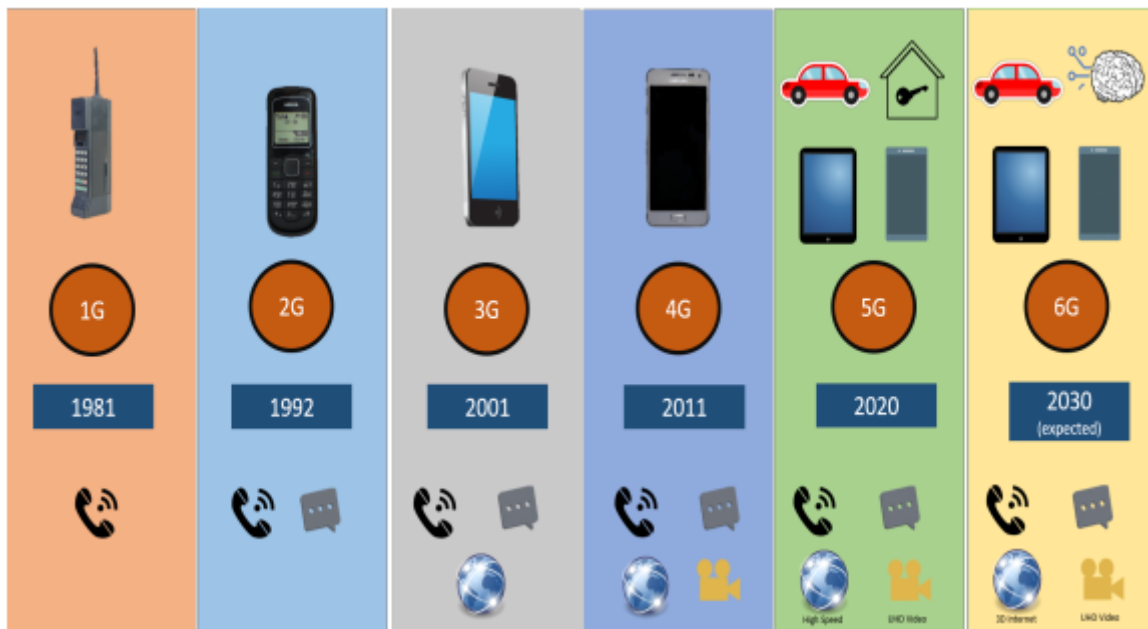
### 1.2.7. Γενιά 6G

Τα κινητά δίκτυα έκτης γενιάς είναι πλήρως ασύρματα χωρίς χωρικούς περιορισμούς. Είναι ακόμη σε στάδιο εξέλιξης και θα παρέχουν ταχύτητες της τάξεως των Terabit. Η τεχνολογία αυτή απαιτεί smart antenna συστήματα, μεγάλη χωρητικότητα μνήμης στις κινητές συσκευές και μεγάλων διαστάσεων οπτικά δίκτυα. Τα δίκτυα 6G δεν θα είναι κυψελωτά και θα επιτρέπουν αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης κατά την παροχή υπηρεσιών. Δεν είναι ακόμα ξεκάθαρη η περιοχή συχνοτήτων που θα χρησιμοποιούν αλλά είναι αναμενόμενο ότι η το φασματικό εύρος θα αυξηθεί με στόχο την επίτευξη των επιθυμητών ταχυτήτων. Ενώ η γενιά 5G χρησιμοποιεί συχνότητες της τάξεως των 30GHz-300GHz, η έκτη γενιά αναμένεται να αξιοποιεί υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων στα 300GHz έως και 3THz. Βέβαια, η πρόσβαση σε αυτές τις συχνότητες δεν έχει φτάσει ακόμα σε εμπορική χρήση.

Μερικές από τις καινοτομίες της 6G γενιάς είναι η σύνδεση με ρομποτικά συστήματα και αυτόνομα συστήματα, ασύρματες διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή, τεχνολογία blockchain, augmented reality μέσω πολυαισθητήρων κ.α (Εικόνα 1.11). Η γενιά 6G αναμένεται να εισαχθεί το 2030. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της είναι τα εξής:

- Ρυθμός Δεδομένων: Παροχή ρυθμού δεδομένων της τάξεως των Tbps, σχεδόν δέκα φορές παραπάνω από αυτόν της 5<sup>ης</sup> γενιάς.
- Καθυστέρηση: Η γενιά 6G στοχεύει σε καθυστέρηση της τάξεως του 0.1ms σε σχέση με την καθυστέρηση του 1 ms στα 5G συστήματα.

- Φασματική απόδοση: Η έκτη γενιά παρέχει δέκα φορές μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην αξιοποίηση του ραδιοφάσματος.
- Ενεργειακή αποδοτικότητα: Συγκριτικά με την 5<sup>η</sup> γενιά αναμένεται εκατό φορές πιο αποδοτική χρήση ενέργειας.
- Διαδραστική εμπειρία κατά την χρήση: Μέσω σύνδεσης με ρομποτικά συστήματα και της αξιοποίησης μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης η εμπειρία μετάδοσης γίνεται πιο διαδραστική και αυτοματοποιημένη.
- Τεράστια συνδεσιμότητα: Μετάδοση τεράστιου όγκου δεδομένων και δυνατότητα στήριξης μέχρι και ενός εκατομμυρίου συνδέσεων ταυτόχρονα, δέκα φορές παραπάνω από τις δυνατότητες της 5<sup>ης</sup> γενιάς [23].



**Εικόνα 1.11:** Εξέλιξη της κινητής τηλεπικοινωνίας από 1G-6G [22].



## 2. Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης

Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης αποτελούν βασική τεχνολογία για τα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, επηρεάζοντας όλες τις γενιές από 1G έως 6G. Η επιρροή τους είναι τόσο μεγάλη καθώς επιτρέπουν την παροχή υπηρεσιών σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας παράλληλα τους ίδιους πόρους επικοινωνίας. Η φιλοσοφία τους στηρίζεται στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των πόρων αυτών και στην όσο δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη αναγκών δίχως την αύξηση φάσματος και κόστους. Συγκεκριμένα, πετυχαίνουν την πολλαπλή ταυτόχρονη πρόσβαση μέσω πολυπλεξίας των χρηστών στο πεδίο του χρόνου, της συχνότητας, κώδικα ή και μέσω συνδυασμών κάποιων από αυτών των πεδίων [27].

### 2.1. OMA (Orthogonal Multiple Access)

Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης χωρίζονται σε ορθογωνικές (OMA) και μη ορθογωνικές (NOMA, Non Orthogonal Multiple Access). Η τεχνική OMA επιτρέπει την ορθογωνική πρόσβαση στους χρήστες του συστήματος διαμοιράζοντας τους επικοινωνιακούς πόρους ως προς την συχνότητα, τον χρόνο αλλά και μέσω κώδικα. Ο ορθογωνικός διαχωρισμός εφαρμόζεται με σκοπό την αποφυγή παρεμβολών ανάμεσα στα επιμέρους κανάλια αλλά και στην ευκολότερη αναγνώριση των σημάτων στο πεδίο του δέκτη παρά την αύξηση της πολυπλοκότητας. Αναλόγως το πεδίο διαμοιρασμού του κοινού καναλιού χωρίζουμε τις τεχνικές αυτές σε τεχνική διαίρεσης συχνότητας (FDMA), διαίρεσης χρόνου (TDMA), διαίρεσης κώδικα (CDMA, Code division Multiple Access) αλλά και ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) [27].

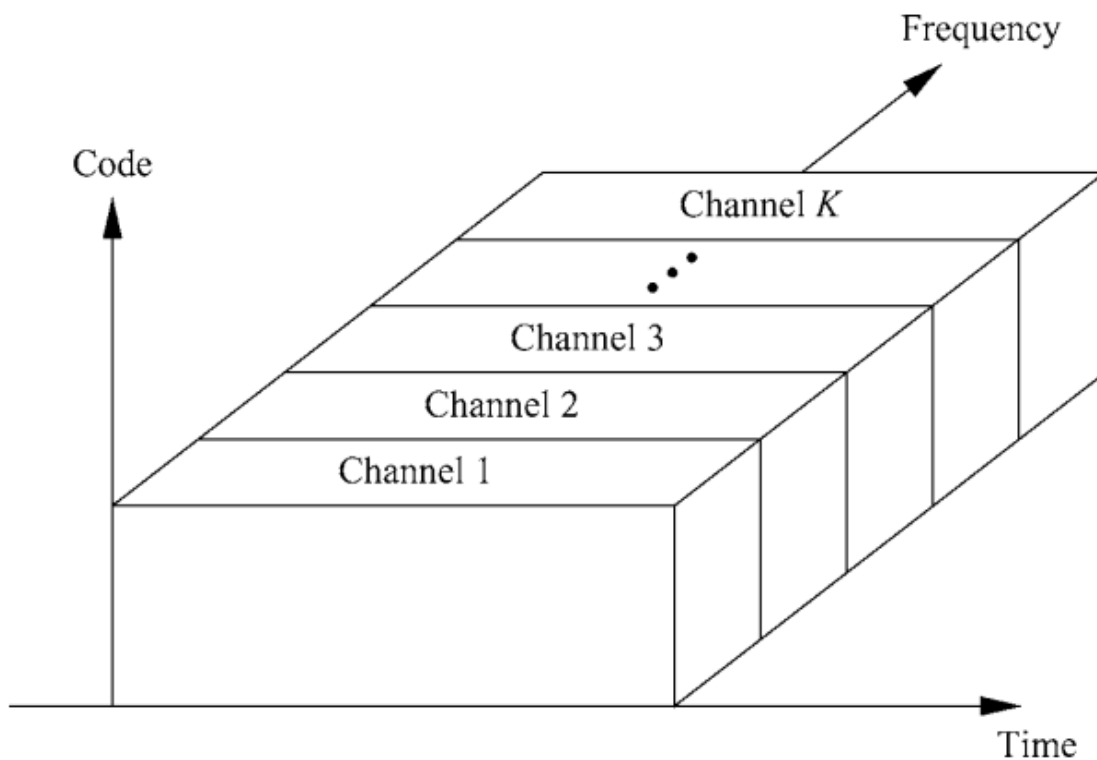
#### 2.1.1. FDMA

Για την πολλαπλή πρόσβαση στο πεδίο της συχνότητας, το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες, κάθε μία από τις οποίες δεσμεύεται από διαφορετικό χρήστη [20]. Η επιλογή των συχνοτήτων πρέπει να γίνει κατάλληλα έτσι ώστε να μην αποδίδονται οι ίδιες συχνότητες στους ίδιους χρήστες-κανάλια (**Εικόνα 2.1**). Για την αποφυγή παρεμβολών, χρησιμοποιούνται προστατευτικές περιοχές συχνοτήτων (frequency guard bands), μικρού εύρους, οι οποίες διαχωρίζουν τις συχνότητες των χρηστών μεταξύ τους. Οι προστατευτικές ζώνες



αυτές καλύπτουν παράλληλα και παρεμβολές λόγω ατελειών στα φίλτρα αλλά και λόγω φασματικής εξάπλωσης εξαιτίας του φαινομένου Doppler [28].

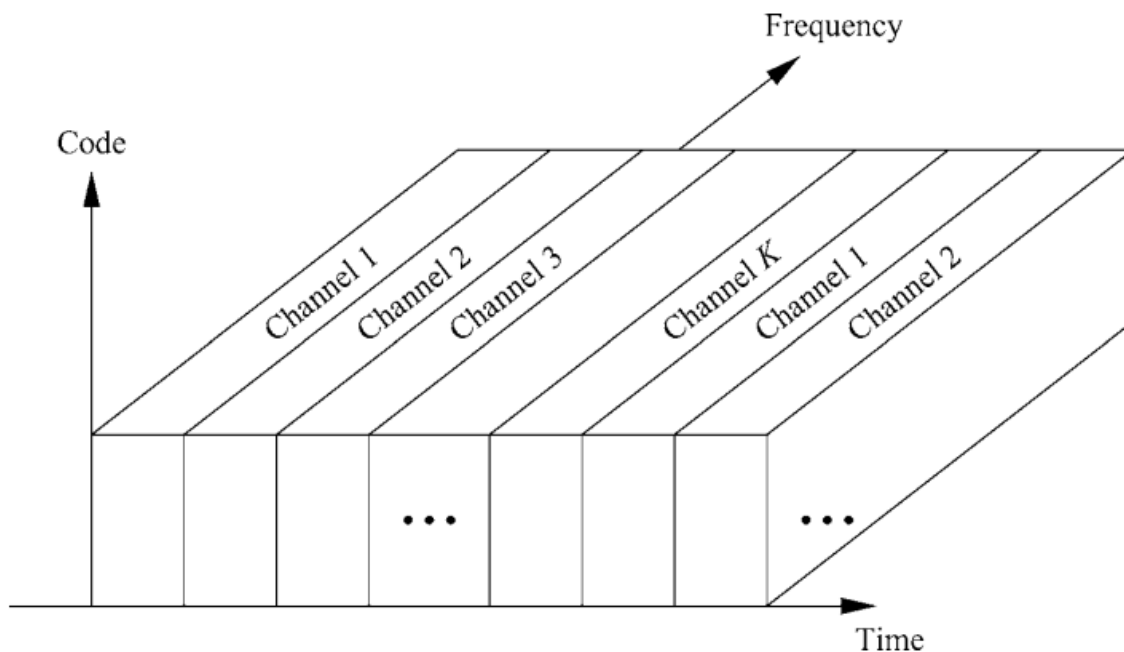
Η μετάδοση είναι συνεχής ως προς τον χρόνο, και αυτό εμφανίζει δυσκολίες στην εκτίμηση των καναλιών καθώς η τελευταία πρέπει να γίνεται ταυτόχρονα με την απόδοση των συχνοτήτων, και στο κατάλληλο φάσμα μετάδοσης. Συνεπώς, οι ραδιοδέκτες καλούνται να αποδιαμορφώσουν σήματα διαφορετικών συχνοτήτων αλλά την ίδια χρονική στιγμή. Το φαινόμενο αυτό δυσκολεύει και την ανάθεση πάνω από μίας ζώνης συχνοτήτων σε έναν χρήστη [28]. Ακόμη, το ραδιοφάσμα είναι ακριβός πόρος επικοινωνίας και η χρήση συχνοτήτων που δεν μεταδίδουν πληροφορία, όπως οι προστατευτικές ζώνες, οδηγούν στην μείωση του διαθέσιμου φάσματος άρα και στην μείωση του ρυθμού δεδομένων. Παρά τα ελαττώματα αυτά, η τεχνική FDMA αποτέλεσε την πιο συνηθισμένη μέθοδο για αναλογικά συστήματα επικοινωνίας, και έθεσε τις βάσεις για τα πρότυπα αναλογικής κυψελωτής τηλεφωνίας AMPS και TACS (Total Access Communication System) [28].



**Εικόνα 2.1:** Μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης διαχωρισμού συχνότητας [28].

## 2.1.2 TDMA

Κατά την μέθοδο TDMA παρατηρούμε τον διαχωρισμό των σημάτων στο πεδίο του χρόνου. Συγκεκριμένα, σε κάθε χρήστη αποδίδεται μία κυκλικά επαναλαμβανόμενη χρονική βαθμίδα η οποία αξιοποιεί όλο το διαθέσιμο ραδιοφάσμα (**Εικόνα 2.2**). Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται μη επικαλυπτόμενα χρονικά κανάλια στο ίδιο μέσο επικοινωνίας. Λόγω της κοινής χρήσης του ίδιου φάσματος είναι απαραίτητη η μείωση των διασυμβολικών παρεμβολών. Λόγω της περιοδικότητας που εμφανίζει αυτή η μέθοδος ανά τον χρήστη, συμπεραίνεται ότι η μετάδοση δεν είναι συνεχής όπως στην τεχνική FDMA. Αυτό βοηθάει στην εκτίμηση και κατ'επέκταση βελτίωση ενός σήματος προς μετάδοση λόγω των χρονικών παύσεων ανάμεσα στις διαφορετικές χρονοβαθμίδες. Επίσης, η χρήση όλου του διαθέσιμου ραδιοφάσματος οδηγεί σε υψηλό ρυθμό δεδομένων και την πλήρη αξιοποίηση του για τις επικοινωνιακές ανάγκες του συστήματος. Ακόμη, η ανάθεση πολλαπλών καναλιών σε έναν χρήστη είναι απλούστερη καθώς δεν απαιτείται νέα περιοχή συχνοτήτων αλλά η πρόσθεση ενός παραπάνω κύκλου πρόσβασης στο ήδη υπάρχον φάσμα [28].



**Εικόνα 2.2:** Μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης διαχωρισμού χρόνου [28].

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την TDMA είναι η ανάγκη για τον συγχρονισμό των αντίστοιχων σημάτων ανά τους χρήστες, με το πρόβλημα

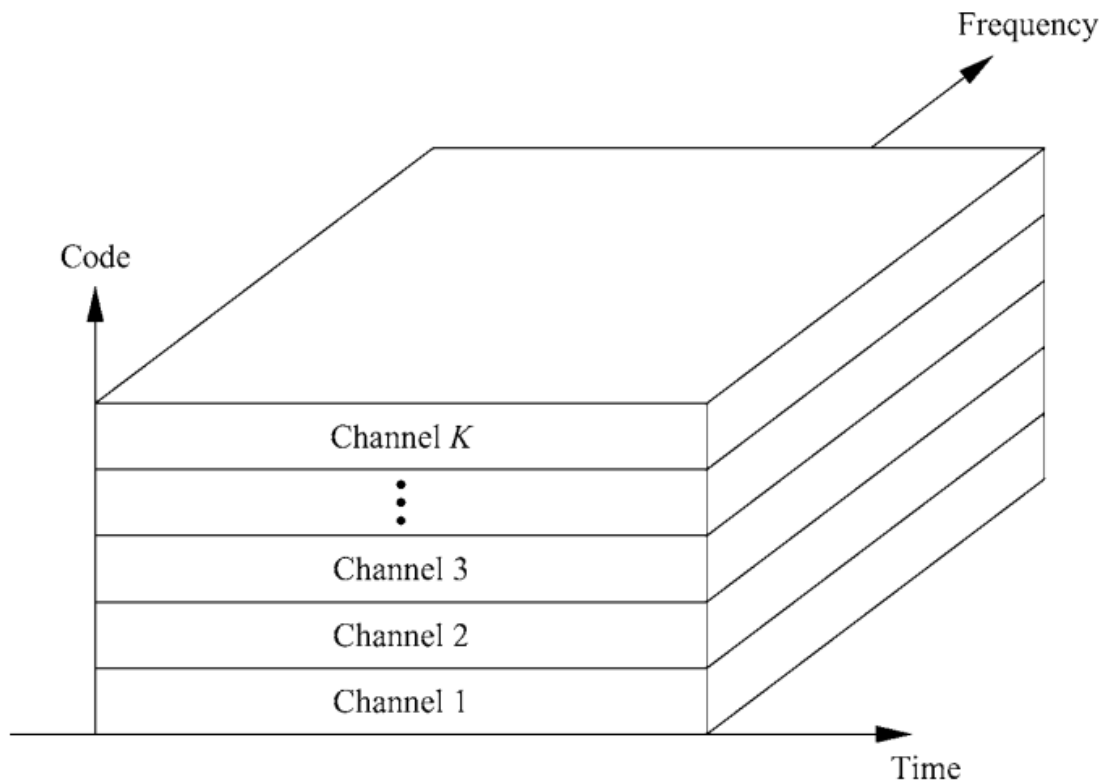
αυτό να γίνεται πιο εμφανές κατά την μετάδοση της άνω ζεύξης (μετάδοση από χρήστες προς σταθμό βάσης). Συγκεκριμένα, ένας χρήστης μεταδίδει σε διαφορετικά κανάλια, με διαφορετική χρονοκαθυστέρηση το κάθε ένα. Ως αποτέλεσμα είναι αναγκαίο στο πεδίο του σταθμού βάσης να γίνει συγχρονισμός των επιμέρους σημάτων έτσι ώστε να διατηρηθεί η ορθογωνικότητα μεταξύ των χρονικών αυτών βαθμίδων. Αντιθέτως, κατά την μετάδοση στην κάτω ζεύξη όλα τα σήματα προέρχονται από τον ίδιο σταθμό βάσης και στο ίδιο κανάλι, όποτε η ορθογωνικότητα διατηρείται. Παράλληλα, έχοντας άφιξη καναλιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά ανά χρονική βαθμίδα στον σταθμό βάσης, είναι απαραίτητη όπως και στην FDMA η χρήση προστατευτικών χρονικών περιοχών με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου multipath [28].

### **2.1.3. CDMA**

Ενώ στην TDMA και την FDMA οι πόροι του συστήματος χωρίζονται προσωρινά είτε χρονικά είτε φασματικά, στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης μέσω κώδικα (CDMA) όλοι οι χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα και μάλιστα αξιοποιώντας το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Αυτό επιτυγχάνεται αποδίδοντας σε κάθε χρήστη μία μοναδική κωδικοποίηση η οποία τον διαχωρίζει από τους υπόλοιπους (**Εικόνα 2.3**). Το πιο σύνηθες μοντέλο CDMA είναι το DS-CDMA (Direct Spectrum CDMA). Συγκεκριμένα, το ωφέλιμο σήμα κάθε χρήστη πολλαπλασιάζεται με μία ψευδοτυχαία ακολουθία, η οποία διευρύνει το φάσμα του αλλά παράλληλα το αντιστοιχίζει σε μία μοναδική κωδικοποίηση, ορθογώνια χωρισμένη από τις υπόλοιπες [27]. Το κύριο πλεονέκτημα της CDMA είναι η πλήρης αξιοποίηση του ραδιοφάσματος και μάλιστα την ίδια χρονική στιγμή, ενώ είναι ευκολότερη και η κατανομή παραπάνω από ενός καναλιού σε έναν χρήστη με την ανάθεση παραπάνω κωδικοποιήσεων. Παρόλ' αυτά παρατηρούνται αρκετές δοκιμασίες αναλόγως το αν ο διαχωρισμός των κωδικοποιήσεων είναι ορθογωνικός ή όχι [28].

Ένα από τα μειονεκτήματα της μη ορθογωνικής CDMA ειδικότερα για την άνω ζεύξη είναι ότι η αναγνώριση του χρήστη βασίζεται καθαρά στην αποκωδικοποίηση του σήματος και όχι στην διατήρηση της ορθογωνικότητας των καναλιών. Ακόμη, η μη ορθογωνικότητα δεν περιορίζει τόσο τον αριθμό των διαθέσιμων κωδικοποιήσεων σε αντίθεση με την ορθογωνική προσέγγιση. Αυτό βέβαια μπορεί να προκαλέσει προβλήματα καθώς όσο πιο πολλά μη ορθογωνικά κανάλια αξιοποιούν το ίδιο φάσμα συχνοτήτων τόσο μεγαλύτερες

είναι και οι παρεμβολές και ως συνέπεια μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος για όλους τους χρήστες [28].



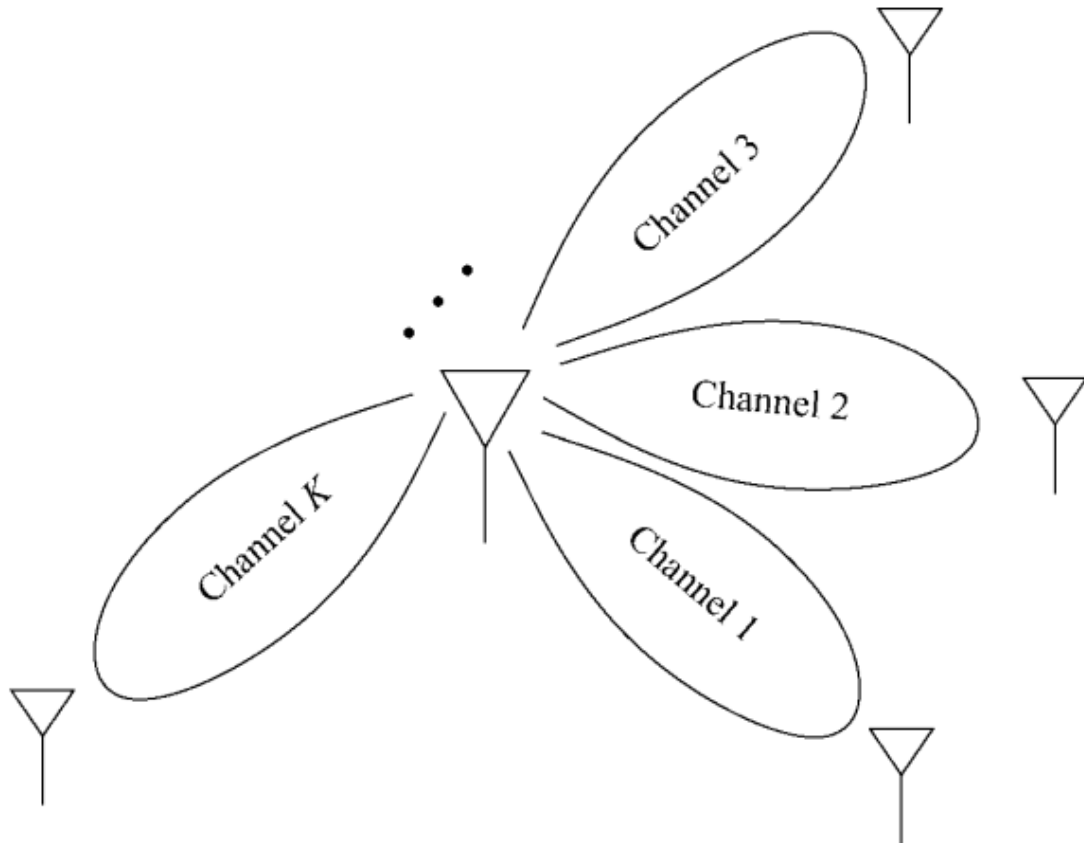
**Εικόνα 2.3:** Μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης διαχωρισμού κώδικα [28].

#### 2.1.4. SDMA

Η τεχνική SDMA (Space Division Multiple Access) χρησιμοποιεί ως μέσο διαχωρισμού των επιμέρους καναλιών την κατεύθυνση (**Εικόνα 2.4**), αποδίδοντας διαφορετικά κανάλια στους αντίστοιχους χρήστες αναλόγως την γωνιακή τους θέση σε σχέση με την εμβέλεια της κεραίας. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται μέσω κατευθυντικών κεραιών.

Ορθογωνικά κανάλια μπορούν να αποδοθούν όταν η γωνιακή απόκλιση ανάμεσα στους διαφορετικούς χρήστες ξεπερνάει την γωνιακή κάλυψη της κατευθυντικής κεραίας. Πρακτικά η SDMA παρατηρείται σε συστοιχίες κεραιών των οποίων η κατευθυντικότητα χωρίζεται σε πεπερασμένο αριθμό τομέων. Ο κάθε ένας έχει υψηλό κατευθυντικό κέρδος ενώ οι παρεμβολές μεταξύ τους είναι μικρές. Στις περιπτώσεις πολλαπλών χρηστών στον ίδιο τομέα εφαρμόζεται περαιτέρω διαχωρισμός καναλιών μέσω FDMA αλλά και TDMA. Ειδικά στην κινητή τηλεπικοινωνία και λόγω της ύπαρξης πολλών περιοχών μετάδοσης, η τεχνική SDMA καλείται να ανταπεξέλθει άμεσα σε πιθανές

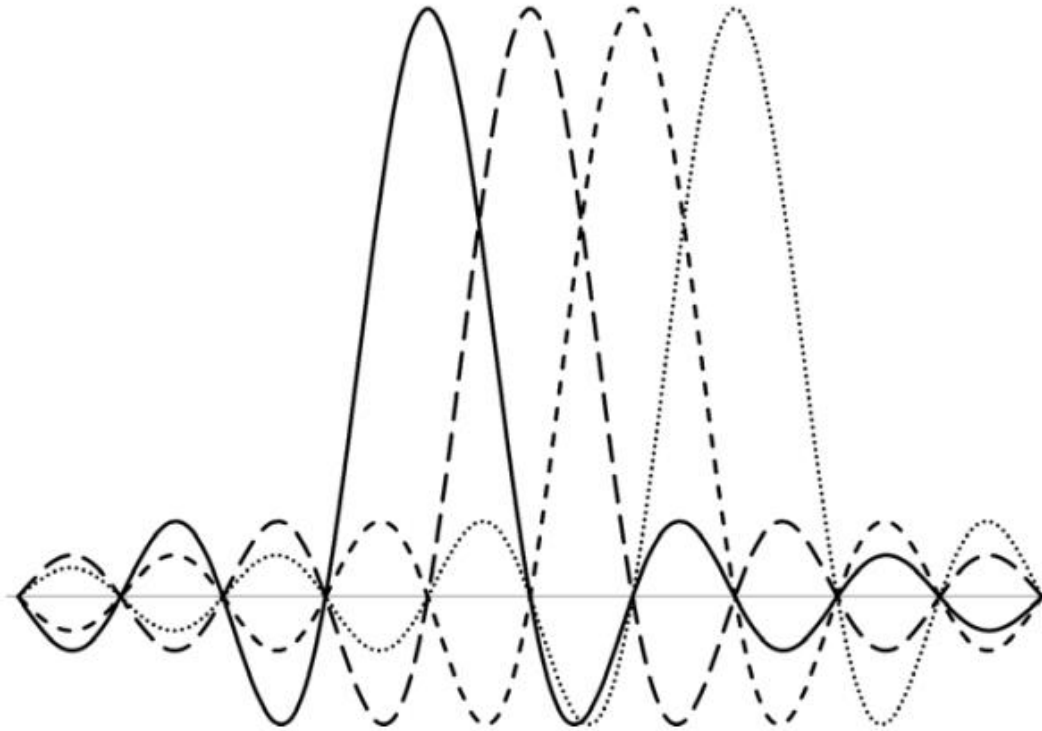
αλλαγές θέσεων των χρηστών. Για παράδειγμα εάν η κατευθυντικότητα μια κεραίας είναι τμηματοποιημένη πρέπει κατά την μετάβαση ενός χρήστη από τον έναν τομέα στον άλλον να γίνει η ομαλή αλλαγή των καναλιών, χωρίς να διακοπεί η μετάδοση και χωρίς αλλαγή στην ποιότητα του σήματος [28].



**Εικόνα 2.4:** Μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης διαχωρισμού χώρου [28].

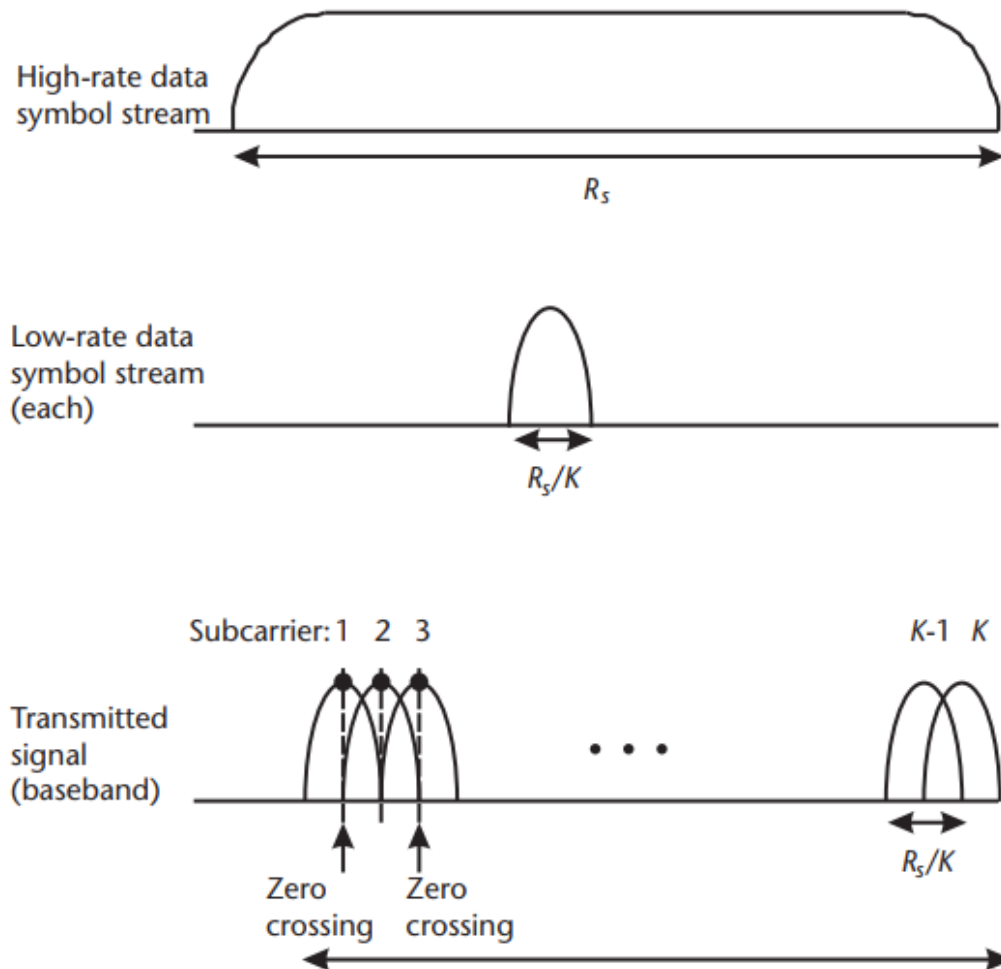
### 2.1.5. OFDMA

Η διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ανήκει στις τεχνικές πολυδιαυλικής (multicarrier) διαμόρφωσης. Η βασική ιδέα της πολυδιαυλικής διαμόρφωσης είναι ο χωρισμός μιας ροής ψηφίων πληροφορίας σε πολλές επιμέρους ροές (substreams) και η μετάδοσή τους σε αντίστοιχο πλήθος υποδιαύλων (subchannels). Τα πολλαπλά υποφέροντα (subcarriers) επιλέγονται ιδανικά να είναι ορθογώνια μεταξύ τους (**Εικόνα 2.5**). Ο ρυθμός μετάδοσης και το εύρος ζώνης του κάθε υποδιαύλου είναι υποπολλαπλάσια του συνολικού ρυθμού μετάδοσης και του συνολικού εύρους ζώνης [29].



**Εικόνα 2.5:** Φάσμα OFDM σήματος που αποτελείται από 4 υποφορείς. Το φάσμα είναι διάρκειας ενός συμβόλου [30].

Η OFDM ξεπερνάει την ανάγκη ύπαρξης προστατευτικών περιοχών (guard bands). Αντί να χρησιμοποιεί έναν πεπερασμένο αριθμό πολλαπλασιαστών και ταλαντωτών κατά τη διαμόρφωση, η OFDM εφαρμόζει διακριτό μετασχηματισμό Fourier για την δημιουργία των υποφερόντων. Στο μεταδιδόμενο OFDM σήμα τα υποφέροντα χωρίζονται έτσι ώστε να επικαλύπτουν μερικώς το ένα το άλλο στο πεδίο της συχνότητας. Ο μηδενισμός του ενός υποφέροντος πέφτει στην ίδια κατακόρυφη θέση με την μέγιστη τιμή των γειτονικών (**Εικόνα 2.6**), και κατ'επέκταση κάθε επικαλυπτόμενος μηδενισμός υποφερόντων είναι κατακόρυφα ίδιος με μία αντίστοιχη μέγιστη τιμή. Επειδή η OFDM ανακτά την πληροφορία του συμβόλου από τις κορυφές των φερόντων τα υποφέροντα είναι ορθογώνια μεταξύ τους και παρά την επικάλυψη τους αποφεύγονται οι παρεμβολές [30].



**Εικόνα 2.6:** Φάσμα high-rate data συμβόλου, φάσμα low-rate data συμβόλου και το μεταδιδόμενο OFDM σήμα. Το μεταδιδόμενο σήμα δίνεται για τη διάρκεια ενός συμβόλου. Οι μηδενισμοί του υποφέροντος 2 πέφτουν πάνω στα μέγιστα των γειτονικών υποφορέων 1 και 3 [30].

Επειδή η OFDM μεταδίδει χρησιμοποιώντας υποφέροντα στενής ζώνης είναι ανθεκτική απέναντι στις διασυμβολικές παρεμβολές καθώς και στην εξασθένηση λόγω του φαινομένου multipath. Παράλληλα, η πολυπλοκότητα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για κάθε υποφέρον ξεχωριστά είναι μικρότερη. Επίσης, χάρη στην δυνατότητα επικάλυψης των φερόντων υπάρχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην χρήση του διαθέσιμου φάσματος σε σύγκριση με την συμβατική τεχνική Frequency Division Multiplexing (FDM) [30].

Το κύριο πλεονέκτημα της OFDM είναι η ανθεκτικότητα στις narrowband παρεμβολές αλλά και στο φαινόμενο εξασθένησης (fading) που προκαλείται από ατμοσφαιρικές και εξωτερικές συνθήκες. Για παράδειγμα εάν οι συνθήκες μετάδοσης προκαλούν κάποια καθυστέρηση ή αλλαγή φάσης στο

σήμα που λαμβάνει ο δέκτης, σε συστήματα μετάδοσης πολλαπλών φορέων (OFDM), μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτούς επηρεάζεται. Αντιθέτως, εάν η μετάδοση εξαρτάται μονάχα από έναν φορέα, η απόδοση του συστήματος θα επηρεαστεί πολύ παραπάνω.

Δύο είναι τα κύρια μειονεκτήματα της OFDM μεθόδου. Αυτά είναι το φαινόμενο High Peak to Average Power Ratio (PAPR) και η δυσκολία συγχρονισμού όλων των επιμέρους φορέων στο σήμα που λαμβάνει ο δέκτης. Το PAPR, παρατηρείται όταν πολλαπλοί φορείς αθροίζονται. Οι κυματομορφές των φορέων κατά την OFDM έχουν μεγάλη τιμή μέγιστης ισχύος συγκριτικά με την μέση τιμή ισχύος τους. Αυτό οδηγεί σε μεγάλο peak-to-average power ratio. Το φαινόμενο αυτό διογκώνεται όταν πολλαπλά σήματα προστεθούν υπό την ίδια φάση. Για παράδειγμα, όταν  $N$  φορείς αθροιστούν, η μέγιστη τιμή ισχύος καταλήγει να είναι  $N$  φορές μεγαλύτερη από την μέση τιμή της.

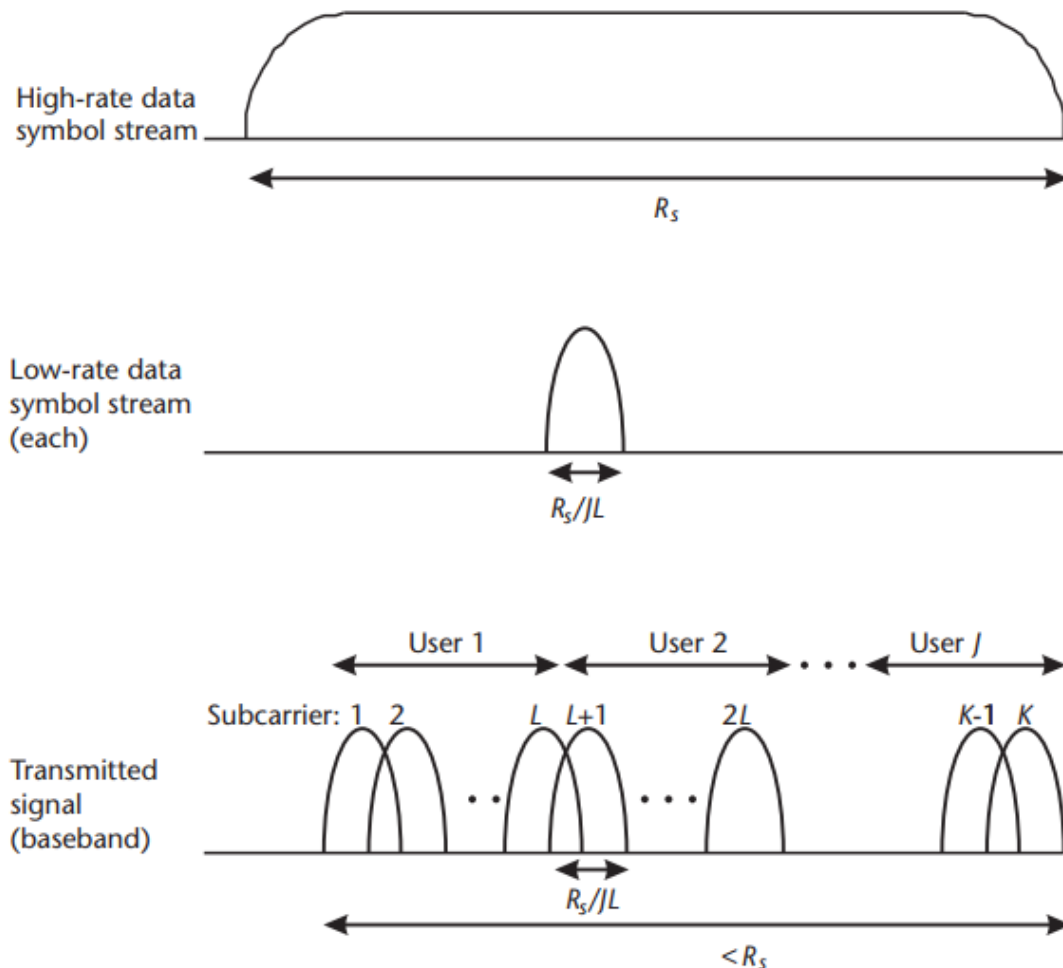
Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν έναν υψηλής ισχύος ενισχυτή (High Power Amplifier, HPA) για να μεταδώσουν ένα σήμα. Λόγω του μεγάλου PAPR η ενίσχυση του σήματος κινδυνεύει να αποφέρει παραμόρφωση στον δέκτη, και κατ'επέκταση αλλοίωση της ορθογωνικότητας των φορέων. Με σκοπό να γίνει γραμμικά η ενίσχυση του σήματος, ο HPA αναγκάζεται να μειώσει την απόδοση του. Στην περίπτωση πάλι που εφαρμόζεται ενίσχυση χωρίς γραμμικά χαρακτηριστικά, εμφανίζεται παραμόρφωση όπως in-band distortion και out-of-band radiation, φαινόμενα που επηρεάζουν αρνητικά το Bit Error Rate του συστήματος. Η αντιμετώπιση του PAPR έχει κάνει απαραίτητη την εφαρμογή τεχνικών για τον μετριασμό του κατά τα OFDM συστήματα.

Ένα άλλο μειονέκτημα της OFDM είναι η ευαισθησία της στα φαινόμενα που επηρεάζουν τον συγχρονισμό του σήματος ειδικά στο πεδίο του δέκτη. Φαινόμενα όπως η διαφορά φάσης ανάμεσα στους υποφορείς (carrier-frequency offset), σφάλματα διαμόρφωσης (sampling clock errors) και απόκλιση των συμβόλων διαμόρφωσης (symbol-timing offset) αντιλαμβάνονται ως παραμόρφωση είτε ως καθυστέρηση στον δέκτη. Όλες αυτές οι αποκλίσεις πρέπει να έχουν διορθωθεί προτού εφαρμοστεί ο FFT (Fast Fourier Transform) του λαμβανόμενου σήματος και έτσι δυσκολεύει αισθητά η εκτίμηση του σήματος κατά την λήψη. Η μη ακριβής αποκωδικοποίηση των συμβόλων και η λανθασμένη εκτίμηση του σήματος προκαλούν παρεμβολές όπως inter-Carrier Interference (ICI), inter-block Interference και αλλοιώνουν την ορθογωνικότητα των υποφορέων [31].

Η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) αναθέτει πολλαπλά υποφέροντα σε διαφορετικούς χρήστες παράλληλα εφαρμόζοντας



OFDM πολυπλεξία (Εικόνα 2.7). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν πολλοί χρήστες να χρησιμοποιούν το ίδιο μέσο ταυτόχρονα.

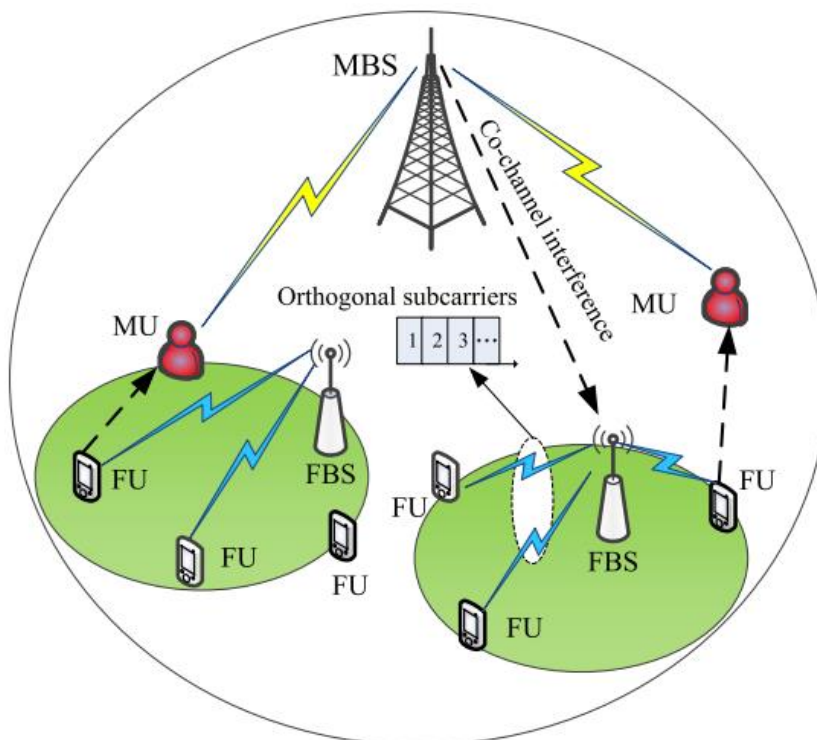


**Εικόνα 2.7:** Φάσμα high-rate data συμβόλου, φάσμα low-rate data συμβόλου και το μεταδιδόμενο OFMDA σήμα. Το μεταδιδόμενο σήμα δίνεται για τη διάρκεια ενός συμβόλου σε  $j$  αριθμό ομάδων. Τα σήματα πληροφορίας για έναν χρήστη μεταδίδονται μέσω συνεχόμενων υποφορέων [30].

Στην OFDM όλα τα υποφέροντα μεταδίδουν πληροφορία για έναν μόνο χρήστη και μόνο ένας χρήστης μπορεί να μεταδώσει εκείνη την χρονική περίοδο. Στην περίπτωση μετάδοσης παραπάνω χρηστών θα πρέπει να δοθεί χρονική προτεραιότητα κατά την OFDM. Σε γενικές γραμμές δύο είναι οι τρόποι ανάθεσης συμβόλων στα υποφέροντα, μέσω ψευδοτυχαίας ακολουθίας, και μέσω σειριακών επικαλυπτόμενων υποφερόντων τα οποία ομαδοποιούνται κατάλληλα σε κάθε χρήστη.

Χάρη στα χαρακτηριστικά της OFDM πολυπλεξίας, η OFDMA τεχνική πολλαπλής πρόσβασης διαθέτει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Είναι ανθεκτική στις διασυμβολικές παρεμβολές.
- Μπορεί να προσαρμόσει την κωδικοποίηση και διαμόρφωση για κάθε υποφέρον ξεχωριστά.
- Λόγω της χρήσης αντίστροφου και διακριτού μετασχηματισμού Fourier (IDFT/DFT) η πολυπλοκότητα της διαμόρφωσης είναι μειωμένη.
- Χάρη στην ποικιλία συχνοτήτων (frequency diversity), ειδικά κατά την μέθοδο όπου τα υποφέροντα κατανέμονται τυχαία στον χρήστη, ορισμένες περιοχές συχνοτήτων μπορούν να αποφύγουν παρεμβολές και εξασθένηση που παρατηρούνται σε άλλες θέσεις πρόσβασης.
- Στην περίπτωση συνεχόμενων και επικαλυπτόμενων φερόντων για πολλαπλούς χρήστες, είναι ευκολότερη η μετάβαση του χρήστη σε κοντινές περιοχές υποφερόντων όπου θα επικρατούν καταλληλότερες για αυτόν συνθήκες μετάδοσης (multiuser diversity) [30].
- Ενσωμάτωση της OFDMA τεχνικής και στα ετερογενή δίκτυα (**Εικόνα 2.8**). Η προσέγγιση αυτή αποτελεί και την γραμμή διαχωρισμού σε σχέση με τα συμβατικά HetNets που αναλύθηκαν στο *Κεφάλαιο 1.2.5.2*, και έχει ως στόχο την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Συγκεκριμένα, στα επιμέρους υποδίκτυα μιας ετερογενούς τοπολογίας μπορεί να εφαρμοστεί ορθογωνική κατανομή των διαθέσιμων καναλιών, οδηγώντας σε περαιτέρω μείωση των ομοδιαυλικών παρεμβολών [10].



**Εικόνα 2.8:** HetNet με χρήση OFDMA [10].

## 2.2. NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)

Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης επιτρέπουν στους χρήστες να μοιράζονται τους ίδιους επικοινωνιακούς πόρους και μέχρι την γενιά 4G είχαν σχεδιαστεί κυρίως με τη φιλοσοφία του ορθογωνικού διαχωρισμού των σημάτων. Η μέθοδος αυτή βοηθάει στην αποφυγή παρεμβολών, όμως περιορίζει τον αριθμό χρηστών που έχουν πρόσβαση στο κοινό μέσο επικοινωνίας. Με τον ερχομό της γενιάς 5G εμφανίστηκε η ανάγκη εξυπηρέτησης ακόμα μεγαλύτερου αριθμού χρηστών, με υψηλές απαιτήσεις όσον αφορά την καθυστέρηση και τον ρυθμό μετάδοσης [32].

Η τεχνική NOMA επιτρέπει την πολλαπλή πρόσβαση με μη ορθογωνικό διαχωρισμό μεταδίδοντας πληροφορία ταυτόχρονα και στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων, παρουσιάζοντας μεταβολές είτε στα επίπεδα ισχύος είτε στο πεδίο της κωδικοποίησης. Η ταυτόχρονη μετάδοση προς όλους τους χρήστες μειώνει αισθητά την καθυστέρηση επικοινωνίας ενώ η πρόσβαση στο πλήρες διαθέσιμο φάσμα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα στη χρήση των συχνοτήτων. Οι δύο κύριες μέθοδοι πολυπλεξίας κατά την NOMA είναι αυτή της ισχύος (Power Domain NOMA, PD NOMA) και αυτή της κωδικοποίησης (Code Domain NOMA, CD NOMA) [28].

Κατά την PD NOMA, ένα κοινό κανάλι προσφέρεται προς όλους τους χρήστες με στόχο την καλύτερη συνδεσιμότητα και την συνεχή μετάδοση. Η πολυπλεξία γίνεται στο επίπεδο της ισχύος δηλαδή αναθέτονται διαφορετικά επίπεδα ισχύος σε κάθε χρήστη κατά την μετάδοση. Ο κάθε χρήστης αξιοποιεί όλο το διαθέσιμο φάσμα παράλληλα με άλλους χρήστες κάτι που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται να υπάρχουν προτεραιότητες και χρονικές καθυστερήσεις. Επίσης η PD NOMA μπορεί να συνυπάρξει και με ορθογωνικές μεθόδους όπως την TDMA και FDMA. Η διαφορά με την CD NOMA είναι ότι οι χρήστες στην CD διαχωρίζονται μέσω συγκεκριμένων ακολουθιών που μεταξύ τους έχουν χαμηλή αυτοσυσχέτιση παρόμοια με την τεχνική CDMA [28].

Κατά την PD πολυπλεξία διαφορετικοί χρήστες λαμβάνουν διαφορετικούς συντελεστές ισχύος αναλόγως την κατάσταση του καναλιού τους με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης συστήματος. Συγκεκριμένα, σήματα πληροφορίας πολλαπλών χρηστών συγκεντρώνονται στην πλευρά του πομπού. Στην πλευρά του δέκτη παρατηρείται διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (Successive Interference Cancellation, SIC) με στόχο την αποκωδικοποίηση των σημάτων πληροφορίας έως ότου το σήμα του επιθυμητού δέκτη έχει συλλεχθεί.

Κατά την CD πολυπλεξία, διαφορετικοί χρήστες που λαμβάνουν διαφορετικούς κώδικες πολυπλέκονται στους ίδιους φασματικούς πόρους. Παρόλο που η CD έχει θέσει τις προϋποθέσεις για αύξηση της φασματικής αποδόσης, η εφαρμογή της είναι δύσκολη στα τωρινά συστήματα επικοινωνίας καθώς απαιτεί μεγάλες φασματικές περιοχές. Αντιθέτως η PD NOMA δεν απαιτεί μεγέθυνση του φάσματος για να βελτιώσει την φασματική απόδοση του συστήματος. Επίσης η εφαρμογή της δεν απαιτεί περαιτέρω αλλαγές στις ήδη υπάρχοντες εγκαταστάσεις δικτύων. Για αυτούς τους λόγους επιλέγεται κυρίως η PD NOMA [28].

### 2.2.1. Πλεονεκτήματα NOMA έναντι OMA

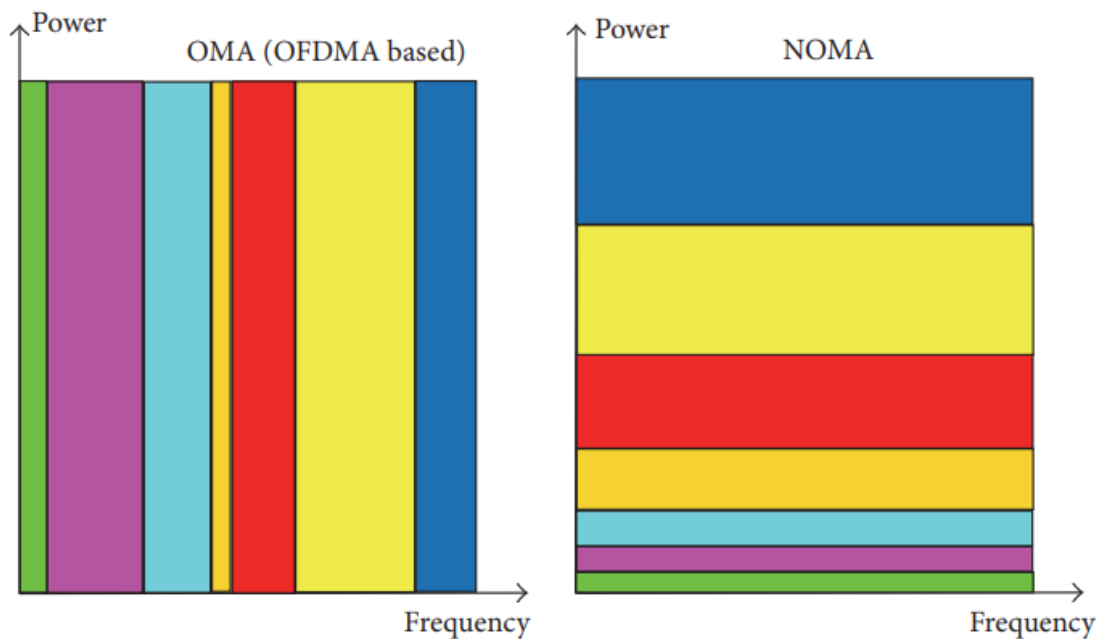
Ο στόχος της NOMA είναι να πετύχει την πρόσβαση σε μεγαλύτερο αριθμό χρηστών διατηρώντας έναν υψηλό ρυθμό δεδομένων σε συνδυασμό με ίση κατανομή ισχύος (**Εικόνα 2.10**). Παράλληλα θέτει τις βάσεις για μαζική συνδεσιμότητα, υψηλή φασματική απόδοση, μικρή καθυστέρηση και υψηλή συμβατότητα [28].

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της NOMA είναι ο συνδυασμός της με νέες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, όπως η τεχνολογία multiple-input multiple-output (MIMO), massive MIMO, τεχνολογίες μικροκυμάτων αλλά και με μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας [32].

Φυσικά υπάρχουν και μειονεκτήματα καθώς η NOMA καλείται να ανταπεξέλθει σε προβλήματα που αφορούν την δυναμική κατανομή των χρηστών στο κανάλι μετάδοσης, τα επίπεδα παραμόρφωσης του σήματος αλλά τον καλύτερο διαμορισμό των επικοινωνιακών πόρων [28]. Οι τομείς που η NOMA προσέγγιση υπερτερεί κατά της OMA είναι οι εξής:

- Φασματική απόδοση (spectral efficiency): Κατά την OFDMA όσο και την OMA οι χρήστες μοιράζονται μία φασματική περιοχή η οποία χωρίζεται ορθογωνικά προς αυτούς. Κατά την NOMA δεν υπάρχει διαχωρισμός με αποτέλεσμα οι χρήστες με κακές συνθήκες καναλιού να αξιοποιούν τους ίδιους πόρους με αυτούς σε καλές συνθήκες, με τις παρεμβολές να μειώνονται μέσω SIC. Επιτρέποντας σε όλους τους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε όλες τις διαθέσιμες περιοχές συχνοτήτων του φάσματος προς χρήση, αυξάνονται οι πιθανότητες για μεγαλύτερη φασματική απόδοση.

- Δικαιοσύνη χρήστη (user fairness), μαζική συνδεσιμότητα (massive connectivity) και μείωση καθυστέρησης (low latency): Κατά την OFDMA μέσω user scheduling, ο χρήστης με καλές συνθήκες καναλιού έχει υψηλότερη προτεραιότητα να εξυπηρετηθεί ενώ οι χρήστες που αντιμετωπίζουν χειρότερες συνθήκες καναλιού αναγκάζονται να περιμένουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι εντελώς δίκαια η εξυπηρέτηση και πολλοί χρήστες να υπομένουν υψηλότερη καθυστέρηση. Αντιθέτως, η NOMA εξυπηρετεί τους χρήστες ταυτόχρονα ανεξαρτήτως των συνθηκών που επικρατούν στον κανάλι τους οδηγώντας σε ένα πιο δίκαιο σύστημα. Παράλληλα, επιτρέπει μαζική συνδεσιμότητα εξαλείφοντας πιθανές καθυστερήσεις λόγω σειράς προτεραιότητας.
- Συμβατότητα (compatibility): Η NOMA είναι συμβατή με τα περισσότερα επικοινωνιακά συστήματα καθώς δεν απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στην ήδη υπάρχουσα αρχιτεκτονική τους [33].



**Εικόνα 2.10:** Οπτική σύγκριση OMA και NOMA [33].

## 2.2.2 Downlink NOMA

Στο πεδίο του πομπού όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.11** ο σταθμός βάσης μεταδίδει το συνολικό σήμα. Το σήμα αυτό αποτελεί υπέρθεση όλων των επιμέρους σημάτων που αντιστοιχούν σε κάθε χρήστη. Η διαφοροποίηση των επιμέρους σημάτων γίνεται μέσω συντελεστών ισχύος οι οποίοι καθορίζονται σύμφωνα με τις συνθήκες που αντιμετωπίζει κάθε χρήστης που ανήκει στο δίκτυο. Ο στόχος είναι να αποδοθεί μεγαλύτερη τιμή ισχύος προς χρήστες που

αντιμετωπίζουν δυσκολότερες συνθήκες και χαμηλότερη προς αυτούς που βρίσκονται σε προνομιούχο θέση. Οι συντελεστές ισχύος είναι οι δείκτες οι οποίοι κάνουν τον παραπάνω διαχωρισμό ορατό κατά την μετάδοση.

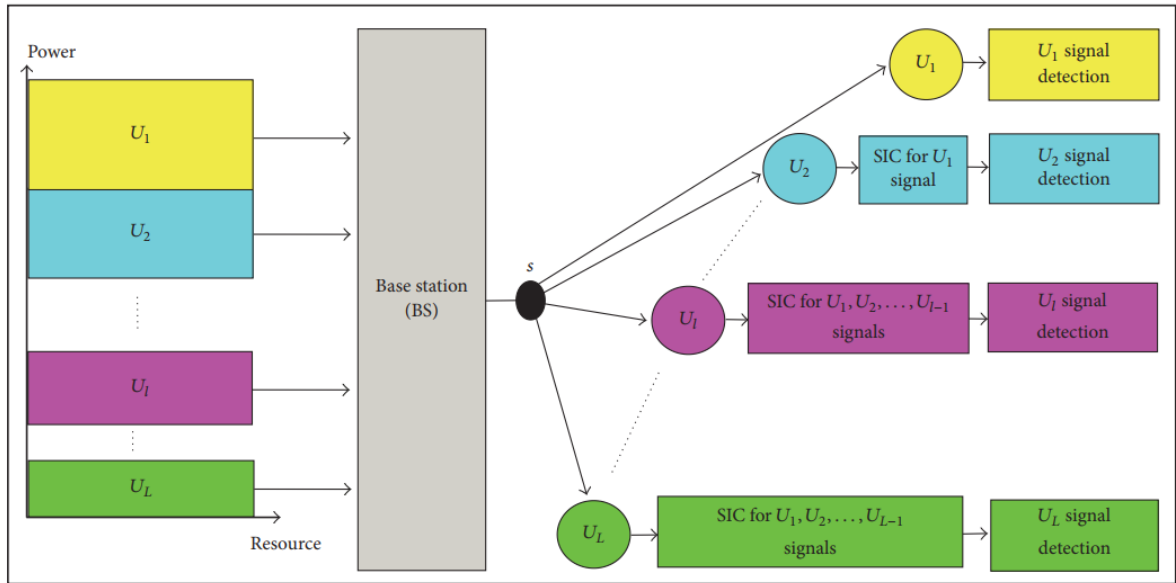
Αφού η πλευρά του δέκτη λάβει το σήμα, εκτελούνται διαδικασίες SIC. Όπως είναι αναμενόμενο, κάθε χρήστης θα λάβει πρώτα τα σήματα μεγαλύτερης ισχύος, τα οποία όμως ενδέχεται να αντιστοιχούν σε γειτονικούς χρήστες. Μέσω SIC διαδικασιών, τα σήματα αυτά αφαιρούνται με στόχο να μείνει μόνο εκείνο που ανήκει στον επιθυμητό χρήστη. Ο στόχος των SIC αυτών βημάτων είναι το να καταλήξει κάθε χρήστης, με το σήμα το οποίο ανταποκρίνεται στις δικές του μοναδικές ανάγκες ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρήστης με το πιο ισχυρό σήμα, δεν είναι ανάγκη να προχωρήσει σε SIC καθώς το σήμα του υπερτερεί των υπολοίπων και η αναγνώριση του είναι πιο άμεση. Το τελευταίο βήμα είναι η αποκωδικοποίηση του σήματος, η οποία γίνεται για κάθε χρήστη. Σε αυτό το βήμα παρόμοια με τις διαδικασίες SIC, τα σήματα που αντιστοιχούν σε χαμηλότερη ισχύ από την ιδανική, αντιμετωπίζονται ως θόρυβος, με τελικό αποτέλεσμα ο κάθε χρήστης να λάβει το ωφέλιμο σήμα που του αντιστοιχεί. Αυτό φαίνεται και από την **Εξίσωση 2-2** (30) όπου για τον τελευταίο χρήστη έχουν προστεθεί σαν θόρυβος και συντελεστές των προηγούμενων κινητών τερματικών. Το μεταδιδόμενο σήμα στον σταθμό βάσης δίνεται την **Εξίσωση 2-1** [33] :

$$s = \sum_{i=1}^L \sqrt{a_i P_s} x_i, \quad \text{Εξ. (2 - 1)}$$

Όπου  $x_i$  είναι το σήμα πληροφορίας του χρήστη  $i$ .  $P_s$  είναι η ισχύς μετάδοσης στον σταθμό βάσης και  $a_i$  είναι ο συντελεστής ισχύος του χρήστη  $i$ . Οι συντελεστές ισχύος ταξινομούνται ως  $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_L$  ενώ τα κέρδη των καναλιών για τους χρήστες 1 έως  $L$  ως  $|h_1|^2 \leq |h_2|^2 \leq \dots \leq |h_L|^2$ . Το σήμα που λαμβάνει ο  $l$ -οστός χρήστης είναι:

$$y_l = h_l s + n_l = h_l \sum_{i=1}^L \sqrt{a_i P_s} x_i + n_l, \quad \text{Εξ. (2 - 2)}$$

όπου ο όρος  $n_l$  είναι η πρόσθεση γκαουσιανού θορύβου [33].



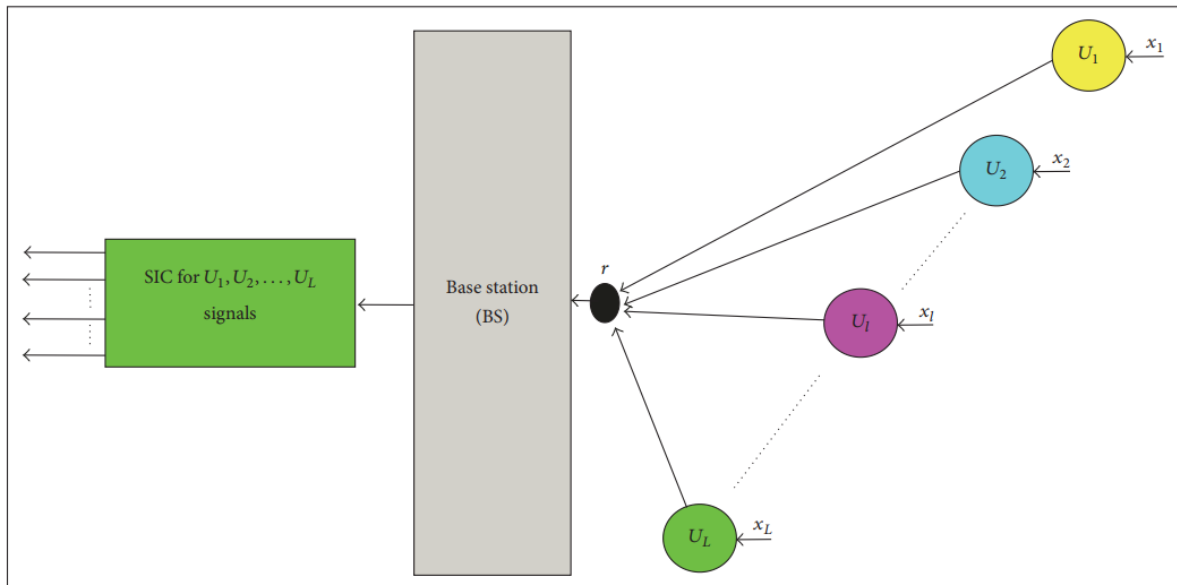
Εικόνα 2.11: Δίκτυο NOMA κατά την μετάδοση κάτω ζεύξης [33].

### 2.2.3 Uplink NOMA

Κατά την μετάδοση άνω ζεύξης, ο σταθμός βάσης λαμβάνει τα επιμέρους σήματα και καλείται να τα διαχωρίσει (Εικόνα 2.12). Θεωρείται επίσης δεδομένο ότι κατά τη μετάδοση κάτω ζεύξης έχουν ήδη αποδοθεί συντελεστές ισχύος σε κάθε χρήστη ξεχωριστά. Ο διαχωρισμός γίνεται όπως και στην κάτω ζεύξη μέσω SIC διαδικασιών. Η διαφορά εδώ όπως φαίνεται και στην **Εξίσωση (2-3)** [33] είναι ότι τα σήματα από τους χρήστες έχουν κοινή τιμή ισχύος, και η διαφορά μεταξύ τους φαίνεται από τον συντελεστή καναλιού  $h$ . Η προτεραιότητα όσον αφορά την κατανομή ισχύος έχει αποδοθεί στην κάτω ζεύξη, και ως αποτέλεσμα κατά την άνω μετάδοση ο σταθμός βάσης έχει ως κύριο στόχο την αποκωδικοποίηση των επιμέρους σημάτων. Το ληφθέν σήμα στον σταθμό βάσης δίνεται από την εξίσωση:

$$r = \sum_{i=1}^L h_i \sqrt{a_i P} x_i + n, \quad \text{Εξ. (2-3)}$$

Όπου  $h_i$  είναι ο συντελεστής καναλιού του  $i$ -οστού χρήστη,  $P$  είναι η μέγιστη τιμή ισχύος που κατανέμεται από κοινού σε όλους τους χρήστες και ο όρος  $n$  είναι η πρόσθεση γκαουσιανού θορύβου [33].



**Εικόνα 2.12:** Δίκτυο NOMA κατά την μετάδοση άνω ζεύξης [33].





## 3. MIMO και massive MIMO συστήματα

### 3.1. Εισαγωγή στην Τεχνολογία MIMO

Μία βασική τεχνολογία για την επίτευξη της υψηλής φασματικής απόδοσης που απαιτείται από τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα είναι η τεχνολογία MIMO (multiple-input, multiple-output) ή αλλιώς τεχνολογία πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου. Τα MIMO συστήματα αποτελούνται από πολλαπλές κεραίες τόσο στο επίπεδο του δέκτη όσο και στο επίπεδο του πομπού [34]. Κατά την τεχνολογία MIMO, μία ροή δεδομένων μεταδίδεται ως πολλά ανεξάρτητα σήματα μέσω πολλαπλών κεραιοστοιχείων, χρησιμοποιώντας παράλληλα το ίδιο κανάλι. Η πληροφορία προς μετάδοση χωρίζεται σε επιμέρους ροές δεδομένων στο επίπεδο του πομπού, και στον δέκτη επανασυναρμολογείται φτάνοντας σε σύστημα με τον ίδιο αριθμό κεραιών με αυτόν του δέκτη [34].

Τα ανεξάρτητα μονοπάτια μετάδοσης προκύπτουν μέσω χωρικής πολυπλεξίας και διαφορισμού και έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν πληροφορία η οποία δεν εξαρτάται από τις υπόλοιπες ροές [28]. Ο δέκτης καλείται να επεξεργαστεί τις διαφορές σε καθυστέρηση ανάμεσα στα επιμέρους σήματα καθώς και παρεμβολές και περαιτέρω θόρυβο, αφού κάθε μονοπάτι πληροφορίας αντιμετωπίζει ξεχωριστές συνθήκες μετάδοσης [35]. Επειδή η αρχική πληροφορία μεταδίδεται σε πολλά επιμέρους σήματα η τεχνολογία MIMO παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την προσέγγιση SISO. Τα κυριότερα είναι τα εξής:

- Μία διάταξη MIMO μπορεί να εκμεταλλευτεί τα ανακλώμενα και διαθλώμενα σήματα που προκαλούνται εξαιτίας του φαινομένου multipath, καθώς στο πεδίο του δέκτη τα σήματα φτάνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μεταξύ τους, με μικρή απόκλιση. Ως αποτέλεσμα σε περιπτώσεις με παρουσία πολλών εμποδίων μεταξύ πομπού και δέκτη, όπως σε αστικό περιβάλλον επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα σήματος. Αντιθέτως, τα SISO συστήματα έχουν μειωμένη απόδοση σε συνθήκες χωρίς καθαρό πεδίο ορατότητας ανάμεσα στις διατάξεις κεραιών.
- Η χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται μέσω περαιτέρω χωρικών καναλιών τα οποία προκύπτουν μέσω κωδικοποίησης χώρου-χρόνου (space-time coding).
- Τα πολλαπλά μονοπάτια μετάδοσης είναι πιο ανθεκτικά σε παρεμβολές, καθώς αντιμετωπίζουν διαφορετικές συνθήκες μεταξύ τους. Ως

αποτέλεσμα η εξασθένιση σε μία από τις ροές δεδομένων δεν οδηγεί σε μεγάλη πτώση της απόδοσης του συστήματος, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα τόσο ήχου όσο και εικόνας [35].

Φυσικά, η υιοθέτηση των συστημάτων MIMO φέρει και μειονεκτήματα σε θέματα πόρων, συγκεκριμένα:

- Απαιτείται μεγάλο κόστος εγκατάστασης και διατήρησης των συστημάτων πολλαπλών κεραιοστοιχείων.
- Υπάρχουν ανάγκες χώρου και ισχύος σε επίπεδο κυκλωμάτων.
- Είναι αναγκαία η αύξηση της πολυπλοκότητας λόγω της πολυδιάστατης επεξεργασίας σήματος [35].
- Οι συσκευές στο πεδίο του χρήστη πολλές φορές δεν έχουν την απαιτούμενη υπολογιστική και ενεργειακή ισχύ για να ανταπεξέλθουν σε έναν σύστημα MIMO ενώ λόγω της αρχιτεκτονικής MIMO ο δέκτης οφείλει να έχει πολλαπλές κεραιές όπως και ο πομπός. Η πρόκληση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνολογιών όπου στο πεδίο του δέκτη είναι αρκετή μία μόνο κεραία λήψης χωρίς την μείωση των κεραιοστοιχείων στον πομπό, όπως η multiuser-MIMO και κατ'επέκταση η massive-MIMO [28].

Ένα σύστημα κεραιών MIMO που αποτελείται έστω από αριθμό  $M_t$  κεραιών μετάδοσης και  $M_r$  κεραιών λήψης μπορεί να περιγραφεί από το παρακάτω διακριτό σύστημα **Εξίσωση (3-1)** [21].

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{M_r} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M_t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M_r 1} & \cdots & h_{M_r M_t} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{M_t} \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. (3 - 1)}$$

ή αλλιώς ως,  $y = Hx+n$ . Το διάνυσμα  $x(x_1$  έως  $x_{M_t})$  αντιστοιχίζεται στα  $M_t$  σύμβολα προς μετάδοση, το διάνυσμα  $n(n_1$  έως  $n_{M_r})$  αντιστοιχίζεται στα  $M_r$  σύμβολα θορύβου ενώ ο πίνακας  $H$  διαστάσεων  $M_r \times M_t$  περιλαμβάνει τα κέρδη μεταξύ κάθε κεραιάς μετάδοσης  $i$  προς κάθε κεραία λήψης  $j$  [21]. Το σήμα προς μετάδοση κωδικοποιείται, διαμορφώνεται σε σύμβολα και πριν οδηγηθεί προς μετάδοση στην βαθμίδα πολλαπλών κεραιοστοιχείων ανατίθεται σε υποφορείς.

Το μεταδιδόμενο  $M_t \times 1$  σήμα  $(x_n(t))$  για τον  $n$ -οστό τερματικό σταθμό ακολουθώντας την αρχιτεκτονική MIMO δίνεται από την **Εξίσωση (3-2)** [36]:

$$x_n(t) = \sum_{s \in S} \sqrt{p_{n,s}} w_{n,s} X_{n,s} e^{j2\pi f_s t}, 0 < t < T \quad \text{Εξ. (3 - 2)}$$

όπου  $X_{n,s}$  είναι το  $s$ -οστό μεταδιδόμενο σύμβολο του  $n$ -οστού τερματικού σταθμού,  $f_s$  είναι η αντίστοιχη συχνότητα για τον  $s$ -οστό υποφορέα,  $w_{n,s}$  είναι το διάνυσμα μετάδοσης σύμφωνα με το οποίο το σήμα θα μεταδοθεί από όλες τις  $M_t$  κεραιές,  $T$  είναι η διάρκεια συμβόλου και  $j$  είναι το φανταστικό στοιχείο της εξίσωσης.

Στο πεδίο του δέκτη το  $M_r \times 1$  σήμα ( $Y_{n,s}$ ) για κάθε υποφορέα δίνεται από την **Εξίσωση (3-3)** [8], η οποία για χάρη απλότητας αναφέρεται σε διάρκεια συμβόλου  $T=1$ .

$$Y_{n,s} = \left( \sqrt{\frac{p_{n,s}}{TL_{n,\text{sec}(n)}}} \right) \mathbf{H}_{n,\text{sec}(n)} w_{n,s} X_{n,s} \quad \text{Εξ. (3 - 3)}$$

$$+ \sum_{n' \neq n, s \in S_{n'}}^N \left( \sqrt{\frac{p_{n',s}}{TL_{n,\text{sec}(n')}}} \right) \mathbf{H}_{n,\text{sec}(n')} w_{n',s} X_{n',s} + \mathbf{noise}_{n,s}$$

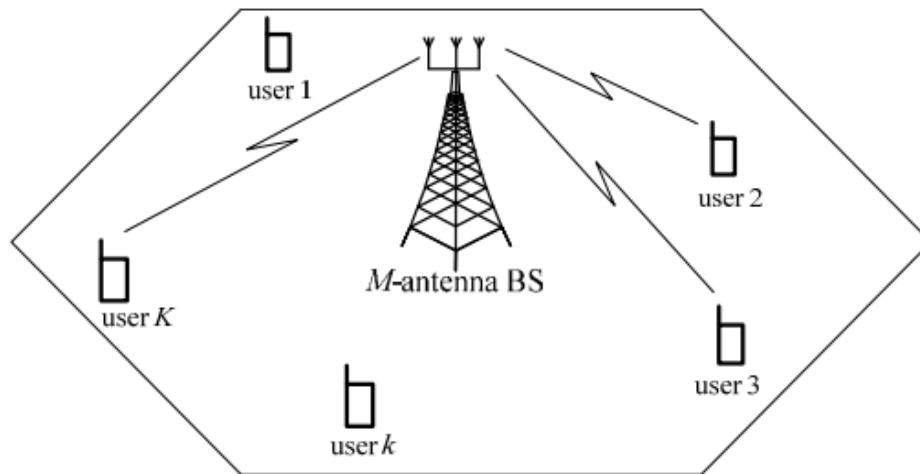
Ο γενικός όρος  $\mathbf{H}_{n, \text{sec}(n'),s}$  είναι ο  $M_r \times M_t$  πίνακας για τον  $s$ -οστό υποφορέα του  $n$ -οστού τερματικού σταθμού, συγκεκριμένα στον  $n'$ -οστό του τομέα, ενώ ο όρος  $\mathbf{noise}_{n,s}$  αποτελεί την πρόσθεση του λευκού γκαουσιανού θορύβου διαστάσεων  $M_r \times 1$ .

Οι όροι  $\Pi_{n, \text{sec}(k)}$  και  $\Pi_{n, \text{sec}(l)}$  είναι οι συνολικές απώλειες στον  $n$ -οστό τερματικό σταθμό αναφερόμενοι στους τομείς  $k$  και  $l$  του τερματικού αυτού, και οι όροι  $p_{ns}$ ,  $p_{k,s}$ ,  $p_{l,s}$  αναφέρονται στην κατανομημένη ισχύ στον  $s$ -οστό υποφορέα του  $n$ -οστού,  $k$ -οστού,  $l$ -οστού τερματικού σταθμού αντίστοιχα [36].

### 3.2. Massive MIMO διατάξεις

Στην προσπάθεια για περαιτέρω εκμετάλλευση της χωρικής πολυπλεξίας και την αύξηση του κέρδους μέσω αυτής, τα συστήματα MIMO εξελίχθηκαν σε multiuser MIMO (MU-MIMO), όπου πολλοί χρήστες εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από έναν σταθμό βάσης, ο οποίος φέρει πολλαπλά κεραιοστοιχεία (**Εικόνα 3.1**). Η βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων MU-MIMO δεν απαιτεί μεγάλο αριθμό κεραιών στο πεδίο του δέκτη και αυτό είναι σημαντικό

λόγω των απαιτήσεων για χαμηλό κόστος και μικρό φυσικό μέγεθος όσον αφορά τις κινητές συσκευές και τερματικούς .



**Εικόνα 3.1:** Multiuser MIMO σύστημα όπου  $K$  τερματικοί μίας κεραίας λήψης εξυπηρετούνται από σταθμό βάσης  $M$  κεραίων [37].

Τα συστήματα MU-MIMO όπου ένας σταθμός βάσης με εκατοντάδες κεραίες εξυπηρετεί ταυτόχρονα δεκάδες ή και παραπάνω χρήστες, ονομάζεται σύστημα massive-MIMO ή αλλιώς MU-MIMO πολύ μεγάλης τάξης (hyper MIMO, full dimension MIMO systems) [37]. Σε ένα κυψελωτό δίκτυο massive-MIMO ο αριθμός των χρηστών δεν πρέπει να ξεπερνάει τον αριθμό των κεραίων σε κάθε ξεχωριστή κυψέλη. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει κατευθυντικά σήματα προς τον κάθε χρήστη ο οποίος εξυπηρετείται έχοντας μία μόνο κεραία λήψης.

Η τεχνολογία beamforming δίνει την δυνατότητα στον σταθμό βάσης να προσαρμόσει το διάγραμμα ακτινοβολίας της κάθε κεραίας στις ανάγκες του κάθε χρήστη (**Εικόνα 3.2**). Στα συστήματα massive MIMO η αποστολή πληροφορίας προς τον χρήστη γίνεται μέσω πολλών μονοπατιών. Μέσω beamforming τα διάφορα μονοπάτια αυτά συγχρονίζονται έτσι ώστε να επιτρέπεται η ταυτόχρονη λήψη σημάτων από σταθμό βάσης και χρήστη και να μεγιστοποιηθεί η φασματική απόδοση του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, ο κάθε τερματικός είναι σε θέση να λάβει ένα ισχυρό σήμα χωρίς παρεμβολές με άλλους τερματικούς [22].



**Εικόνα 3.2:** Massive MIMO, beamforming [31].

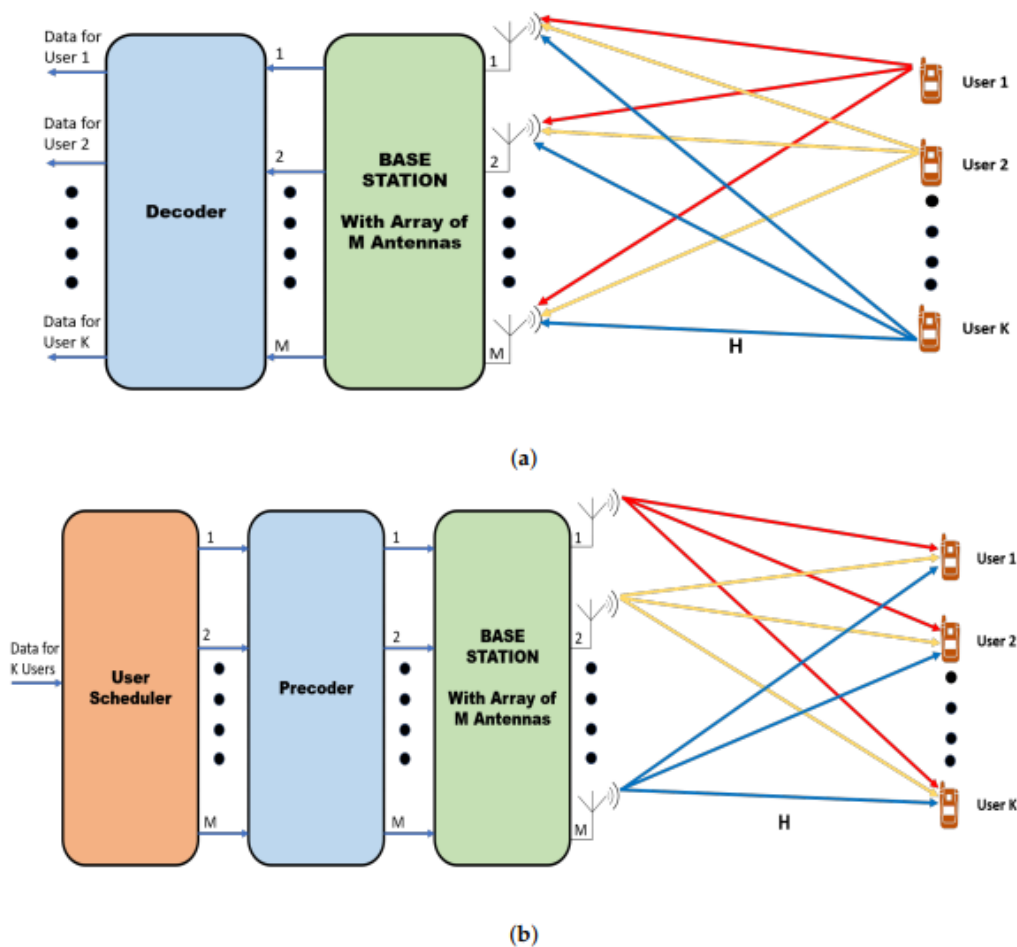
Στα συστήματα πολλαπλών κεραιοστοιχείων, είναι αναγκαία η ταυτόχρονη επικοινωνία από σταθμό βάσης προς τερματικό και αντίστροφα και μάλιστα στο ίδιο κανάλι (**Εικόνα 3.3**). Η ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη σήματος μέσω των ίδιων φασματικών πόρων επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας Full Duplex η οποία εφαρμόζεται σε πολλά συστήματα 5G. Παρόλο που η μέθοδος αυτή αυξάνει την πολυπλοκότητα συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος και στην κάλυψη μεγάλης κινητικότητας λόγω πολλών χρηστών προς εξυπηρέτηση [22].

Έχοντας πολλά κεραιοστοιχεία στο επίπεδο του πομπού οι παράμετροι του καναλιού γίνονται πιο ντετερμινιστικές καθώς είναι δυνατή η χρήση γραμμικών μεθόδων ανάλυσης σήματος με στόχο τόσο την κωδικοποίηση του απεσταλμένου σήματος όσο και την αποκωδικοποίηση του στο πεδίο του δέκτη [9]. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των massive-MIMO συστημάτων είναι τα εξής:

- Πολύ μεγάλη φασματική απόδοση και αξιοπιστία κατά την επικοινωνία: Η massive-MIMO τεχνολογία εμπεριέχει όλα τα πλεονεκτήματα της κλασικής MU-MIMO αρχιτεκτονικής. Συγκεκριμένα με  $M$  κεραιές και  $K$  χρήστες μπορεί να επιτευχθεί ποικιλομορφία τάξεως  $M$  και κέρδος πολυπλεξίας  $\min(M, K)$ . Αυξάνοντας και τον συντελεστή  $M$  και τον  $K$ , μπορούμε να αποκτήσουμε τεράστια φασματική απόδοση και υψηλή αξιοπιστία συστήματος [37].
- Υψηλή ενεργειακή απόδοση: Κατά την μετάδοση κάτω ζεύξης, ο σταθμός βάσης επικεντρώνει την ενεργειακή δαπάνη στην κατευθυντικότητα που απαιτείται για την μετάδοση προς τον

χρήστη. Συνεπώς, με την παρουσία συστοιχείων από κεραίες, η ισχύς διαμοιράζεται και συνολικά μειώνονται τα επίπεδα της. Για έναν δεδομένο αριθμό χρηστών, διπλασιάζοντας τον αριθμό των κεραιών στον σταθμό βάσης, και παράλληλα μειώνοντας την ισχύ κατά το ήμισυ, διατηρείται η ίδια φασματική απόδοση και ως αποτέλεσμα η ενεργειακή απόδοση διπλασιάζεται [37].

- Απλούστερη επεξεργασία σήματος: Στα περισσότερα περιβάλλοντα ασύρματων δικτύων όταν ο αριθμός των κεραιών υπερτερεί αυτόν των χρηστών και ο διαμοιρασμός του καναλιού είναι ορθογωνικός, οι συνθήκες μετάδοσης βελτιώνονται. Κάτω από επιθυμητές συνθήκες, οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών και ο θόρυβος μπορούν να ελαττωθούν με τη χρήση γραμμικών μεθόδων, συγκεκριμένα γραμμική προκωδικοποίηση (precoding) στην κάτω ζεύξη και γραμμική αποκωδικοποίηση (decoding) στην άνω ζεύξη [37].

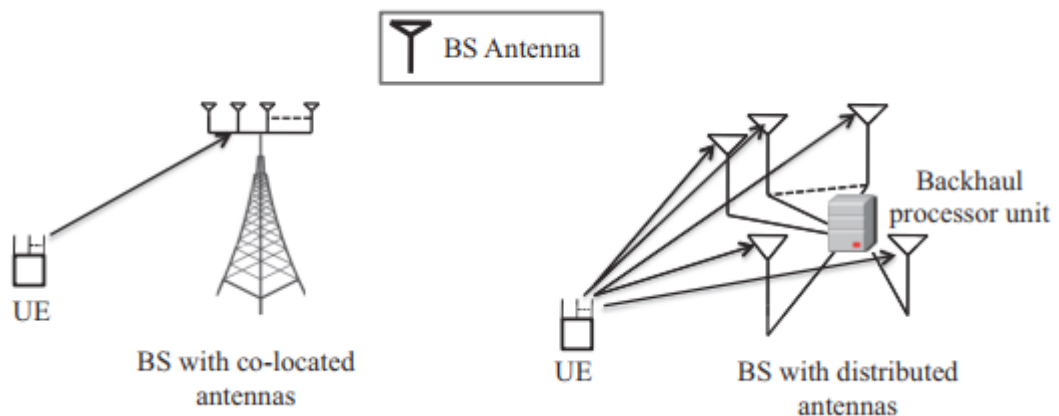


**Εικόνα 3.3:** Massive MIMO, άνω και κάτω ζεύξη, (a) άνω ζεύξη, (b) κάτω ζεύξη [22].

### 3.3. Κατηγορίες massive MIMO διατάξεων

Κατά την εγκατάσταση massive MIMO συστημάτων, δύο κύρια σχήματα μπορούν να υιοθετηθούν: Το κεντρικό σχήμα (centralized MIMO, C-MIMO), όπου οι κεραιές λήψης (Rx) και μετάδοσης (Tx) είναι συγκεντρωμένες επάνω στους σταθμούς βάσης (συμβατικό massive MIMO σχήμα), και το κατακεκομμένο (distributed MIMO, D-MIMO) όπου οι κεραιές των σταθμών βάσεων είναι τοποθετημένες σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και συνδέονται μεταξύ τους μέσω backhaul συνδέσεων όπως οπτικές ίνες (**Εικόνα 3.4**).

Πρακτικά, το σχήμα C-MIMO είναι πιο εύκολο ως προς την μαθηματική ανάλυση και την εγκατάσταση σε σύγκριση με το σχήμα D-MIMO. Ο λόγος είναι οι διαφορετικές κατηγορίες path loss που παρατηρούνται κατά το D-MIMO, οι οποίες οφείλονται στην κατανομή των κεραιών σε διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες. Οι αποστάσεις για την πρόσβαση και επικοινωνία στο σχήμα D-MIMO αλλάζουν αναλόγως την τοποθεσία του κάθε κεραιοστοιχείου με αποτέλεσμα να απαιτείται πιο περίπλοκη ανάλυση για την εκτίμηση του συστήματος. Ακόμη, επειδή η επιλογή της τοποθεσίας κάθε κεραιάς είναι κρίσιμη για την ποιότητα του συστήματος απαιτείται περαιτέρω έρευνα και μελέτη, έργο που γίνεται ακόμη πιο δύσκολο καθώς τα συστήματα massive MIMO φέρουν εξ'ορισμού πολύ μεγάλο αριθμό κεραιών. Βέβαια η D-MIMO αρχιτεκτονική παρουσιάζει και πλεονεκτήματα συγκριτικά με την C-MIMO όπως: Χαμηλότερη απαιτούμενη ενέργεια μετάδοσης, μεγαλύτερο κέρδος πολυπλεξίας, μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη και ευκολία πρόσβασης [10].

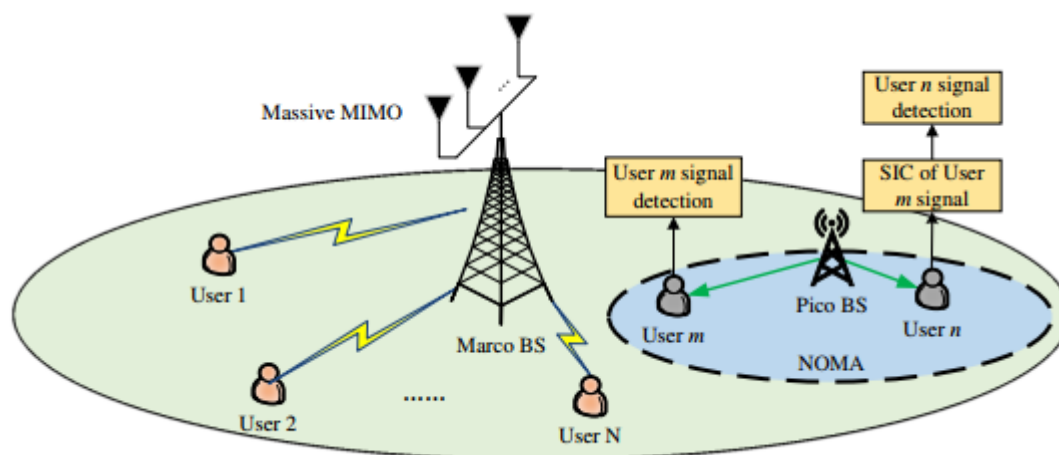


**Εικόνα 3.4:** C-MIMO, σταθμός βάσης με συγκεντρωμένες κεραιές (αριστερά), D-MIMO, σταθμός βάσης με κατακεκομμένες κεραιές (δεξιά) [10].



Παράλληλα με τον στόχο να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα της MIMO αρχιτεκτονικής και της NOMA ανάθεσης πόρων, προτάθηκε ετερογενές μοντέλο το οποίο βασίζεται σε σταθμούς βάσης MIMO και massive-MIMO διατάξεων στα macrocell δίκτυα και σε SISO σταθμούς βάσης με τεχνικές ανάθεσης NOMA στα δευτερόντα picocell και femtocell δίκτυα. Τα macrocell δίκτυα εξυπηρετούν μέσω beamforming τερματικούς που φέρουν ένα κεραιοστοιχείο το ίδιο και τα μικρότερα υποδίκτυα.

Ο στόχος του μοντέλου αυτού είναι η βελτίωση της φασματικής απόδοσης στα μικρότερα δίκτυα της διάταξης μέσω μη-ορθογωνικών τεχνικών ανάθεσης πόρων, σε αντίθεση με την συμβατική OMA. Παράλληλα, με την υιοθέτηση περισσότερων femtocell και picocell οι συνδέσεις στα υποδίκτυα είναι πιο άμεσες και κοντινές με αποτέλεσμα την αύξηση και του σηματοθορυβικού λόγου SNIR. Επίσης, είναι εφικτός ο πιο δίκαιος διαμοιρασμός ενέργειας μέσα στα υποδίκτυα χάρη στην power-domain NOMA κατανομή [9].



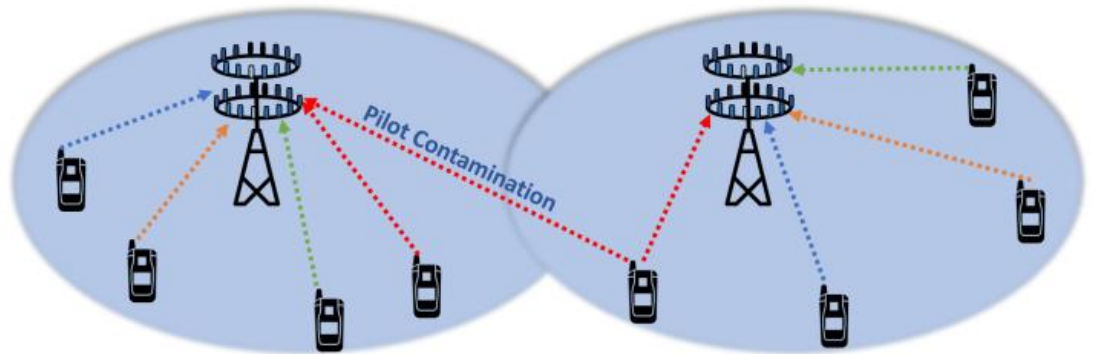
**Εικόνα 3.5:** Ετερογενές δίκτυο το οποίο εφαρμόζει MIMO-NOMA τεχνικές διαμοιρασμού φάσματος [9].

### 3.4. Προκλήσεις Massive-MIMO Τεχνολογίας

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία MIMO και massive MIMO, υπάρχουν και προκλήσεις που κάνουν την εφαρμογή τους πιο δύσκολη, όπως:

- Μόλυνση σήματος πιλότου (Pilot Contamination): Στα συστήματα massive MIMO κατά την άνω ζεύξη η εκτίμηση του καναλιού γίνεται μέσω πιλοτικών σημάτων από τον τερματικό προς τον σταθμό βάσης.

Όμως, ο αριθμός των ορθογωνικών πιλοτικών σημάτων και το διαθέσιμο φάσμα είναι περιορισμένα με αποτέλεσμα να γίνεται επαναχρησιμοποίηση των σημάτων αυτών στις γειτονικές κυψέλες (**Εικόνα 3.5**), και πολλοί τερματικοί από διαφορετικές περιοχές να εκμεταλλεύονται τους ίδιους φασματικούς πόρους [22]. Ως αποτέλεσμα, κατά την εκτίμηση του συστήματος σε μία κυψέλη παρατηρούνται παρεμβολές από τερματικούς άλλων κυψελών, φαινόμενο που μειώνει την απόδοση του συστήματος και μάλιστα δεν διορθώνεται με την πρόσθεση παραπάνω κεραιοστοιχείων.



**Εικόνα 3.6:** Μόλυνση σήματος πιλότου [22].

- Εκτίμηση Καναλιού, CSI (Channel State Information): Για ένα σύστημα massive MIMO που χρησιμοποιεί διαίρεση συχνότητας ως μέσο πολλαπλής πρόσβασης και συγκεκριμένα το πρότυπο FDD (Frequency Division Duplexing), απαιτείται εκτίμηση του καναλιού τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Για πολύ μεγάλο αριθμό κεραιοστοιχείων η αξιολόγηση της κάτω ζεύξης κατά το FDD γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκη και δύσκολο να προσαρμοστεί σε καθημερινά ασύρματα δίκτυα.
- Προγραμματισμός χρηστών (User Scheduling): Συστήματα massive MIMO με μεγάλο αριθμό κεραιών στον σταθμό βάσης επικοινωνούν με πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα, αξιοποιώντας τους ίδιους επικοινωνιακούς πόρους. Αυτό έχει ως συνέπεια παρεμβολές μεταξύ των σημάτων από κάθε χρήστη (multi-user interference) και κατ'έκταση την μείωση του ρυθμού δεδομένων και της συνολικής ποιότητας του συστήματος. Για να μειωθεί ο βαθμός των παραπάνω παρεμβολών και να επιτευχθεί ο διαχωρισμός των σημάτων από διαφορετικούς τερματικούς χρησιμοποιούνται μέθοδοι προκωδικοποίησης (precoding) κατά την κάτω ζεύξη.

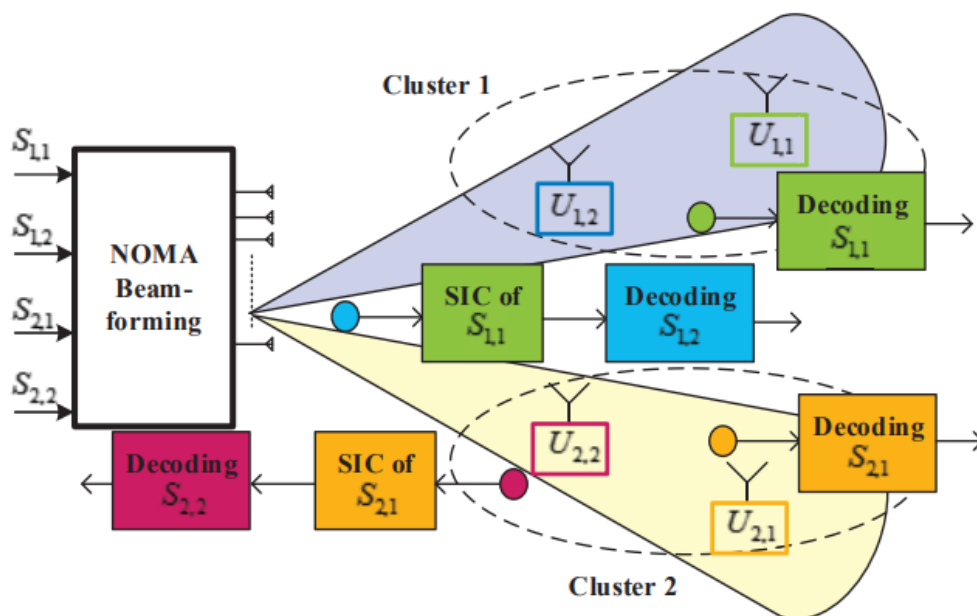
- Μέθοδοι προκωδικοποίησης (Precoding) : Οι μέθοδοι προκωδικοποίησης βοηθούν στην μείωση των παρεμβολών και στην οργάνωση της επικοινωνίας κατά την ταυτόχρονη επικοινωνία με πολλαπλούς χρήστες. Το αρνητικό όμως αυτών των μεθόδων είναι το μεγάλο υπολογιστικό βάρος που προσθέτουν στο σύστημα το οποίο μάλιστα αυξάνεται αναλόγως του αριθμού κεραιών.
- Κόστος υλικού (Hardware) : Τα massive MIMO συστήματα βασίζονται σε μεγάλο αριθμό κεραιοστοιχείων ανά σταθμό βάσης με στόχο την αντιμετώπιση παρεμβολών, εξασθένησης και θορύβου σε συνδυασμό με την αύξηση της χωρητικότητας και του ρυθμού δεδομένων. Όμως, όπως είναι λογικό η φιλοσοφία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τόσο σε επίπεδο υλικού (hardware), όσο και σε υπολογιστική ισχύ.
- Ενέργεια: Η ενεργειακή απόδοση είναι ο λόγος της φασματικής απόδοσης προς την ενέργεια μετάδοσης. Η φασματική απόδοση αυξάνεται πάντα χάρη στον μεγάλο αριθμό κεραιών, όμως αντίστοιχα αυξάνεται και η απαιτούμενη ενέργεια. Συνεπώς, η πρόκληση εμφανίζεται στον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας όσο προστίθενται περαιτέρω κεραιοστοιχεία στην προσπάθεια για αύξηση της φασματικής απόδοσης.
- Εντοπισμός σήματος κατά την άνω ζεύξη (Signal Detection) : Στα massive MIMO συστήματα λόγω του υψηλού αριθμού κεραιών ο εντοπισμός των σημάτων από τους πολλαπλούς χρήστες, γίνεται υπολογιστικά περίπλοκος. Επίσης, στο σταθμό βάσης λόγω των πολλών ταυτόχρονων σημάτων από τους κινούμενους τερματικούς, παρατηρείται υπέρθεση των σημάτων αυτών με αποτέλεσμα την εμφάνιση παρεμβολών και κατ'επέκταση την μείωση του ρυθμού δεδομένων και της φασματικής απόδοσης του συστήματος [22].

### 3.5. NOMA και MIMO

Η τεχνολογία massive-MIMO έχει μελετηθεί αρκετά σε συνδυασμό με την μέθοδο OMA και έχει γίνει εμφανές ότι η καλύτερη απόδοση αυτού του συνδυασμού τεχνικών πραγματοποιείται σε δίκτυα όπου ο αριθμός κεραιών υπερβαίνει αυτόν των χρηστών. Συνεπώς, η προσέγγιση MIMO-OMA δεν μπορεί να υποστηρίξει πλήρως υπερφορτωμένα δίκτυα υψηλής κινητικότητας. Το παραπάνω εμπόδιο μπορεί να ξεπεραστεί μοιράζοντας τους πόρους μη ορθογωνικά μέσω NOMA-MIMO συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να

επιτευχθεί καλύτερη φασματική απόδοση κατά την ανάγκη για μαζική συνδεσιμότητα στα σημερινά δίκτυα [36].

Κατά τα MIMO-NOMA συστήματα, ο σταθμός βάσης διαθέτει πολλαπλές κεραιές και ο χρήστης μία ή παραπάνω. Παρομοίως με την μέθοδο NOMA σε SISO συστήματα, διαδικασίες SIC είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση παρεμβολών και την αποκωδικοποίηση του σήματος. Δεδομένου των χωρικών δυνατοτήτων που παρέχει η MIMO αρχιτεκτονική, η ακύρωση των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω τεχνικών beamforming, τόσο στο πεδίο της ισχύος όσο και του χώρου. Το πιο διαδεδομένο μοντέλο MIMO-NOMA ονομάζεται cluster ή multi-cluster MIMO-NOMA.



**Εικόνα 3.7:** MIMO-NOMA σύστημα με  $N=1$  αριθμό κεραιοστοιχείων ανά δέκτη,  $C=2$  clusters,  $K=2$  χρήστες ανά cluster [10].

Ορίζεται δίκτυο το οποίο περιέχει σταθμούς βάσης BS (Base Station) με  $M$  αριθμό κεραιών και  $K$  αριθμό χρηστών προς εξυπηρέτηση οι οποίοι φέρουν  $N$  αριθμό κεραιών (Εικόνα 3.6). Οι χρήστες χωρίζονται σε  $C$  αριθμό υπομάδων (clusters) η καθεμία με  $K$  αριθμό χρηστών. Μέσω beamforming προς τις αντίστοιχες υπομάδες (clusters) οι χρήστες λαμβάνουν το σήμα μέσω power-domain NOMA διαχωρισμού πόρων. Συγκεκριμένα, ισχύει σε κάθε cluster η ίδια προτεραιότητα που ισχύει σε SISO συστήματα, δηλαδή ο χρήστης με το χαμηλότερο κέρδος καναλιού λαμβάνει περισσότερη ισχύ και έχει προτεραιότητα

στις διαδικασίες SIC. Η τεχνική beamforming βοηθάει στην αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των επιμέρους clusters, ενώ για μικρότερο αριθμό χρηστών, μπορεί να συνεισφέρει και στην απαλοιφή ενδο-παρεμβολών μέσα στις επιμέρους υποομάδες. Οι κυριότερες δυσκολίες αυτού του μοντέλου είναι η βελτιστοποίηση του beamforming, η κατανομή ισχύος προς τους χρήστες, ο τρόπος διαχωρισμού των χρηστών σε clusters και το πόσο πολύπλοκες και αξιόπιστες μπορούν να γίνουν οι μεθοδοι SIC σε ένα τέτοιο περιβάλλον [10].



## 4. Αρχιτεκτονική Προσομοιωτή Πολυκυψελωτού Δικτύου

### 4.1. Παράμετροι και Στάδια Προσομοίωσης

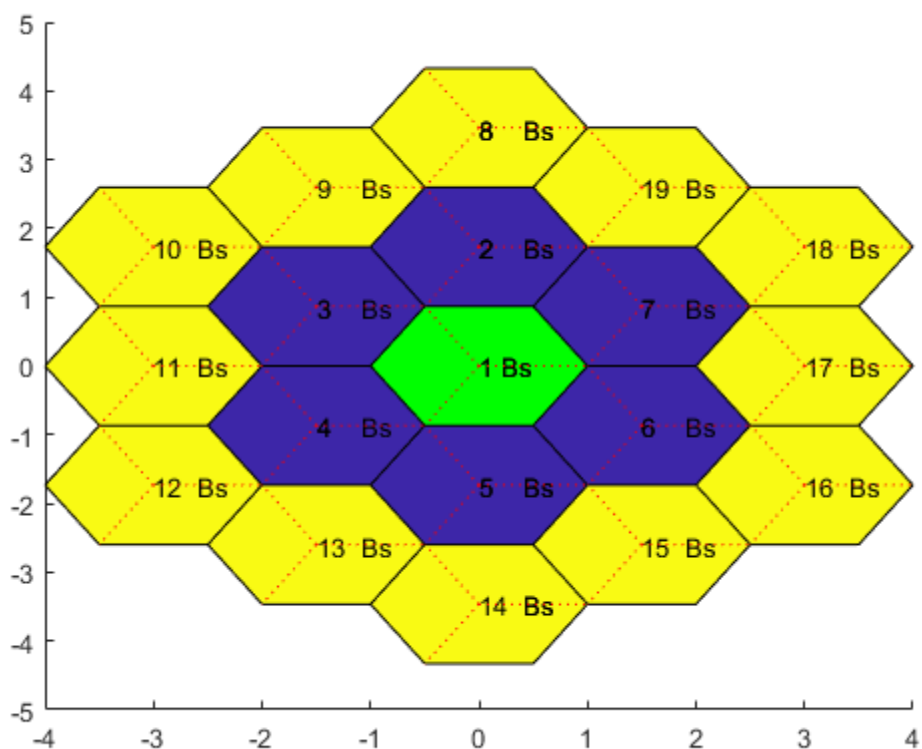
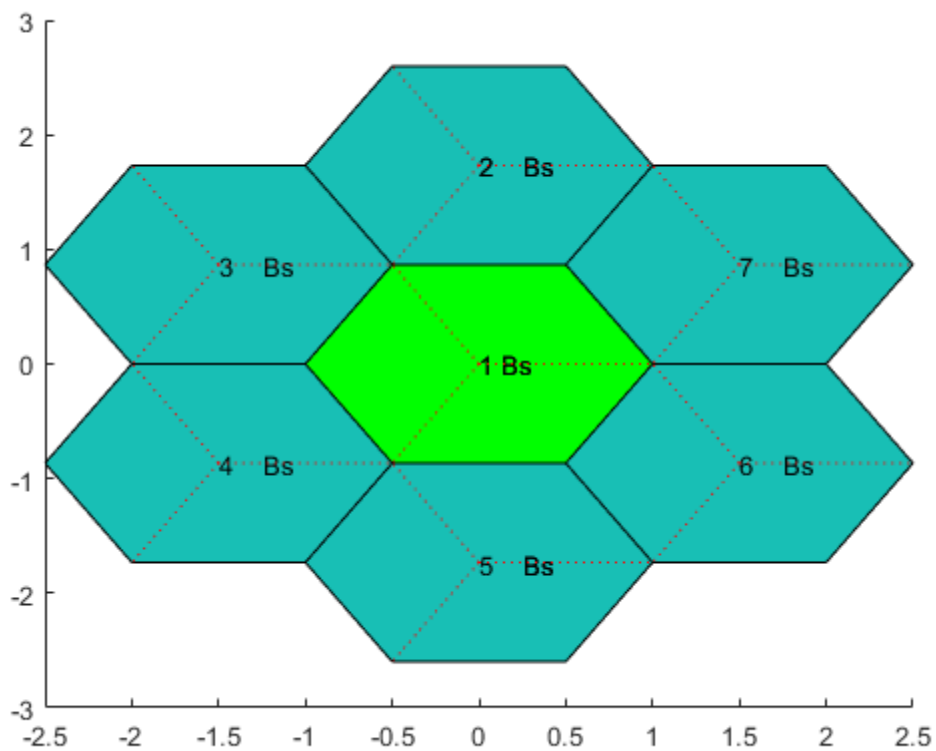
Η συγκεκριμένη μελέτη περιγράφει σενάρια μετάδοσης σε πολυκυψελωτά δίκτυα με κεντρική συχνότητα λειτουργίας στα 2GHz ( **Πίνακας 4-1** ). Οι σταθμοί βάσης είναι τοποθετημένοι χωρικά σε σταθερή θέση και περιέχουν κατευθυντικές κεραιές. Εφόσον ο στόχος είναι η μελέτη πολυκυψελωτών δικτύων και η μείωση της υπολογιστικής ισχύος θεωρούνται τα εξής: Αντί για την ανάθεση τεράστιου αριθμού κεραιών σε ένα σταθμό βάσης και τον ορισμό ενός μονοκυψελωτού δικτύου, τοποθετούνται μειωμένου αριθμού κεραιές σε πολλαπλές κυψέλες [32].

Το σύστημα αυτό προσομοιώνει μέσω MATLAB [42] την ανάθεση φορέων στο δίκτυο και αξιολογεί διάφορες στρατηγικές διαμοιρασμού ασύρματων πόρων για διάφορες τιμές πιθανότητας αποκλεισμού (Probability Failure, PF). Η κατανομή φάσματος αξιοποιεί ορθογωνικές τεχνικές (OFDMA) ενώ στο πεδίο της ισχύος εφαρμόζονται μη-ορθογωνικές μέθοδοι λόγω των διαφορετικών επιπέδων ισχύος ανά φορέα και χρήστη. Ο συνδυασμός ορθογωνικών (συχνότητα) και μη-ορθογωνικών τεχνικών (ισχύς) στοχεύει στον μετριασμό των ομοδιαυλικών παρεμβολών κατά τον διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων. Στο στάδιο της ανάθεσης φορέων, παραμετροποιούνται η κυψελική τοπολογία (**Εικόνα 4.1**), η ακτίνα της κυψέλης, ο SINR (σηματοθορυβικός λόγος), το πλήθος ανατιθέμενων καναλιών ανά χρήστη κ.τ.λ. Τέλος, ο προσομοιωτής είναι ημι-στατικός, δηλαδή στη διάρκεια μιας Monte Carlo (MC) προσομοίωσης τα Mobile Terminals (MT) δεν αλλάζουν τη γεωγραφική τους θέση, ενώ η ανάθεση/έλεγχος ισχύος έχει αποσυζευχθεί από την διαδικασία ανάθεσης ραδιοπόρων για λόγους απλοποίησης των τελευταίων [41].

Παράμετροι	Τιμή
Αριθμός υποφερόντων ανά σταθμό βάσης	128
Κεντρική συχνότητα λειτουργίας	2 GHz
Ύψος σταθμού βάσης / κινητού τερματικού	25m / 1.5m
Κέρδος κεραίας σταθμού βάσης / κινητού τερματικού	14 dBi / 0 dBi
Επίπεδα Κυψελών	1,2 (7, και 19 κυψέλες αντίστοιχα)
Αριθμός τομέων σε κάθε κυψέλη	3
Ύψος σταθμού βάσης, BS	30m
Μοντέλο διάδοσης	Okumura-Hata
Μέγιστες απώλειες διαδρομής (path loss)	133.4 dB
Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής ανά κινητό τερματικό	1 watt
Τυπική απόκλιση σκίασης	8 dB
Ακτίνα κυψέλης	1 km
Επίπεδο θερμικού θορύβου	-104 dB
Πλήθος Monte Carlo προσομοιώσεων	1000

**Πίνακας 4.1:** Παράμετροι τοπολογίας δικτύου.





**Εικόνα 4.1:** (a) Τοπολογία δικτύου ενός επιπέδου (1 tier), 7 σταθμών βάσεων (BS), (b) Τοπολογία δικτύου δύο επιπέδων (2 tier), 19 σταθμών βάσεων (BS).

Ο προσομοιωτής εκτελεί επαρκή αριθμό επαναλήψεων Monte Carlo (MC) ώστε να ληφθούν απαραίτητες πληροφορίες για την εκτίμηση του δικτύου κάτω από ρεαλιστικά σενάρια μετάδοσης [36]. Κάθε MC επανάληψη περιέχει 4 βήματα (**Εικόνα 4-2**) τα οποία είναι τα εξής:

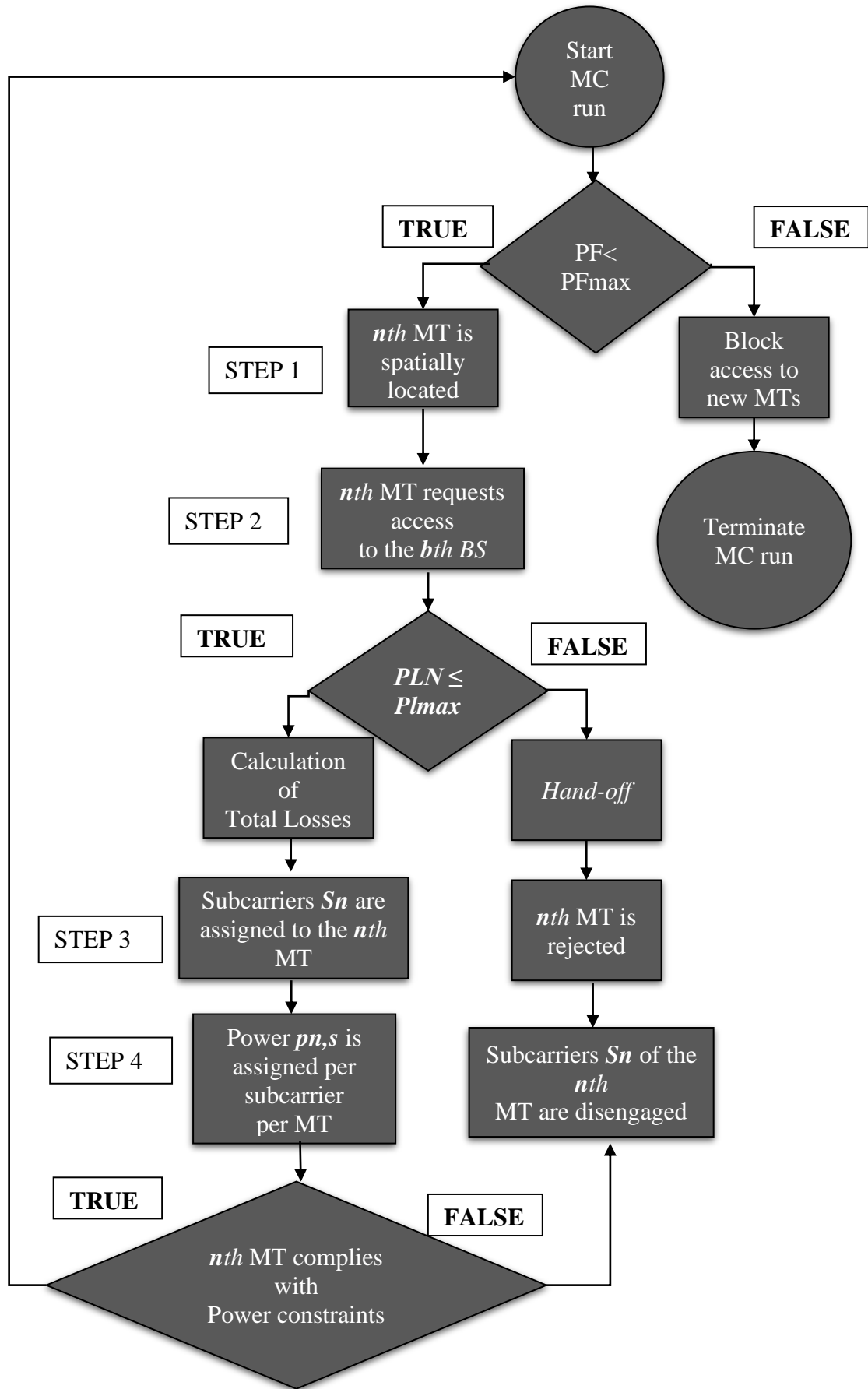
- Βήμα 1: Στη διάρκεια μιας MC προσομοίωσης, τα MTs εισέρχονται στο δίκτυο σειριακά ακολουθώντας ομοιόμορφη γκαουσιανή κατανομή  $CN(0,1)$  και δεν αλλάζουν τη γεωγραφική τους θέση. Επειδή η συσκευή κάθε  $n$ -οστού MT λειτουργεί σε H/M περιβάλλον σκέδασης, στη συνέχεια λαμβάνονται υπόψιν οι απώλειες διάδοσης συμπεριλαμβανομένης και της γκαουσιανής σκίασης  $CN(0,1)$ .
- Βήμα 2: Το νεο-εισερχόμενο  $n$ -οστό MT ( $1 \leq n \leq N$ ) αιτείται σύνδεσης από τον πλησιέστερο  $b$ -οστό BS ( $1 \leq b \leq B$ ) ως προς τον οποίο παρουσιάζει την ελάχιστη απώλεια διάδοσης. Εφόσον η εν λόγω απώλεια διάδοσης δεν ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, η σύνδεση εδραιώνεται και εκτιμώνται οι συνολικές απώλειες [41]. Εάν η μέγιστη τιμή απώλειας διάδοσης ξεπεραστεί, ο κινητός σταθμός απορρίπτεται και ανανεώνεται η τιμή της πιθανότητας αποκλεισμού (Probability Failure, PF, αριθμός ακυρωμένων κινητών σταθμών ανά τον αριθμό αιτημάτων για πρόσβαση στην τοπολογία) [36].
- Βήμα 3: Ο  $b$ -οστός BS αναθέτει ένα σύνολο  $U_n$  φορέων σύμφωνα με τις προτεινόμενες τεχνικές. Επειδή η διαδικασία αυτή εστιάζει στην ικανοποίηση πολλαπλών απαιτήσεων (δυναμική ανάθεση ισχύος και φερόντων, διατήρηση δικαιοσύνης μεταξύ των MT, μείωση αλγοριθμικής πολυπλοκότητας, κ.τ.λ.) θεωρούμε ίσο πλήθος υποφορέων ανά MT (δηλ.  $S_n = |U_n|$ ) και ότι εντός κυψέλης κάθε φορέας ανατίθεται μόνο σε ένα τερματικό [ $S_n \cap S_m = \emptyset$  για  $\forall n, m \in N$  και  $n \neq m$ ] [41]. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο σε NOMA όσο και σε OMA σενάρια διάδοσης, εφαρμόζεται το πλάνο επαναχρησιμοποίησης συχνότητας -1 (Frequency reuse-1, FR-1). Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, οι ίδιοι πόροι συχνοτήτων και χρόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν από γειτονικές κυψέλες, όπως δείχνει και η **Εξίσωση (4-1)** [36].

$$0 \leq |S \cap S'| \leq \min(S, S'), \quad n' \leq N, \quad BS(n) \neq BS(n') \quad \text{Εξ. (4-1)}$$

- Βήμα 4: Υπολογισμός ισχύος ανά φέρον και έλεγχος (**Εξίσωση 4-2**) [36] των επιπέδων ισχύος σύμφωνα με τις διαθέσιμες τεχνικές ανάθεσης. Συγκεκριμένα, εάν η συνολική ισχύς σε έναν κινητό σταθμό ξεπερνάει μία τιμή  $p_m$ , ο MT απορρίπτεται, οι φορείς του αποδεσμεύονται και η

διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον επόμενο ΜΤ. Επίσης, η τιμή της συνθήκης αποκλεισμού PF ανανεώνεται [36].

$$0 < \sum_{s \in S_n} p_{n,s} < p_m \quad \text{Εξ. (4 - 2)}$$



Εικόνα 4.2 : Αναπαράσταση MC προσομοίωσης [41]

## 4.2. Αλγόριθμοι Ανάθεσης Φερόντων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι ανάθεσης φερόντων που εφαρμόστηκαν υπό τον πολυκυκλωτό προσομοιωτή. Στο τρίτο βήμα της MC προσομοίωσης τα φέροντα διαμοιράζονται με τεχνικές οι οποίες μπορούν να είναι ορθογωνικές (OFDMA) ενώ στο τέταρτο βήμα γίνεται ο υπολογισμός της κατανάλωσης ισχύος βασισμένη στην PD-NOMA μέθοδο [36]. Εφαρμόζονται δύο αλγόριθμοι ανάθεσης φορέων, ο Ψευδοτυχαίος αλγόριθμος (Pseudo-Random) και ο σειριακός αλγόριθμος Round-Robin. Στη συνέχεια οι δύο αυτοί αλγόριθμοι αναφέρονται και ως Random ή Sequential.

### 4.2.1. Σειριακός Αλγόριθμος (Round-Robin)

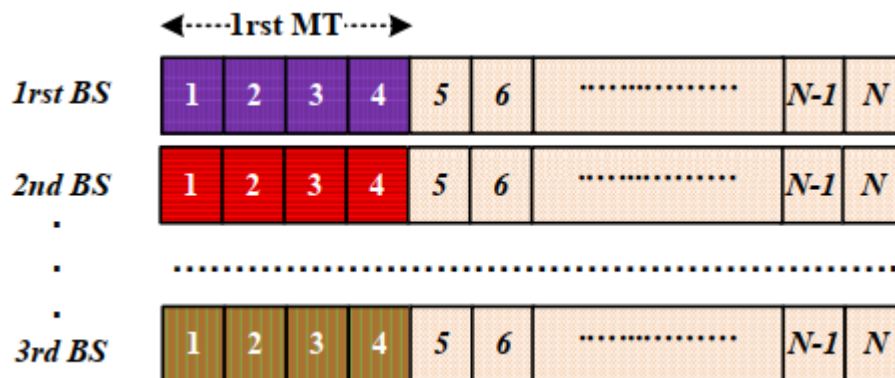
Στην πιο απλή περίπτωση ανάθεσης ραδιοπόρων, κάθε νεοεισερχόμενος τερματικός σταθμός δεσμεύει σειριακά (Round Robin) ένα σετ υποφορέων  $U_n$ , μήκους  $S_n = |U_n|$  του  $b$ -οστού σταθμού βάσης, όπως φαίνεται στην **Εξίσωση (4-3)** [36]. Η λογική που ακολουθείται είναι η εξής:

$$\begin{aligned} U_n &\leftarrow C_b(1:S_n) \\ C_b &\leftarrow C_b \setminus U_n \end{aligned} \qquad \text{Εξ. (4 - 3)}$$

Η παραπάνω τεχνική αυξάνει την πιθανότητα των διασυμβολικών παρεμβολών ISI (Inter Symbol Interference) αλλά και των ομοδιαυλικών παρεμβολών CCI (Co-Channel Interference). Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των CCI οι πρώτοι τερματικοί σταθμοί που εισάγονται σε έναν σταθμό βάσης δεσμεύουν σχεδόν πάντα τους ίδιους φορείς που έχουν δεσμεύσει οι πρώτοι τερματικοί που ανήκουν σε γειτονικούς σταθμούς.

Για παράδειγμα στην **Εικόνα 4.3** η εισαγωγή τριών τερματικών σταθμών (με τέσσερις φορείς ο έκαστος) σε κάθε έναν από τρεις διαθέσιμους σταθμούς βάσης, οδηγεί σε ομοδιαυλικότητα σε κάθε έναν από τους τέσσερις φορείς. Ως αποτέλεσμα, οι τρεις τερματικοί αξιοποιούν τους ίδιους ραδιοπόρους, καθιστώντας το απαραίτητο να γίνει εκ νέου υπολογισμός ισχύος για κάθε περίπτωση ομοδιαυλικότητας. Ακόμη, υποθέτοντας ότι ο αριθμός διαθέσιμων φορέων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό που αναλογεί σε κάθε τερματικό, η παραπάνω μέθοδος ενδεχομένως να αφήνει αρκετούς φορείς μη-δεσμευμένους καθώς δίνεται πάντα η προτεραιότητα στα πρώτα κανάλια κάθε σταθμού βάσης. Το παραπάνω φαινόμενο οδήγησε στην εφαρμογή του

ψευδοτυχαίου αλγορίθμου (Εικόνα 4.4), με στόχο την αποφυγή των CCI παρεμβολών και τον πιο δίκαιο διαμοιρασμό των διαθέσιμων υποφορέων [41].



**Εικόνα 4.3:** Αναπαράσταση σειριακής ανάθεσης υποφορέων μέσω αλγορίθμου Round-Robin [41].

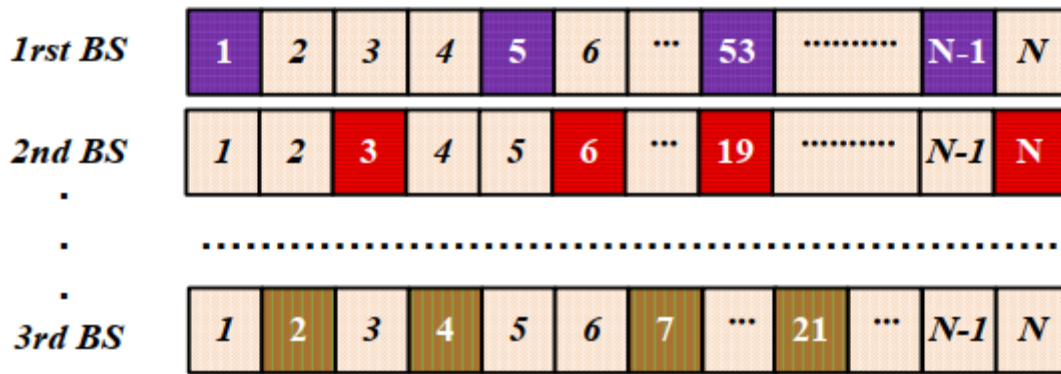
#### 4.2.2. Ψευδοτυχαίος Αλγόριθμος (Pseudo-Random Algorithm)

Με στόχο την αποσυσχέτιση των όμορων φορέων και την μετρίαση των παρεμβολών ISI και CCI επιλέγεται ο ψευδοτυχαίος αλγόριθμος. Σύμφωνα με αυτόν ο b-οστό σταθμός βάσης αναθέτει στον n-οστό κινητό τερματικό έστω  $U_n$  σετ φορέων, μέσα από το συνολικό αριθμό καναλιών, με τυχαία σειρά (Εξίσωση 4-4) [41]. Στη συνέχεια, οι δεσμευμένοι από τον κινητό τερματικό φορείς αφαιρούνται από το σύνολο διαθέσιμων καναλιών. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε δέσμευση φορέα από κινητό τερματικό, τηρώντας τις παρακάτω συνθήκες [36].:

$$U_n \leftarrow \text{randsample}(S_n, C_b)$$

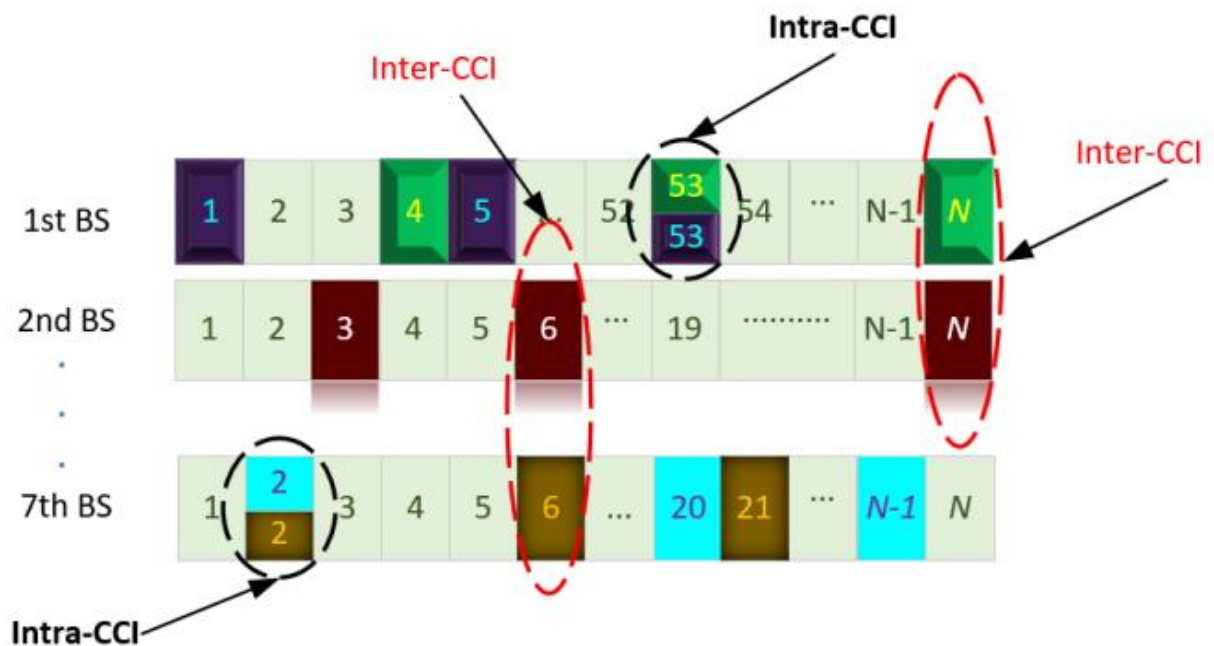
$$C_b \leftarrow C_b \setminus U_n$$

**Εξ. (4 – 4)**



**Εικόνα 4.4:** Αναπαράσταση ανάθεσης υποφορέων μέσω Pseudo-random αλγορίθμου [41].

Παρακάτω, (Εικόνα 4.5) παρατηρείται ένα παράδειγμα εφαρμογής του παραπάνω αλγορίθμου καθώς και των περιπτώσεων ομοδιαυλικότητας ανάμεσα σε τερματικούς που ανήκουν τόσο στον ίδιο σταθμό βάσης όσο και σε διαφορετικό.



**Εικόνα 4.5:** Ομοδιαυλικότητα κατά την ανάθεση φερόντων μέσω Ψευδοτυχαίου αλγορίθμου [36].

- Ο πρώτος τερματικός (MT) στον πρώτο σταθμό βάσης (BS) έχει λάβει τους φορείς 1, 5, και 53. Ο δεύτερος MT που ανήκει στον ίδιο σταθμό βάσης έχει λάβει και αυτός με τυχαίο τρόπο τους φορείς 4, 53, και  $N$ .

Επομένως, ο φορέας 53 έχει δεσμευτεί δύο φορές στην ίδια κυψέλη εφόσον θεωρούμε FD-NOMA πρότυπο διαμοιρασμού.

- Ο πρώτος τερματικός στον δεύτερο σταθμό βάσης έχει λάβει τυχαία τους φορείς 3, 6 και N.
- Ο πρώτος τερματικός στον έβδομο σταθμό βάσης έχει λάβει τυχαία τους φορείς 2, 6 και 21, ενώ ο δεύτερος τερματικός του ίδιου σταθμού βάσης έχει λάβει τους υποφορείς 2, 20 και N-1. Ξανά, λόγω της FD-NOMA μεθόδου ο φορέας 2 έχει ενεργοποιηθεί διπλά.

Συνεπώς, για τους τερματικούς στον πρώτο και στον έβδομο σταθμό βάσης υπάρχει ομοδιαυλικότητα και μάλιστα στην ίδια κυψέλη, στους υποφορείς 53 και 2 αντίστοιχα (Intra-CCI). Παράλληλα, ο δεύτερος τερματικός στον πρώτο σταθμό βάσης και ο πρώτος τερματικός στον έβδομο σταθμό βάσης παρουσιάζουν ομοδιαυλικότητα αλλά σε διαφορετική κυψέλη (Inter-CCI), λόγω της τυχαίας ανάθεσης των υποφορέων N και 6 αντίστοιχα [36]. Στο επίπεδο συχνότητας η μελέτη εξετάζει περιπτώσεις μόνο Inter-CCI όμως στον τομέα της ισχύος υπάρχει μη ορθογωνικός διαμοιρασμός.

### 4.3. Εκτίμηση Ισχύος

Κατά την εκτίμηση της ισχύος ανά s-οστού υποφορέα του n-οστού χρήστη λαμβάνονται υπόψιν περιπτώσεις ομοδιαυλικότητας τόσο σε ξεχωριστές όσο και σε ίδιες κυψέλες (**Εξίσωση 4-5**) [36]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο αλγόριθμος αφορά στην Non-Orthogonal κατανομή ισχύος ως προς τους φορείς και χρήστες αντίστοιχα. Έτσι, αν υπάρχει ένα πλήθος τερματικών που εκπέμπουν στον ίδιο υποφορέα, για δεδομένο σηματοθορυβικό λόγο SNIR, η ισχύς μετάδοσης στον υποφορέα για κάθε τερματικό υπολογίζεται κατόπιν επίλυσης γραμμικού συστήματος και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [36]:



$$\begin{aligned}
 & SINR_{n,s} \\
 &= \frac{\frac{p_{n,s}}{TL_{n,k}}}{\sum_{k \neq n, s \in S, k \notin BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{k,s}}{TL_{n,sec(k)}}} + \sum_{l \neq n, s \in S_n, l \in BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{l,s}}{TL_{n,sec(l)}}} + I_{noise}} \\
 \Rightarrow \frac{p_{n,s}}{TL_{n,sec(n)}} &= SINR_{n,s} \left( \sum_{k \neq n, s \in S, k \notin BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{k,s}}{TL_{n,sec(k)}}} + \right. \\
 & \quad \left. \sum_{l \neq n, s \in S_n, l \in BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{l,s}}{TL_{n,sec(l)}}} + I_{noise} \right) \rightarrow \\
 p_{n,s} &= SINR_{n,s} TL_{n,sec(n)} \left( \sum_{k \neq n, s \in S, k \notin BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{k,s}}{TL_{n,sec(k)}}} \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{l \neq n, s \in S_n, l \in BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{l,s}}{TL_{n,sec(l)}}} + I_{noise} \right) \xrightarrow{SINR_{n,s} = \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{n,s}} \\
 p_{n,s} &= \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{n,s} TL_{n,sec(n)} \left( \sum_{k \neq n, s \in S, k \notin BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{k,s}}{TL_{n,sec(k)}}} + \right. \\
 & \quad \left. \sum_{l \neq n, s \in S_n, l \in BS(n)}^N \sqrt{\frac{p_{l,s}}{TL_{n,sec(l)}}} + I_{noise} \right) \quad \mathbf{E\xi. (4 - 5)}
 \end{aligned}$$

Εδώ και πάλι οι όροι  $\Pi_{n, sec(k)}$  και  $\Pi_{n, sec(l)}$  είναι οι συνολικές απώλειες στον n-στό τερματικό σταθμό αναφερόμενοι στους τομείς k και l του τερματικού αυτού, και οι όροι  $p_{n,s}$ ,  $p_{k,s}$ ,  $p_{l,s}$  αναφέρονται στην κατανομημένη ισχύ στον s-στό φορέα του n-οστού, k-οστού, l-οστού τερματικού σταθμού αντίστοιχα.

Στο ίδιο βήμα, γίνεται έλεγχος ισχύος ανά χρήστη (**Εξίσωση 4-6**) [36]. Εν προκειμένω, υπάρχουν δύο περιπτώσεις. Αν εντοπιστούν ισχείς ανά ΜΤ που ξεπερνούν μια προκαθορισμένη τιμή, τότε τα αντίστοιχα τερματικά αφαιρούνται, στη συνέχεια ορίζεται νέο γραμμικό σύστημα εξισώσεων για την εκτίμηση των ισχύων ανά φορέα και πραγματοποιείται ξανά ο εν λόγω έλεγχος ισχύος. Η διαδικασία ελέγχου συνεχίζεται έως ώτου το άθροισμα ισχύων των υποφορέων κάθε χρήστη παραμένει εντός του επιτρεπτού ορίου (1 Watt) [41].

Στην άλλη περίπτωση, αν εντοπιστεί τερματικό στον οποίο έχουν ανατεθεί φορείς και κάποιοι παρουσιάζουν αρνητικές ισχείς, το εν λόγω τερματικό αφαιρείται άμεσα και συνεχίζεται η προσπάθεια εισαγωγής νέου

τερματικού. Με κάθε αφαίρεση τερματικού γίνεται ανανέωση των παραμέτρων αποκλεισμού του συστήματος. Μόλις η πιθανότητα αποκλεισμού ξεπεράσει την προκαθορισμένη τιμή, κάθε νέο αίτημα πρόσβασης απορρίπτεται [41].

$$\sum_{n=1, n \in b}^N \sum_{s \in S_n} p_{n,s} \leq P_{B_{max}}, 1 \leq b \leq B, 1 \leq n \leq N$$

$$\sum_{s \in S_n} p_{n,s} \leq P_{MTmax}, 1 \leq n \leq N \quad \mathbf{Eξ. (4 - 6)}$$

Μία MC προσομοίωση τερματίζεται όταν η τιμή συνθήκης αποκλεισμού φτάσει ή ξεπεράσει μία προκαθορισμένη μέγιστη τιμή (Max Blocking Probability,  $PF_{max}$ ), ή στην περίπτωση μη ύπαρξης διαθέσιμων φορέων έστω και σε έναν σταθμό βάσης BS [36].



## 5. Σχολιασμός και Ανάλυση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύεται η επίδοση του πολυκυκλωτού συστήματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες ως προς τον αριθμό φερόντων, την τιμή σηματοθορυβικού λόγου (SNIR), και την συνθήκη αποκλεισμού PF. Το σύστημα μελετήθηκε μέσω προσομοιώσεων MC σταθερού αριθμού για κάθε σενάριο. Στόχος του κεφαλαίου είναι η σύγκριση των δύο τεχνικών ανάθεσης που περιγράφονται στο *Υποκεφάλαιο 4.2* βάση τριών κύριων παραμέτρων :

- Την χωρητικότητα (αριθμό αποδεκτών κινητών τερματικών σταθμών).
- Την συνολική ισχύ εκπομπής.
- Την μέση ισχύ εκπομπής ανά κινητό τερματικό.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως γραφήματα, μέσα από τα οποία αξιολογούμε την συμπεριφορά του συστήματος και συγκρίνουμε τις δύο τεχνικές ανάθεσης, Random (Pseudo-Random Algorithm) και Sequential (Round-Robin algorithm). Σε πρώτο στάδιο ορίζονται οι σταθερές παράμετροι του συστήματος (**Πίνακας 5.1**)

<b>Παράμετροι</b>	<b>Τιμή</b>
Αριθμός υποφερόντων ανά σταθμό βάσης	128
Κεντρική συχνότητα λειτουργίας	2 GHz
Ύψος σταθμού βάσης / κινητού τερματικού	25m / 1.5m
Κέρδος κεραίας σταθμού βάσης / κινητού τερματικού	14 dBi / 0 dBi
Μοντέλο διάδοσης	Okumura-Hata
Μέγιστες απώλειες διαδρομής (path loss)	133.4 dB
Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής ανά κινητό τερματικό	1 watt
Τυπική απόκλιση σκίασης	8 dB
Ακτίνα κυψέλης	1 km
Επίπεδο θερμικού θορύβου	-104 dB
Πλήθος Monte Carlo προσομοιώσεων	1000

**Πίνακας 5.1 :** Σταθεροί παράμετροι του συστήματος προς προσομοίωση.

Η πρώτη ομάδα προσομοιώσεων έχει τις εξείς παραμέτρους (**Πίνακας 5.2**):

Παράμετροι	Τιμή
Επίπεδο κυψελών περιφερειακά της κεντρικής κυψέλης (αριθμός tiers)	1
SNIR	9.6 dB , 5 dB
Αριθμός υποφερόντων ανά κινητό τερματικό	1,2,3,4,5
Πιθανότητα αποκλεισμού (PF)	10%, 20%, 30%

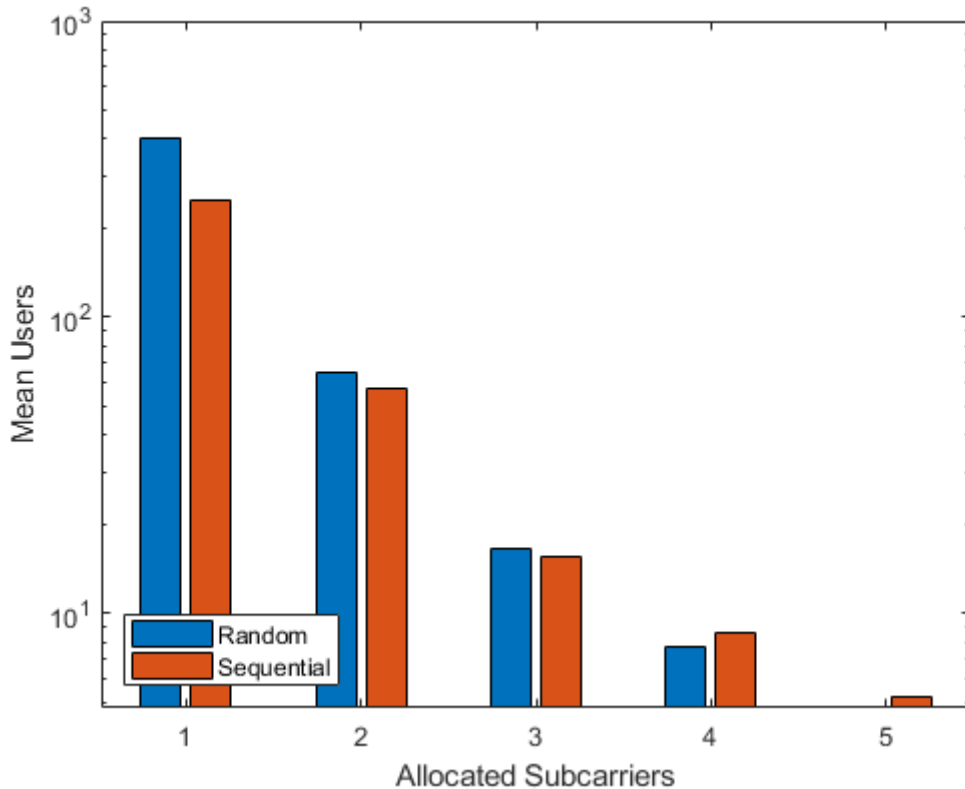
**Πίνακας 5.2:** Παράμετροι πρώτης ομάδας προσομοιώσεων.

Στα γραφήματα παρατηρούνται πέντε ομάδες στηλών με την κάθε μία να αντιστοιχεί σε διαφορετικό αριθμό φορέων ανά κινητό τερματικό (1 έως 5). Οι κατηγορίες στηλών ανά ομάδα είναι δύο, μία για την τεχνική Random και μία για την τεχνική Sequential. Πρώτο βήμα είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό πιθανότητα αποκλεισμού (PF) 10% και SNIR στα 9.6 dB.

Η τεχνική Random υπερτερεί όσον αφορά την χωρητικότητα έναντι της τεχνικής Sequential. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς κατά την σειριακή ανάθεση οι ομοδιαυλικές παρεμβολές είναι πολύ πιο έντονες. Οι παρεμβολές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι οι χρήστες δεσμεύουν τους ίδιους φορείς σε κάθε σταθμό βάσης. Για παράδειγμα, δύο χρήστες όντας οι πρώτοι που εισάγονται σε δύο διαφορετικούς σταθμούς, θα απασχολήσουν τους ίδιους υποφορείς αντίστοιχα. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται για κάθε δεκτό χρήστη. Αντιθέτως, η τυχαιότητα του ψευδοτυχαίου αλγόριθμου, δεν οδηγεί σε βέβαιη ομοδιαυλικότητα και κατ'επέκταση δεν υπερφορτώνει το σύστημα κατά την εκτίμηση ισχύος.

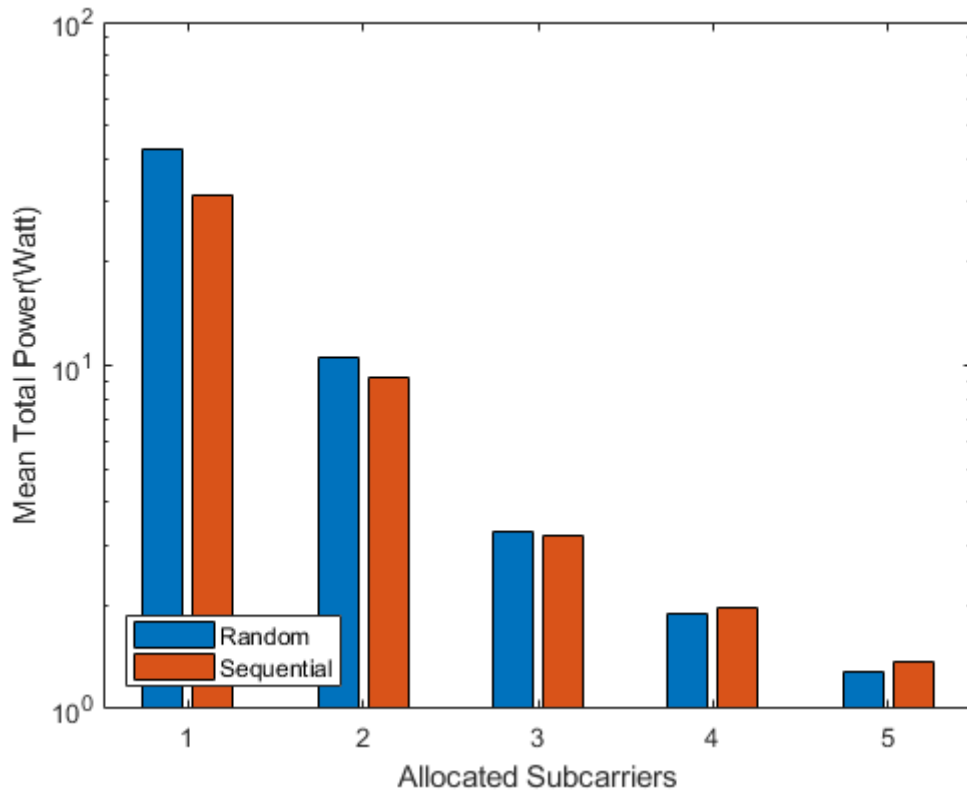
Από την **Εικόνα 5.1** φαίνεται ότι και στις δύο τεχνικές, με την αύξηση των υποφορεών η χωρητικότητα του συστήματος μειώνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή για παραπάνω φορείς ανά χρήστη αυξάνονται οι ομοδιαυλικές παρεμβολές με αποτέλεσμα ο έλεγχος ισχύος να οδηγεί σε περισσότερες απορρίψεις. Απ'την άλλη, παρατηρείται μεγάλος αριθμός χρηστών για έναν φορέα ανά τερματικό σταθμό γιατί το όριο της ισχύος είναι δύσκολο να ξεπεραστεί με ένα μόνο κανάλι. Ως αποτέλεσμα, η απόρριψη από το σύστημα βασίζεται σχεδόν εξ'ολοκλήρου από την έλλειψη διαθέσιμων φορέων. Γι'αυτό

και για έναν φορέα ανά χρήστη είναι και πιο ξεκάθαρη η διαφορά των δύο τεχνικών στο πεδίο των ομοδιαυλικών παρεμβολών. Βέβαια, κατά την αύξηση των φορέων οι δύο μέθοδοι δεν παρουσιάζουν αισθητές διαφορές ενώ σε κάποιες περιπτώσεις τείνουν να συγκλίνουν. Αυτό δείχνει ότι για πολλά διαθέσιμα κανάλια οι ομοδιαυλικές παρεμβολές είναι παρόμοιας έντασης και στις δύο τεχνικές, εξομαλύνοντας τις διαφορές που έχουν ως προς την μέση χωρητικότητα.



**Εικόνα 5.1** : Μέση χωρητικότητα για 9.6 SNIR, 1 tier, 10% PF.

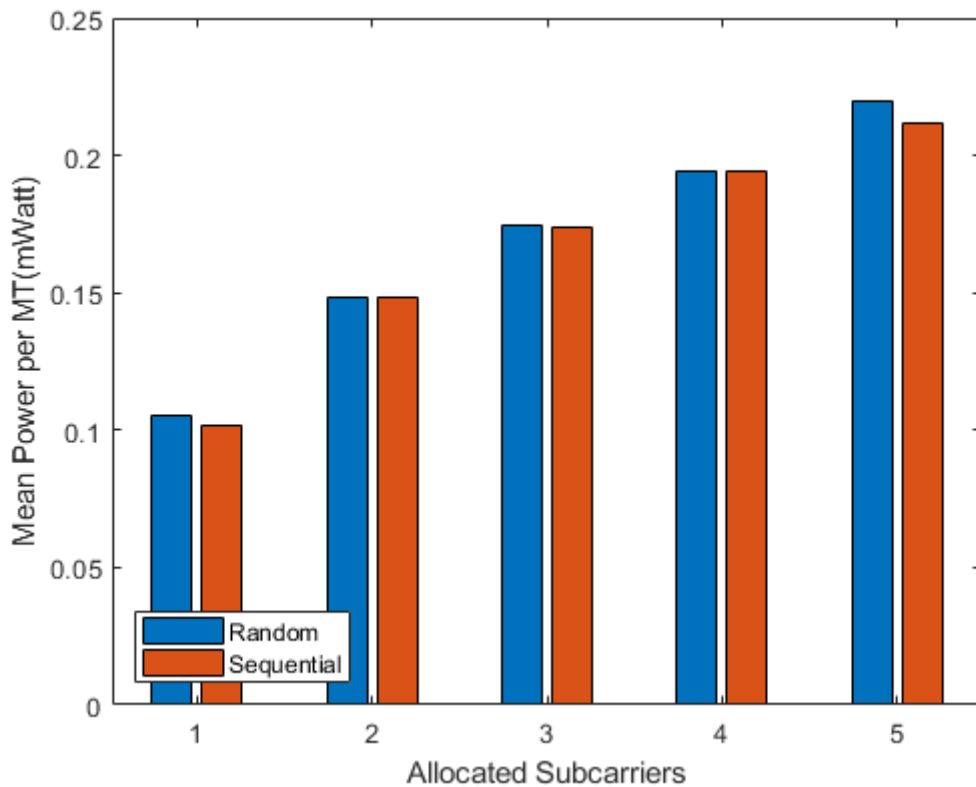
Στη συνέχεια αναλύεται η συνολική ισχύς εκπομπής για κάθε αριθμό διαθέσιμων υποφορέων (**Εικόνα 5.2**). Παρατηρείται ότι η συνολική ισχύς έχει ανάλογη συμπεριφορά με την χωρητικότητα του συστήματος. Αυτό είναι λογικό καθώς περισσότεροι χρήστες ισοδυναμούν και σε μεγαλύτερη ανάγκη ισχύος. Ως αποτέλεσμα ο ψευδοτυχαίος αλγόριθμος παρουσιάζει μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος έναντι της σειριακής ανάθεσης. Όπως και η χωρητικότητα έτσι και η συνολική ισχύς για μεγαλύτερο αριθμό φορέων τείνει να είναι ίδια για τις δύο μεθόδους, ενώ για 4 και 5 υποφορείς όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, η Sequential μέθοδος ενδέχεται να ξεπερνάει σε επίπεδα ισχύος την Random.



**Εικόνα 5.2 :** Μέση συνολική ισχύς εκπομπής για 1 tier, 10% PF, 9.6 SNIR.

Όσον αφορά την μέση ισχύ εκπομπής ανά χρήστη, δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις δύο τεχνικές ανάθεσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εκτίμηση ισχύος χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο και για τα δύο σενάρια ανάθεσης καναλιών. Βέβαια καθώς αυξάνονται οι διαθέσιμοι φορείς ανά χρήστη η μέση ισχύς αυξάνεται (**Εικόνα 5.3**). Αυτό είναι λογικό αφού η παρουσία περισσότερων φορέων ανά χρήστη αυξάνει τις ομοδιαυλικές παρεμβολές, οδηγώντας σε αύξηση της ισχύος. Ακόμη, η συνολική ισχύς για κάθε χρήστη προκύπτει αθροίζοντας την ισχύ ανά φορέα, συνεπώς είναι αναμενόμενο ότι για περισσότερους φορείς που απασχολεί ο κάθε χρήστης να υπάρχει και αύξηση της ισχύος.





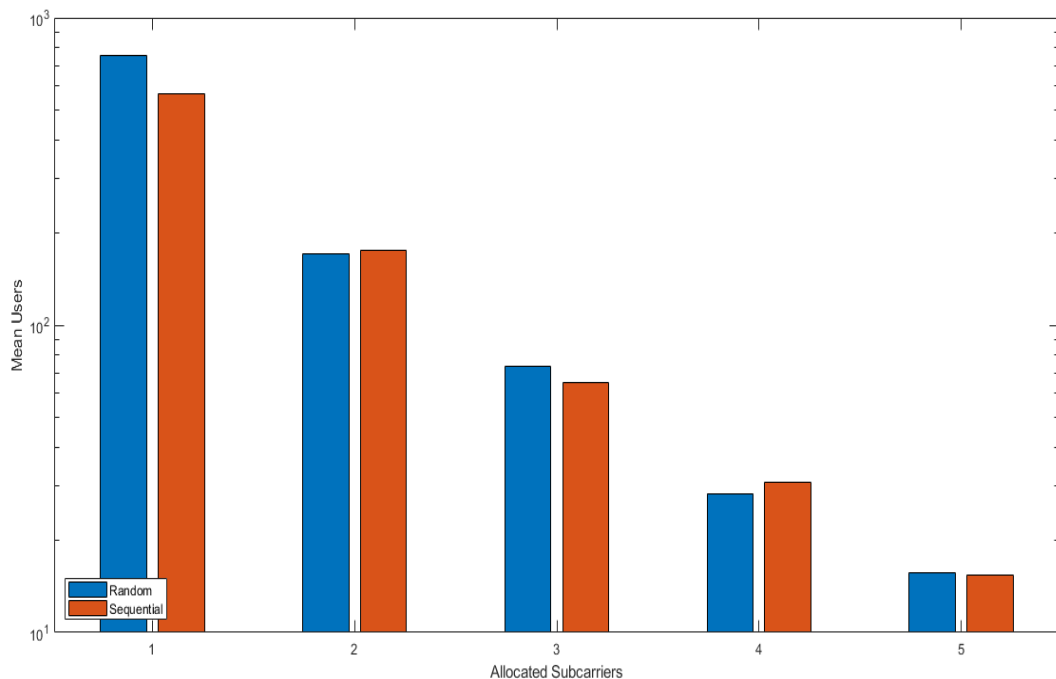
**Εικόνα 5.3 :** Μέση ισχύς εκπομπής ανά κινητό τερματικό για 9.6 SNIR, 1 tier, 10% PF.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η επιρροή που έχει στο σύστημα η συνθήκη αποκλεισμού PF. Σε γενικές γραμμές η τιμή 10% για PF θεωρείται ρεαλιστική και επιθυμητή τιμή. Μία χαμηλή τιμή για PF δεν επιτρέπει πολλές απορρίψεις κατά την αίτηση πρόσβασης θέτοντας έτσι τις βάσεις για υψηλή αποδοτικότητα και ποιότητα κατά την λειτουργία του συστήματος. Παρόλ'αυτά, η προσομοίωση Monte Carlo για PF 10% τερματίζεται γρήγορα με αποτέλεσμα να μην δοκιμάζεται πλήρως η συμπεριφορά του δικτύου. Συνεπώς, στα παρακάτω γραφήματα έχουν τεθεί τιμές 20% και 30% για PF, με στόχο την αναλυτικότερη παρατήρηση των παραμέτρων ενδιαφέροντος.

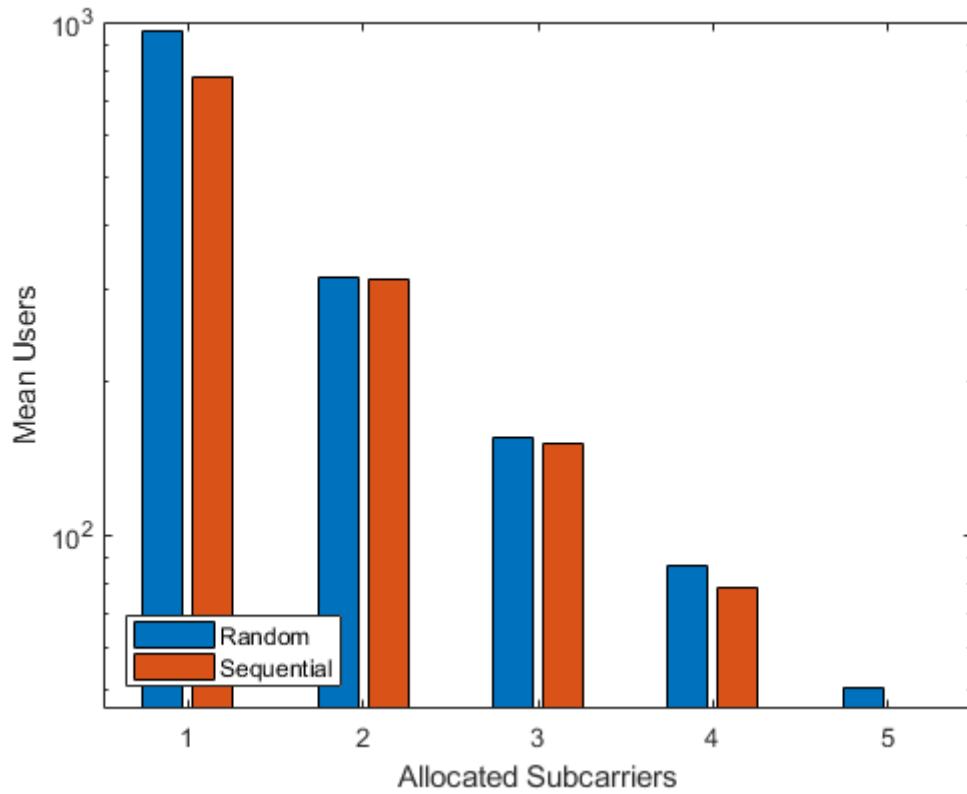
Όπως φαίνεται απο τις **Εικόνες 5.4 και 5.5**, η χωρητικότητα του συστήματος παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά όταν συγκρίνονται οι δύο μέθοδοι ανάθεσης φορέων. Η Random τεχνική υπερτερεί και πάλι της Sequential, κυρίως για μικρό αριθμό υποφορέων ανά χρήστη. Καθώς αυξάνονται οι φορείς, οι δύο τεχνικές δεν διαφέρουν αισθητά ως προς την χωρητικότητα. Συγκρίνοντας όμως τις **Εικόνες 5.4 και 5.5** με την **Εικόνα 5.1**, είναι εμφανές ότι πλέον η χωρητικότητα αυξάνεται αναλόγως με την αύξηση

της PF. Αυτό είναι λογικό, αφού με μεγαλύτερη PF, το δίκτυο επιτρέπει περισσότερες απορρίψεις προτού λήξει την προσομοίωση. Η παραπάνω σύγκριση γίνεται ξεκάθαρα στην **Εικόνα 5.6**.

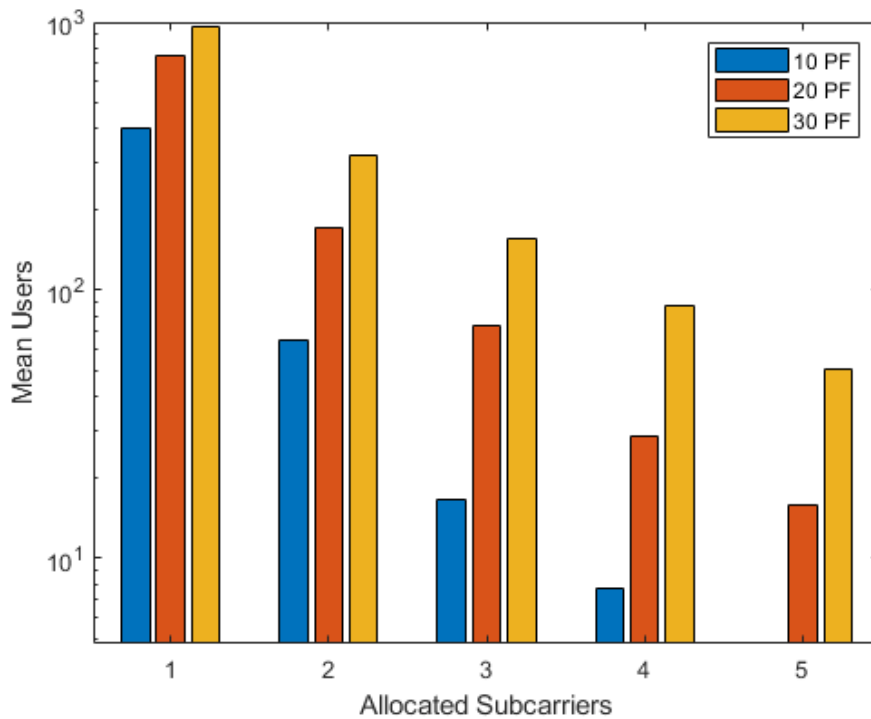
Με άλλα λόγια ο τερματισμός των προσομοιώσεων με PF 20% και 30% δεν επέρχεται τόσο γρήγορα όσο στην προηγούμενη κατάσταση με PF 10%, με αποτέλεσμα το δίκτυο να εξυπηρετεί παραπάνω χρήστες κατά την λειτουργία του. Αναμενόμενη είναι επίσης η υπεροχή του σεναρίου με PF 30% έναντι αυτού με PF 20% ακριβώς για τους παραπάνω λόγους.



**Εικόνα 5.4:** Μέση χωρητικότητα, για 1 tier, 20% PF, 9.6 SNIR.

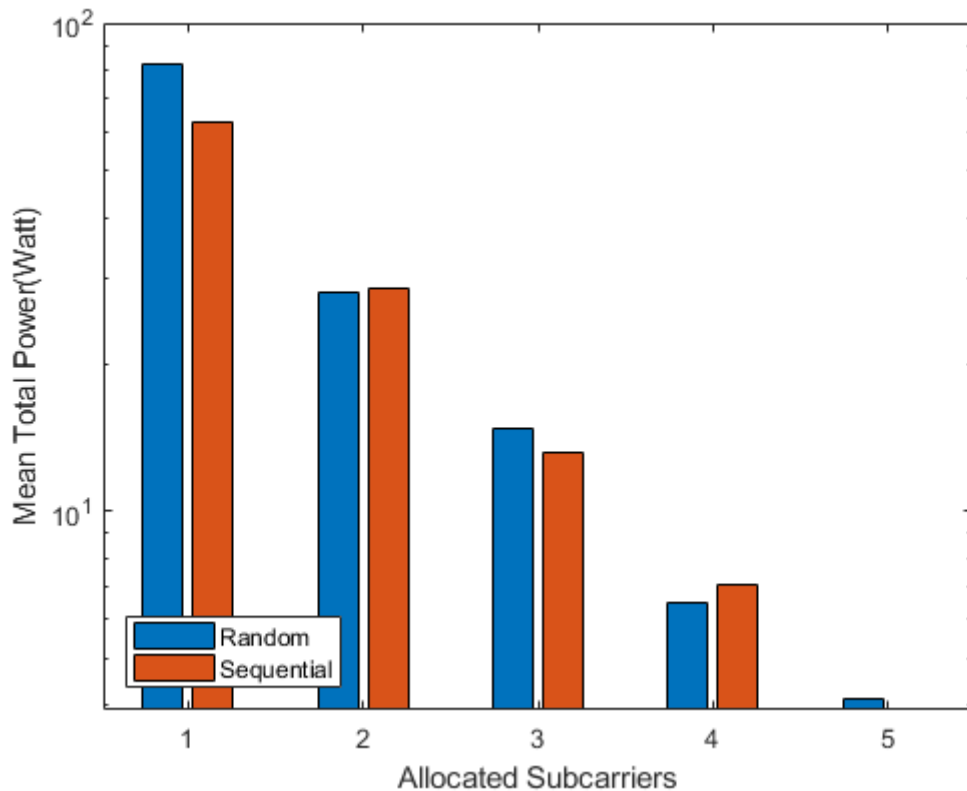


**Εικόνα 5.5:** Μέση χωρητικότητα, για 1 tier, 30% PF, 9.6 SNIR.

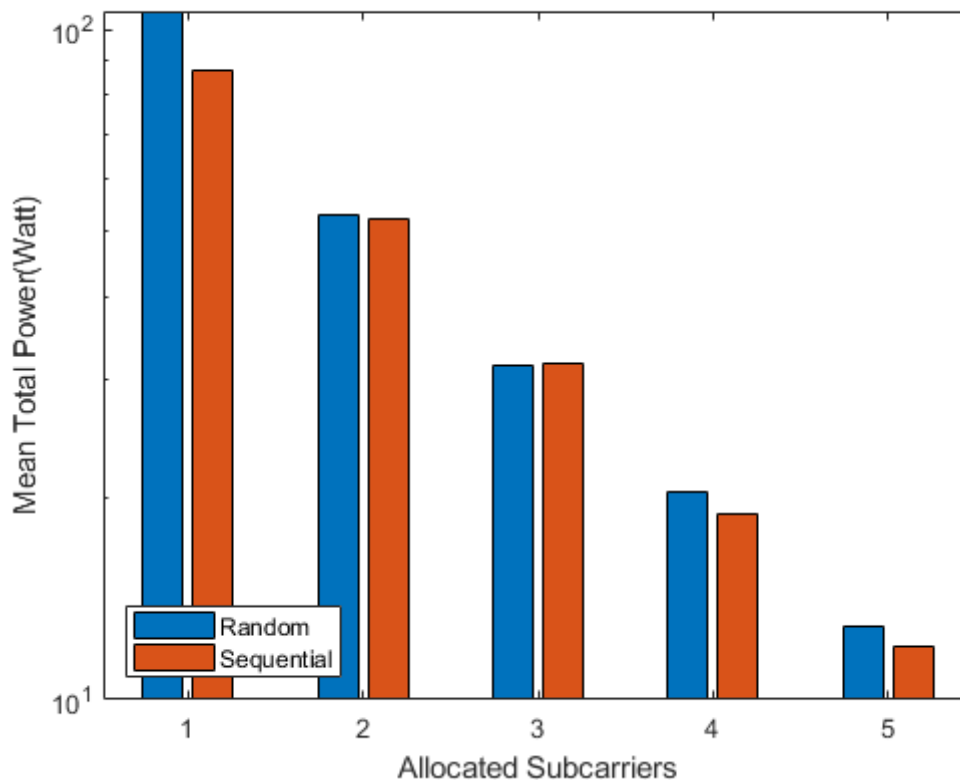


**Εικόνα 5.6:** Μέση χωρητικότητα ανά PF, για Random ανάθεση στα 9.6 SNIR

Όπως εξηγήθηκε και στη περίπτωση για 10% PF η συνολική ισχύς εκπομπής του συστήματος είναι ανάλογη της χωρητικότητας για κάθε πιθανό σενάριο. Συνεπώς, και πάλι η μέθοδος Random εφόσον έχει τους περισσότερους χρήστες παρουσιάζει και μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος, συγκεκριμένα στις **Εικόνες 5.7 και 5.8**. Όπως και για την χωρητικότητα, η αύξηση της πιθανότητας αποκλεισμού επιβαρύνει το σύστημα και στο τομέα της ισχύος. Γι' αυτό και για 20% και 30% PF η συνολική ισχύς είναι συγκριτικά υψηλότερη.

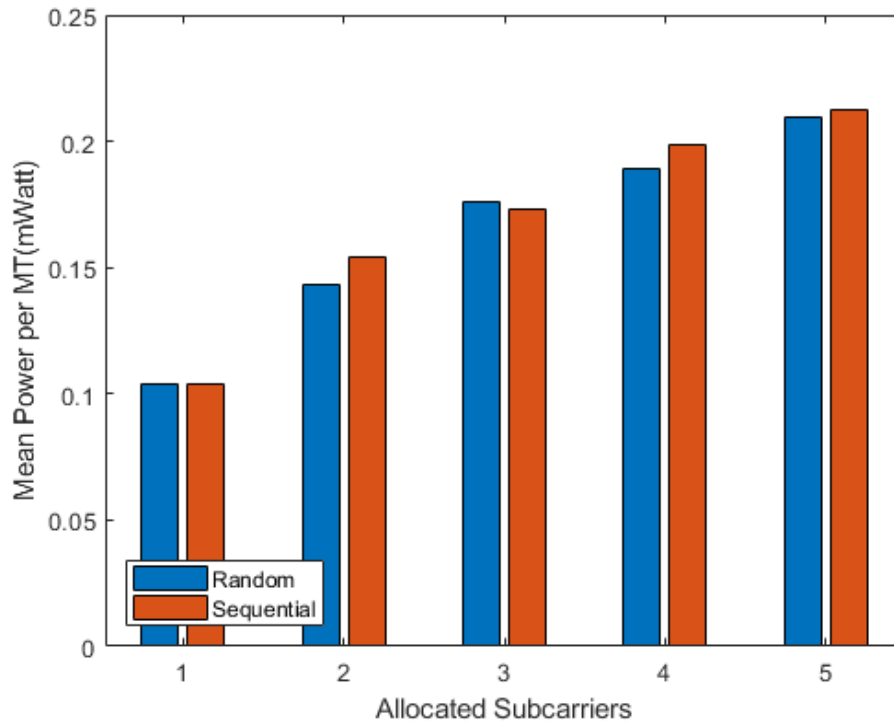


**Εικόνα 5.7 :** Μέση συνολική ισχύς για 1 tier, 20%PF, 9.6 SNR

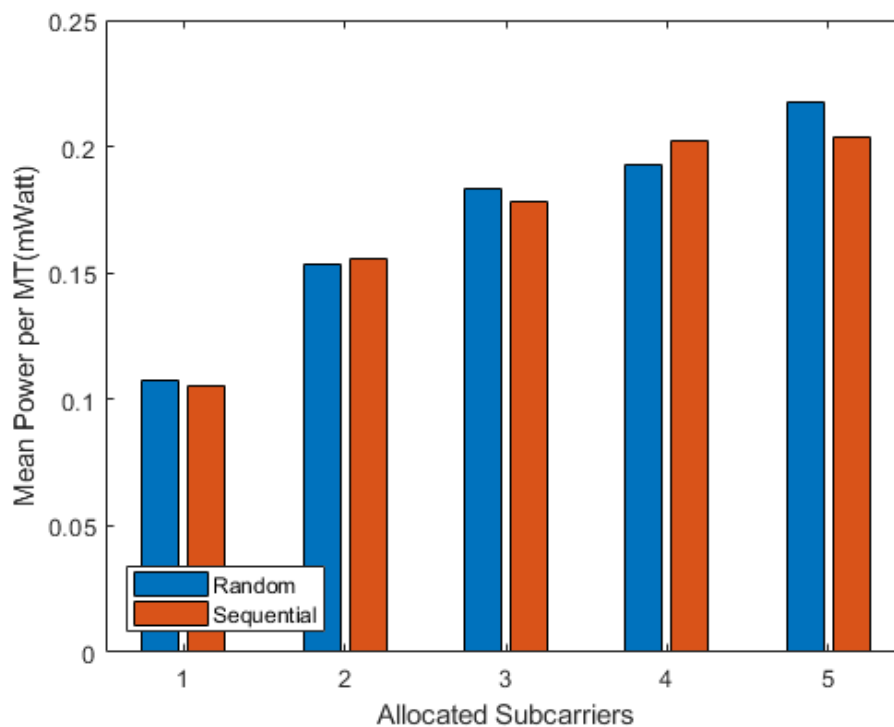


**Εικόνα 5.8 :** Μέση συνολική ισχύς για 1 tier, 30%PF, 9.6 SNR

Παρατηρώντας την επίδραση της PF στην μέση ισχύ εκπομπής για κάθε χρήστη (Εικόνα 5.9, Εικόνα 5.10) αποδεικνύεται ότι δεν προκαλούνται αισθητές αλλαγές. Αυτό οφείλεται στο ότι ο υπολογισμός ισχύος ακολουθεί ίδιο μοντέλο σε όλα τα σενάρια. Η PF καθορίζει πόσες απορρίψεις μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα προτού τερματιστεί η πρόσβαση σε αυτό. Δεν καθορίζει τα επίπεδα ισχύος που καταναλώνει ο κάθε χρήστης. Συνεπώς, η μέση ισχύς ανά χρήστη έχει ίδια χαρακτηριστικά για όλες τις PF. Κύριο σημείο εδώ είναι και πάλι ότι μεγάλος αριθμός φορέων ανά χρήστη οδηγεί σε περισσότερες ομοδιαυλικές παρεμβολές αρά και σε μεγαλύτερη ισχύ ανά τερματικό.



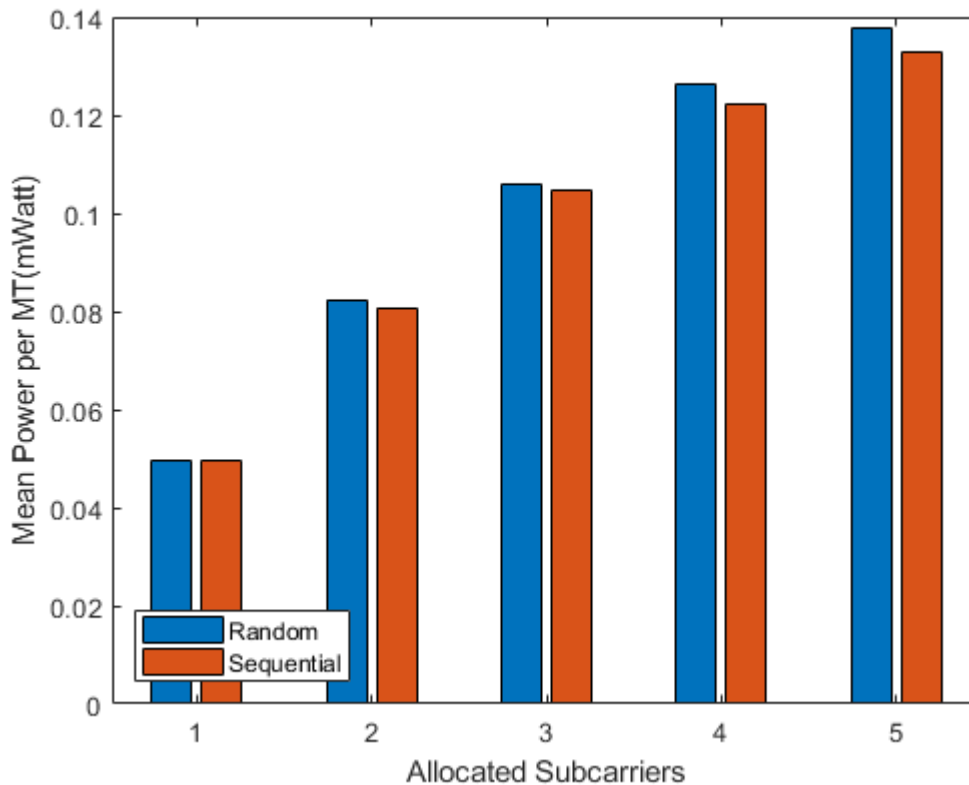
**Εικόνα 5.9 :** Μέση ισχύς ανά χρήστη για 1 tier, 9.6 SNIR, 20% PF



**Εικόνα 5.10:** Μέση ισχύς ανά χρήστη για 1 tier, 9.6 SNIR, 30% PF

Επόμενο βήμα είναι η σύγκριση των παραμέτρων ενδιαφέροντος για διαφορετική τιμή SNIR. Κρατάμε σε αυτό το σημείο την PF ως 10%. Παρατηρώντας την **Εξίσωση 4-5**, φανερώνεται η εξάρτηση της ισχύος ανά χρήστη στα αντίστοιχα του υποφέροντα. Συγκεκριμένα η συνολική ισχύς για ένα χρήστη σε όλα τα κανάλια που δεσμεύει είναι ανάλογη του σηματοθορυβικού λόγου. Συνεπώς για μεγαλύτερο SNIR παρατηρείται και μεγαλύτερη ισχύς ανά χρήστη.

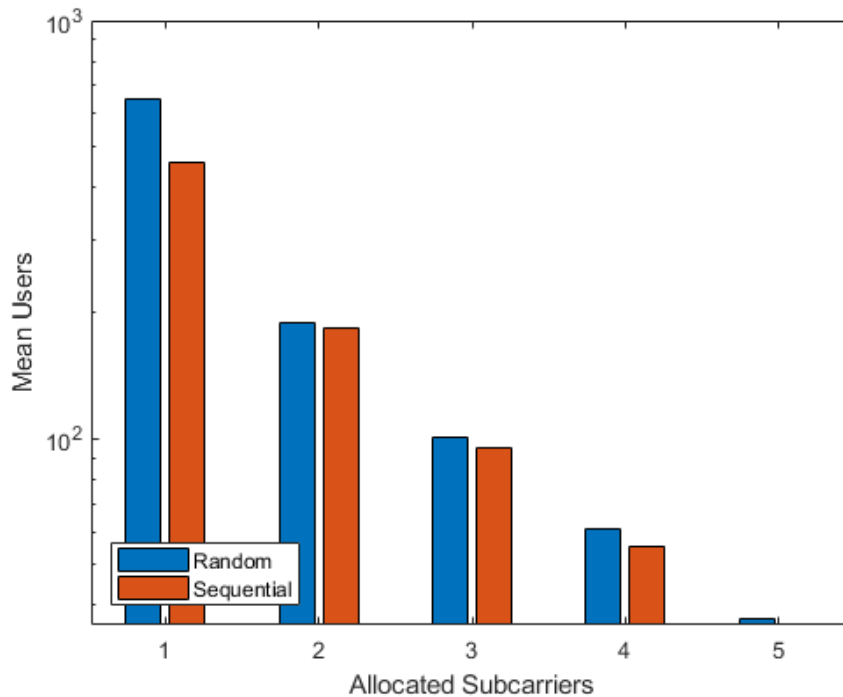
Η ισχύς εκπομπής είναι ίσως η κυριότερη παράμετρος καθώς επηρεάζει μέσω του ελέγχου ισχύος την χωρητικότητα και όπως είναι προφανές και την συχολική ισχύ εκπομπής του συστήματος. Επομένως, περιμένουμε για μικρότερο SNIR μικρότερη ισχύ ανά χρήστη. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύεται από την **Εικόνα 5.11**. Τα επίπεδα ισχύος ανά χρήστη είναι χαμηλότερα συγκριτικά με την ισχύ για 9.6 SNIR.



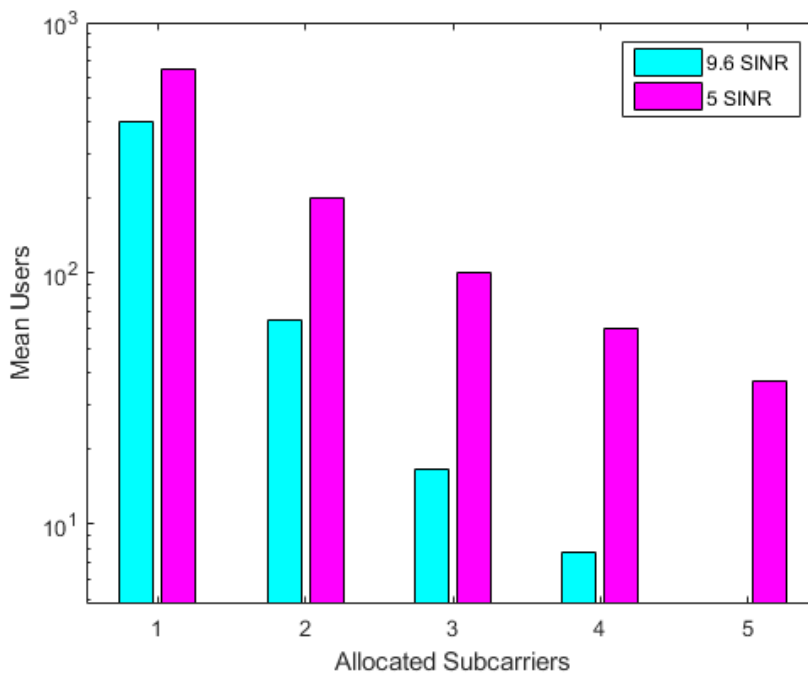
**Εικόνα 5.11** : Μέση ισχύς εκπομπής ανά χρήστη για 10% PF, 1 tier, 5 SNR

Με χαμηλότερη ισχύ ανά χρήστη αναμένεται να είναι λιγότερο πιθανή η υπέρβαση του ορίου ισχύος, που είναι σταθερό στα 1 watt για όλα τα σενάρια. Αυτό σημαίνει ότι για 5 SNIR ενδέχεται να εισέλθουν περισσότεροι χρήστες αφού τα επίπεδα ισχύος τους δεν ωθούν το σύστημα στο να τους απορρίψει. Ως

αποτέλεσμα όπως βλέπουμε στην **Εικόνα 5.12** ο αριθμός χρηστών για 5 SNIR (και 10% PF) είναι μεγαλύτερος από το αντίστοιχο σενάριο στα 9.6 SNIR (**Εικόνα 5.1**). Η παραπάνω σύγκριση γίνεται πιο εμφανής από την **Εικόνα 5.13** και **5.14**.

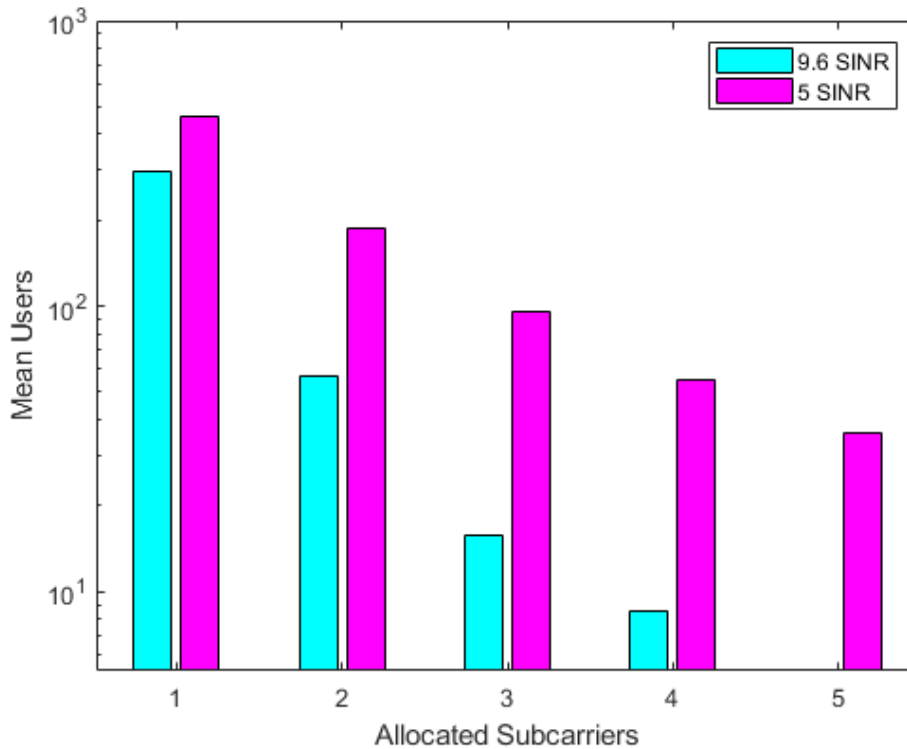


**Εικόνα 5.12:** Μέση χωρητικότητα, για 10% PF, 1 tier, 5 SNIR



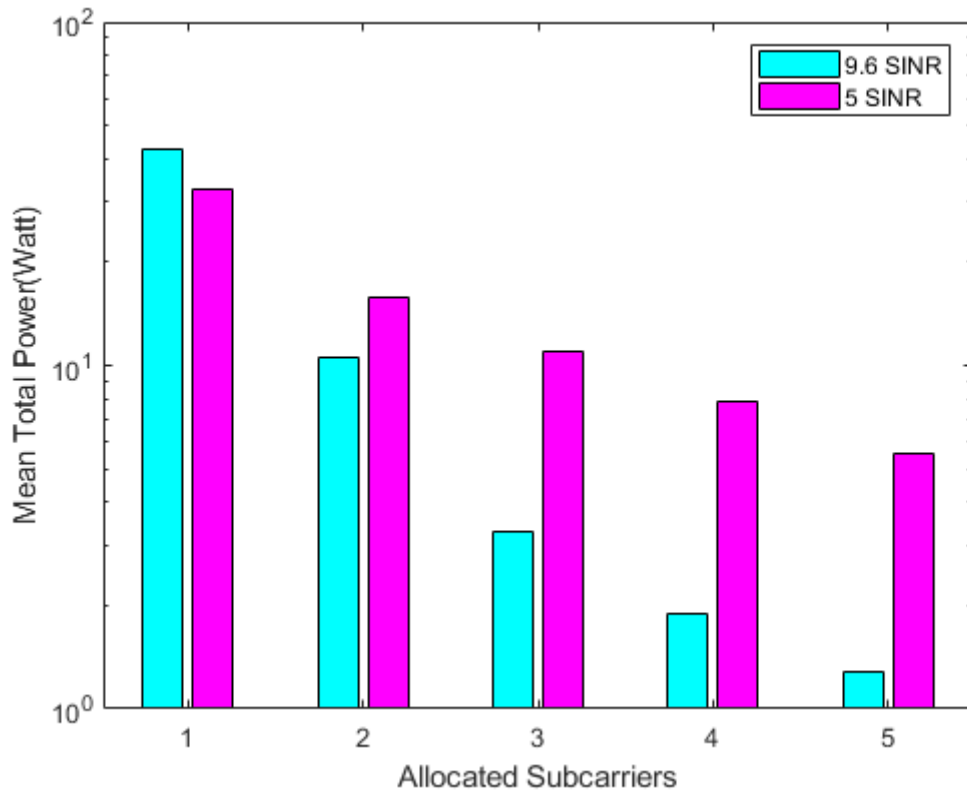
**Εικόνα 5.13:** Μέση χωρητικότητα για Random ανάθεση στα 5 και 9.6 SNIR, 10% PF.





**Εικόνα 5.14:** Μέση χωρητικότητα για Sequential, 10% PF, 1 tier, 9.6 και 5 SNIR

Στη συνέχεια, προχωρώντας στον σχολιασμό για την συνολική ισχύ για 5 SNIR πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η συμπεριφορά θα είναι ανάλογη με την χωρητικότητα. Οπότε αναμένονται για 5 SNIR μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος εκπομπής στο σύνολο, λόγω της μεγαλύτερης απασχόλησης του δικτύου (**Εικόνα 5.15**). Το παρακάτω γράφημα δείχνει επίσης ότι για έναν φορέα οι λόγοι SNIR δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Όμως, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των φορέων, οι ομοδιαυλικές παρεμβολές γίνονται πιο έντονες και για τις δύο περιπτώσεις. Οι παρεμβολές αυτές φαίνεται να επηρεάζουν πιο πολύ το δίκτυο για 9.6 SNIR κύριως γιατί όπως αναλύθηκε οι χρήστες έχουν μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής. Αντιθέτως, για 5 SNIR η ομοδιαυλικότητα μειώνει την χωρητικότητα και κατ'επέκταση την συνολική ισχύ εκπομπής με χαμηλότερο ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χαμηλότερες τιμές SNIR ισοδυναμούν σε μικρότερα επίπεδα ισχύος στο επίπεδο του χρήστη. Ως αποτέλεσμα, η υπέρβαση ισχύος αθροιστικά στους φορείς δεν είναι τόσο συχνή, οδηγώντας στην δέσμευση περισσότερων φορέων άρα και περισσότερων χρηστών προς εξυπηρέτηση κατά το τέλος μίας προσομοίωσης Monte Carlo.



**Εικόνα 5.15:** Μέση συνολική ισχύς για Random ανάθεση, 1 tier, 10%PF, 9.6 και 5 SNIR.

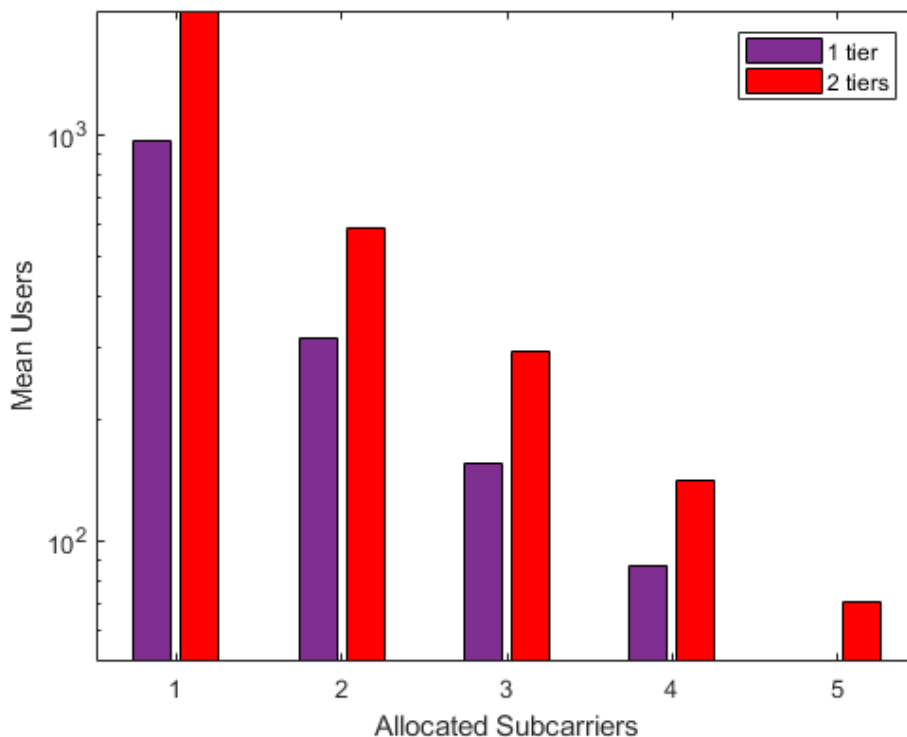
Στο δεύτερο στάδιο προσομοιώσεων αυξάνεται η εμβέλεια της τοπολογίας προχωρώντας από μία ομάδα κυψελών (1 tier) γύρω από την κεντρική κυψέλη σε δύο (2 tiers).

Παράμετροι	Τιμή
Επίπεδο κυψελών περιφερειακά της κεντρικής κυψέλης (αριθμός tiers)	2
SNIR	9.6 dB , 5 dB
Αριθμός υποφερόντων ανά κινητό τερματικό	1,2,3,4,5
Πιθανότητα αποκλεισμού (PF)	10% , 20% , 30%

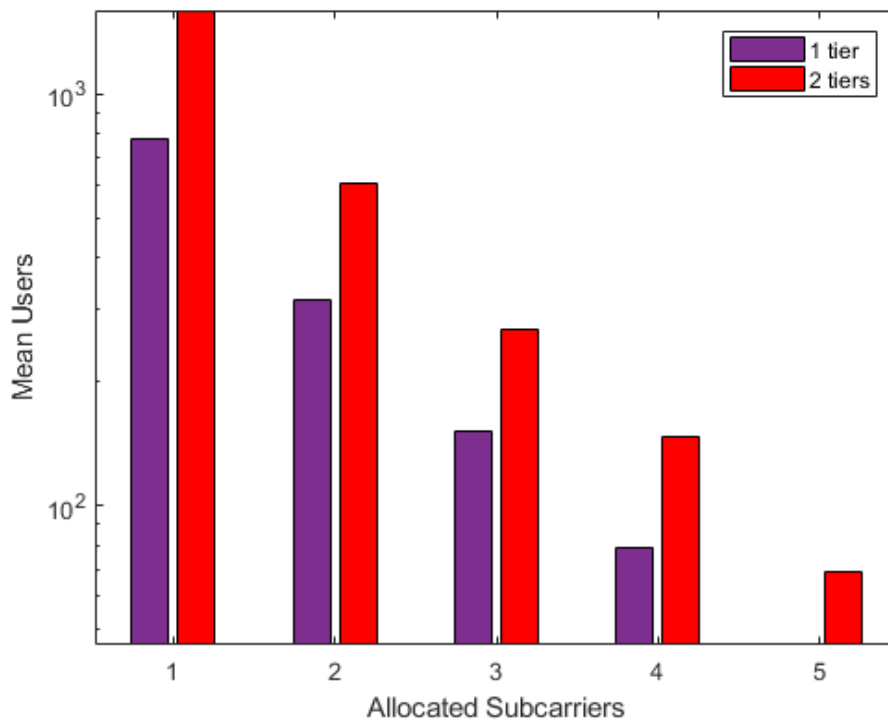
**Πίνακας 5.3:** Παράμετροι δεύτερης ομάδας προσομοιώσεων.

Η λογική λέει ότι με μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, θα προκύψει και μεγαλύτερη χωρητικότητα και για τις δύο μεθόδους. Αυτό επαληθεύεται όπως φαίνεται στις **Εικόνες 5.16, 5.17** . Παρατηρείται συγκεκριμένα μεγάλη αύξηση στο αριθμό αποδεκτών χρηστών. Η υπεροχή της τεχνικής Random δεν επηρεάζεται από την πρόσθεση ενός tier. Επομένως, και πάλι επιτρέπει την είσοδο περισσότερων χρηστών λόγω μειωμένων ομοδιαυλικών παρεμβολών συγκριτικά με την σειριακή ανάθεση φερόντων.

Λόγω των πολλών παραπάνω χρηστών αναμένεται και αύξηση της συνολικής ισχύος στο δίκτυο συγκριτικά με την ίδια τοπολογία του ενός επιπέδου (tier). Η σχέση μεταξύ Random και Sequential ανάθεσης καναλιών δεν αλλάζει με την πρόσθεση ενός παραπάνω tier. Αντιθέτως, η υπεροχή της τυχαίας ανάθεσης διατηρείται καθώς η άυξηση σε χωρητικότητα είναι το ίδιο έντονη και στις δύο τεχνικές. Συνεπώς, αναμένεται ίδια συμπεριφορά και σε τοπολογία δύο επιπέδων με την διαφορά ότι οι τιμές θα είναι αισθητά πιο υψηλές.



**Εικόνα 5.16** : Μέση χωρητικότητα ανά tier , για Random ανάθεση, 30%PF, 9.6 SNIR.



**Εικόνα 5.17 :** Μέση χωρητικότητα ανά tier , για Sequential ανάθεση, 30%PF, 9.6 SNIR.

Συνοψίζοντας, η τεχνική Random ανάθεσης υποφερόντων φαίνεται να δίνει πιο επιθυμητά αποτελέσματα. Η αποφυγή των ομοδιαυλικών παρεμβολών δεν υπερφορτώνει υπολογιστικά το σύστημα όσο η Sequential. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη χωρητικότητα, κυρίως για έναν φορέα ανά χρήστη. Για μεγαλύτερο αριθμό φορέων οι δύο τεχνικές παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, τόσο στην ισχύ όσο και στην χωρητικότητα.



## 6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Η παρούσα εργασία υλοποίησε ένα πολυκυψελωτό σύστημα πολλαπλής πρόσβασης, με στόχο την αξιολόγηση δύο τεχνικών ανάθεσης ορθογωνικών πόρων, την σειριακή (Sequential) με χρήση του αλγορίθμου Round-Robin και την τυχαία (Random) μέσω εφαρμογής ψευδοτυχαίου αλγορίθμου. Οι Random και Sequential συνδυαστήκανε με αλγόριθμο ανάθεσης μη-ορθογωνίων επιπέδων ισχύος ανά κανάλι ανά χρήστη με στόχο τον μετριασμό ομοδιαυλικών παρεμβολών. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προέκυψε ότι από τις δύο μεθόδους η Random υπερτερεί της Sequential. Ο ψευδοτυχαίος αλγόριθμος αντεπεξέρχεται καλύτερα στην αντιμετώπιση των ομοδιαυλικών παρεμβολών καθώς δεν υπερφορτώνει τους επιμέρους φορείς με πολλούς χρήστες. Για μεγαλύτερες τιμές αποκλεισμού και οι δύο μέθοδοι εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό χρηστών με το κόστος ότι θα υπάρχουν πιο πολλές απορρίψεις μειώνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου. Η επίδραση του SNIR στο σύστημα έδειξε ότι για υψηλότερες τιμές παρουσιάζονται μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος στο επίπεδο του κινητού τερματικού, επηρεάζοντας αρνητικά την χωρητικότητα και στις δύο τεχνικές. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι για μεγάλο αριθμό φορέων ανά χρήστη (3-5) οι δύο τεχνικές τείνουν να συγκλίνουν ως προς την επίδοση τους αποδεικνύοντας ότι η επιρροή έντονων ομοδιαυλικών παρεμβολών μπορεί να μετριάσει μία μέθοδο η οποία φαινομενικά υπερτερεί.

Κατά συνέπεια, αντικείμενο μελλοντικής μελέτης αποτελούν μέθοδοι εκτίμησης ισχύος οι οποίες δεν υποβαθμίζονται από την όμορη χρήση περισσότερων καναλιών. Περαιτέρω στόχος για μελλοντική εργασία είναι η εφαρμογή των παραπάνω τεχνικών σε ετερογενείς διατάξεις με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Η παρούσα εργασία επίσης, δεν προσομοιώνει μη-ορθογωνικές τεχνικές ως προς την συχνότητα, επομένως ο συνδυασμός της ετερογένειας δικτύων με την πρόσθεση ενός ακόμη επιπέδου μη-ορθογωνικού διαμοιρασμού πόρων θα μπορούσε να αποφέρει θετικά αποτελέσματα. Επίσης, βλέποντας πως για διαφορετικά δεδομένα πρόσβασης (SNIR, συνθήκη αποκλεισμού, αριθμός καναλιών ανά χρήστη) οι τεχνικές ανάθεσης καναλιών παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα, θα ήταν ιδανικό ένα δυναμικό σύστημα αποφάσεων που θα ξεπερνάει την ανάγκη για συνεχείς ελέγχους ισχύος και πρόσβασης. Η προσαρμογή αυτή θα μπορούσε να υλοποιηθεί μέσω συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης (AI), τα οποία συμβαδίζουν με την φιλοσοφία της γενιάς 6G.



## **Βιβλιογραφία**

- [1] Anton A. Huurdeman THE WORLDWIDE HISTORY OF TELECOMMUNICATIONS John Wiley & Sons, Inc , 2003
- [2] Nikhil Bhandari , Shivinder Devra , Karamdeep Singh, (Electronics Technology Department, Guru Nanak Dev University, Amritsar) Evolution of Cellular Network: From 1G to 5G , International Journal of Engineering and Techniques - Volume 3 Issue 5, Sep - Oct 2017
- [3] Sarmistha Mondal , Anindita Sinha , Jayati Routh, A Survey on Evolution of Wireless Generations 0G to 7G, Dept. Of ECE Siliguri Institute of Technology, Darjeeling, International Journal of Advance Research in Science and Engineering- IJARSE, Vol-1, Iss-2, 2015
- [4] Egena Onu ,Omar Alani, LTE-ADVANCED AND BEYOND, Conference: 14th Anual Post Graduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and BroadcastingAt: Liverpool, United Kingdom, June 2013
- [5] Saradeep Manam, Yashwanth P.V, Pavan Telluri, Comparative Analysis of Digital Wireless Mobile Technology: A Survey, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), ISSN: 2278-3075, Volume-8, Issue-6C2, April 2019
- [6] Manik Chandra Pandey , Shivaji Kumar Yadav and Indradeep Verma, A Novel Approach in 4G Mobile Technology, IIMT College of Engineering, Indo-Iranian Journal of Scientific Research (IIJSR),Volume 1, Issue 1, Pages 240-245, October-December 2017
- [7] Vishnika Veni, B. Ajitha, G. Preetha, 4G and 5G Wireless Technology, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181, Volume 7, Issue 11
- [8] Vivek Mhatre, Catherine Rosenberg, Homogeneous vs Heterogeneous Clustered Sensor Networks: A Comparative Study, School of Electrical and



Computer Eng., Purdue University, IN 47907-1285, IEEE Communications Society, 2004

[9] Yuanwei Liu, Zhijin Qin, Maged ElKashlan, Yue Gao, and Arumugam Nallanathany, Non-orthogonal Multiple Access in Massive MIMO Aided Heterogeneous Networks Queen Mary University of London, King's College London, UK, 978-1-5090-1328-9/16, 2016 IEEE

[10] Wikipedia, Heterogeneous Network, assessed, 30 July 2022

[11] Yongjun Xu , Member, IEEE, Guan Gui ,Senior Member, IEEE, Haris Gacanin , Fellow, IEEE,and Fumiyuki Adachi , A Survey on Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks: Current Research, Future Trends, and Challenges Life, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 23, NO. 2, SECOND QUARTER 2021

[12] Jain-Shing Liu (Member, IEEE), Chun-Hung Richard Lin, and Yu-Chen Hu (Senior Member, IEEE), Joint Resource Allocation, User Association, and Power Control for 5G LTE-based Heterogeneous Networks VOLUME 4, 2016

[13] Jeanette Wannstrom, Carrier Aggregation explained for 3GPP, (Submission, June 2013)

[14] Norshidah Katiran, Norsheila Fisal, Sharifah Kamilah Syed Yusof, Siti Marwangi Mohamad Maharum, Aimi Syamimi Ab Ghafar, and Faiz Asraf Saparudin, Inter-cell Interference Mitigation and Coordination in CoMP Systems, UTM-MIMOS CoE Telecommunication Technology, Universiti Teknologi Malaysia, ICIEIS 2011, Part III, CCIS 253, pp. 654–665, 2011

[15] Diógenes do Rego, I. de Sousa, V.A., Jr., Solution for Interference in Hotspot Scenarios Applying Q-Learning on FFR-Based, ICIC Techniques. Department of Communications Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte 2021

[16] Toshihito Kudo and Tomoaki Ohtsuki, Kudo and Ohtsuki, Cell range expansion using distributed Q-learning in heterogeneous networks, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2013

[17] Wei-Chen Pao<sup>1</sup>, Jhih-Wei Lin, Yung-Fang Chen and Chin-Liang Wang, Joint ABS and user grouping allocation for HetNet with picocell deployment in downlink, Pao et al. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2017)

[18] Juho Lee, Jin-Kyu Han, and Jianzhong (Charlie) Zhang, MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced, Digital Media & Communications R&D Center, Samsung Electronics, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2009, Article ID 302092, 10 pages

[19] Maria A. Seimeni, Aris Tsolis, Antonis A. Alexandridis and Stelios A. Pantelopoulos, Human Exposure to EMFs from Wearable Textile Patch Antennas: Experimental Evaluation of the Ground-Plane Effect Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 92, 71–89, 2021

[20] Md. Turab Hossain, Md. Nayemor Rahman, Jibon Mahmud, Review on 5G Technology, Conference: IICT, At: BUET, Dhaka, Bangladesh, Affiliation: Bangladesh University of Engineering and Technology, October 2021

[21] Godfrey Anuga Akpakwu; Bruno J. Silva; Gerhard P. Hancke; Adnan M. Abu-Mahfou, A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges, date of publication December 4, 2017, date of current version February 28, 2018

[22] Robin Chataut, and Robert Akl, Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction Department of Computer Science and Engineering, University of North Texas, Received: 9 April 2020, Accepted: 7 May 2020; Published: 12 May 2020

[23] Vinay Kumar, Sadanand Yadav, D. N. Sandeep, S. B. Dhok, Rabindra Kumar Barik and Harishchandra Dubey, 5G Cellular: Concept, Research Work and Enabling Technologies Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019

[24] Wei Lu, Dexi Lu, OPEN WIRELESS ARCHITECTURE VIRTUALIZATION SYSTEM FOR WIRELESS MOBILE TERMINAL DEVICE Feb. 11, 2008

[25] Meenal G. Kachhavay, Ajay P.Thakare, 5G Technology-Evolution and Revolution ,C.S.E. Sipna College of Engineering, Amravati, Head of Department, Electronics and Telecommunication, Sipna College of Engineering, Amravati, IJCSMC, pg.1080 – 1087 Vol. 3, Issue. 3, March 2014

[26] B.G.Gopal, P.G.Kuppusamy, Professors, Department of Electronics and Communication Engineering, A Comparative Study on 4G and 5G Technology for Wireless Applications, Engineering College Avadi, Chennai, India, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), e-ISSN: 2278-2834,p- ISSN: 2278-8735 , PP 67-72Volume 10, Issue 6, Ver. III Nov - Dec .2015

[27] Shahren Shah, Ahmed Nidham Qasim, Muhammet Ali Karabulut, Haci Ilhan and MD.Baharul Islam, Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless, Communication Systems, volume 9, Received July 28, 2021, accepted August 10, 2021, date of publication August 12, 2021, date of current version August 19, 2021, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2021.3104509

[28] Andrea Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press 2005

[29] Παναγιώτης Γ.Κωπτής καθηγητής Ε.Μ.Π, Παντελής-Δανιήλ Μ.Αράπογλου, Δρ.Μηχανικός Ασύρματες Επικοινωνίες, Ε.Μ.Π, 2010

[30] Samuel C.Yang, OFDMA System Analysis and Design, ISBN-13: 978-1-60807-076-3, Artech House 2010

[31] Rajiv Saxena and Hem Dutt Joshi: OFDM and its Major Concerns: A Study with Way Out, IETE JOURNAL OF EDUCATION I VOL 54 I ISSUE 1 I JAN-JUN 2013

[32] Mojtaba Vaezi, Senior Member, IEEE, Gayan Amarasuriya, Member, IEEE, Yuanwei Liu, Member, IEEE, Ahmed Arafa, Member, IEEE, Fang Fang, Member, IEEE, and Zhiguo Ding, Senior Member, IEEE, Interplay Between NOMA and Other Emerging Technologies: A Survey arXiv:1903.10489v2 [cs.IT] 5 Aug 2019

[33] Mahmoud Aldababsa, Mesut Toka, Selahattin Gökçeli, GüneG Karabulut Kurt and OLuz Kucur, A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond, Wireless Communications and Mobile Computing Volume 2018, Article ID 9713450, 24 pages, Published 28 June 2018

[34] G. Bauch, A. Alexiou, MIMO Technologies for the Wireless Future, IEEE 2008

[35] Adam Krumbein, Understanding the Basics of MIMO Communication Technology, A General Education White Paper for Business Professionals and Technical Staff, Southwest Antennas, Inc., 2016

[36] Maria A. Seimeni, Penny Alevizaki, Panagiotis K. Gkonis, Dimitra I. Kaklamani, Iakovos S. Venieris, On resource scheduling and interference mitigation in distributed massive-MIMO wireless orientations via NOMA transmission, Physical Communication, Volume 53, 2022, 101725, ISSN 1874-4907

[37] Hien Quoc Ngo, Massive MIMO: Fundamentals and System Designs, Division of Communication Systems Department of Electrical Engineering (ISY), Linköping University ISBN 978-91-7519-147-8, ISSN 0345-7524, 2015

[38] Mutsawashe Gahadza, Simon Winberg, Performance of massive MIMO Systems for Future Generation Wireless Systems 2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies ICMIMT, 2019

[39] G. N. Kamga, M. Xia and S. Aïssa, "Spectral-Efficiency Analysis of Massive MIMO Systems in Centralized and Distributed Schemes," in IEEE

Transactions on Communications, vol. 64, no. 5, pp. 1930-1941, May 2016, doi: 10.1109/TCOMM.2016.2519513.

[40] Huang, Yongming & Zhang, Cheng & Wang, Jiaheng & Jing, Yindi & Luxi, Yang & Xiaohu, You. Signal Processing for MIMO-NOMA: Present and Future Challenges. IEEE Wireless Communications 25. 10.1109/MWC.2018.1700108. 2018

[41] Μαρία Α. Σεϊμένη, Καταστολή παρεμβολών με τεχνικές χωρικής απομόνωσης και ανάθεσης πόρων σε OFDMA συστήματα, Ε.Μ.Π, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, 2016

[42] MATLAB. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2021