



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ

“Εφαρμογή Downlink/Uplink Decoupling σε δίκτυα
5G”

Συγγραφέας:

ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.M 236055

Υπεύθυνος καθηγητής:

Μπούρας Χρήστος, Καθηγητής

Τριμελής Επιτροπή:

Βλάχος Κυριάκος, Καθηγητής

Γαροφαλάκης Ιωάννης, Καθηγητής

Μπούρας Χρήστος, Καθηγητής

Πάτρα 2022

© Copyright συγγραφέας Θεοδωρόπουλος Γεώργιος, 2022

© Copyright θέματος Μπούρας Χρήστος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια της προπτυχιακής φοίτησης στο τμήμα Μηχανικών ΗΎ και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διπλωματικής αυτής είναι << Εφαρμογή Downlink/Uplink Decoupling σε δίκτυα 5G>>.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών ΗΎ και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών και Επιστημονικό Υπεύθυνο της Μονάδας 6 του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων καθώς και Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας το θέμα της διπλωματικής μου, αλλά και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα.

Ακόμα, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον κύριο Ραφαήλ Καλογερόπουλο στην αρχή καθώς και τον κύριο Βασίλη Κόκκινο των οποίων η βοήθεια και η στήριξη ήταν καθοριστική για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Παρείχαν ιδέες και τρόπους για να ξεκινήσω την εργασία αυτή καθώς και συμβουλές για την μορφή της.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την συνεχή τους στήριξη καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου καθώς και για την βοήθεια και τις θυσίες τους ώστε να κάνω το όνειρο μου πραγματικότητα.

Πάτρα, 2022

Θεοδωρόπουλος Γεώργιος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Εισαγωγή Κεφαλαίου	11
1.2 Φόντο Δικτύων	11
1.3 Στόχος της διπλωματικής	12
1.4 Δομή της διπλωματικής	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	14
2.1 Κυψελοειδή Δίκτυα	14
2.2 Εξέλιξη των Κυψελοειδών δικτύων.....	16
2.3 Κατηγορίες των cells.....	17
2.4 Δίκτυα 1 ^{ης} γενιάς(1G).....	19
2.5 Δίκτυα 2 ^{ης} γενιάς(2G).....	20
2.6 Δίκτυα 3 ^{ης} γενιάς(3G).....	23
2.7 Δίκτυα 4 ^{ης} γενιάς(4G).....	25
2.8 Δίκτυα 5 ^{ης} γενιάς(5G).....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Τεχνολογίες πέμπτης γενιάς δικτύων	33
3.1 Προβλήματα διαχείρισης φάσματος	33
3.1.1 Παρεμβολές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.....	33
3.1.2 Παρεμβολές στα συστήματα OFDM	34
3.2 Τεχνικές αντιμετώπισης προβλημάτων παρεμβολών	36
3.2.1 Intermodulation methods	36
3.2.2 Frequency methods.....	37
3.3 Συστήματα Orthogonal-Frequency-Division-Multiplexing(OFDM)	40
3.3.1 Χαρακτηριστικά και χρήση	40
3.3.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα OFDM συστημάτων.....	42
3.4 Συστήματα Orthogonal-Frequency-Division-Multiple-Access(OFDMA)	44
3.5 5G New Radio Standard(NR)	45
3.6 Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνοτήτων(FDD)	47

3.7 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου(TDD).....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:Uplink and Downlink Decoupling.....	52
4.1 Heterogeneous Networks	52
4.2 Downlink and Uplink Decoupling	56
4.3 Decoupled Downlink and Uplink Duplexing.....	59
4.4 Πλεονεκτήματα DUDe.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μοντέλο συστήματος.....	62
5.1 Εισαγωγή.....	62
5.2 Τυπική απόκλιση της προσομοίωσης του SNR	64
5.3 Μέσο SNR στο Uplink	65
5.4 Προσομοίωση ισχύς μετάδοσης	66
5.5 Τυπική απόκλιση της προσομοίωσης του SNR	67
5.6 Μέσο SNR στο Uplink	68
5.7 Προσομοίωση ισχύς μετάδοσης	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	71
6.1 Εισαγωγή Κεφαλαίου	71
6.2 Συμπεράσματα	71
6.3 Μελλοντική εργασία	72
Βιβλιογραφία	73
ΚΩΔΙΚΑΣ.....	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σύγκριση 1G, 2G, 3G, 4G, 5G(slideshare.net)	17
Εικόνα 2: Μοντέλο επικοινωνίας 1G(simplecoding.in)	20
Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική δικτύων 2G(scholarworks.rit.edu)	22
Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική δικτύων 3G(cdg.org)	25
Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική δικτύων LTE(researchgate.net)	26
Εικόνα 6: Τεχνολογία LTE-A	27
Εικόνα 7: 5G(investors.com)	28
Εικόνα 8: Εξέλιξη LTE-NR διασυνδέσεις(researchgate.net)	29
Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική 5G κυψελοειδών δικτύων(researchgate.net)	30
Εικόνα 10: Ασφάλεια 5G(techblog.comsoc.org)	32
Εικόνα 11: Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας(FFR)(lte-son.blogspot.com)	35
Εικόνα 12: Συγχρονισμός OFDM(electronics-notes.com)	41
Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική συστήματος OFDM(researchgate.net)	43
Εικόνα 14: OFDMA υπομεταφορείς(microwavejournal.com)	44
Εικόνα 15: Διαφορά OFDM-OFDMA(gta.ufrj.br)	45
Εικόνα 16: Πολυπλεξία Διαίρεσης συχνότητας(conniq.com)	47
Εικόνα 17: Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου(conniq.com)	49
Εικόνα 18: TDD εναντίον FDD(pt.slideshare.net)	51
Εικόνα 19: Ετερογενή 5G δίκτυα(openairinterface.org)	52
Εικόνα 20: Ετερογενή δίκτυα/Ομογενή δίκτυα(netmanias.com)	53
Εικόνα 21: Τοπολογία Ετερογενή δικτύων(researchgate.net)	55
Εικόνα 22: Αποσύνδεση Downlink/Uplink και συσχέτιση χρηστών(researchgate.com)	56
Εικόνα 23: Ανισορροπίες στο Downlink και Uplink(mdpi.com)	57
Εικόνα 24: Μοντέλο συστήματος DUDe(semanticsscholar.org)	58
Εικόνα 25: Κατανάλωση ενέργειας	60
Εικόνα 26: Διάγραμμα SINR	61
Εικόνα 27: Μοντέλο Συστήματος	62
Εικόνα 28: Τυπική απόκλιση SNR	64
Εικόνα 29: Μέση τιμή SNR	65
Εικόνα 30: Ισχύς μετάδοσης	67
Εικόνα 31: Τυπική απόκλιση SNR	68
Εικόνα 32: Μέση τιμή SNR	69
Εικόνα 33: Ισχύς μετάδοσης	70

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανθρώπινη επικοινωνία είναι κάτι που όλοι μας επιζητάμε στην καθημερινότητά μας. Κάθε πτυχή και εφαρμογή που μας βοηθάει να επικοινωνούμε μεταξύ μας είναι υπό μελέτη λόγω των αυξανόμενων αναγκών που έχουμε καθώς η τεχνολογία δικτύων μας δίνει περισσότερες δυνατότητες και λειτουργίες. Ο διαχωρισμός του downlink και του uplink είναι μία τεχνική η οποία εμφανίστηκε σχετικά πρόσφατα με σκοπό την μείωση του προβλήματος της ανισορροπίας μεταξύ τους, η οποία συμβαίνει στα δίκτυα Hetnets εξαιτίας της δύναμης μετάδοσης που υπάρχει μεταξύ των macro και small cells. Σε αυτή την διπλωματική, υπάρχει στην αρχή μία αναφορά σχετικά με την εξέλιξη των δικτύων ανά τα χρόνια και πως τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς διαφέρουν με όλα όσα έχουν προηγηθεί. Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες που συναντάμε στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, για να καταλήξουμε στο βασικό θέμα της διπλωματικής αυτής που δεν είναι άλλο από την εφαρμογή του Downlink και Uplink Decoupling στα δίκτυα αυτά. Επομένως ένας από τους κύριους στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση και η αξιολόγηση της εφαρμογής του DL/UL Decoupling σε σχέση με την coupled που ακολουθούσαν όλα τα δίκτυα μέχρι και της 4^{ης} γενιάς. Αποσυνδέοντας το uplink από το macro cell μπορεί να βελτιώσει μία πολύ σημαντική μετρική η οποία ονομάζεται uplink outage. Η διπλή συνδεσιμότητα στο uplink είναι εξαιρετικά αμφιλεγόμενη, καθώς ο χρήστης έχει περιορισμένη ισχύ για κοινή χρήση μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων πρόσβασης. Επιπροσθέτως, αυτή η μελέτη συγκρίνει την απόδοση της πολλαπλής συνδεσιμότητας έναντι της ύπαρξης μίας κυψέλης εξυπηρέτησης. Η σύγκριση αυτή γίνεται βάση της καλύτερης κυψέλης εξυπηρέτησης του uplink. Το αποτέλεσμα μας δείχνει πως αποσυνδέοντας την πρόσβαση αυξάνεται η χωρητικότητα ακόμα και αν κάποια small cell είναι απρόσιτα.

ABSTRACT

Human communication is something that we all seek in our daily lives. Every aspect and application that helps us communicate each other is under study due to the growing needs we have as network technology gives us more capabilities and functions. The separation of downlink and uplink technique that appeared relatively recently in order to reduce the problem of the imbalance between them, which occurs in the HetNets networks due to the transmission power that exists between macro and small cells. In this thesis, there is at the beginning a report on the evolution of networks over the years and how 5th generation networks differ from everything that has preceded it. Then, reference is made to the technologies found in 5th generation networks, to come to the basic issue of this thesis, which is none other than the application of Downlink and Uplink Decoupling in these networks. Therefore, one of the main objectives of this diploma thesis is the comparison and evaluation of the implementation of DL/UL Decoupling in relation to the coupled followed by all networks up to the 4th generation. Disconnecting the uplink from the macro cell can improve a very important metric call uplink outage. The dual connectivity in uplink is highly controversial, as the user has limited power for sharing between two different access point. In addition, this study compares the performance of multiple connectivity versus the existence of a service cell. This comparison is based on the best service hive of uplink. The result shows us that disconnecting access increases capacity even if some small cells are inaccessible.

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αλφαβητικά όλες οι συντομογραφίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική.

3 GPP	3RD Generation Partnership Project
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMTS	Advance Mobile Telephone Systems
BS	Base Station
CCD	Cyclic Delay Diversity
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CoMP	CoMP (Coordinated Multipoint
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
D2D	Device-to-Device
DCH	Dedicated Channel
DFT	Discrete Fourier Transform
DL	Downlink
DSCH	Downlink Shared Channel
DUDe	Downlink & Uplink Decoupling
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FDD	Frequency Division Duplexing
FFR	Fractional Frequency Reuse
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
Het Net	Heterogeneous Network
HS-DSCH	High Speed Downlink Shared Channel
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
ICI	Inter Carrier Interference
ICIC	Inter Cell Interference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMTA	Inter Mobile Telecommunications Advanced
IMTS	Improved Mobile Telephone Service
ITU	International Telecommunications Union
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
MIMO	MIMO (Multiple In Multiple Output
MMS	Multimedia Messages Service
MoCA	Multimedia Over Coax Alliance
MTS	Mobile Telephone Systems
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OBH	Organized Beam Hopping
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PTT	Push to Talk
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technologies
RB	Resource Block
SFBS	Space Frequency Block Coding
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VDSL	Very High-Bit-Rate Digital Subscriber Line
WAP	Wireless Application Protocol
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή Κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε μία αναφορά στο πως από τα πρώτα τεχνολογικά βήματα που υπήρξαν στον τομέα των δικτύων φτάσαμε να μιλάμε για το μεγαλύτερο άλμα που έχει γίνει μέχρι στιγμής στον τομέα αυτό και συγκεκριμένα για τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς τα οποία και σχετικά πρόσφατα μπορούμε να χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας.

Επιπλέον, θα μιλήσουμε για τους βασικούς στόχους αυτής της διπλωματικής εργασίας. Στην διπλωματική αυτή θα ασχοληθούμε με μία συγκεκριμένη εφαρμογή η οποία πρωτοεμφανίστηκε στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς και αυτή είναι το Downlink/Uplink Decoupling. Είναι μία εφαρμογή που όπως και τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς βρίσκεται στο επίκεντρο επιστημονικών ερευνών και εξελίξεων.

Τέλος, θα αναλύσουμε και λίγο την δομή που θα ακολουθήσουμε στην παρούσα διπλωματική καθώς και κάποια βασικά στοιχεία των κεφαλαίων που θα ακολουθήσουν ώστε να υπάρχει μία ιδέα για το τι υπάρχει στα επερχόμενα κεφάλαια.

1.2 Φόντο Δικτύων

Από την πρώτη έως και την τέταρτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, το downlink και το uplink σε μία συνεδρία επικοινωνίας ήταν σε σύνδεση. Ο χρήστης(UE) έπρεπε να συσχετιστεί με τον ίδιο σταθμό βάσης(BS) και στο DL και στο UL. Έως τότε, η προσέγγιση αυτή έμοιαζε να είναι η βέλτιστη, δεδομένου ότι η ισχυρότερη σύνδεση μεταξύ BS και UE ήταν η ίδια και στις δύο κατευθύνσεις. Παρόλα αυτά, με το πέρασμα των χρόνων και μετά από αρκετές μελέτες, η προσέγγιση αυτή φαίνεται να μην είναι η βέλτιστη καθώς αποδεικνύεται ότι για ετερογενή κυψελοειδή δίκτυα(HetNets) η αποσύνδεση του DL και UL σε μία συνεδρία επικοινωνίας φέρει μεγαλύτερα κέρδη.

Τα επιχειρήματα υπέρ της σύνδεσης είναι αρκετά. Αν το δούμε από την άποψη του καθαρού σχεδιασμού του δικτύου, τα λογικά, μεταφορικά και φυσικά κανάλια είναι ευκολότερο να σχεδιαστούν και να λειτουργήσουν. Αυτό αφορά κυρίως τον συγχρονισμό των βεβαιώσεων, τις διαδικασίες αποδοχής κλήσεων και παραδόσεων και την διαχείριση και τον έλεγχο της ισχύος. Με την αποσύνδεση των δύο κατευθύνσεων, απαιτείται δυνατός συγχρονισμός και δυνατή συνδεσιμότητα δεδομένων(μέσω οπτικής ίνας) μεταξύ των BSs. Από την πλευρά της ανάπτυξης και της τοπολογίας, μέχρι πριν λίγα χρόνια τα κυψελοειδή δίκτυα σχεδιάζονταν και

αναπτυσσότουσαν στην φιλοσοφία των ομογενών δικτύων με macro cells που όλα μετέδιδαν με την ίδια ισχύ. Αν το δούμε από την άποψη της κυκλοφορίας, η φόρτιση και στις δύο κατευθύνσεις ήταν ακριβώς ίδια στα δίκτυα 2^{ης} γενιάς και στα αρχικά δίκτυα 3^{ης} γενιάς. Επιπλέον, στα δίκτυα 3,5G και 4G κυριαρχούσε η φόρτιση στο downlink, μονοπωλώντας την χρήση της DL συσχέτισης σε σχέση με αυτή της UL ή της αποσύνδεσης.

Ωστόσο, μία συνδεδεμένη συσχέτιση είναι μία περιοριστική ειδική περίπτωση μίας γενικότερης πολιτικής σύνδεσης χωρίς περιορισμό ζεύξης. Έτσι, γίνεται ξεκάθαρο ότι μία καλοσχεδιασμένη πολιτική συσχέτισης βασισμένη στο Downlink/Uplink Decoupling μπορεί να ξεπεράσει μία coupled.

1.3 Στόχος της διπλωματικής

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά που αναφέραμε προηγουμένως στόχος της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι να αποδείξει σε θεωρητικό επίπεδο αρχικά πως η αποσύνδεση αυτή μπορεί να φέρει καλύτερα αποτελέσματα σε επίπεδο μετάδοσης ισχύος και SINR και στην συνέχεια με την κατάλληλη προσομοίωση ενός συστήματος να το αποδείξει και πρακτικά. Αυτή η υλοποίηση θα γίνει πάνω σε ένα απλό HetNet και με την βοήθεια της Matlab θα καταλήξουμε στα συμπεράσματα μας.

1.4 Δομή της διπλωματικής

Στο κεφάλαιο 2, θα κάνουμε μία ιστορική αναδρομή στα δίκτυα, από τα πρώτα χρόνια σχεδιασμού και ύπαρξής τους, στις τεχνολογίες και τις εφαρμογές που είχαν και θα φτάσουμε μέχρι και σήμερα και τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς τα οποία και θα μελετήσουμε αναλυτικότερα καθώς είναι και αυτά στα οποία εφαρμόζεται η αποσύνδεση στο downlink και το uplink.

Στο κεφάλαιο 3, θα δούμε και θα αναλύσουμε τεχνολογίες των δικτύων 5^{ης} γενιάς. Θα αναλύσουμε τα συστήματα στα οποία αναπτύσσονται τα δίκτυα αυτά, θα δούμε προβλήματα που εμφανίζονται καθώς και τρόπους αντιμετώπισής τους.

Στο κεφάλαιο 4, είναι το κύριο μέρος της διπλωματικής εργασίας αυτής. Θα αναλύσουμε την εφαρμογή Downlink/Uplink Decoupling στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, πως αυτή εφαρμόζεται και τι πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έχει σε σχέση με την coupled.

Στο κεφάλαιο 5, θα ορίσουμε το μοντέλο συστήματος πάνω στο οποίο θα γίνει η προσομοίωση ώστε να πάρουμε τα αποτελέσματα που χρειαζόμαστε και να

καταλήξουμε στους λόγους για τους οποίους είναι προτιμότερη η αποσύνδεση. Θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα και θα καταλήξουμε σε συγκεκριμένα συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο 6, θα παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μέσα από την προσομοίωση. Επίσης θα δώσουμε τον επίλογο της διπλωματικής και μία σύντομη περιγραφή με μελλοντικές ιδέες και προτάσεις εξέλιξης της ήδη υπάρχουσας τεχνολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα κινητά ραδιοτηλεφωνικά συστήματα ήταν ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα που προηγήθηκαν της σύγχρονης κυψελοειδούς κινητής τηλεφωνικής τεχνολογίας. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά τα συστήματα περιλάμβαναν το Push to Talk (μία μέθοδος αμφίδρομης επικοινωνίας με την χρήση ενός κουμπιού για την μετάβαση από την λειτουργία φωνητικής λήψης στην μετάδοση), τα mobile telephone systems(MTS), τα improved mobile telephone services (IMTS) και τα advanced mobile telephone systems(AMTS). Αυτά τα συστήματα ξεχωρίζουν από τα πρώιμα συστήματα κινητής τηλεφωνία διότι ήταν πλέον διαθέσιμα ως εμπορική υπηρεσία που άνηκε στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής με τους δικούς τους τηλεφωνικούς αριθμούς. Αυτά τα κινητά τηλέφωνα ήταν τοποθετημένα κυρίως σε αυτοκίνητα με τον πομποδέκτη να βρίσκεται στον κορμό του αυτοκινήτου και το ακουστικό κοντά στον οδηγό.

Η ιδέα των κυψελωδών δικτύων είναι μία προσέγγιση που διαμορφώνεται για αρκετές δεκαετίες. Κάνοντας μία σύντομη ιστορική αναδρομή, οι πρώτοι που πρότειναν την υλοποίηση τους ήταν οι Douglas H. Ring και W. Rae Young, τον Δεκέμβριο του 1947. Οι συχνότητες και οι τεχνολογίες οι οποίες ήταν απαραίτητες για να φτάσουμε στην υλοποίηση αυτής της ιδέας δεν υπήρχαν εκείνη την εποχή. Έτσι 20 χρόνια αργότερα οι Richard H. Frenkiel, Joel S. Engel και Philip T. Porter που ήταν και αυτοί εργαζόμενοι στην Bell Labs, μίας αμερικανικής εταιρείας έρευνας και τεχνολογίας διατύπωσαν μία πιο λεπτομερή πρόταση για την υλοποίηση αυτού του συστήματος. Ήταν η πρώτη φορά που ακούστηκε η πρόταση χρήσης κυψελωειδών πύργων στις ήδη υπάρχουσες κεραίες ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές.

Το πρόβλημα που υπήρξε σε όλο αυτό το σύστημα ήταν ότι μία συσκευή θα έπρεπε να μείνει εντός της περιοχής κάλυψης που εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης κατά την διάρκεια μίας τηλεφωνικής κλήσης. Για τον λόγο αυτό το 1970 ένας μηχανικός της Bell Labs, ο Amos E. Joel εφηύρε ένα τρικύλινδρο κύκλωμα κορμού για να βοηθήσει στην διαδικασία μεταβίβασης κλήσεων από ένα κελί σε ένα άλλο. Το 1973 η Motorola ήταν η πρώτη εταιρεία που παρήγαγε κινητό τηλέφωνο και τον Απρίλιο της ίδιας χρονιάς ο ερευνητής Martin Cooper πραγματοποίησε την πρώτη κλήση μέσω κινητού από φορητό εξοπλισμό συνδρομητών. [1]

2.1 Κυψελοειδή Δίκτυα

Τα κυψελοειδή δίκτυα ή αλλιώς κινητά δίκτυα είναι δίκτυα επικοινωνιών των οποίων ο τελευταίος σύνδεσμος είναι ασύρματος. Η οργανωμένη δομή τους και τα εύχρηστα τεχνικά χαρακτηριστικά τους αυξάνουν τη συνδρομητική χωρητικότητα του συστήματος παρέχοντας ουσιαστική εκμετάλλευση του προσφερόμενου φάσματος

ραδιοσυχνοτήτων με δυνατότητα κάλυψης σχετικά μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Η μορφή των κυψελοειδών συστημάτων έχει σχήμα κανονικού εξαγώνου και αυτό συμβαίνει γιατί προσεγγίζει καλύτερα την επιφάνεια του κύκλου, δεν εμφανίζει κενά και απαιτεί μικρότερο αριθμό κυψελών. Με τα κυψελοειδή δίκτυα λύσαμε το πρόβλημα την φασματικής συμφόρησης και αυξήσαμε την χωρητικότητα χρήσης. Η περιοχή των κυψελοειδών δικτύων διαιρείται σε κελιά, όπου το κάθε κελί έχει τις δικές του συχνότητες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το σύστημα για μετάδοση και επικοινωνία. Κάθε κελί έχει την δικιά του συχνότητα. Η επικοινωνία δεδομένων δρομολογείται από τον πομπό σταθμού βάσης, τον δέκτη και την μονάδα ελέγχου του.

Τα κυψελοειδή δίκτυα εξαιτίας του σχεδιασμού τους προσφέρουν μια σειρά θετικών χαρακτηριστικών.

- Έχουν περισσότερη χωρητικότητα από έναν μεγάλο μεταδότη καθώς η ίδια συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλούς συνδέσμους εφόσον βρίσκονται σε διαφορετικά κελιά.
- Οι κινητές συσκευές από την στιγμή που βρίσκονται πιο κοντά στους πύργους των κυψελών χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια.
- Μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης από έναν επίγειο πομπό.

Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών έχουν αναπτύξει κυψελοειδή δίκτυα φωνής και δεδομένων στο μεγαλύτερο μέρος της γης. Αυτό επιτρέπει τη σύνδεση των κινητών τηλεφώνων με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Αντίθετα τα ιδιωτικά κυψελοειδή δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έρευνα ή από μεγάλους οργανισμούς.

Η αυξημένη χωρητικότητα σε ένα κυψελοειδές δίκτυο προέρχεται από το σύστημα μεταγωγής κινητών επικοινωνιών, το οποίο επέτρεψε σε πολλούς χρήστες της ίδιας περιοχής να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα για τις κλήσεις τους εκμεταλλευόμενοι τις συχνότητες στον πλησιέστερο διαθέσιμο κυψελοειδή πύργο. Αν υπήρχε ένας απλός πομπός θα μπορούσε να γίνει μόνο μία μετάδοση μίας δεδομένης συχνότητας. Αυτό οδηγεί αναπόφευκτα σε παρεμβολές στο σήμα από άλλα κελιά που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Για τον λόγο αυτό σε ένα τυπικό σύστημα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα κυτταρικό κενό μεταξύ των κελιών που επαναχρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, το βασικό χαρακτηριστικό των κυψελοειδών δικτύων είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων για την αύξηση της κάλυψης και της χωρητικότητας. Γειτονικά κελιά πρέπει να χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες λόγω των παρεμβολών που θα δημιουργηθούν. Το πρόβλημα αυτό δεν υπάρχει μεταξύ κελιών σε μακρινή απόσταση εφόσον ο εξοπλισμός του ιστού και των χρηστών του κυψελοειδούς δικτύου δεν μεταδίδεται με υπερβολική ισχύ. [2]

2.2 Εξέλιξη των Κυψελοειδών δικτύων

Μετά την καθιέρωση των κυψελοειδών δικτύων τα μοντέλα δικτύων κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησαν να διαιρούνται σε γενιές, 'G' που προέρχεται από την αγγλική λέξη Generation. Πλέον οποιοδήποτε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ακολουθεί αυτό το πρότυπο και ορίζει όλες τις τεχνολογικές λεπτομέρειες εφαρμογής ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η πρώτη κινητή συσκευή που άλλαξε εντελώς τον κόσμο της επικοινωνίας χρησιμοποιούσε το προχωρημένο πρωτόκολλο κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το αναλογικό δίκτυο είναι το 1G δηλαδή δίκτυο 1^{ης} γενιάς. Με αυτή την τεχνολογία τα κινητά τηλέφωνα λειτουργούσαν σε ένα voice-only δίκτυο ακριβώς όπως λειτουργούσε και μία ραδιοφωνική μετάδοση. Δεδομένου όμως ότι αναφερόμαστε σε ένα αναλογικό σύστημα ξέρουμε ότι κατά την διάρκεια των κλήσεων υπάρχουν κάποιοι θόρυβοι που προκαλούνται από άλλες κοντινές συσκευές.

Προκειμένου λοιπόν να εξαλειφθεί το πρόβλημα με τον θόρυβο, η τεχνολογική εξέλιξη μας φέρνει τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς, τα οποία και βασίζονται στο Global System for Mobile Communication και χρησιμοποιούν ψηφιακά σήματα για μετάδοση φωνής με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 64kbps. Επίσης είναι η πρώτη φορά που παρέχεται η δυνατότητα του Short Message Service, που χρησιμοποιεί bandwidth range από 30 έως 200 KHz. Στην συνέχεια της τεχνολογικής εξέλιξης έχουμε τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, 3G, τα οποία χρησιμοποιούν Wide Band Wireless Network. Πλέον έχουμε φτάσει σε υψηλά επίπεδα σαφήνειας των τεχνολογιών αυτών. Τα δεδομένα στέλνονται μέσω μίας τεχνολογίας ανταλλαγής πακέτων και οι φωνητικές κλήσεις μέσω μίας τεχνολογίας εναλλαγής κυκλωμάτων. Υποστηρίζει καινούργιες λειτουργίες όπως πρόσβαση σε τηλεόραση και βίντεο καθώς και νέες υπηρεσίες όπως το Global Roaming. [3]

Τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς, 4G, ήρθαν σε ένα ήδη στρωμένο έδαφος και η μετάβαση από το 3G στο 4G ήταν πολύ πιο εύκολη από την μετάβαση από GSM σε 3G. Δεν υπήρχαν πολλές αλλαγές ανάμεσα σε αυτές τις δύο γενιές κινητών δικτύων. Το βασικό πλεονέκτημα όμως ήταν οι πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που προσφέρουν τα δίκτυα 4G σε σχέση με αυτές των 3G δικτύων. Έτσι η πρόσβαση στις υπάρχουσες υπηρεσίες γίνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα και αξιοπιστία υποστηρίζοντας παράλληλα και τα νέα πρωτόκολλα internet IPv6 ενώ υπάρχει και βελτίωση του Long Term Evolution.

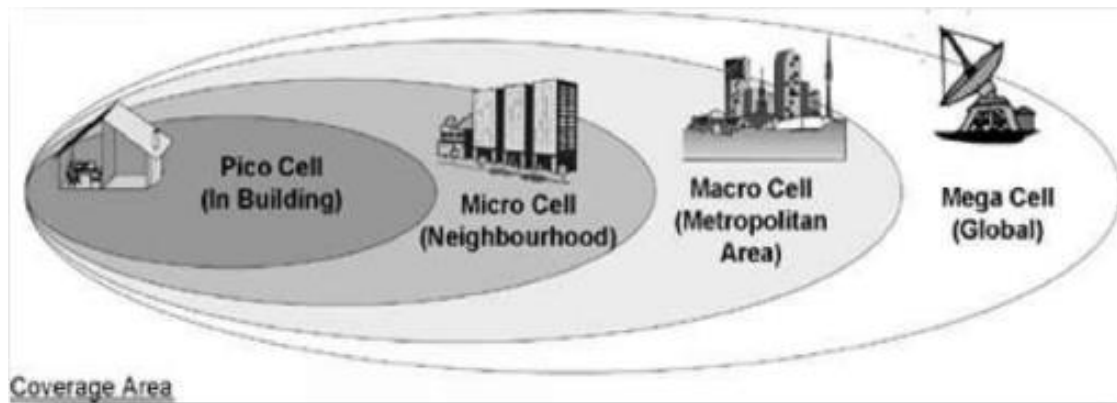
<i>Technology / Features</i>	<i>1G</i>	<i>2/2.5G</i>	<i>3G</i>	<i>4G</i>	<i>5G</i>
Start/ Deployment	1970/ 1984	1980/ 1999	1990/ 2002	2000/ 2010	2010/ 2015
Data Bandwidth	2 kbps	14.4-64 kbps	2 Mbps	200 Mbps to 1 Gbps for low mobility	1 Gbps and higher
Standards	AMPS	2G: TDMA, CDMA, GSM 2.5G: GPRS, EDGE, 1xRTT	WCDMA, CDMA-2000	Single unified standard	Single unified standard
Technology	Analog cellular technology	Digital cellular technology	Broad bandwidth CDMA, IP technology	Unified IP and seamless combination of broadband, LAN/WAN/	Unified IP and seamless combination of broadband,

Εικόνα 1: Σύγκριση 1G, 2G, 3G, 4G, 5G(slideshare.net)

Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς , 5G, είναι μία τεχνολογία η οποία ήρθε μέσα στο 2019 φτάνοντας πλέον ταχύτητες 10Gbps, παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια, καλύπτει μεγαλύτερο εύρος και εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια. Παρόλα αυτά είναι μία τεχνολογία που αναπτύσσεται και εξελίσσεται κατά την διάρκεια συγγραφής αυτής της διπλωματικής εργασίας και είναι η βάση της έρευνας για την εκπόνησή της. Τέλος, για τις παραπάνω τεχνολογίες θα αναφερθούμε ξεχωριστά στην συνέχεια και θα τις αναλύσουμε λεπτομερώς [4]

2.3 Κατηγορίες των cells

Μετά την περιγραφή των κυψελοειδών δικτύων και την σύντομη περίληψη της εξέλιξής τους ανά τα χρόνια σε αυτή την υποενότητα θα αποδώσουμε εν συντομία τις κατηγορίες των cells που υπάρχουν. Η καθεμία κατηγορία έχει και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά όπως και μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που βοηθάνε στην επιλογή του κατάλληλου cell ανά περίπτωση. [2]



Εικόνα 2: Περιοχές κάλυψης των cells(litepoint.com)

Τις κατηγορίες των cell θα τις χωρίσουμε με βάση την περιοχή κάλυψής τους, από την μικρότερη ως την μεγαλύτερη και είναι οι εξής:

- **Small cells:** Τα μικρά κύτταρα μπορεί να περιλαμβάνουν femtocells, picocells και microcells. Χρησιμοποιούνται πολύ στα νέα δίκτυα και με τεχνολογίες όπως το Beamforming, που είναι μία τεχνολογία που κάνει εστίαση ενός σήματος σε μία πολύ μικρή περιοχή, μπορεί να βελτιώσει την κάλυψη των μικρών κυψελών. Το πεδίο κάλυψης των κυττάρων αυτών μπορεί να είναι το εσωτερικό ενός κτηρίου, πχ σπίτι ή μία μικρή επιχείρηση έως και μία ολόκληρη γειτονιά.
- **Macro cell:** Ένα macro cell είναι ένας κυψελοειδής σταθμός βάσης ο οποίος στέλνει και λαμβάνει σήματα μέσω μεγάλων πύργων και κεραιών. Μπορεί να προσφέρει κάλυψη για αρκετά χιλιόμετρα. Η χρήση τους είναι κυρίως για κάλυψη μίας ολόκληρης περιοχής πράγμα αδύνατον για τα small cells.
- **Mega cell:** Η μεγαλύτερη από άποψη κάλυψης κατηγορία κυττάρων. Καλύπτει εκατοντάδες χιλιόμετρα και η χρήση της γίνεται μέσω δορυφόρων.

Οι δύο κατηγορίες με τις οποίες θα ασχοληθούμε περαιτέρω στην διπλωματική αυτή είναι τα small cells και τα macro cells. Οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι υπεύθυνες για την δικτυακή κάλυψη και το εύρος χωρητικότητας. Τα macro cells γενικά χρησιμοποιούνται στα κυψελοειδή δίκτυα για να παρέχουν κάλυψη στα κινητά τηλέφωνα. Ένας macro σταθμός βάσης έχει ένα τρόπο επικοινωνίας με όλο το δίκτυο.

Από την άλλη, τα small cells φαίνονται σαν μία πολύ μικρή έκδοση των macro cell, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο. Επειδή όπως εξηγήσαμε και παραπάνω έχουν μικρή περιοχή κάλυψης, τα small cells εγκαθίστανται πιο κοντά στα σημεία που απαιτείται σύνδεση. Συνήθως, προτιμώνται σε σημεία που υπάρχουν ήδη υποδομές και όχι τόσο σε μέρη έξω από πόλεις. Τα small cells χρειάζεται να είναι το ένα κοντά στο άλλο ώστε να μεταδίδουν σωστά και να δημιουργούν δίκτυο. [5]

2.4 Δίκτυα 1^{ης} γενιάς(1G)

Κατά την διάρκεια του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου η εμφάνιση των ραδιο-τηλεφώνων είχε περιοριστεί για στρατιωτική χρήση και δεν ήταν διαθέσιμο για τους πολίτες ή για γενική χρήση. Αυτά τα πρώτα ραδιο-τηλέφωνα είναι γνωστά ως Walkie-Talkies. Στην συνέχεια εμφανίστηκαν τα τηλέφωνα στο αυτοκίνητο από την Bell System το 1946 στις Η.Π.Α. και συνέχισαν να εξελίσσονται και να γίνονται πιο ευρέως γνωστά την δεκαετία του 1960. Χρησιμοποιήθηκαν από την IMTS που ήταν συνδεδεμένη με ένα σταθερό δίκτυο γνωστό και ως public switched telephone network. Αυτό είναι ένα παράδειγμα ενός ραδιο-τηλεφωνικού δικτύου το οποίο ήταν ένα στάδιο πριν το 1G γνωστό και ως 0G. Το 1971 το Autoradiotelephon δίκτυο εμφανίστηκε ως το πρώτο δημόσιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στην Φιλανδία. Λειτουργούσε σε ζώνες 150MHz και οι κλήσεις άλλαζαν με το χέρι. Και αυτό άνηκε στην 0G τεχνολογία.

Τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς είναι αναλογικά πρότυπα τηλεπικοινωνιών που χρησιμοποιήθηκαν την δεκαετία του 1980. Η κύρια ιδέα ήταν ότι ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί μία περιοχή η οποία είναι χωρισμένη σε κελιά. Με τον τρόπο αυτό πολλοί χρήστες μπορούσαν να εξυπηρετηθούν σε μία περιοχή διότι τα κελιά ήταν μικρά και το μοντέλο επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων αξιοποιεί στο έπακρο τα πιο κοντινά. Το πρώτο δημόσιο κυψελοειδή δίκτυο ξεκίνησε στην Ιαπωνία το 1979 από την Nippon Telegraph and Telephone. Η συγκεκριμένη γενιά δικτύων είχε και μερικές τεχνολογίες όπως:

- Mobile Telephone Systems (MTS)
- Advance Mobile Telephone Systems (AMTS)
- Improved Mobile Telephone Service (IMTS)
- Push to Talk(PTT)

Το 1981 η Νορβηγία και η Σουηδία έχτισαν το πρώτο τους 1G δίκτυο βασισμένο στο πρότυπο Nordic Mobile Telephone(NMT) με τις χώρες Δανία και Φιλανδία να ακολουθούν το 1982. Οι επόμενες χώρες ήταν η Ρωσία και η Σαουδική Αραβία. Το 1983 οι Αμερικάνοι δημιουργούν το δικό τους κυψελοειδή δίκτυο στο πρότυπο του AMPS. Τα περισσότερα τηλέφωνα στην εποχή των 1G δικτύων ήταν: [1]

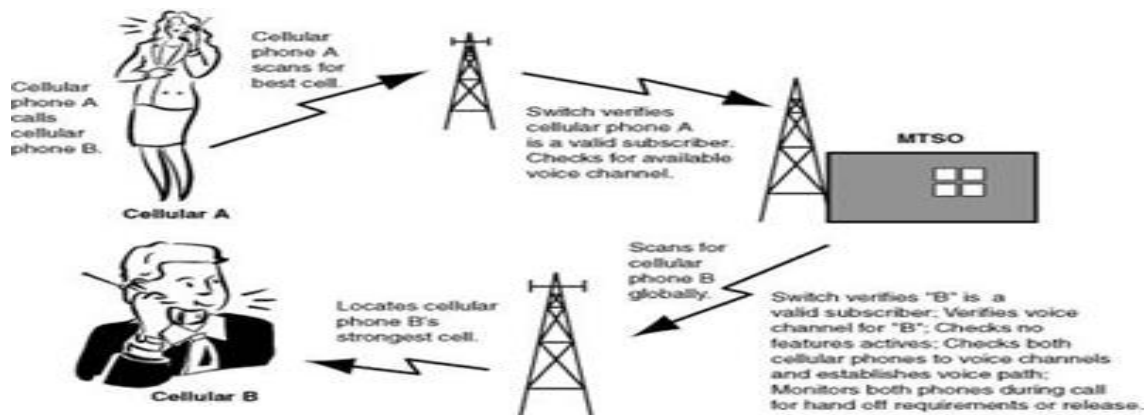
- Βαριά, ζύγιζαν περίπου 3-4 κιλά
- Για εταιρική χρήση και όχι για προσωπική
- Ακριβά
- Ένα σύμβολο ευημερίας και κοινωνικής κατάστασης

Όπως οι περισσότερες τεχνολογίες έτσι και τα δίκτυα πρώτης γενιάς είχαν προβλήματα με την ασφάλεια τους. Συγκεκριμένα όποιος είχε πρόσβαση σε έναν

δέκτη ραδιοφωνικής ζώνης συνδεδεμένο σε έναν υπολογιστή μπορούσε να καταγράφει τα τηλεφωνήματα των συνδρομητών.

Τα μειονεκτήματα της 1G κινητής τεχνολογίας ήταν τα εξής:

- Πολύ κακή ποιότητα ήχου
- Περιορισμένη κάλυψη
- Πλήρες αναλογικό σύστημα επικοινωνίας με κακή χρήση του φάσματος
- Μικρή χωρητικότητα
- Διαφορετικά 1G συστήματα δεν ήταν συμβατά το ένα με το άλλο λόγω των διαφορετικών συχνοτήτων
- Δεν υποστηρίζεται περιαγωγή μεταξύ διαφορετικών χειριστών
- Αδύναμη ασφάλεια χωρίς υποστήριξη κρυπτογράφησης



Εικόνα 2: Μοντέλο επικοινωνίας 1G(simplecoding.in)

2.5 Δίκτυα 2^{ης} γενιάς(2G)

Τα μειονεκτήματα των 1G δικτύων που αναφέραμε στην προηγούμενη υποενότητα περιόριζαν περαιτέρω την εξάπλωση της τεχνολογίας. Για να μπορέσουμε να αυξήσουμε την εξάπλωση και να επιτευχθεί η υιοθέτηση της κινητής επικοινωνίας πρέπει τα μελλοντικά δίκτυα να είναι πιο διαχειρίσιμα και προσιτά. Νωρίς το 1980 η ομάδα ραδιοεπικοινωνιών της κοιμισιόν τηλεπικοινωνιών της CEPT και η υπο-ομάδα R21 σχεδίασαν να έχουν υπηρεσίες κινητών στα 900 MHz με χωρητικότητα 1000 καναλιών. Το 1982, η GSM σχηματίστηκε για να εναρμονίσει τα τεχνικά και επιχειρησιακά χαρακτηριστικά των δημόσιων κινητών επικοινωνιακών συστημάτων σε ζώνες των 900 MHz. Η ETSI ιδρύθηκε το 1988 για να καταχωρήσει τα πρότυπα και τις τεχνικές λεπτομέρειες για την GSM τεχνολογία.

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιήθηκαν δημόσια στην Φιλανδία το 1991 στηριζόμενα στο πρότυπο GSM. Αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων για να περιγράψει τα πρωτόκολλα για ψηφιακά κυψελοειδή δίκτυα 2^{ης} γενιάς που χρησιμοποιούνται από κινητές συσκευές όπως τα tablet. Από το 2014, έχει γίνει το παγκόσμιο πρότυπο για τις κινητές επικοινωνίες. Τα δίκτυα 2G αναπτύχθηκαν ως αντικαταστάτης των αναλογικών κυψελοειδών δικτύων πρώτης γενιάς και το πρότυπο GSM περιγράφηκε ως ψηφιακό δίκτυο μεταγωγής κυκλωμάτων βελτιστοποιημένο για φωνητική τηλεφωνία πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας. [1]

Η μεγάλη διαφορά με την προηγούμενη γενιά είναι ότι στα δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιείται ψηφιακή μετάδοση για την μεταφορά με ταχύτητες που ξεπερνάνε τα 64Kbps. Επιπλέον για πρώτη φορά είδαμε την τεχνολογία SMS. Αρχικά ήταν διαθέσιμο μόνο σε δίκτυα GSM, αλλά επεκτάθηκε τελικά σε όλα τα ψηφιακά δίκτυα. Το πρώτο μήνυμα SMS δημιουργήθηκε και απεστάλη στο Ηνωμένο Βασίλειο το Δεκέμβριο του 1992 και το 1993 ακολούθησε το πρώτο SMS σε άτομο στην Φιλανδία. Έτσι, στα τέλη της δεκαετίας του 1990 το SMS καθιερώθηκε ως η βασική μέθοδος επικοινωνίας. Στα δίκτυα 2G υπήρξε επίσης η ικανότητα πρόσβασης σε περιεχόμενα πολυμέσων στα κινητά τηλέφωνα. Το 1998 το πρώτο περιεχόμενο που μεταφορτώθηκε στα κινητά τηλέφωνα ήταν ο ήχος κλήσης που ξεκίνησε στην ραδιοφωνία της Φιλανδίας.

Μεγάλο βήμα υπήρξε και στην ασφάλεια των δικτύων δεύτερης γενιάς. Συγκεκριμένα υποστηριζόταν ψηφιακή κρυπτογράφηση η οποία πρόσφερε υψηλότερη απόδοση διεύθυνσης και για αυτό τον λόγο ήταν πιο ικανό για φάσμα δικτύου. Στα δίκτυα αυτά το πρόβλημα εντοπιζόταν στις λιγότερο κατοικημένες περιοχές όπου το ασθενέστερο ψηφιακό σήμα αναπτύσσεται σε υψηλότερες συχνότητες και αυτό δεν ήταν αρκετό για να φτάσει σε έναν cell tower.

Όπως στα δίκτυα πρώτης γενιάς έτσι και εδώ υπάρχουν κάποιες τεχνολογίες που υποστηρίζονται και είναι οι εξής:

- General Packet Radio Service(GPRS)
- Code Division Multiple Access(CDMA)
- Global System for Mobile Communication(GSM)
- Enhanced Data Rates for GSM Evolution(EDGE)

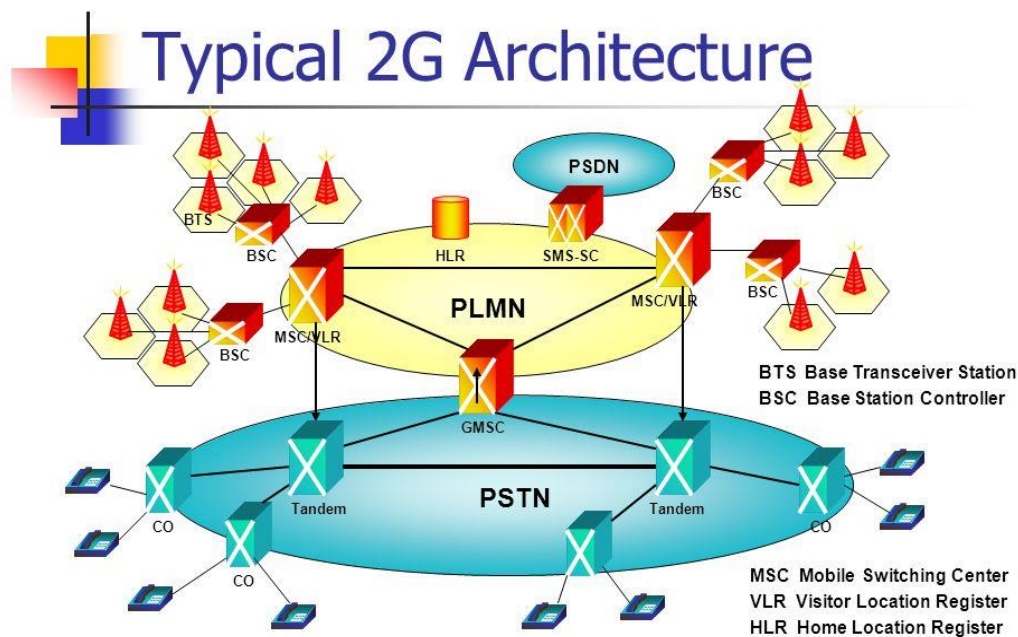
Με τα δίκτυα 2G επιτεύχθηκαν οι παρακάτω βελτιώσεις: [6]

- Time-division multiple access, επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος, υποστήριξη περισσότερων χρηστών
- Οι επικοινωνίες είναι ψηφιακά κρυπτογραφημένες
- Φθηνότερα, μικρότερα, ελαφρύτερα κινητά
- Αύξηση της αγοράς, Εμφάνιση εταιρειών κινητής τηλεφωνίας
- Υποστήριξη περιαγωγής

- Υποστήριξη μηνυμάτων

Ένα βήμα παρακάτω στα δίκτυα δεύτερης γενιάς είναι τα 2,5G δίκτυα με αρκετές εξελίξεις σε σχέση με τα 2G. Η κύρια αναβάθμιση ήταν η υλοποίηση της εναλλαγής πακέτων. Επίσης υπήρξε μία αύξηση στην ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων από τα 56Kbps στα 115Kbps.

Τέλος, η τεχνολογία αυτή έδωσε την δυνατότητα αποστολής και λήψης φωτογραφιών και βίντεο μέσω της τεχνολογίας Multimedia Messages Services(MMS). Η υπηρεσία αυτή είναι ένας τυπικός τρόπος για την αποστολή μηνυμάτων που περιλαμβάνουν περιεχόμενο πολυμέσων από και προς ένα κινητό τηλέφωνο μέσω κυψελοειδούς δικτύου. Το πρότυπο MMS επεκτείνει την ικανότητα του κεντρικού SMS, επιτρέποντας την ανταλλαγή μηνυμάτων κειμένου περισσότερων χαρακτήρων. Σε αντίθεση με το SMS, το MMS μπορεί να προσφέρει μία ποικιλία μέσων, συμπεριλαμβανομένων μικρού μήκους βίντεο, μίας εικόνας και ήχου. [1]



Εικόνα 3: Αρχιτεκτονική δικτύων 2G(scholarworks.rit.edu)

2.6 Δίκτυα 3^{ης} γενιάς(3G)

Τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς είναι οι επικρατέστεροι πάροχοι υπηρεσιών κινητής επικοινωνίας στον κόσμο. Βασισμένοι στην τρομερή επιτυχία του GSM στα δίκτυα 2^{ης} γενιάς, τα δίκτυα 3G ακολούθησαν τον ίδιο δρόμο συνεργασίας και παγκόσμιας τυποποίησης για την διασφάλιση της διαλειτουργικότητας. Η κινητή επικοινωνία είναι μετά από όλα αυτά διεθνής υπόθεση αν λάβουμε υπόψη μας το γεγονός της αύξησης των επιχειρήσεων που σχετίζονται με αυτό. Τα 3G πήγαν την διεθνή συνεργασία ένα βήμα παρακάτω με τον σχηματισμό της 3GPP η οποία παρουσίασε τις τεχνικές λεπτομέρειες της 3G τεχνολογίας.

Η τρίτη γενιά δικτύων κινητής τηλεπικοινωνίας βασίζεται σε ένα σύνολο προτύπων που χρησιμοποιούνται για κινητές συσκευές που ακολουθούν τις προδιαγραφές της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών(ITU). Είναι η πρώτη γενιά δικτύων που βρίσκει εφαρμογή η πρόσβαση στο κινητό Internet καθώς και οι βιντεοκλήσεις και η τηλεόραση. Πλέον στέλνουμε δεδομένα μέσω μίας τεχνολογίας ανταλλαγής πακέτων(packet switching) και οι φωνητικές κλήσεις εκτελούνται μέσω της εναλλαγής κυκλωμάτων. Μαζί με τις νέες εφαρμογές που αναφέραμε παραπάνω στα δίκτυα τρίτης γενιάς συναντάμε και μία καινούργια υπηρεσία που ονομάζεται Global Roaming. Επιπλέον αυτή η γενιά χρησιμοποιεί κανάλι ευρείας ζώνης μετάδοσης και έτσι οποιοσδήποτε πομπός μπορεί να επικοινωνήσει με φωνητική κλήση καθώς και με μήνυμα με όποιον δέκτη θέλει σε όποιο μέρος της γης και να βρίσκεται.

Το 1998 με την τεράστια εξάπλωση του διαδικτύου είχε προκύψει και η ανάγκη για κινητό διαδίκτυο. Στα 3G, με τα WCDMA και CDMA2000, η μετάδοση των δεδομένων ξεπερνούσε τα 2Mbps για έναν ακίνητο χρήστη ή για έναν χρήστη που περπατάει και τα 384Kbps για έναν χρήστη σε κινούμενο όχημα. Το 3G εκπέμπει σε εύρος 2100 MHz και έχει εύρος ζώνης από 15-20 MHz πράγμα που χρησιμοποιείται για βιντεοκλήσεις με μεγάλες ταχύτητες. Το 2002 υπήρξε ένα ιστορικό σημείο αναφοράς στην τηλεφωνία στο οποίο η συνδρομή για κινητά ξεπέρασε την σταθερή γραμμή, κάνοντας την κινητή επικοινωνία πιο σημαντική από ποτέ. Όταν το 3G έγινε αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας, οι βιντεοκλήσεις και το σερφάρισμα στο διαδίκτυο χρειαζόταν μεγαλύτερες και καλύτερες οθόνες. Τότε ήρθε και η ώρα να δούμε το πρώτο iPhone από την Apple. Ήταν το πρώτο κινητό τηλέφωνο με χωρητική οθόνη πολλαπλής αφής και ένα περιβάλλον βασισμένο στην πολλαπλή αφή, το οποίο και έθεσε την μόδα των smartphone στην αγορά. [7] Η γενιά αυτή όπως και όλες οι προηγούμενες φέρουν μαζί τους και κάποιες καινούργιες τεχνολογίες οι οποίες είναι:

- Wideband Code-division multiple access
- Wireless local area network
- Bluetooth
- Universal Mobile Telecommunication System
- High-Speed Downlink packet access

- Global Roaming Clarity

Η ITU δεν παρείχε σαφή ορισμό του ποσοστού δεδομένων που οι χρήστες μπορούν να περιμένουν από τον εξοπλισμό ή τους παρόχους του 3G. Έτσι, οι χρήστες στους οποίους πωλούνται υπηρεσίες 3G ενδέχεται να μην μπορούν να επισημάνουν ένα πρότυπο και να δηλώσουν ότι οι τιμές που καθορίζει δεν πληρούνται. Η ITU δεν ορίζει σαφώς τα ελάχιστα απαιτούμενα ποσοστά, ούτε απαιτεί μέσες τιμές, ούτε διασαφηνίζει τους τρόπους των διεπαφών που χαρακτηρίζονται ως 3G. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν διάφοροι αόριστοι ρυθμού δεδομένων που πωλούνται ως 3G στην αγορά.

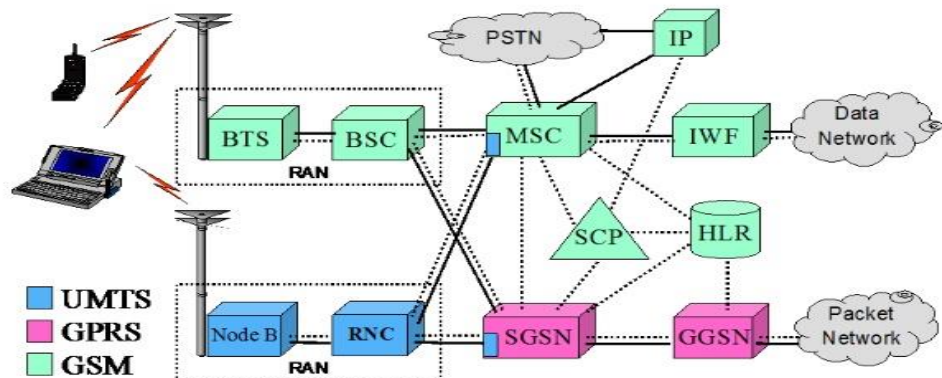
Επιπλέον, τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια από τους προκατόχους τους. Επιτρέποντας στον UE να επαληθεύει το δίκτυο στο οποίο συνδέεται, ο χρήστης μπορεί να είναι βέβαιος ότι το δίκτυο είναι το επιδιωκόμενο και όχι ένα παραστατικό. Εκτός από την ασφάλεια των υποδομών δικτύου 3G, προσφέρεται ασφάλεια από άκρο σε άκρο όταν προσπελάζονται πλαίσια εφαρμογής όπως το IMS. Το εύρος ζώνης και οι πληροφορίες θέσης που είναι διαθέσιμες σε συσκευές 3G δημιουργούν εφαρμογές που δεν ήταν προηγουμένως διαθέσιμες σε χρήστες κινητών τηλεφώνων. Μερικές από τις εφαρμογές αυτές είναι οι εξής:

- Global Positioning System(GPS)
- Υπηρεσίες με βάση την τοποθεσία
- Κινητή τηλεόραση
- Τηλεϊατρική
- Βιντεοδιασκέψεις

Το 3G παρόλο που έκανε ένα μεγάλο βήμα στην τεχνολογία και στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών δημιούργησε και μερικά προβλήματα. Η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη και έτσι η ζωή της μπαταρίας των συσκευών άρχισε να πέφτει πολύ πιο εύκολα. Επίσης πολλές φορές υπήρχε μεγάλη καθυστέρηση στην φόρτωση στο δίκτυο λόγω των υψηλών ρυθμών μετάδοσης.

Το επόμενο βήμα στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία ήταν το HSPA. Στο βήμα αυτό συμπεριλαμβάνεται η τεχνολογία HSDPA στην οποία η μετάδοση από τον σταθμό βάσης σε έναν συνδρομητή πραγματοποιείται με 5 φορές μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με αυτή στο UMTS και 15 φορές πιο γρήγορα από το GPRS. Η τεχνολογία HSDPA βασίζεται στο γεγονός ότι αντί να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά dedicated channels για την μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιούμε ένα downlink shared channel(DSCH) το οποίο το μοιράζονται οι συνδρομητές για την μετάδοση των πακέτων. Το κανάλι αυτό έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. [6]

3G Network Architecture



43

Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική δικτύων 3G(cdg.org)

2.7 Δίκτυα 4^{ης} γενιάς(4G)

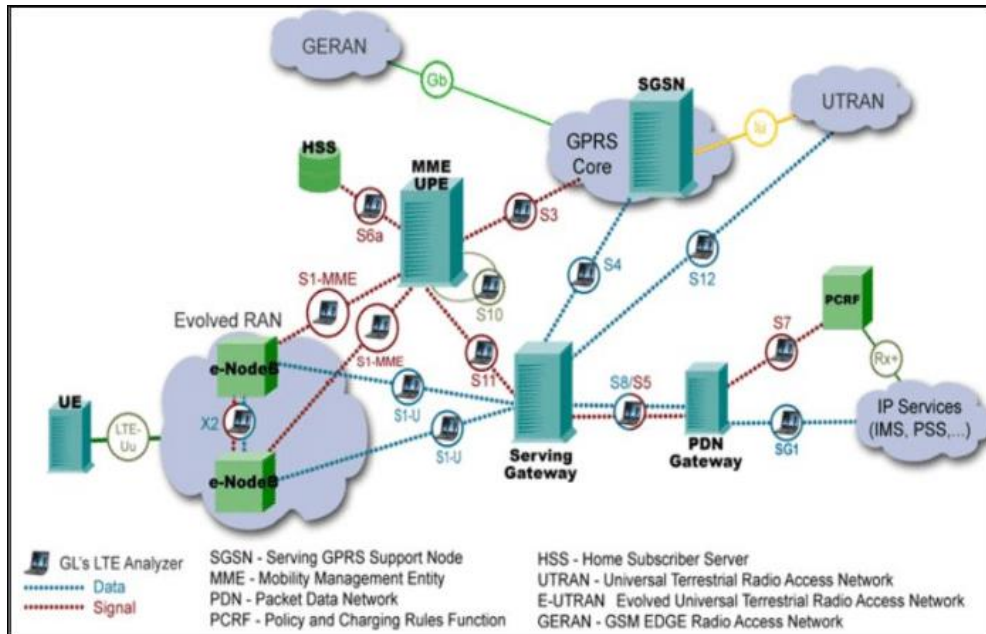
Στις αρχές του 2001 υπήρξαν οι πρώτες συζητήσεις και υποθέσεις για τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς από πολύ μεγάλες εταιρείες της βιομηχανίας. Από αυτή την περίοδο ήταν συμφωνημένο από όλους ότι η νέα γενιά δικτύων θα είναι μία εξέλιξη και όχι μία επανάσταση όπως ήταν οι προηγούμενες γενιές. Το 2004 ήταν και η χρονιά που άρχισε να παίρνει σχήμα αυτή η ιδέα ξεκινώντας από την πρώτη LTE τεχνική λεπτομέρεια, R8. Η ολοκλήρωση ήρθε το 2008 και παρουσιάστηκε από την 3GPP, την ίδια ομάδα που είχε παρουσιάσει την τεχνική λεπτομέρεια WCDMA για τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς. Το 2009 η TeliaSonera ξεκίνησε τις πρώτες LTE υπηρεσίες κινητών παγκοσμίως στην Στοκχόλμη και το Όσλο, έχοντας ως παρόχους του εξοπλισμού δικτύου την Sony Ericsson και την Huawei. [8]

Στην συγκεκριμένη γενιά δικτύων τέθηκαν κάποια πρότυπα για τις απαιτήσεις του 4G όπως η μέγιστη ταχύτητα 4G υπηρεσιών στα 100Mbit/s όταν βρισκόμαστε σε αυτοκίνητο ή κάποιο μεταφορικό μέσο και 1Gbit/s για πεζούς και για ακίνητους χρήστες. Το 4G όχι μόνο μας έδωσε την δυνατότητα να ξεπεράσουμε τις υπηρεσίες του 3G αλλά μας έδωσε και μία ευρυζωνική πρόσβαση στο δίκτυο μέσω των κινητών τηλεφώνων. Επίσης σε σχέση με το 3G υπήρξε αύξηση στην χωριτικότητα του δικτύου, στον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και στην καθυστέρηση.

Η ολοκλήρωση του 4G συστήματος επιτεύχθηκε με την τεχνολογία Long Term Evolution(LTE). Οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν είναι οι εξής:

- LTE Standard
- Multiple Inputs-Multiple Outputs

- Orthogonal frequency-division multiplexing
- Orthogonal frequency-division multiple access
- Worldwide Interoperability for Microwave Access

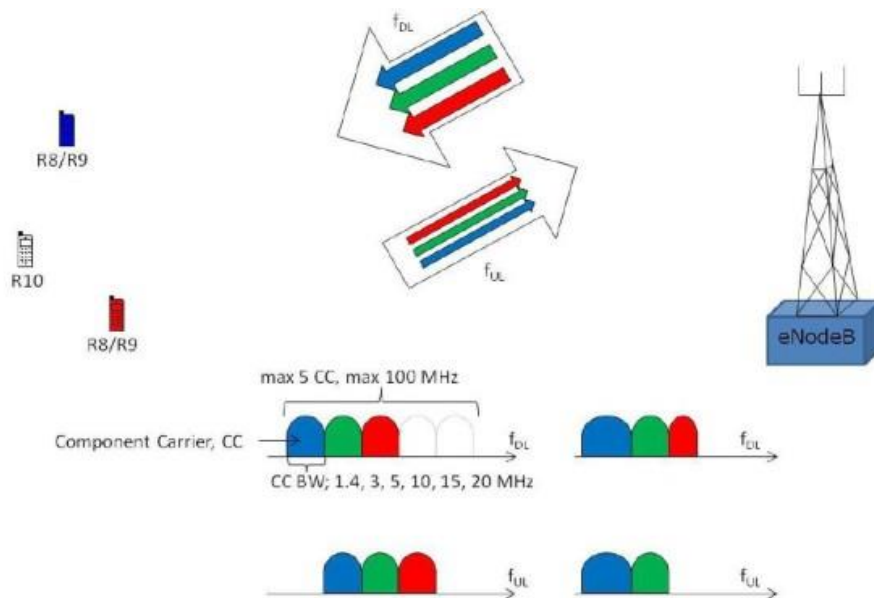


Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική δικτύων LTE(researchgate.net)

Υπήρχε ένας μεγάλος στόχος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και αυτός ήταν η δημιουργία ενός παγκόσμιου συστήματος κινητής επικοινωνίας με τα ίδια πρότυπα. Αυτό τον στόχο κατάφερε να πετύχει η 3GPP(3rd Generation Partnership Project), ένας παγκοσμίως γνωστός οργανισμός τηλεπικοινωνιών. Η 3GPP έθεσε τα πρότυπα για την τεχνολογία LTE και υποσχέθηκε ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων πάνω από 300Mbit/s για downlink με MIMO κεραιές 4x4 και 75Mbit/s για uplink με μία απλή κεραιά για κάθε 20MHz φάσματος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του 4G είναι κυρίως η αποδοτικότητα του φάσματος του συστήματος, η μεγαλύτερη χωρητικότητα του δικτύου και η μεγαλύτερη ποιότητα υπηρεσιών με σκοπό την υποστήριξη καινούργιων τεχνολογιών όπως είναι τα HD video και mobile television, υπηρεσίες παιχνιδιών και το Cloud. Το επόμενο βήμα ήταν μία εξέλιξη της τεχνολογίας LTE και ονομάστηκε LTE-A(Advanced). Στην τεχνολογία αυτή συναντάμε για πρώτη φορά την συνάθροιση φορέα(carrier aggregation) η οποία σχεδιάστηκε για να πολλαπλασιάσει το εύρος ζώνης των LTE

συνδέσεων αφήνοντας τους συνδρομητές να κατεβάζουν δεδομένα από διαφορετικές ζώνες δικτύου ταυτόχρονα. [1]



Εικόνα 6: Τεχνολογία LTE-A

2.8 Δίκτυα 5^{ης} γενιάς(5G)

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) καθώς και οι νέες λειτουργίες και τεχνολογίες που φέρουν μαζί τους είναι υψίστης σημασίας και επακόλουθα αποτελούν το κύριο θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αυτό επιτάσσει την αναλυτικότερη ανάπτυξη τους σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων. Τα δίκτυα 5G είναι ακόμα και αυτή την στιγμή σε επίπεδα έρευνας και ανακάλυψης καινούργιων χαρακτηριστικών.



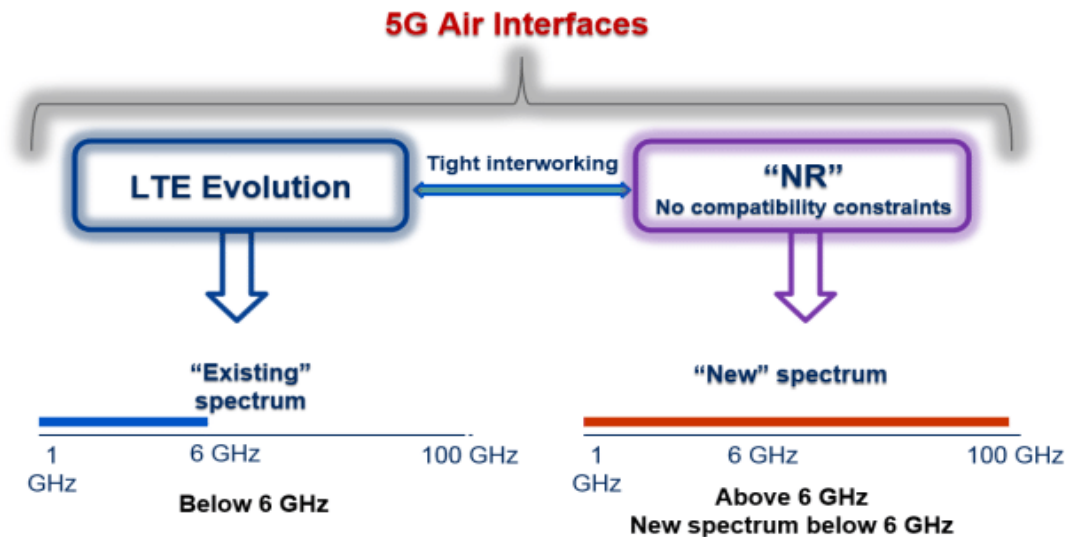
Εικόνα 7: 5G(investors.com)

Τη σημερινή εποχή οι συνδρομητές έχουν ανάγκη για καλύτερη κατανάλωση μπαταρίας, για βελτιωμένη περιοχή κάλυψης καθώς και για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Το 5G ήρθε για να υλοποιήσει τις ανάγκες των συνδρομητών όπως:

- Ταχύτητα μετάδοσης που ξεπερνά το 20Gbps με ένα μέσο όρο ρυθμού μετάδοσης των 100+ Mbps.
- Τα 5G δίκτυα σχεδιάστηκαν για να παίρνουν το μέγιστο από κάθε bit φάσματος μίας μεγάλης περιοχής, από χαμηλές ζώνες κάτω του 1GHz, από μεσαίες ζώνες μεταξύ του 1 και του 6 GHz καθώς και από υψηλές ζώνες γνωστές και ως millimeter wave.
- Μεγαλύτερη χωρητικότητα περίπου 100 φορές από αυτή των 4G καθώς και μεγαλύτερη αποδοτικότητα δικτύου.
- Μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης περίπου στο 1ms.
- Παρέχει μία πλατφόρμα που μόνο μπορεί να εκτοξεύσει την εμπειρία των συνδρομητών αλλά και να υποστηρίξει πρωτοφανής υπηρεσίες όπως το IoT.

Τα δίκτυα 5G στηρίζονται στην μέθοδο OFDM(Orthogonal frequency-division multiplexing), μία μέθοδο διαίρεσης ενός ψηφιακού σήματος σε διάφορα κανάλια για την αποφυγή παρεμβολών την οποία θα αναλύσουμε περισσότερο και σε επόμενο κεφάλαιο. Χρησιμοποιεί 5G NR(New Radio) όπου είναι μία καινούργια διεπαφή αποκλειστικά για το 5G.

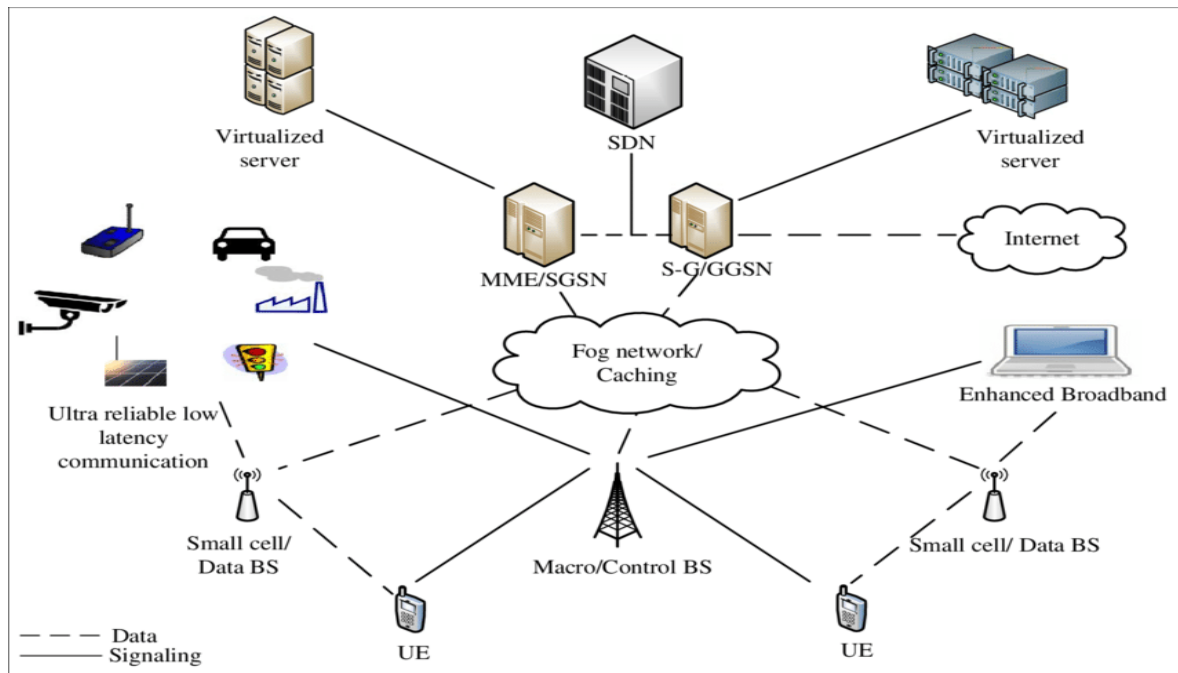
Η συγκεκριμένη διεπαφή σχεδιάστηκε από το μηδέν έχοντας ως παράδειγμα τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες LTE για να υποστηρίξει την ποικιλία των υπηρεσιών, των συσκευών και της ανάπτυξης που θα επιφέρουν τα δίκτυα 5G. [9]



Εικόνα 8: Εξέλιξη LTE-NR διασυνδέσεις(researchgate.net)

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς παίζουν σημαντικό ρόλο και στην παγκόσμια ανάπτυξη. Με τον ερχομό των νέων αυτών δικτύων άνοιξαν 22 εκατομμύρια νέες θέσεις εργασίας, δαπανήθηκαν 2.1 τρισεκατομμύρια δολάρια σε GDP ανάπτυξη και 13.2 τρισεκατομμύρια δολάρια της παγκόσμιας οικονομικής παραγωγής. Σαφώς καταλαβαίνουμε ότι η επίπτωση των 5G είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των προηγούμενων γενιών.

Η χρήση των δικτύων πέμπτης γενιάς κυμαίνεται περισσότερο σε τρεις βασικούς τύπους συνδεδεμένων υπηρεσιών όπως είναι η βελτιωμένη κινητή ευρυζωνική σύνδεση, κρίσιμες επικοινωνίες και στο Internet of Things. Το 5G προορίζεται να συνδέσει τεράστιο αριθμό ενσωματωμένων αισθητήρων σχεδόν στα πάντα μέσω της δυνατότητας μείωσης των ποσοστών δεδομένων, της ισχύος και της κινητικότητας παρέχοντας εξαιρετικά λιτές και χαμηλού κόστους λύσεις συνδεσιμότητας. Επίσης ένα μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων είναι ότι έχουν σχεδιαστεί για να είναι συμβατά σε τυχόν νέες υπηρεσίες που είναι άγνωστες έως σήμερα.



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική 5G κυψελοειδών δικτύων(researchgate.net)

Είναι πολύ σημαντικό και θα αναλύσω λίγο περισσότερο την αρχιτεκτονική πάνω στην οποία στηρίζονται τα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Η 3GPP παρέχει ολοκληρωμένο σύστημα προσδιορισμού της αρχιτεκτονικής των 5G δικτύων που είναι πολύ πιο προσανατολισμένη στις υπηρεσίες από ότι στις προηγούμενες γενιές. Οι υπηρεσίες παρέχονται μέσω ενός κοινού πλαισίου για λειτουργίες δικτύου που επιτρέπει την χρήση αυτών των υπηρεσιών. Η αρθρωτότητα, η επαναχρησιμοποίηση και η αυτοσυγκράτηση των λειτουργιών του δικτύου έχουν σχεδιαστεί ακριβώς για τα δίκτυα 5G. [10]

Ένα σημαντικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής είναι το Multi-Access Edge Computing(MEC). Είναι μία εξέλιξη στο cloud computing που φέρνει τις εφαρμογές από τα κεντρικά κέντρα δεδομένων στις άκρες του δικτύου και προφανώς πιο κοντά στους χρήστες και τις συσκευές τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός συντομότερου δρόμου στην μετάδοση ανάμεσα στον χρήστη και τον host. Τα χαρακτηριστικά του MEC είναι η μικρή καθυστέρηση, το μεγάλο εύρος ζώνης και η άμεση πρόσβαση σε πληροφορίες Radio Access Network κάτι που ξεχωρίζει τα 5G δίκτυα από τους προκάτοχούς τους.

Το Network Function Virtualization(NFV) διαχωρίζει το λογισμικό από το υλικό αντικαθιστώντας διάφορες λειτουργίες δικτύου όπως τα firewalls, τους εξισσοροπητές φορτίου και τους δρομολογητές με εικονικές παρουσίες που τρέχουν σαν λογισμικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε λιγότερα κομμάτια υλικών στοιχείων τα οποία είναι και πιο ακριβά και μπορεί ακόμα να επιταχύνει τους χρόνους εγκατάστασης. Το NFV μπορεί να εντοπίσει άλλες 5G προκλήσεις μέσω

virtualize computing, storage και network που είναι προσαρμοσμένες με βάση τις εφαρμογές και τα τμήματα πελατών.

Η έννοια του NFV επεκτείνεται στο RAN μέσω της αποσυγκέντρωσης δικτύου που προωθείται από συμμαχίες όπως το O-RAN. Αυτό επιτρέπει ευελιξία και δημιουργεί νέες ευκαιρίες ανταγωνισμού, παρέχει ανοιχτές διεπαφές και ανάπτυξη ανοιχτού κώδικα έτσι ώστε να διευκολύνει την ανάπτυξη νέων δυνατοτήτων και τεχνολογίας. Η εισαγωγή των διεπαφών eCPRI παρουσιάζει μία πιο οικονομική λύση, καθώς λιγότερες διεπαφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή πολλαπλών φορέων 5G. Το eCPRI έχει ως στόχο να είναι μια τυποποιημένη διεπαφή για 5G.

Το κλειδί για να έχουμε την πλήρης δυναμική της 5G αρχιτεκτονικής είναι το network slicing. Αυτή η τεχνολογία προσθέτει μία νέα διάσταση στο NFV αφήνοντας πολλά λογικά δίκτυα ταυτόχρονα να τρέχουν στην κορυφή ενός κοινόχρηστου φυσικού δικτύου υποδομής. Η τεχνολογία αυτή είναι πολύ χρήσιμη για εφαρμογές όπως το IoT όπου ο αριθμός χρηστών θα είναι πολύ μεγάλος αλλά το γενικό εύρος ζώνης μικρό. Με την τεχνολογία αυτή το κόστος, η διαχείριση των πόρων και η ευκινησία στο δίκτυο μπορούν όλα να είναι στο ιδανικό επίπεδο. [11]

Τέλος, άλλη μία τεχνολογία που βοήθησε στην επιτυχία των 5G δικτύων είναι το beamforming. Συμβατικοί σταθμοί βάσης μεταδίδουν σήμα σε πολλές κατευθύνσεις χωρίς να δίνουν σημασία στην θέση των χρηστών ή των συσκευών. Με την χρήση των πολλαπλών εισόδων-εξόδων(MIMO) οι συστοιχίες από δεκάδες μικρές κεραιές συνδυάζονται σε έναν ενιαίο σχηματισμό, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της πιο αποτελεσματικής διαδρομής μετάδοσης σε κάθε χρήστη, ενώ μεμονωμένα πακέτα μπορούν να σταλούν σε πολλαπλές κατευθύνσεις και στη συνέχεια να χαρτογραφηθούν για να φτάσουν στον τελικό χρήστη με μία προκαθορισμένη σειρά.

Έχοντας αναφερθεί στα κυριότερα μέρη της αρχιτεκτονικής των 5G δικτύων, σημαντικό ρόλο παίζει και η ασφάλεια αυτών. Το 5G προσφέρει τεράστια απόδοση και ποικιλία εφαρμογών μέσω πόρων που βασίζονται στο cloud, μέσω της εικονοποίησης, του network slicing και άλλων αναδυόμενων τεχνολογιών. Με τέτοιες αλλαγές έρχονται και νέα προβλήματα ασφάλειας και εμφανίζονται περισσότερες επιφάνειες επιθέσεων. Η ασφάλεια των 5G δικτύων βασίζεται στις προηγούμενες γενιές κινητής τεχνολογίας αλλά όλο και περισσότεροι κίνδυνοι υπάρχουν με την αύξηση των χρηστών. Μεταξύ των βελτιωμένων λειτουργιών ασφάλειας που περιγράφονται λεπτομερώς από τα πρότυπα 3GPP είναι ο ενοποιημένος έλεγχος ταυτότητας για την αποσύνδεση του ελέγχου ταυτότητας από σημεία πρόσβασης, τα επεκτάσιμα πρωτόκολλα ελέγχου ταυτότητας για την στέγαση ασφαλών συναλλαγών, οι ευέλικτες πολιτικές ασφαλείας για την αντιμετώπιση περισσότερων περιπτώσεων χρήσης και μόνιμων αναγνωριστικών συνδρομητών για την διασφάλιση της ιδιωτικής ζωής στο δίκτυο.



Εικόνα 10: Ασφάλεια 5G(techblog.comsoc.org)

Στα χρόνια των 5G δικτύων το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης και το ασύρματο backhaul πρέπει να ενσωματωθεί ως ένα με την ίδια τεχνολογία και μία κοινή “δεξαμενή” φάσματος. Η τεχνολογία επικοινωνίας Device-to-Device μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφορτιστεί η κυκλοφορία, μπορεί να επεκτείνει τις δυνατότητες και να ενισχύσει την συνολική αποδοτικότητα του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Για να μην έχουμε υψηλά επίπεδα παρεμβολών μεταξύ των συνδέσεων η επικοινωνία D2D πρέπει να είναι κάτω από τον έλεγχο του δικτύου.

Από την αρχή της κινητής επικοινωνίας η ζεύξη με διαίρεση συχνοτήτων(FDD) ήταν ο κυρίαρχος τρόπος ζεύξης. Στα δίκτυα πέμπτης γενιάς η ζεύξη με διαίρεση χρόνου(TDD) παίζει πολύ πιο σημαντικό ρόλο για τις υψηλές ζώνες συχνοτήτων και ιδιαίτερα αυτές που είναι πάνω από τα 10GHz ενώ η FDD χρησιμοποιείται μόνο για τις χαμηλές ζώνες. Περισσότερη ανάλυση για τις ζεύξεις και τους τρόπους που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα 5G υπάρχει παρακάτω. [12] [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Τεχνολογίες πέμπτης γενιάς δικτύων

3.1 Προβλήματα διαχείρισης φάσματος

3.1.1 Παρεμβολές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Τα προβλήματα που δημιουργούνται από τις παρεμβολές στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας άρχισαν να υπάρχουν από τις αρχές του 1980 στην περίπτωση της πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας. Οι παρεμβολές είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας απόδοσης των περισσότερων ασύρματων δικτύων. Οι παρεμβολές στα σήματα στα κυψελοειδή δίκτυα μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που προκαλούνται από φυσικά φαινόμενα και δεν μπορούμε να τις εξαλείψουμε και σε αυτές που προκαλούνται από χειροποίητα σήματα τα οποία και μπορούμε να ελέγξουμε. Η απόδοση των κυψελοειδών δικτύων είναι συνδεδεμένη με το SINR το οποίο είναι ο λόγος του σήματος προς την παρεμβολή/θόρυβο. Ο τύπος του SINR είναι ο $SINR = S/W+I$, όπου το S είναι η επιθυμητή δύναμη του σήματος, W είναι ο θόρυβος και I είναι η παρεμβολή.

Το πρώτο είδος παρεμβολών που θα αναλύσουμε είναι η παρεμβολή ίδιων καναλιών(CCI). Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που προκαλούν αυτού του είδους τις παρεμβολές. Πιο συγκεκριμένα, αυτό του είδους οι παρεμβολές δημιουργούνται όταν ο πομποδέκτης που βρίσκεται σε ένα σταθμό βάσης εκπέμπει σήμα στην ίδια συχνότητα με τον πομποδέκτη που βρίσκεται σε άλλο σταθμό βάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εύρος ζώνης του ενός να καλύπτει του άλλου. Στις κυψελοειδείς κινητές επικοινωνίες το φάσμα των συχνοτήτων είναι ένας πολύτιμος πόρος που χωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενες ζώνες φάσματος και για αυτό δημιουργείται αυτό το πρόβλημα. Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι πρόκειται περισσότερο για ένα είδος συμφόρησης και όχι ακριβώς παρεμβολής. Το CCI αναγκάζει άλλες συσκευές να διακόψουν την μετάδοση τους και να περιμένουν στην ουρά ώστε να ολοκληρωθεί η πρώτη συσκευή.

Το δεύτερο είδος είναι οι παρεμβολές γειτονικών καναλιών(ACI), που προκαλούνται από γειτονικό κανάλι που χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με αυτό. Ο κακός έλεγχος συχνότητας, ο κακός συντονισμός και το ανεπαρκές φιλτράρισμα είναι οι κυριότεροι λόγοι εμφάνισης αυτών των παρεμβολών. Σε αυτού του είδους τις παρεμβολές έχουμε δύο υποθέσεις που πρέπει να ελέγξουμε. Την υπόθεση της παρεμβολής εντός ζώνης και αυτή της παρεμβολής εκτός ζώνης. Στην πρώτη περίπτωση το εύρος ζώνης του παρεμβαλλόμενου σήματος πέφτει μέσα στο εύρος ζώνης του σημαντικού σήματος. Αντίθετα στην άλλη περίπτωση το εύρος ζώνης του

παρεμβαλλόμενου σήματος πέφτει έξω από το εύρος ζώνης του σημαντικού σήματος. Για την αντιμετώπιση αυτών των παρεμβολών χρησιμοποιούνται φίλτρα με υψηλή διακριτική ικανότητα τα οποία όμως είναι ακριβά και η υλοποίηση της συνάρτησής τους είναι εξαιρετικά δύσκολη. Για αυτούς τους λόγους ο μοναδικός τρόπος αντιμετώπισης αυτών των παρεμβολών είναι η ανάθεση καναλιών στις κυψέλες ώστε να αποφεύγεται η χρήση γειτονικών συχνοτήτων σε γειτονικές κυψέλες.

Στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας υπάρχει μία μορφή παρεμβολής που ονομάζεται near end to far end ratio. Αυτού του είδους οι παρεμβολές εμφανίζονται μόνο στα δίκτυα κινητής τηλεπικοινωνίας. Εμφανίζεται όταν η απόσταση μεταξύ του τερματικού και του σταθμού βάσης είναι τόσο κοντινή που υπάρχει περίπτωση κάλυψης του σημαντικού σήματος από ένα άλλο σήμα μετάδοσης. Αυτό συμβαίνει όταν ένας δέκτης είναι μακριά από τον σταθμό βάσης του σε μία απόσταση d_a και κοντά σε έναν άλλο σε απόσταση d_b και ισχύει $d_a > d_b$. Σε αυτή την κατάσταση το πρόβλημα που θα υπάρξει είναι ότι οι δύο πομποί θα μεταδώσουν σαν ένας με την ίδια ενέργεια και συχνότητα και για αυτό τον λόγο το σήμα που θα φτάσει στον τερματικό από την επιθυμητή πηγή έχει καλυφθεί από τα ανεπιθύμητα σήματα που έφθασαν. Οι παρεμβολές near end to far end ratio λέγεται αλλιώς και διαφορά ισχύος εξαιτίας του χαμένου μονοπατιού ανάμεσα στην περιοχή λήψης και τους δύο σταθμούς βάσης. [14]

3.1.2 Παρεμβολές στα συστήματα OFDM

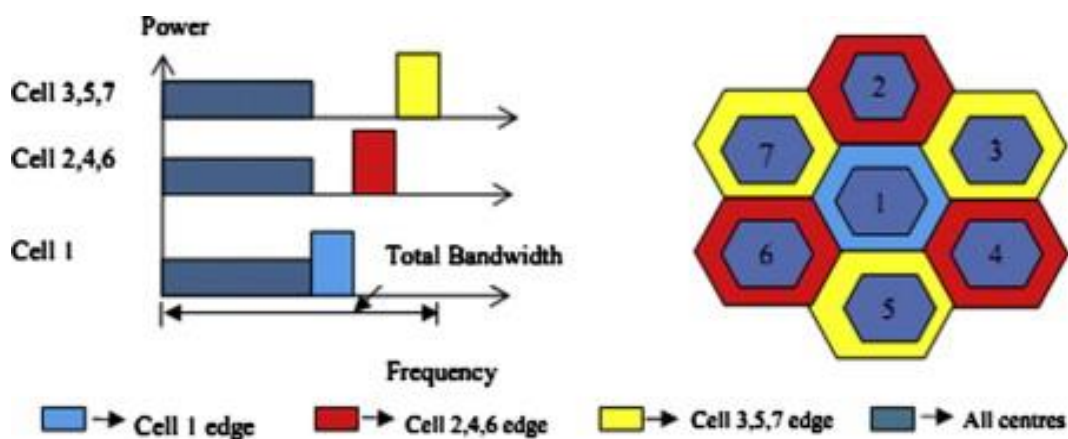
Στα συστήματα OFDM ένας μεγάλος στόχος είναι να μπορέσουμε να επαναχρησιμοποιήσουμε τις διαθέσιμες συχνότητες σε γειτονικά κελιά. Η βασική μονάδα για τον προγραμματισμό και την αποδοτικότητα των πόρων είναι το Resource Block (RB). Στα δίκτυα LTE όλοι οι σταθμοί βάσης μεταδίδουν σε όλα τα διαθέσιμα RBs χρόνου-συχνότητας ταυτόχρονα. Επιπλέον, τα κελιά στα δίκτυα LTE έχουν μικρότερη δέσμη λόγω του περιορισμού της χωρητικότητας από τους τερματικούς. Η αποδοτικότητα του συστήματος προσδιορίζεται από την πιθανότητα σύγκρουσης και από τις επιπτώσεις της σύγκρουσης στο SINR. Οι τεχνικές των ICIC έρχονται να αραιώσουν το πρόβλημα με την υιοθέτηση συγκεκριμένων προτιμήσεων γειτονικών κελιών για διαφορετικό υποσύνολο RB ή με τον περιορισμό της ενέργειας των συγκρουόμενων RB.

Στα συστήματα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς υπήρχε μία ιδέα για το Power Control στην οποία η μετάδοση ενέργειας για τους χρήστες είναι συνδεδεμένη με την απόσταση από τον σταθμό βάσης. Για τον λόγο αυτό η μετάδοση ενέργειας είναι συνδεδεμένη με τις απώλειες μετάδοσης για τον σκοπό της ενέργειας που έχει ληφθεί από τον σταθμό

βάσης. Με την λύση αυτή δεν έχουμε βελτιστοποίηση της συνολικής κίνησης αλλά έχουμε μία σίγουρη και δίκαιη λύση για όλους τους cell edge χρήστες.

Στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς προτείνεται το Fractional Power Control. Λόγω αυτού, μόνο ένα μέρος της απώλειας διάδοσης είναι ισορροπημένο. Η λύση αυτή μας δίνει μία βελτίωση της τάξης του 20% στους τομείς κίνησης για περιπτώσεις κελιών με δέσμες από 500m έως 1000m και εύρος ζώνης 10MHz.

Το FFR διαιρεί το χρήσιμο εύρος ζώνης σε υποπεριοχές και τις χρησιμοποιεί σαν ένα κελί με έναν τρόπο που η παρεμβολές εξαλείφονται. Στα LTE OFDM συστήματα το FFR μειώνει τα διαθέσιμα Resource Blocks που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και έτσι η ποιότητα των υπηρεσιών των εφαρμογών με μεγάλο εύρος ζώνης επηρεάζονται. Το AFRF προσαρμόζει την απόδοση FFR σε σχέση με το επίπεδο παρεμβολής και προσαρμόζει τους χρήστες σε μία υποπεριοχή βασισμένη στους υπολογισμούς του δείκτη ποιότητας καναλιού(CQI). [15]



Εικόνα 11: Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας(FFR)(Ite-son.blogspot.com)

Υπάρχουν κάποιες τεχνικές με τις οποίες μπορούμε να μειώσουμε τις παρεμβολές. Σε επίπεδο χώρου συγκεκριμένα κάποιες τεχνικές είναι οι εξής:

- Πολυπλεξία χώρου(Spatial Multiplexing)
- Cyclic delay diversity(CCD)
- MIMO σε UpLink
- Space Frequency Block Coding σε DownLink

Στο DownLink πολλοί σταθμοί βάσης μεταδίδουν ένα ή περισσότερα MIMO μονοπάτια στο UE ενώ στο UpLink, η μετάδοση ενός UE μπορεί να ληφθεί από έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης. Μία ακόμα τεχνική είναι η ακύρωση παρεμβολής(IC). Η κύρια ιδέα αυτής της τεχνικής είναι η αναγέννηση των παρεμβολών και αμέσως μετά η αφαίρεση τους από το επιθυμητό σήμα. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την αποθήκευση των ληφθέντων σημάτων για περαιτέρω επεξεργασία δεδομένων.

Η πιο εξελιγμένη τεχνική με τα μεγαλύτερα αποτελέσματα στην χωρητικότητα απαιτεί την ακύρωση των παρεμβολών από άγνωστα σύμβολα. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας, οι τεχνικές IC χρησιμοποιούνται στους σταθμούς βάσης και συγκεκριμένα στο UpLink. Η Organized Inter-BS Access υλοποιείται σχετικά με το φάσμα, τον χρόνο και τον χώρο επαναχρησιμοποίησης των RBs ανάμεσα στους σταθμούς βάσης. Μία ακόμα τεχνική μεταξύ ακμών σε ένα στρώμα πολλαπλών κελιών ονομάζεται organized beam hopping(OBH). Με αυτή την τεχνική πραγματοποιείται μία ψεύτικη τυχαία αλλαγή μεταξύ μίας οργανωμένης ποσότητας ημι-ορθογωνίων διαγραμμάτων που χρησιμοποιούνται από γειτονικούς σταθμούς βάσης με στόχο την μεγιστοποίηση της κίνησης από την επαναχρησιμοποίηση των RBs και την μείωση των παρεμβολών μεταξύ των σταθμών βάσης. Η απόδοση αυτής της τεχνικής δείχνει να είναι πολύ καλύτερη από αυτή του απλού beamforming και του opportunistic beamforming με αρκετά προβλήματα βέβαια στα θέματα πολυπλοκότητας.

3.2 Τεχνικές αντιμετώπισης προβλημάτων παρεμβολών

3.2.1 Intermodulation methods

Στην προηγούμενη ενότητα αναφερθήκαμε στα προβλήματα διαχείρισης του φάσματος και συγκεκριμένα στις παρεμβολές που δημιουργούνται στα κυψελοειδή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αλλά και στα συστήματα OFDM συγκεκριμένα. Υπάρχουν τρόποι με τους οποίους μπορούμε να αντιμετωπίσουμε τις παρεμβολές αυτές και να μειώσουμε τα προβλήματα που μας δημιουργούν. Θα χωρίσουμε τις μεθόδους αυτές με βάση τον τρόπο που επεμβαίνουν στις παρεμβολές.

Η πρώτη κατηγορία είναι οι λύσεις διαμόρφωσης. Η διαμόρφωση πλάτους των σημάτων που περιέχουν δύο ή περισσότερες συχνότητες σε ένα σύστημα μη γραμμικό αναφέρεται ως διατροπή(intermodulation). Η διατροπή αυτή μεταξύ των συστατικών συχνοτήτων θα έχει ως αποτέλεσμα πρόσθετα σήματα σε συχνότητες που δεν είναι μόνο αρμονικές συχνότητες, αλλά και στις αθροιστικές συχνότητες των αρχικών συχνοτήτων και σε πολλαπλάσια αυτών. [16] Οι τύποι διαμόρφωσης για γειτονικούς σταθμούς βάσης είναι η reverse Intermodulation(RIM) και η forward intermodulation(FIM). Τα συστατικά της forward intermodulation προκαλούνται

στους δέκτες του θύματος και προκαλούν μεγάλη ανησυχία όταν πέφτουν απευθείας στο απαιτούμενο σήμα. Μία μέθοδος φιλτραρίσματος χρησιμοποιήθηκε στην Γερμανία, από τους Annamalai, Young και Miller το 2010 για την εξάλειψη των στοιχείων FIM. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην γνώση των συνοδευόμενων προδιαγραφών πομποδεκτών και των διαμορφώσεων κεραίας που το καθιστούν ακατάλληλο για δυναμικά περιβάλλοντα.

Οι Guthrie και Hunson το 2005 πρότειναν μία λύση που περιλάμβανε την τοποθέτηση φίλτρου διέλευσης ευέλικτης ζώνης συχνοτήτων μπροστά από ενισχυτές χαμηλού θορύβου δέκτη και μετά από ενισχυτές ισχύος πομπού για ένα σύστημα επικοινωνίας στρατιωτικής μετάβασης συχνότητας. Αυτή η μέθοδος σταματά το μεγάλο σήμα μπλοκαρίσματος μέσω του προ-φιλτραρίσματος του δέκτη και εισάγει μόνο το επιθυμητό σήμα. Ο πομπός μετά το φιλτράρισμα εμποδίζει την είσοδο οποιουδήποτε αντίστροφου σήματος. Επειδή η παραπάνω λύση δεν ήταν εφικτή προτάθηκε μία άλλη από τους Ahmed και Faulkner το 2012 η οποία βασιζόταν στην έννοια της προσαρμοστικής ακύρωσης θορύβου. Η λύση αυτή χρησιμοποιεί έναν πρωταρχικό μετατροπέα εισόδου για την λήψη του επιθυμητού σήματος που έχει καταστρέψει τον θόρυβο και έναν μετατροπέα αναφοράς για την απόκτηση θορύβου που έχει σχέση με τον θόρυβο της αρχικής εισόδου. Η είσοδος αναφοράς φιλτράρεται και αφαιρείται από την κύρια είσοδο για να ληφθεί το επιθυμητό σήμα. Η τεχνική αυτή αξιοποιεί την επίτευξη ενός αρκετά μεγάλου λόγου παρεμβολών προς σήμα στην κεραία αναφοράς τοποθετώντας την κοντά στην παρεμβολή. Αυτό επιτυγχάνει μείωση 48 dB έχοντας επίσης και ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αυτό της προσαρμογής στα σήματα μπλοκαρίσματος σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Οι παραμορφώσεις RIM δημιουργούνται όταν η μετάδοση υψηλής ισχύος από ένα jammer ακτινοβολεί στο σύστημα κεραίας ενός άλλου jammer. Αυτά τα σήματα αναμιγνύονται μαζί στο μη γραμμικό στάδιο εξόδου του PA. Η προσαρμοστική λύση για αυτές τις παραμορφώσεις ταξινομούνται ευρέως σε λύσεις ακροδεκτών και ακύρωσης παρεμβολών με χρήση αναγεννημένων παραμορφώσεων. Η παραδοσιακή λύση τερματικού πομπού περιλαμβάνει την τοποθέτηση πολλαπλών απομονωτών στην έξοδο του PA. Αυτό έχει το πλεονέκτημα της εξασθένισης του αντίστροφου σήματος αλλά προκαλεί απώλεια εισαγωγής για την επιθυμητή προώθηση προς τα εμπρός. Αυτή η λύση επιτυγχάνει μείωση 35 dB αλλά απαιτεί συνεργασία μεταξύ των χειριστών πομπού. [17]

3.2.2 Frequency methods

Η κατανομή συχνότητας σε κυψελοειδή δίκτυα είναι ένα σημαντικό θέμα μεταξύ ερευνητών, μηχανικών βελτιστοποίησης και μαθηματικών. Το διαθέσιμο φάσμα μένει σταθερό. Ως εκ τούτου, το πρόβλημα κατανομής συχνότητας διαμορφώνεται ως πρόβλημα πολλαπλών αντικειμένων, πολλαπλών περιορισμών βελτιστοποίησης όπου, δεδομένου ενός αριθμού σταθμών βάσεων και διαθέσιμων καναλιών,

απαιτείται η εύρεση ενός βέλτιστου σχεδίου συχνότητας που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των καναλιών σε μία γεωγραφική περιοχή. Οι συνήθεις περιορισμοί παρεμβολών στα προβλήματα αυτά είναι: co-channel, co-site και περιορισμοί γειτονικών καναλιών. Οι μέθοδοι λύσης που εφαρμόζονται ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες- τις τεχνικές βελτιστοποίησης και στις ευρετικές τεχνικές αναζήτησης.

Οι διάφορες ευρετικές μέθοδοι περιλαμβάνουν:

- Greedy algorithms
- Local search (Επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής σκληρής βελτιστοποίησης)
- Tabu search (Χρησιμοποιεί τοπικές μεθόδους αναζήτησης οι οποίες λαμβάνουν μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα και ελέγχουν του άμεσους γείτονες του δηλαδή παρόμοιες λύσεις)
- Simulated annealing (Είναι μία πιθανολογική τεχνική για την προσέγγιση του βέλτιστου όγκου μιας δεδομένης λειτουργίας)
- Genetic algorithms (Αναζήτηση βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγράψουν ως μαθηματικά προβλήματα)
- Artificial neural networks (Αλγοριθμικό κατασκευάσμα το οποίο εμπίπτει στον τομέα της υπολογιστικής νοημοσύνης με στόχο την επίλυση κάποιου υπολογιστικού προβλήματος)
- Ant colony and multi-agent optimization (Πιθανολογική τεχνική βασισμένη στην συμπεριφορά των μυρμηγκιών για την επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων τα οποία αφορούν την εύρεση βέλτιστων μονοπατιών σε γράφους)

Έχουν αναπτυχθεί πολλές ερευνητικές εργασίες για την εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων (Genetic Algorithms) στο πρόβλημα ανάθεσης καναλιών. Η διατύπωση του προβλήματος διατυπώνεται κυρίως ως εξής: δεδομένων n ραδιοκελιών και ενός αριθμού διαθέσιμων καναλιών, απαιτείται η εύρεση της βέλτιστης αντιστοίχισης καναλιών που να ελαχιστοποιεί τις τρεις παρεμβολές και να μεγιστοποιεί τους πόρους και το διαθέσιμο φάσμα. Στους γενετικούς αλγόριθμους, ένας αριθμός εφικτών λύσεων δημιουργούνται τυχαία και δηλώνονται ως γονείς, νέοι απόγονοι δημιουργούνται χρησιμοποιώντας χειριστές μετάλλαξης ή crossover. Οι χειριστές crossover εκτελούν το crossover μεταξύ των γονέων για την ανταλλαγή πληροφοριών με καλύτερη απόδοση, ενώ οι χειριστές μετάλλαξης συνδυάζουν τυχαία μεταλλαξιγόνα με μεμονωμένους γονείς για να σχηματίσουν μία νέα γενιά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί μία βέλτιστη λύση που να ικανοποιεί μία λειτουργία φυσικής κατάστασης που να αξιολογεί την απόδοση της παραγόμενης λύσης. [17]

Simulated annealing είναι μία τεχνική αναζήτησης που μοντελοποιεί τη φυσική διαδικασία ανόπτησης όπου ένας κρύσταλλος ψύχεται από υγρή κατάσταση σε στερεή. Οι ορολογίες που καθορίζουν τις διαδικασίες σε προσομοιωμένη ανόπτηση είναι: αρχική λύση, θερμοκρασία, στρατηγική ψύξης και λειτουργία φυσικής

κατάστασης. Η αρχική λύση είναι μία τυχαία παραγόμενη λύση που καθορίζει το σημείο εκκίνησης του αλγόριθμου αναζήτησης. Η λειτουργία φυσικής κατάστασης είναι μία λειτουργία που μετρά την αποτελεσματικότητα μίας συγκεκριμένης λύσης στο πρόβλημα. Η πιθανότητα αποδοχής μίας λύσης στο χώρο αναζήτησης ελέγχεται από την θερμοκρασία ενώ η στρατηγική ψύξης καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ο αλγόριθμος εξερευνά τον χώρο αναζήτησης.

Ο όρος σμήνος νοημοσύνης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Beni και Wang το 1993 για να αναφερθεί στην συλλογική συμπεριφορά αποκεντρωμένων αυτο-οργανωμένων συστημάτων, τεχνικών ή φυσικών αλληλεπιδράσεων τοπικά με το περιβάλλον τους, προκαλώντας έτσι ένα συνεκτικό λειτουργικό παγκόσμιο μοτίβο. Οι αλγόριθμοι ant-colony είναι μαθηματικοί αλγόριθμοι που μιμούνται την συμπεριφορά των μυρμηγκιών κατά την αναζήτηση τροφής. Οι μαθηματικοί και οι λάτρεις της βελτιστοποίησης διαμορφώνουν την έξυπνη συμπεριφορά των μυρμηγκιών όταν αναζητούν μία βέλτιστη διαδρομή μεταξύ της πηγής τροφίμων και της φωλιάς τους, ενώ βασίζονται σε ανατροφοδότηση από το περιβάλλον τους μέσω της απόθεσης φερομόνων κατά μήκος πιθανών διαδρομών προς την πιθανή πηγή τροφής. Χρησιμοποιείται σε προβλήματα βελτιστοποίησης που μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα γράφημα. Το πρόβλημα εκχώρησης καναλιού διατυπώνεται ως εξής: Δεδομένων n ραδιοκελιών, ένα γράφημα με S κορυφές και E ακμές μπορεί να κατασκευαστεί για να αντιπροσωπεύει τον προβληματικό τομέα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης σε προβλήματα εκχώρησης συχνότητας έγκειται στην ανταπόκριση και στην προσαρμογή της στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κυκλοφορίας και στην απόδοση του δικτύου.

Ο όρος τεχνικά νευρωνικά δίκτυα αναφέρεται σε τεχνικά συστήματα που αντλούν έμπνευση από την μέθοδο επεξεργασίας πληροφοριών από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα. Έννοιες όπως νεύρωνες, άξονες, δενδρίτες, συνάψεις κλπ χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση ενός υπολογιστικού συστήματος επεξεργασίας πληροφοριών. Στην εποπτευόμενη μάθηση, το νευρωνικό δίκτυο εκτελεί υπολογισμό χαρτογραφώντας πληροφορίες από προηγούμενα δεδομένα σχετικά με το σύστημα που εξετάζεται κάθε φορά. Η μη εποπτευόμενη μάθηση προβάλλει δεδομένα σχετικά με ένα σύστημα σε έναν χώρο N διαστάσεων χρησιμοποιώντας νεύρωνες για να αντιπροσωπεύει τα διαφορετικά στοιχεία δεδομένων. Για την κατανομή φάσματος, εφαρμόζεται συνήθως η μη εποπτευόμενη μαθησιακή προσέγγιση. Ένας νεύρωνας αντιπροσωπεύει ένα κύτταρο και περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ζήτηση των κυττάρων και τις συχνότητες των κυττάρων. Οι νεύρωνες στο δίκτυο διασυνδέονται από μία μαθηματική λειτουργία έτσι ώστε οι περιορισμοί παρεμβολών και οι περιορισμοί ζήτησης να ενσωματώνονται. Η διαδικασία αυτή τρέχει επαναληπτικά έως ότου επιτευχθεί μία ελάχιστη τιμή της ενεργειακής λειτουργίας. [16] [17]

3.3 Συστήματα Orthogonal-Frequency-Division-Multiplexing(OFDM)

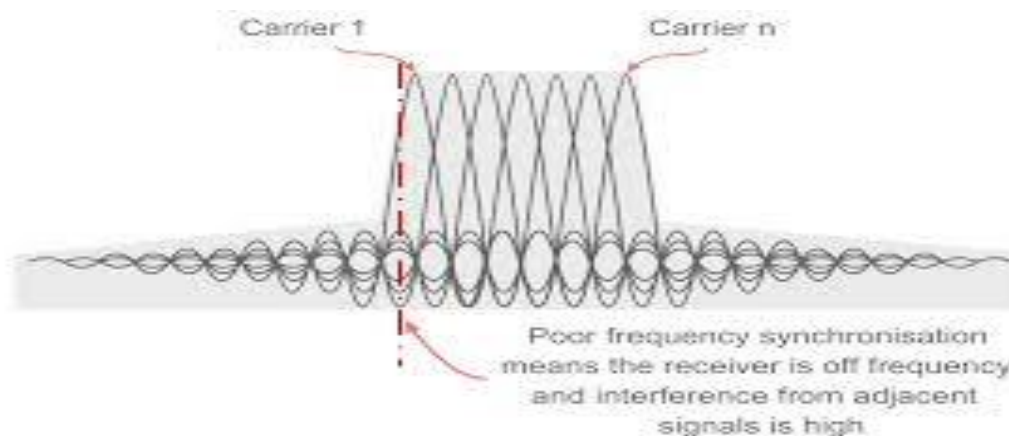
3.3.1 Χαρακτηριστικά και χρήση

Orthogonal Frequency Division Multiplexing είναι μία μορφή σήματος κυματομορφής ή διαμόρφωσης που παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα για τους συνδέσμους δεδομένων. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για πολλά από τα τελευταία ασύρματα συστήματα μεγάλου εύρους ζώνης και μεγάλου ρυθμού δεδομένων όπως το WiFi , οι κυψελοειδείς τηλεπικοινωνίες και άλλα. Το γεγονός ότι το OFDM χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό μεταφορέων, όπου ο καθένας μεταφέρει χαμηλού ρυθμού δεδομένα, σημαίνει ότι είναι πολύ ανθεκτικό στα επιλεκτικά αποτελέσματα εξασθένησης, παρεμβολών και διαδρομών παρέχοντας επίσης υψηλό βαθμό φασματικής απόδοσης.

Η χρήση των συστημάτων OFDM και της διαμόρφωσης πολλαπλών μεταφορέων γενικότερα έχει έρθει στο επίκεντρο τα τελευταία χρόνια καθώς παρέχει μία ιδανική πλατφόρμα για ασύρματες μεταδόσεις δεδομένων επικοινωνίας. Παρόλα αυτά η τεχνολογία αυτή εμφανίστηκε για πρώτη φορά την δεκαετία του 60 και 70 κατά την διάρκεια ερευνών νέων μεθόδων μείωσης της παρεμβολής μεταξύ δύο κοντινών καναλιών. Αυτός ήταν και ο κυριότερος λόγος που αναπτύχθηκαν αυτά τα συστήματα. Μερικά από τα πρώτα συστήματα που υιοθέτησαν το OFDM ήταν ψηφιακής μετάδοσης- και σε αυτά το OFDM ήταν έτοιμο να παρέχει μία αξιόπιστη μορφή μεταφοράς δεδομένων πάνω από μία ποικιλία συνθηκών διαδρομής σημάτων. Ένα παράδειγμα ήταν το ψηφιακό ράδιο DAB που εμφανίστηκε στην Ευρώπη και σε άλλες χώρες. Το OFDM χρησιμοποιήθηκε και για ψηφιακές τηλεοράσεις. Αργότερα αυξήθηκε η ισχύς ως αποτέλεσμα της αύξησης των επιπέδων ολοκλήρωσης που επιτρέπουν την χρήση του OFDM στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς που άρχισαν να αναπτύσσονται το 2009. [18]

Το OFDM όπως είπαμε είναι μία μορφή διαμόρφωσης πολλαπλών μεταφορέων. Ένα OFDM σήμα αποτελείται από έναν αριθμό κοντινών μεταφορέων διαμόρφωσης. Όταν μία διαμόρφωση οποιασδήποτε μορφής όπως φωνής, δεδομένων και άλλα, εφαρμόζεται σε έναν μεταφορέα, τότε οι πλευρικές ζώνες απλώνονται και στις δύο πλευρές. Είναι πολύ σημαντικό για έναν δέκτη να μπορεί να λάβει ολόκληρο το σήμα για να είναι σε θέση να αποδιαμορφώσει τα δεδομένα. Για να δούμε πως λειτουργεί το OFDM, είναι πολύ σημαντικό να παρατηρήσουμε τον δέκτη. Αυτό δρα σαν μία τράπεζα από αποδιαμορφωτές, που μεταφράζουν κάθε μεταφορέα σε DC. Το σήμα που θα έχουμε σαν αποτέλεσμα ενσωματώνεται κατά την διάρκεια μίας περιόδου συμβόλων για τον επαναπροσδιορισμό των δεδομένων του μεταφορέα. Ο ίδιος αποδιαμορφωτής αποδιαμορφώνει και τους άλλους μεταφορείς. Καθώς η απόσταση μεταξύ του μεταφορέα ισούται με την αμοιβαιότητα της περιόδου των συμβόλων,

αυτό σημαίνει ότι θα έχουν έναν ολόκληρο αριθμό κύκλων στην περίοδο συμβόλων και έτσι δεν θα υπάρχει συνεισφορά παρεμβολών.



Εικόνα 12: Συγχρονισμός OFDM(electronics-notes.com)

Μία απαίτηση των OFDM συστημάτων μετάδοσης και λήψης είναι ότι πρέπει να είναι γραμμικά. Οποιοδήποτε μή-γραμμικό θα προκαλέσει παρεμβολή μεταξύ των μεταφορέων και παραμόρφωση.

Η παραδοσιακή μορφή για να στείλουμε δεδομένα πάνω από ένα RC είναι να τα στείλουμε σειριακά, δηλαδή το ένα bit μετά το άλλο. Αυτό βασίζεται σε ένα μόνο κανάλι και τυχόν παρεμβολές σε αυτή την μοναδική συχνότητα μπορεί να διαταράξει ολόκληρη την μετάδοση. Εδώ έρχονται τα συστήματα OFDM για να δώσουν μία τελείως διαφορετική προσέγγιση. Τα δεδομένα μεταδίδονται παράλληλα μεταξύ των διαφόρων μεταφορέων εντός του συνολικού σήματος OFDM. Έτσι διαιρώντας σε έναν αριθμό παράλληλων υποσυνόρων, ο συνολικός αριθμός δεδομένων είναι αυτός της αρχικής ροής, αλλά αυτός του κάθε υποσυνόρου είναι πολύ χαμηλότερος και τα σύμβολα απέχουν μεταξύ τους καθώς περνάει ο χρόνος. Αυτό μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων και κάνει πιο εύκολη την λήψη κάθε συμβόλου. Όσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός δεδομένων σε κάθε stream σημαίνει ότι η παρεμβολή είναι αρκετά μειωμένη. Αυτό πετυχαίνεται με το να προσθέσουμε μία "φρουρά" στο σύστημα. Έτσι είμαστε σίγουροι ότι τα δεδομένα λαμβάνονται ως δείγματα μόνο όταν το σήμα είναι σταθερό και κανένα άλλο καθυστερημένο σήμα δεν φθάνει. [19]

3.3.2 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα OFDM συστημάτων

Αφού αναλύσαμε την δομή των συστημάτων OFDM καθώς και την λειτουργία τους μπορούμε να συνοψίσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων τα οποία είναι:

- Πολλαπλοί μεταφορείς κουβαλάνε την ροή πληροφοριών
- Οι υπομεταφορείς αυτοί είναι ορθογώνια ο ένας με τον άλλο
- Ένας “φρουρός” εισέρχεται σε κάθε σύμβολο για να μειώσει την καθυστέρηση του καναλιού και την παρεμβολή στα σήματα.

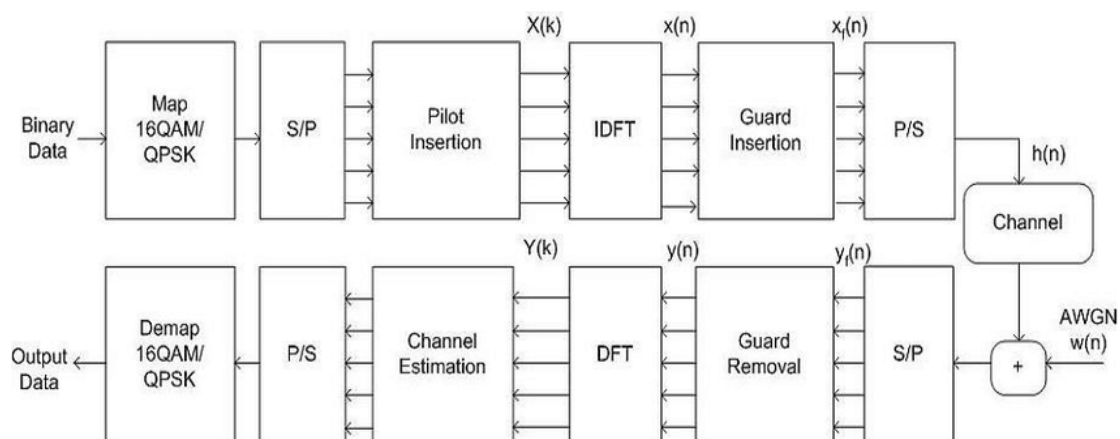
Τα συστήματα OFDM έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλά ασύρματα συστήματα υψηλού ρυθμού μετάδοσης λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που έχουν και αυτά είναι:

- Ασυλία στην επιλεκτική λειτουργία: Πετυχαίνετε μέσω της διαίρεσης του συνολικού καναλιού σε πολλαπλά σήματα.
- Ανθεκτικότητα σε παρεμβολές
- Αποτελεσματική χρήση του φάσματος
- Ανθεκτικότητα στο ISI: Δεν υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ συμβόλων και πλαισίων
- Ανθεκτικότητα στα εφέ στενής ζώνης
- Απλούστερη εξίσωση καναλιών

Η ορθογωνικότητα που παρέχουν τα συστήματα OFDM δίνουν την δυνατότητα τακτοποίησης των υποφορέων με ένα τρόπο που η πλευρική ζώνη διαφορετικών φορέων να διασχίζει η μία την άλλη και τα ακίνητα σήματα να μην επηρεάζονται από παρεμβολές μεταξύ των φορέων. Άλλα οφέλη χρήσης των συστημάτων OFDM είναι:

- Οι πομποί των OFDM είναι φθηνοί επειδή έχουν την δυνατότητα να βάλουν σε εφαρμογή την χαρτογράφηση των bits σε μοναδικούς φορείς με την χρήση του IFFT.
- Το OFDM είναι πιο ανθεκτικό την επιλεκτική εξασθένιση συχνότητας από το σύστημα απλού φορέα.
- Οι δέκτες των OFDM συλλέγουν ενέργεια σήματος στο τομέα της συχνότητας και για τον λόγο αυτό μπορούν να εγγυηθούν ότι δεν θα υπάρξει απώλεια ενέργειας στον τομέα της συχνότητας.
- Στα OFDM μία απλή δομή δέκτη είναι αρκετή για να ανακτήσει δεδομένα από τον πομπό.
- Η ορθογωνικότητα παρέχει μία προστασία που είναι πολύ απλούστερη από αυτή της τεχνικής CDMA.
- Δίνει την δυνατότητα χρήσης της μέγιστης πιθανότητας ανίχνευσης με μία πολύ λογική πολυπλοκότητα.
- Χρησιμοποιείται για μεγάλης ταχύτητας εφαρμογές με μικρό κόστος υπηρεσιών.

- Υποστηρίζει δυναμική πρόσβαση πακέτων.
- Χρησιμοποιεί έξυπνες κεραιές. Εκμεταλλεύεται όλα τα οφέλη από τα συστήματα MIMO.
- Η προσαρμοστική διαμόρφωση και η κατανομή ισχύος είναι πιθανές στα συστήματα αυτά.



Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική συστήματος OFDM(researchgate.net)

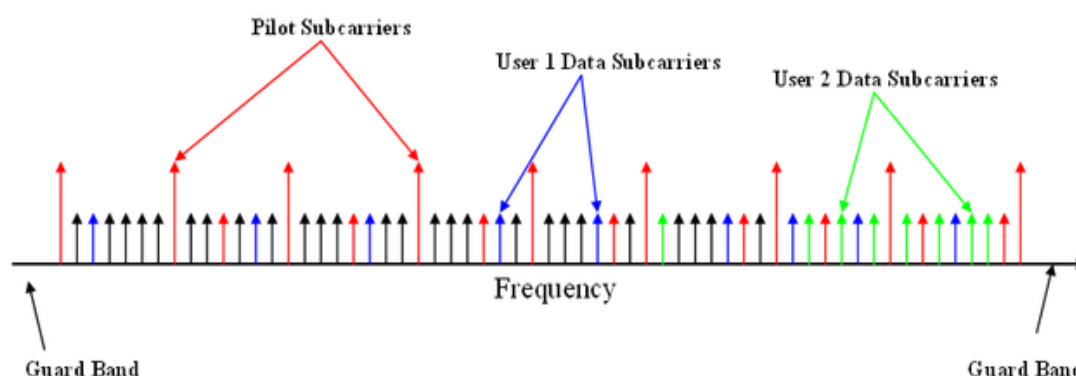
Όπως όλα τα συστήματα έτσι και αυτά δεν έχουν μόνο θετικά χαρακτηριστικά. Τα μειονεκτήματα των OFDM συστημάτων παρόλα αυτά δεν είναι πολλά και είναι τα εξής:

- Υψηλή αναλογία μεταξύ μεγαλύτερης ισχύς και μέσης ισχύς: Αυτό επηρεάζει την απόδοση του ενισχυτή RF, καθώς οι ενισχυτές πρέπει να είναι γραμμικοί και να ικανοποιούν τις μεγάλες παραλλαγές πλάτους και αυτοί οι παράγοντες σημαίνουν ότι ο ενισχυτής δεν μπορεί να λειτουργήσει με υψηλή αποδοτικότητα.
- Ευαίσθητο σε μετατοπίσεις φορέα: Σε αντίθεση με τα συστήματα ενός φορέα αυτά τα συστήματα είναι ευαίσθητα σε μετατοπίσεις συχνότητας φορέα.

Τέλος, τα συστήματα αυτά έχουν κατακτήσει μία θέση στην αγορά των ασύρματων δικτύων. Ο συνδυασμός της μεγάλης χωρητικότητας δεδομένων, της υψηλής αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας στις παρεμβολές σημαίνει πως είναι ιδανικά για εφαρμογές υψηλών δεδομένων που αυτή την στιγμή βρίσκονται στο προσκήνιο. [18]

3.4 Συστήματα Orthogonal-Frequency-Division-Multiple-Access(OFDMA)

Τα συστήματα OFDMA υποστηρίζουν πολλούς χρήστες και είναι μία νέα έκδοση των OFDM συστημάτων. Στα OFDMA μπορούμε να πετύχουμε πολλαπλή πρόσβαση δίνοντας υποσύνολα των υπο-μεταφορέων σε διαφορετικούς χρήστες και έτσι μπορούμε να έχουμε χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για αρκετούς χρήστες. Είναι ένα σχέδιο που χρησιμοποιείται πολύ σε εφαρμογές με υψηλό ρυθμό δεδομένων και υπηρεσίες όπως τα LTE και LTE-A δίκτυα. Προτείνεται επίσης για ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που έχει όπως την δυνατότητα επέκτασης και την τεχνολογία MIMO. Στα συστήματα αυτά όλοι οι διαθέσιμοι υπο-μεταφορείς διαιρούνται και μοιράζονται σε όλους τους χρήστες σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί προσαρμοστικός χρήστης στην εκχώρηση υποφορέα και επιπλέον αν η ανάθεση είναι γρήγορη βελτιώνει τις δυνατότητες των OFDM στις παρεμβολές γρήγορης εξασθένισης και καναλιού-καναλιού.



Εικόνα 14: OFDMA υπομεταφορείς(microwavejournal.com)

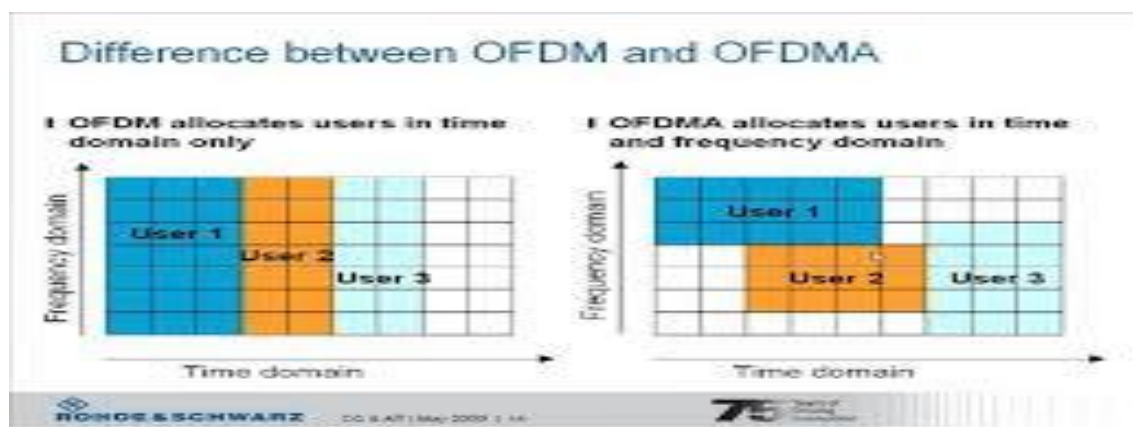
Με τα συστήματα αυτά μπορούμε να ελέγξουμε το σφάλμα ρυθμού δεδομένων του χρήστη και έτσι η ποιότητα των υπηρεσιών είναι καλύτερη. Εκτός από όλα τα παραπάνω, τα συστήματα OFDMA μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως εναλλακτική λύση ενός συνδυασμού OFDM και TDMA. Τα συστήματα αυτά έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα OFDM και μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- Εγγυόνται ταυτόχρονα χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για αρκετούς χρήστες.

- Πετυχαίνει χαμηλή μέγιστη ενέργεια μετάδοσης για χρήστες δεδομένων με χαμηλό ρυθμό δεδομένων.
- Πετυχαίνει συνεπή και μικρότερη καθυστέρηση
- Η αποφυγή σύγκρουσης απλοποιείται με τα OFDMA

Τα συστήματα OFDMA έχουν κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά και αρχές που τα ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα συστήματα της κατηγορίας τους και είναι τα εξής:

- Η ικανότητα για προσαρμογή της ανάπτυξης σε πολλές ζώνες συχνοτήτων με σχεδόν καμία αλλαγή στις παρεμβολές αέρα
- Παρέχει χαμηλού επιπέδου παρεμβολή από γειτονικά κελιά και αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση διαφορετικών φορέων μεταξύ των χρηστών σε διαφορετικά κελιά.
- Είναι δυνατή η κάλυψη δικτύου μίας συχνότητας στα σημεία που υπάρχουν ζητήματα κάλυψης.
- Επιτρέπει ποικιλία συχνοτήτων διασκορπίζοντας τους φορείς σε όλα το φάσμα το οποίο χρησιμοποιείται.
- Διαφορετικοί χρήστες μπορούν να λάβουν διαφορετικές ποιότητες καναλιών. [20]



Εικόνα 15: Διαφορά OFDM-OFDMA(gta.ufrj.br)

3.5 5G New Radio Standard(NR)

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς έχουν θέσει ένα νέο μέτρο ασύρματης σύνδεσης, το οποίο επεκτείνει το φάσμα πάνω από τα 6GHz το οποίο ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθεί από προηγούμενα κυψελοειδή δίκτυα. Η νέα τεχνολογία κινητών δικτύων έχει ήδη αρχίσει να χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη αρχιτεκτονική LTE για να

υποστηρίζει μη αυτόνομα 5G δίκτυα, στο δρόμο για πλήρη αυτόνομη υποδομή η οποία δεν υπήρχε στα 4G δίκτυα. Η τεχνολογία radio access(RAT) σχεδιάστηκε από την 3GPP για τα 5G δίκτυα και περιλαμβάνει δύο συχνοτικά εύρη: την συχνότητα 1 η οποία εκπέμπει κάτω από τα 6GHz και την συχνότητα 2, που περιλαμβάνει τις ζώνες πάνω από τα 24GHz αλλά και πάνω από τα 50GHz.

Η τεχνολογία NR δίνει στα δίκτυα πέμπτης γενιάς την δυνατότητα ευελιξίας πολλές περιπτώσεις χρήσης, επιτρέποντάς της να υποστηρίζει διαφορετικές ζώνες φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών mmWave με πολύ υψηλότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης, μέσω της χρήσης εξειδικευμένων τεχνολογιών, όπως η κλιμάκωση του διαστήματος των υπογείων φορέων και το τεράστιο MIMO που είναι απολύτως απαραίτητο για την εφαρμογή της οδήγησης ραδιοφώνου και της διαμόρφωσης για τον μετριάσμο των προκλήσεων διάδοσης στις επικοινωνίες mmWave.

Η τεχνολογία αυτή έχει κάποια θετικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:

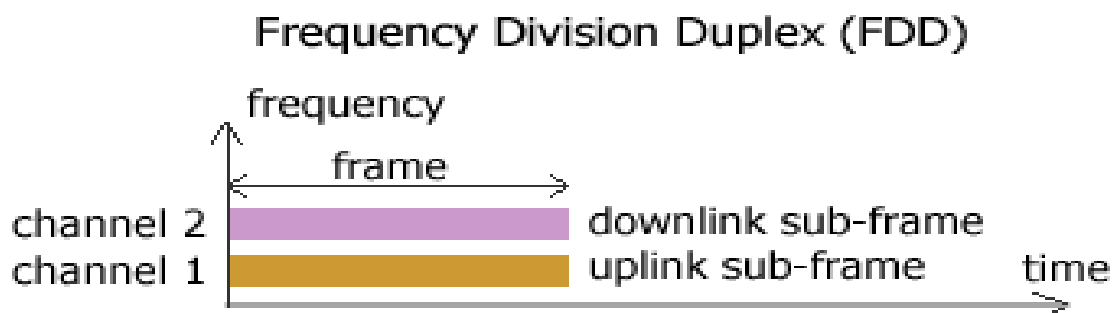
- **New radio spectrum:** Η χρήση της κινητής επικοινωνίας αυξάνεται διαρκώς και τα δίκτυα 5G επιταχύνουν αυτή την τάση με πολλές άλλες εφαρμογές να φιλοξενούνται από την τεχνολογία αυτή. Για τον λόγο αυτό απαιτείται περισσότερο φάσμα ώστε να είναι δυνατόν να καλυφθεί η τεράστια αύξηση της χρήσης. Το πλεονέκτημα των ζωνών υψηλότερης συχνότητας είναι ότι είναι πολύ ευρύτερες και θα είναι σε θέση να επιτρέπουν πολύ υψηλότερα εύρη ζώνης σήματος και ως εκ τούτου να υποστηρίζουν πολύ υψηλότερους ρυθμούς απόδοσης δεδομένων. Το μειονέκτημα σε ορισμένες πτυχές είναι ότι θα έχουν πολύ μικρότερο εύρος, αλλά αυτό μπορεί να θεωρηθεί και πλεονέκτημα γιατί θα επιτρέψει επίσης μεγαλύτερη συχνότητα επαναχρησιμοποίησης. [21]
- **Optimized OFDM:** Για την πρώτη φάση του 5G NR χρησιμοποιείται μία μορφή OFDM ως κυματομορφή. Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στα 4G, στα πιο πρόσφατα πρότυπα Wi-Fi και πολλά άλλα συστήματα και βγήκε ως ο βέλτιστος τύπος κυματομορφής για την ποικιλία διαφορετικών εφαρμογών για 5G. Με την πρόσθετη ισχύ επεξεργασίας που διαθέτουν τα 5G μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικές μορφές βελτιστοποίησης.
- **Beamforming:** Εδώ μιλάμε για μία τεχνολογία που έχει γίνει πραγματικότητα τα τελευταία χρόνια και προσφέρει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα στο 5G. Το Beamforming επιτρέπει τη δέσμη από το σταθμό βάσης να κατευθύνεται προς το κινητό. Με αυτόν τον τρόπο το βέλτιστο σήμα μπορεί να μεταδοθεί στο κινητό και να ληφθεί από αυτό, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις παρεμβολές σε άλλα κινητά.
- **MIMO:** Η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά ασύρματα, από το Wi-Fi έως και το τρέχον κυψελοειδές σύστημα 4G και παρέχει μερικές σημαντικές βελτιώσεις. Στο 5G το MIMO θα είναι μία από τις πιο βασικές τεχνολογίες.

- **Spectrum sharing techniques:** Μεγάλο μέρος του ραδιοφάσματος, αν και κατανέμεται, δεν χρησιμοποιείται με αποτελεσματικό τρόπο. Μία από τις τεχνικές που προτείνονται είναι η κοινή χρήση φάσματος.
- **Small Cells:** Καθώς απαιτείται πυκνοποίηση δικτύου για την παροχή της απαιτούμενης ικανότητας δεδομένων, προτείνεται περισσότερη χρήση μικρών κυψελών και δικτύων μικρών κυψελών. Ένα μικρό δίκτυο κυψελών είναι μία ομάδα σταθμών βάσης μετάδοσης χαμηλής ισχύος που χρησιμοποιεί κύματα χιλιοστών για την ενίσχυση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου. Το δίκτυο μικρών κυψελών 5G λειτουργεί συντονίζοντας μία ομάδα μικρών κυψελών για να μοιραστεί το φορτίο και να μειώσει τις δυσκολίες των φυσικών εμποδίων που γίνονται πιο σημαντικές στα κύματα χιλιοστών.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές και πολλά άλλα, το 5G NR θα είναι σε θέση να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση, την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την αποτελεσματικότητα των τρεχόντων δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Με αυτόν τον τρόπο, το 5G θα είναι σε θέση να διασφαλίσει τη βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, είτε διαθέτει άδεια είτε όχι και θα το επιτύχει σε μία ευρεία ποικιλία ζωνών φάσματος. [22]

3.6 Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνοτήτων(FDD)

Στην πολυπλεξία διαίρεσης συχνοτήτων ο πομπός και ο δέκτης δουλεύουν σε διαφορετικές συχνότητες φορέα. Αυτή είναι μία μέθοδος δημιουργίας μίας πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας που χρησιμοποιεί δύο συχνότητες που διαφέρουν η μία από την άλλη για τις διαδικασίες μετάδοσης και λήψης. Οι κατευθύνσεις μετάδοσης και λήψης διαιρούνται με διαφοροποιημένη αντιστάθμιση συχνότητας. Για παράδειγμα στα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ένα μέρος του φάσματος χρησιμοποιείται για uplink και ένα άλλο για downlink. Αυτά τα δύο μέρη μεταφέρουν δεδομένα από την συσκευή του χρήστη στον σταθμό βάσης και αντίστροφα.



Εικόνα 16: Πολυπλεξία Διαίρεσης συχνότητας(conniq.com)

Η τεχνολογία αυτή έχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα και είναι τα εξής:

- Παρέχει μικρή καθυστέρηση επειδή οι λειτουργίες του πομπού και του δέκτη γίνονται ταυτόχρονα και στον ίδιο χρόνο.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αδειοδοτημένες και μη ζώνες.
- Πλήρης χωρητικότητα δεδομένων είναι διαθέσιμη οποιαδήποτε στιγμή επειδή οι λειτουργίες του πομπού και του δέκτη είναι διαχωρισμένες.
- Υπάρχει προστασία από τις παρεμβολές λόγω των περιορισμών ελέγχου που χρησιμοποιούν τα FDD radios στις αδειοδοτημένες ζώνες.

Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως:

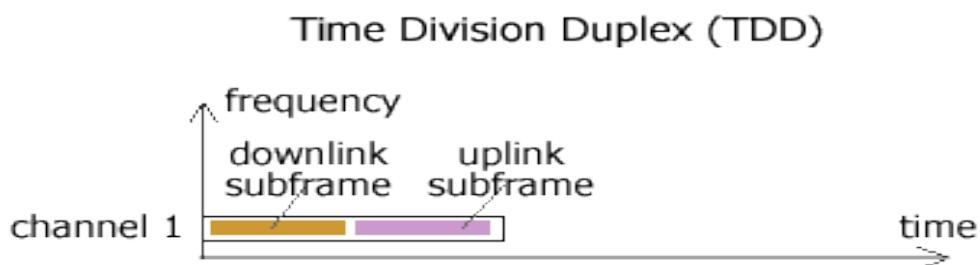
- Δυσκολία στην εγκατάσταση. Οι δρόμοι που δίνονται απαιτούν τη διαθεσιμότητα ζεύγους συχνοτήτων. Αν μία από τις δύο συχνότητες δεν είναι διαθέσιμη τότε δεν μπορούμε να κάνουμε χρήση της συγκεκριμένης ζώνης.
- Η κατανομή της κυκλοφορίας, εκτός από μία κατάσταση 50:50, μεταξύ του πομπού και του δέκτη υποβάλλεται ανάρμοστη χρήση των δύο ζευγαρωμένων συχνοτήτων πράγμα που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης. [23]

3.7 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου(TDD)

Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου είναι μία διαδικασία για την επίτευξη πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας πάνω από ένα half duplex σύνδεσμο επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, χωρίζει τα σήματα uplink και downlink συνδυάζοντας το πλήρες duplex πάνω από το half. Αυτή η μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα στην περίπτωση που υπάρχουν ασύμμετροι ρυθμοί δεδομένων uplink και downlink. Ο πομπός χρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα με τον δέκτη. Η μετάδοση και λήψη κίνησης αλλάζει στον χρόνο. Το uplink διαφοροποιείται από το downlink από το τμήμα διαφορετικών χρονοθυρίδων που χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη. Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου μετατρέπει ένα data stream σε frames και δίνει διαφορετικές χρονοθυρίδες με σκοπό την προώθηση και την επιστροφή των μεταδόσεων. Όταν τα δεδομένα στο uplink αυξηθούν, μοιράζεται και περισσότερη χωρητικότητα. Λειτουργεί αλλάζοντας τις κατευθύνσεις μετάδοσης υπερβολικά με την πάροδο του χρόνου, η οποία γίνεται αμέσως και δεν γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη. Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου δεν υποστηρίζει μόνο φωνή αλλά υποστηρίζει συμμετρικά και μη υπηρεσίες δεδομένων. [23]

Οι χωρητικότητες uplink και downlink τροποποιούνται κατά προτίμηση από την μία κατεύθυνση και έχουν καλύτερη πράξη κατανομής χρόνου εντός μίας χρονικής θυρίδας και μίας παύσης μετάδοσης downstream από αυτές των upstream. Μερικά παραδείγματα εκτέλεσης της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου είναι τα εξής:

- IEEE 802.16 WiMAX
- TD-SCDMA 3G Mobile telephony air interface
- Universal Mobile Telecommunications System
- Pactor
- Dect Wireless Telephony



Εικόνα 17: Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου(conniq.com)

Η τεχνολογία αυτή έχει κάποια πλεονεκτήματα όπως:

- Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου επιτρέπει την χρήση μίας μόνο συχνότητας για λειτουργία και αυξάνει δραστικά την χρήση του φάσματος. Αυτό συγκεκριμένα συμβαίνει σε μικρό εύρος ζώνης και σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων.
- Πληρεί τα κριτήρια για την κατανομή της απόδοσης μεταξύ των κατευθύνσεων μετάδοσης και λήψης. Αυτό είναι μεγάλο πλεονέκτημα για τις εφαρμογές με ασυμμετρικές απαιτήσεις κυκλοφορίας όπως η μετάδοση βίντεο.

Μερικά μειονεκτήματα που έχει αυτή η τεχνολογία είναι τα εξής:

- Τα μοντέλα της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου πετυχαίνουν κακή TDM απόδοση λόγω της καθυστέρησης.
- Πολλά radios με την ίδια τοποθεσία παρεμβάλλονται το ένα στο άλλο εκτός αν είναι συγχρονισμένα.

Οι τεχνολογίες πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου(TDD) και συχνότητας(FDD) έχουν διαφορές οι οποίες είναι σημαντικές και πρέπει να της αναφέρουμε. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

- **Ζεύγος φάσματος:** Στην τεχνολογία LTE-TDD δεν απαιτείται ζεύγος φάσματος γιατί και ο πομπός και ο δέκτης επιδρούν στο ίδιο κανάλι. Αντίθετα στην τεχνολογία LTE-FDD απαιτείται ζεύγος φάσματος για να επιτρέψει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη.
- **Κόστος υλικού:** Στην TDD έχουμε μικρότερο κόστος υλικού καθώς δεν χρειάζεται κάποιος diplexer για να απομονώσει τον πομπό και τον δέκτη σε αντίθεση με την FDD που απαιτείται diplexer και αυξάνει το κόστος.
- **Αμοιβαιότητα καναλιού:** Στην τεχνολογία TDD η διάδοση καναλιού είναι η ίδια και στις δύο κατευθύνσεις που επιτρέπει στον πομπό και τον δέκτη να χρησιμοποιήσουν παραμέτρους. Αντίθετα στην FDD τα χαρακτηριστικά των καναλιών είναι διαφορετικά με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες.
- **Ασυσυμμετρία UL/DL:** Είναι πιθανό να αλλάξουμε δυναμικά την αναλογία χωρητικότητας προς κάλυψη ζήτησης του UL και του DL στην τεχνολογία TDD. Αντίθετα η χωρητικότητα εξαρτάται από την κατανομή συχνότητας. Άρα δεν είναι πιθανή μία δυναμική αλλαγή της αναλογίας αυτής.
- **Guard Period/Guard Band:** Η Guard Period απαιτείται για να αποτρέψει τυχόν σύγκρουση του uplink και downlink. Εάν είναι μεγάλη τότε θα περιορίσει την χωρητικότητα. Στην τεχνολογία FDD μία guard band απαιτείται για να απομονώσει το uplink και το downlink. Όσο μεγάλη και να είναι δεν επηρεάζει την χωρητικότητα.
- **Ασυνεχής μετάδοση:** Η ασυνεχής μετάδοση στην τεχνολογία TDD απαιτείται για να επιτρέψει την μετάδοση και του uplink και του downlink. Αυτό μπορεί να υποβιβάσει την απόδοση της ενέργειας στον πομπό. Στην τεχνολογία FDD απαιτείται η συνεχής μετάδοση.
- **Παρεμβολή σταυροειδούς υποδοχής:** Οι σταθμοί βάσης πρέπει να είναι συγχρονισμένοι σε σχέση με τους χρόνους μετάδοσης του uplink και downlink. Αν γειτονικοί σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν διαφορετικές εντολές uplink και downlink και μοιράζονται το ίδιο κανάλι τότε είναι πιθανό να έχουμε παρεμβολή μεταξύ των κελιών. Στην τεχνολογία FDD δεν εφαρμόζεται καν το παραπάνω. [24]

TDD versus FDD comparison for LTE



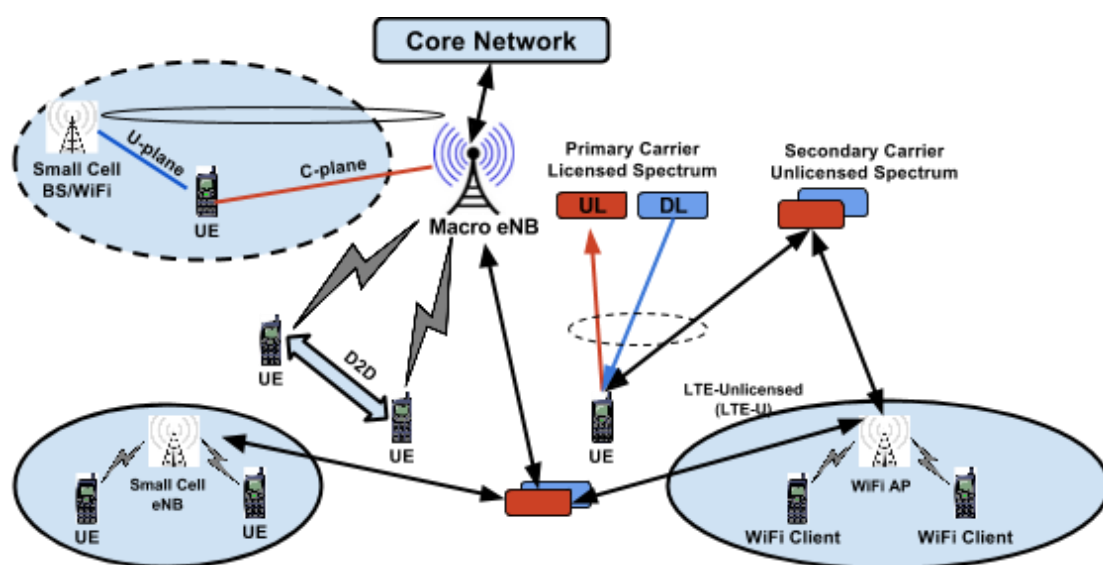
	TDD	FDD	
Desired Antenna power	26.1	23	dBm
PA efficiency	30	30	%
Switch+trace loss	0.5	0	dB
Duplexer loss	0	2.5	dB
Required PA output power	26.6	25.5	dBm
Required PA P1dB	31.6	30.5	dBm
Bandwidth	9.2	4.6	MHz
Subcarrier spacing	10.9375	10.9375	kHz
Cyclic Prefix	0.125	0.125	
Number of subcarriers	841	420	
Symbol period	102.8571	102.8571	us
Frame length	5	5	ms
Tx duty cycle	51%	100%	
Rx/Tx transition gap	60	0	us
Tx time	2.4947	5	ms
Tx power per subcarrier	0.48	0.48	mW
Data rate	12.24	12.25	Mbps
Energy per frame	3.80	5.91	mJ
Efficiency	3.22	2.07	Mbps/mJ
Relative battery life	1.55	1.00	

- Putting it all together:
 - A TDD LTE PA needs to be ~1 dB (25%) bigger than an FDD LTE PA to achieve the same range.
 - However, due to duplexer losses, PA power consumption of the TDD system is about 55% better than for the FDD

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:Uplink and Downlink Decoupling

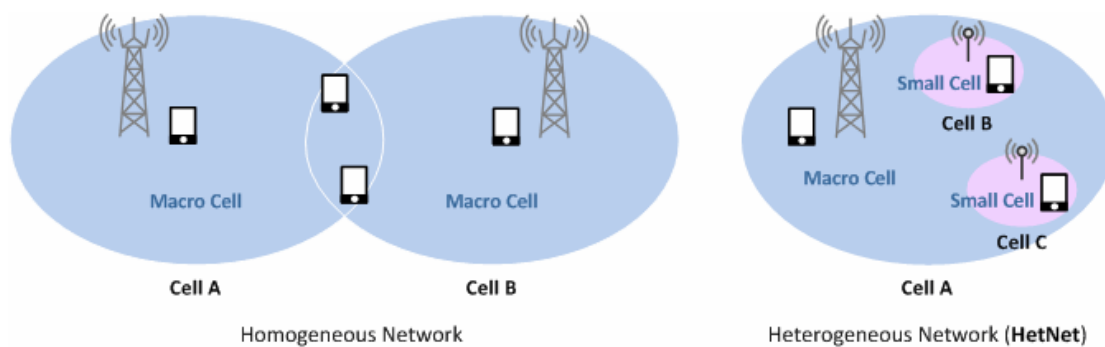
4.1 Heterogeneous Networks

Είναι σίγουρο πως στα επόμενα χρόνια ο κόσμος θα είναι ένα μέρος με περισσότερους σταθμούς βάσης από κινητά τηλέφωνα. Αυτό θα συμβεί επειδή οι διαχειριστές δικτύων και οι επιχειρήσεις δικτύων κινητής τηλεφωνίας θέλουν να ικανοποιήσουν την έντονη ζήτηση των καταναλωτών για ταχύτερη συνδεσιμότητα δεδομένων. Καθώς είναι αδύνατο να προστεθεί επιπλέον φάσμα οδηγούνται στην αναζήτηση άλλων τρόπων για να μπορέσουν να ανταποκριθούν στα αιτήματα των καταναλωτών. Η επιλογή να προστεθούν περισσότεροι σταθμοί βάσης γίνεται όλο και πιο δύσκολη λόγω του κόστους και της έλλειψης διαθέσιμων θέσεων για την εγκατάσταση των κεραιών. Για παράδειγμα, πολλές γειτονικές ενώσεις δεν συνεργάζονται για να ανοίξουν νέες τοποθεσίες για την ανάπτυξη σταθμών βάσης. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές δεν είναι τόσο η κάλυψη των δικτύων όσο η χωρητικότητα των δικτύων λόγω του υπερβολικού αριθμού συνδρομητών. Εδώ είναι που έρχονται τα Heterogeneous Networks για να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα.



Εικόνα 19: Ετερογενή 5G δίκτυα(openairinterface.org)

Τα HetNets είναι ένα μοντέρνο δίκτυο κινητής επικοινωνίας που μπορεί να συνδυάσει διαφορετικούς τύπους κελιών και τεχνολογιών πρόσβασης. Ένα τυπικό HetNet συνδυάζει όλα τα γνωστά μοντέλα και συστήματα δικτύων όπως τα GSM, UMTS, LTE και WiFi. Πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα σημείο πρόσβασης WiFi πληρεί τα πρότυπα των σταθμών βάσης. Πρώτον, είναι σε θέση να φιλοξενήσει αιτήματα για επικοινωνία από πολλούς χρήστες στην περιοχή κάλυψής του. Δεύτερον, παρέχει μία αξιόπιστη backhaul σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο και διαθέτει βιώσιμη πηγή ενέργειας. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των HetNets είναι δυνατότητα ευελιξίας στο συνδυασμό της θέσης ανάπτυξης των μικρών κελιών όπως pico, micro και femto. Ένα Wide Area Network(WAN) μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα συνδυασμό από picocells, microcells και femtocells με σκοπό να προσφέρει ασύρματη κάλυψη σε ένα περιβάλλον με μεγάλο εύρος ασύρματων ζωνών κάλυψης, που κυμαίνονται από έναν εξωτερικό χώρο μέχρι ένα κτήριο, σπίτια και υπόγειες περιοχές. [25] [26]



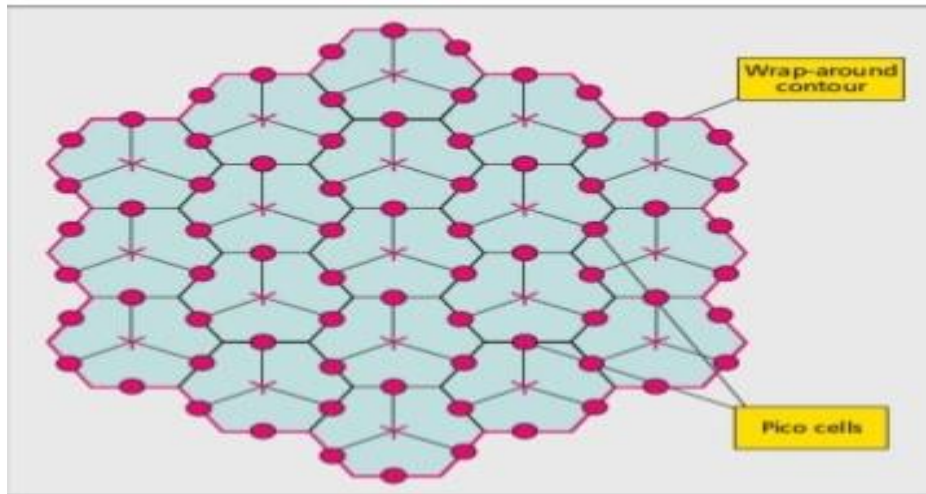
Εικόνα 20: Ετερογενή δίκτυα/Ομογενή δίκτυα(netmanias.com)

Τα HetNets έχουν κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά που μπορούν να αλλάξουν τον τρόπο που συνδέεται ο καθένας μας. Το πρώτο είναι οι μετρικές που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός δικτύου. Μία διαδεδομένη μετρική είναι η προοπτική διακοπής λειτουργίας και η αποδοτικότητα του φάσματος. Η προοπτική διακοπής λειτουργίας εκφράζεται με τον όρο SINR(Signal-to-interference-plus-noise ratio). Εν συντομία, ο λόγος του σήματος προς τις παρεμβολές-θορύβου(SINR) είναι μία ποσότητα που χρησιμοποιείται για να δώσει θεωρητικά ανώτερα όρια στην χωρητικότητα καναλιών στα ασύρματα δίκτυα. Η πιθανότητα το SINR να είναι κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή καθορίζει τη δυνατότητα διακοπής της λειτουργίας. Οι συσκευές τις περισσότερες φορές δεν εξαρτώνται μόνο από το SINR αλλά και από το πόσο γρήγορα φορτώνει κάτι. Στα HetNets ο νόμος των Μεγάλων Αριθμών που σχετίζεται μόνο με macrocell δίκτυα δεν ισχύει. Στα απλά δίκτυα ένας χρήστης που βρίσκεται στην άκρη έχει μικρότερο SINR

και μικρότερο ρυθμό μετάδοσης ενώ ένας χρήστης μέσα στο κελί έχει μεγαλύτερο SINR και ρυθμό μετάδοσης.

Δεύτερον, στα HetNets η σχέση μεταξύ του Uplink και του Downlink είναι διαφορετική σε σχέση με τα προηγούμενα macrocells δίκτυα. Το Uplink και το Downlink λαμβάνονται υπόψη ως δύο διαφορετικά δίκτυα. Για τον λόγο αυτό χρειάζονται διαφορετικά μοντέλα για παρεμβολές και διακίνηση. Για παράδειγμα, ένας χρήστης που είναι στις γωνίες των macrocells μπορεί να χρειαστεί να συνδεθεί σε ένα κοντινό pico ή femto cell. Αυτό συμβαίνει επειδή από την μία κατεύθυνση, UL, ίσως να έχουμε ασθενές SINR και από την άλλη κατεύθυνση όχι. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη ποιότητας υπηρεσίες. Τέλος, στα HetNets το coordinated multipoint(CoMP) είναι πολύ σημαντικό όταν φτάνουμε στο σημείο διαχείρισης παρεμβολών. Η ιδέα να έχουμε κοντινούς σταθμούς βάσης για κωδικοποίηση(DL) και αποκωδικοποίηση(UL) μηνυμάτων για ταυτόχρονους χρήστες. Με την τεχνολογία αυτή οι χρήστες θα έχουν κέρδος πολυπλεξίας αντί να αντιμετωπίζονται σαν παρεμβολές.

Τρίτον, είναι ο παράγοντας της τοπολογίας. Στα HetNets η τοπολογία έχει μία καθαρή αλλαγή. Η τοποθέτηση των σταθμών βάσης και η εμβέλεια κάλυψης είναι διαφορετική. Μέχρι τώρα οι σταθμοί βάσης βρίσκονταν σε απόσταση. Συγκεκριμένα, διαμορφώνονται συχνά ως ένα πλέγμα ξαπλωμένο και ειδικότερα σαν ένα εξαγωνικό ψυγείο. Οι σταθμοί βάσης είναι συγκεντρωμένοι στην περιοχή κάλυψης του υπάρχοντος macrocell και δημιουργούν τις δικές του σχετικές περιοχές. Οι περιοχές αυτές είναι μικρότερες για το DL εξαιτίας της ελάχιστης ισχύος μετάδοσης που διαθέτουν. Οι τυπικές μεταδόσεις ισχύος στα macro, pico και femto είναι 40W, 2W και 100mW αντίστοιχα. Για τον λόγο αυτό η ισχύς μετάδοσης κάθε στρώματος των σταθμών βάσης έχει πολύ σημαντική επιρροή στην τοπολογία. Είναι εμφανές ότι το grid-based μοντέλο του παρελθόντος δεν είναι χρήσιμο σε ένα HetNet. Ένα παράδειγμα είναι το μοντέλο macro-pico που χρησιμοποιήθηκε από την 3GPP στο οποίο τα macrocells σχεδιάστηκαν σαν εξαγωνο με 6 picocell σταθμούς βάσης ανά macrocell. Ένα άλλο μοντέλο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είναι μία ομοιόμορφη κατανομή, η οποία σε επίπεδη επιφάνεια 2D είναι ένα μοντέλο Poisson. Το μοντέλο αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται εντελώς στην τύχη. Μία διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μοντέλων είναι η ευπείθεια(tractability). Για παράδειγμα το SINR και η ταχύτητα μετάδοσης υπολογίζονται μέσω προσομοιώσεων και λαμβάνονται σαν παρεμβολές. Αυτό οδηγεί στο να αγνοούνται οι σταθμοί βάσης σε μακρινές αποστάσεις. [26]



Εικόνα 21: Τοπολογία Ετερογενή δικτύων(researchgate.net)

Από την άλλη πλευρά το μοντέλο Poisson είναι ευάγωγο(tractable) εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας από εργαλεία που είναι διαθέσιμα από την στοχαστική γεωμετρία. Η τοποθεσία είναι ανεξάρτητη των σταθμών βάσης σε αυτό το μοντέλο και αυτό κάνει την επιμέλεια του SINR να αποκτηθεί σε κλειστή μορφή. Αυτό μπορεί να συμβεί σε μοντέλα με μεγάλο και τυχαίο αριθμό σταθμών βάσης, με κάθε σταθμό βάσης να έχει διαφορετικές πυκνότητες ή ισχύ μετάδοσης. Για να είμαστε ακριβείς, το μοντέλο Poisson δεν τοποθετεί τους σταθμούς βάσης τελείως τυχαία.

Αυτά τα δύο μοντέλα δίνουν τις ίδιες διανομές SINR. Τα αποτελέσματα στα οποία διαφέρουν αυτά τα μοντέλα είναι στην τιμή του απόλυτου SINR. Το grid μοντέλο δίνει την καλύτερη περίπτωση για κάλυψη ενώ το Poisson δίνει την ιδέα ότι είναι δύσκολο να έχουμε χειρότερα αποτελέσματα με τόσους πολλούς τυχαίους σταθμούς βάσης. Τέλος, πολλά από αυτά που αναφέρονται παραπάνω πρέπει να αποδειχθούν και μαθηματικά. Συγκεκριμένα, πρέπει να αποδειχθεί ότι σε ένα μοντέλο με δίκτυο περιορισμένων παρεμβολών, η προσθήκη περισσότερων σταθμών βάσης δεν θα αλλάξει τα στατιστικά του DL SINR. [26]

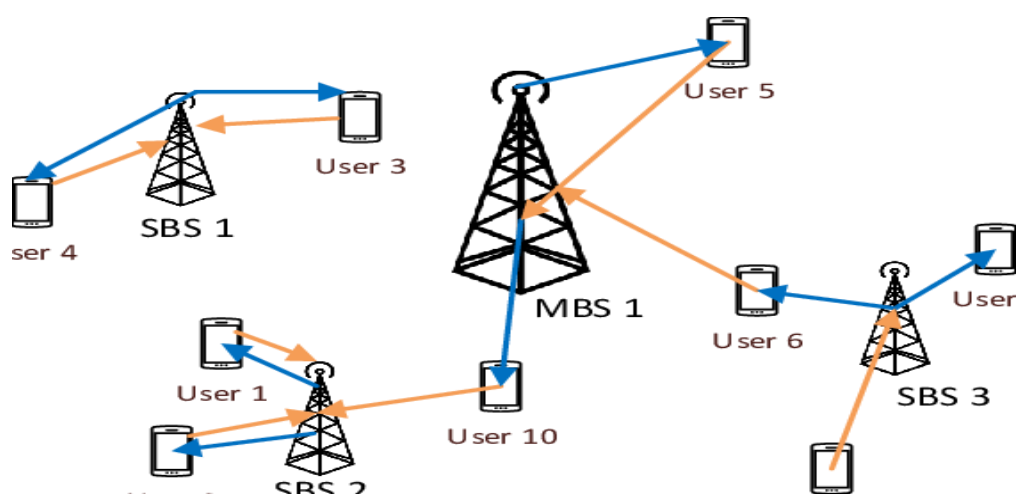
Συνοψίζοντας τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η παρεμβολή που προέρχεται από μικρότερους σταθμούς βάσης εξισορροπείται από την μείωση της απόστασης σε κοντινό σταθμό βάσης, και την αύξηση της ισχύς σήματος.
- Τοποθετώντας σταθμούς βάσης κάθε μεγέθους αυξάνει τον αριθμό χωρητικότητας και ταυτόχρονα μειώνεται η συμφόρηση.
- Ο έλεγχος ισχύος στην διαδικασία DL δεν είναι τόσο συνεπής, επειδή τα επίπεδα ισχύος μπορούν να μοντελοποιηθούν από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, το οποίο δεν έχει κακή επίδραση στο SINR.

4.2 Downlink and Uplink Decoupling

Στις μέρες μας οι συσκευές δεν χρειάζονται όλο και περισσότερη χωρητικότητα αλλά χρειάζονται Quality of Service(QoS) και Quality of Experience(QoE), στις δύο διαδικασίες του UL και DL. Με τις τεχνολογίες του σήμερα και την ανάπτυξη του Internet of Things(IoT), των υπηρεσιών μηχανής προς μηχανής, των δικτύων κοινωνικής δικτύωσης και των υπηρεσιών cloud, οι χρήστες και οι συσκευές τους είναι πιο προσανατολισμένες στην ουσία από ότι τα προηγούμενα χρόνια. Η μη συνεχής QoE των χρηστών στις περιοχές των κελιών δίνει την ώθηση στην επέκταση των αριθμών των σταθμών βάσης βάζοντας περισσότερα κελιά με όχι τόσο μεγάλη κάλυψη. Αυτό φυσικά φέρνει το δίκτυο πιο κοντά στον χρήστη. Αυτές οι αλλαγές στην ανάπτυξη των δικτύων βελτιώνει την συνολική χωρητικότητα του δικτύου ενεργοποιώντας τα χαρακτηριστικά ανώτερης εξισορρόπησης φορτίου μεταξύ των κυψελών και απαλλαγείτε από τρύπες στην κάλυψη. Αυτή η νέα κατάσταση στα δίκτυα φέρνει προκλήσεις με σκοπό την εξασφάλιση QoS και QoE ταυτόχρονα.

Μερικές από αυτές τις προκλήσεις είναι η διαχείριση των παρεμβολών, η βελτίωση του backhaul και τέλος η σχέση του UL με το DL που είναι και το κύριο θέμα της διπλωματικής αυτής. Από το ξεκίνημα της κινητής τηλεφωνίας οι δύο ενώσεις UL και DL ήταν συνδεδεμένες. Οι συσκευές είχαν όριο στην ένωση με τον ίδιο σταθμό βάσης, και με τις δύο ενώσεις UL και DL. Αυτή η κατάσταση των συζευγμένων συνδέσεων έχει πολλά οφέλη όπως ότι τα φυσικά κανάλια και τα κανάλια μετάδοσης ήταν πολύ πιο εύκολα να σχεδιαστούν. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι ότι το δίκτυο έρχεται πιο κοντά στις συσκευές και αφήνει τον χρήστη να συνδέεται στις κυψέλες που είναι καταλληλότερες για τις ανάγκες του χρήστη. Το Downlink and Uplink Decoupling(DUDe) έδωσε στους χρήστες την δυνατότητα να μεταδίδουν και να λαμβάνουν από διαφορετικούς σταθμούς βάσης. [27]

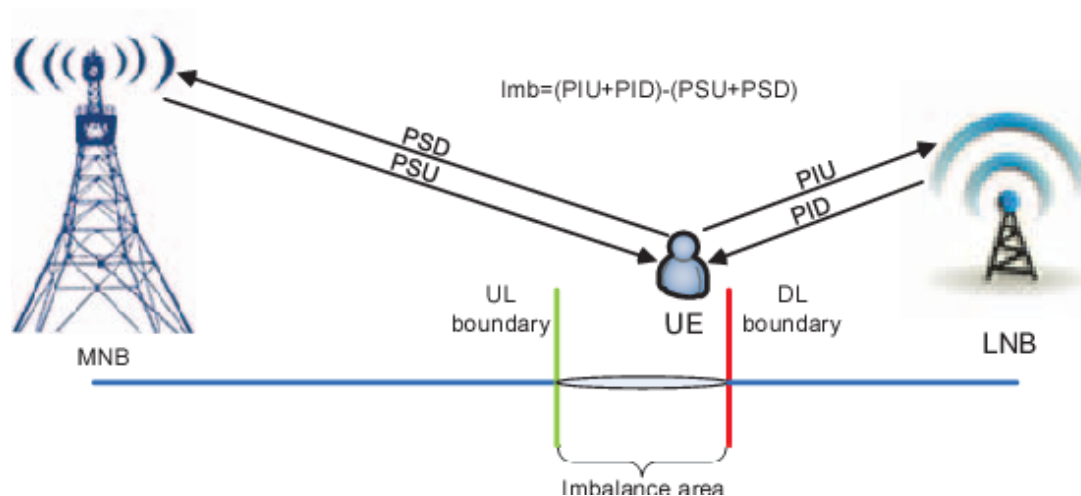


Εικόνα 22:Αποσύνδεση Downlink/Uplink και συσχέτιση χρηστών(researchgate.com)

Το πιο σημαντικό είναι ότι το DUDe αλλάζει τον περιορισμό της επιλογής κελιού που βασίζεται στην ισχύ του δέκτη του downlink και δίνει στο δίκτυο ευκαμψία. Επίσης, η μέθοδος DUDe είναι μία νέα ιδέα που αναγνωρίστηκε σαν μία τεχνική που μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των HetNets. Οι τεχνολογίες που δίνουν προσοχή στις κύριες προκλήσεις των HetNets σε ότι έχει να κάνει με τον ραδιοφωνικό σχεδιασμό και τις παρεμβολές μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες:

- Η διπλή συνδεσιμότητα. Θεωρητικά, επαληθεύει τις βελτιώσεις UL σε ειδικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά, δεν έχει αποδειχθεί ακόμα ότι αυτή είναι η λύση στην έλλειψη προβλήματος ισορροπίας των UL και DL.
- Το DUDe παρέχει αποδεδειγμένες βελτιώσεις στην διαδικασία του UL. Οι νόμοι του DUDe μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των δύο συνδέσμων και μπορούν να λύσουν την έλλειψη προβλήματος ισορροπίας στους τομείς του φορτίου, των παρεμβολών και της κάλυψης.
- Κελιά RE με eICIC. Επαληθεύεται ότι υπάρχουν βελτιώσεις UL στις αναπτύξεις συν-καναλιών. Η μέθοδος αυτή μειώνει την έλλειψη ισορροπίας, όσο υπάρχει βελτίωση του UL η intercell παρεμβολή του DL αυξάνεται.

Μεταξύ όλων των πλεονεκτημάτων που φέρνει η χρήση διαφορετικών τύπων κελιών, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα. Το πιο επιβλαβές στην σύνδεση είναι αυτό που αποκαλούμε UL/DL Imbalance. Το πρόβλημα με αυτό ξεκινάει όταν ο τομέας με το δυνατότερο downlink προς έναν σταθμό βάσης μπορεί να μην είναι απαραίτητα ο τομέας με το δυνατότερο uplink προς τον ίδιο σταθμό βάσης. Αυτό δεν θα ήταν σημαντικό αν δεν απαιτούσαμε μεγαλύτερη χωρητικότητα στο uplink. Έτσι, με τις προκλήσεις του 5G είναι απαραίτητο να επιτευχθεί μία ισορροπία την οποία απαιτούν οι νέες τεχνολογίες όπως, οι εφαρμογές έξυπνων πόλεων και άλλες εξίσου απαιτητικές εφαρμογές. [28]

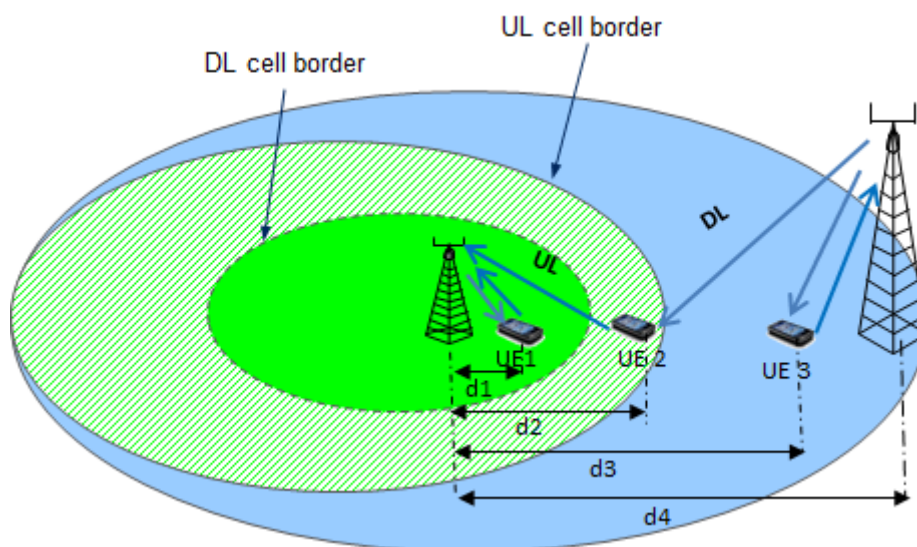


Εικόνα 23: Ανισορροπίες στο Downlink και Uplink(mdpi.com)

Για να μπορέσουμε να λύσουμε το πρόβλημα της ανισορροπίας στο Downlink και το Uplink, μπορούμε να εκτελέσουμε το Downlink και το Uplink με διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Αυτό θα έλυσε το πρόβλημα της σύνδεσης του Uplink και Downlink με το να μην είναι στην καλύτερη ζώνη της ζώνης κάλυψης ενός συγκεκριμένου κελιού. Επίσης, θα αποφεύγαμε τις διαφορές κέρδους μεταξύ των συσκευών που είναι κοντά στο Mcell και αυτών που είναι μέσα στην ζώνη κάλυψης αλλά μακριά από το Mcell. Έτσι, η σύνδεση που θα γίνει εξαρτάται από ποιο σταθμό βάσης η συσκευή θα δεχτεί το πιο ισχυρό σήμα.

Το Downlink και Uplink Decoupling προτείνει την διατήρηση του κανόνα συσχέτισης για την απόδοση του downlink αλλά για του uplink, προτείνει την εκτέλεση της σύνδεσης ανάλογα με την εξασθένιση του σήματος που λαμβάνεται από την συσκευή. Αυτό σημαίνει ότι η συσκευή συνεχίζει να εκτελεί το downlink με το ισχυρότερο σήμα που λαμβάνει από το κελί και εκτελεί το uplink ανάλογα με την απόσταση της συσκευής από το SCell ή το MCell. Όταν η συσκευή είναι πιο κοντά σε ένα SCell παρά σε ένα MCell, αλλά ακόμα παραμένει εντός της ζώνης κάλυψης του MCell, βρίσκεται σε ζώνη decoupling.

Είναι ξεκάθαρο από αυτά που αναφέραμε παραπάνω ότι το Downlink και Uplink Decoupling έχει τα πλεονεκτήματα να έχει υψηλή αντιστάθμιση στο Uplink χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές στην διαδικασία του Downlink. Εξαιτίας του διαχωρισμού των δύο συνδέσμων και της σύνδεσης στο καλύτερο κελί το DUDe μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη στο Uplink όσον αφορά την κάλυψη, την απόδοση, τις παρεμβολές εξισορρόπησης φορτίου και την αξιοπιστία. Στις μέρες μας είναι μεγάλη ανάγκη να βελτιώσουμε την απόδοση του Uplink λόγω της μεγάλης εξάπλωσης του IoT όπου η κυκλοφορία σχετίζεται με το Uplink και πέρα από αυτό υπάρχει μεγάλη αύξηση στην δημοτικότητα εφαρμογών όπως βίντεο κλήσεις, streaming και social networking. [29]



Εικόνα 24: Μοντέλο συστήματος DUDe(semantic scholar.org)

4.3 Decoupled Downlink and Uplink Duplexing

Η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου(TDD) και διαίρεσης συχνότητας(FDD) μπορούν και οι δύο να δουλέψουν με τον σύνδεσμο DUDe, έχοντας βέβαια διαφορετικές συνέπειες σε επίπεδο φάσματος και συστήματος. Η χρήση της πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου επιτρέπει υψηλή ευκαμψία στην μεταφορά των πόρων των UL και DL σε σχέση με την χρήση πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας. Στην περίπτωση της αποσύνδεσης(decoupling) αυτής χρειάζονται λιγότεροι πόροι για το UL για να πετύχουμε την ίδια αποδοτικότητα του ρυθμού UL που θα είχαμε στην περίπτωση της σύνδεσης(coupled).

Αυτοί οι πόροι θα μπορούσαν να σχετίζονται με το DL μέσω δυναμικής πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της TDD είναι η δυνατότητα υπολογισμού του downlink καναλιού μέσω του σήματος αναφοράς του uplink. Ειδικά για τα κανάλια που έχουν μεγάλες διαστάσεις, όπως είναι τα Multiple Input Multiple Output(MIMO), είναι πολύ σημαντικό πλεονέκτημα. Όταν έχουμε DUDe εκτέλεση οι μεταδόσεις DL και UL πηγαίνουν και έρχονται από και προς διαφορετικές κατευθύνσεις, σπάζοντας την αμοιβαία σχέση του καναλιού. Το φάσμα που υπάρχει είναι ζεύγος φάσματος FDD και για αυτό τον λόγο τα MIMO πρέπει να υποστηρίζονται χωρίς αμοιβαιότητα καναλιού. Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι στην DUDe η πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου και διαίρεσης συχνότητας χρειάζονται επανεξέταση και βελτίωση. [30]

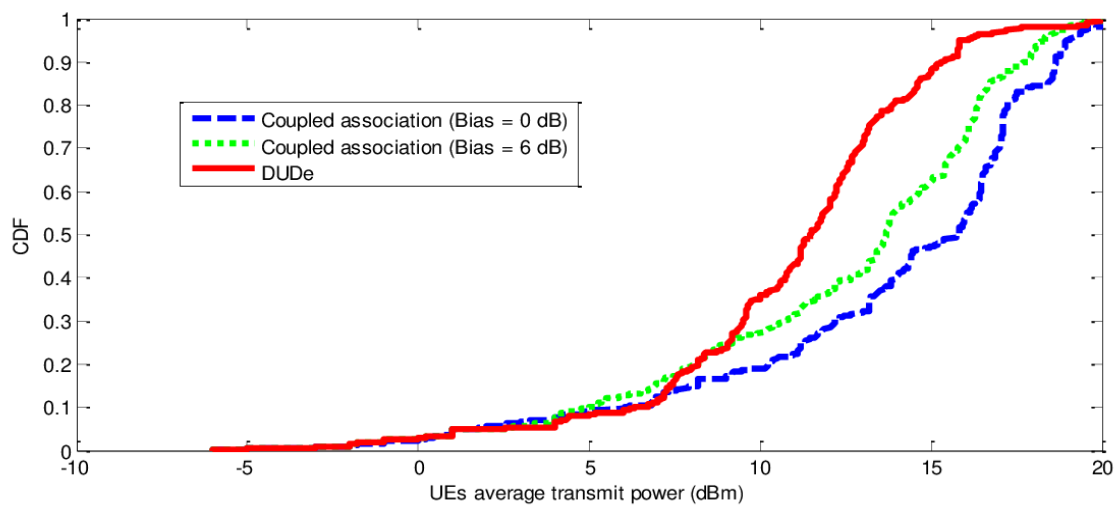
4.4 Πλεονεκτήματα DUDe

Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τον διαχωρισμό αυτό.

1. Αυξημένο Uplink SNR και μειωμένη ισχύς μετάδοσης:

Σε ένα μοντέλο HetNet η macrocell Downlink περιοχή κάλυψης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή ενός μικρότερου σταθμού βάσης. Αυτή η ανισότητα αποδίδεται στις διαφορές της ισχύς μετάδοσης του DL. Επίσης αποδίδεται στα επίπεδα των σταθμών βάσης και στα οφέλη της κεραίας. Από την άλλη πλευρά στην διαδικασία του UL όλοι οι πομποί έχουν την ίδια μέγιστη ισχύ μετάδοσης. [31] Επομένως μία συσκευή που σχετίζεται με ένα macrocell στην διαδικασία DL, θα μπορούσε να συσχετιστεί με έναν άλλο σταθμό βάσης για το UL, για να επωφεληθεί από την μειωμένη απώλεια στο μεταδιδόμενο σήμα. Οι θετικές επιπτώσεις των δράσεων αυτών είναι διπλές. Για τους χρήστες που μεταδίδουν με την μέγιστη ισχύ για να συνδεθούν σε ένα κοντινότερο σταθμό βάσης δίνουν μεγαλύτερο SNR. Επιπλέον, για συγκεκριμένη τιμή SNR είναι εφικτό να έχουμε μειώσεις την ισχύ

εκπομπής λόγω της μειωμένης απόσβεσης σήματος στην περίπτωση UL όπου η συσκευή συνδέεται με τον κοντινότερο σταθμό βάσης και όχι με ένα macrocell.

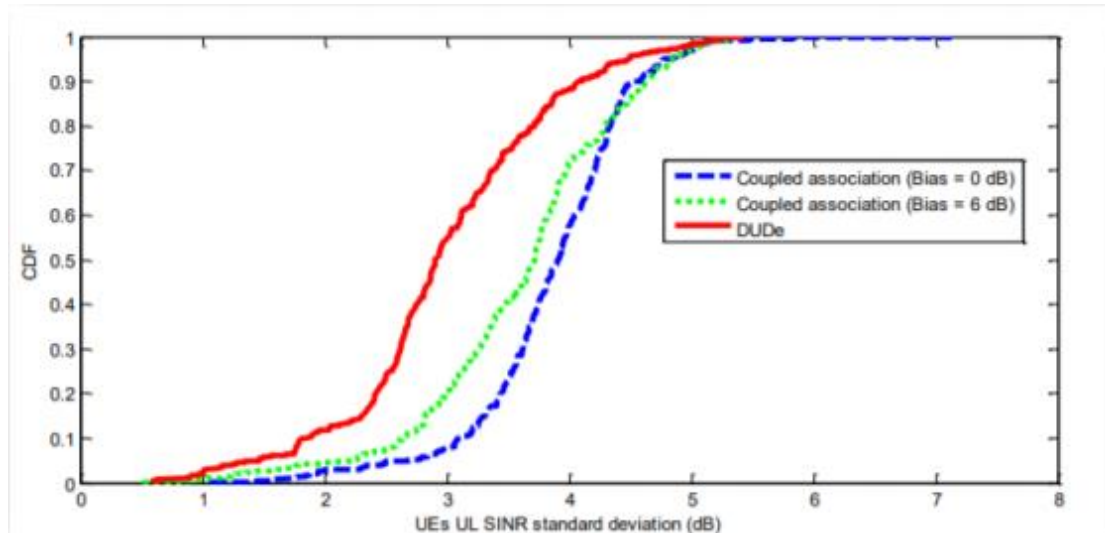


Εικόνα 25: Κατανάλωση ενέργειας

Στην παραπάνω εικόνα η μπλε γραμμή είναι δείχνει την μέση ισχύ DL/UL για συζευγμένο σύνδεσμο χωρίς υποδομές small cell. Η πράσινη γραμμή δείχνει την μέση ισχύ DL/UL αλλά με υποδομές small cell και η κόκκινη γραμμή αφορά το DUDe.

2. Βελτιωμένες συνθήκες παρεμβολών Uplink:

Το Downlink and Uplink Decoupling μειώνει τις παρεμβολές στο επίπεδο του UL. Αυτό δίνει την ελευθερία επιλογής της συσκευής για το αν θέλει ή όχι να συνδεθεί σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό όφελος, αφού για το επίπεδο UL η παρεμβολή σε μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων είναι ένα σύνολο πολλών διαφορετικών μεταδόσεων συσκευών σε διαφορετικά κελιά όπως λαμβάνονται από ένα δεδομένο σταθμό βάσης. Οι παρεμβολές που έρχονται από όλους αυτούς τους χρήστες σχετίζεται με την τοποθεσία τους. Από την άλλη πλευρά, για το DL η παρεμβολή σε έναν δεδομένο χρήστη εξαρτάται από την ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης, τα βάρη διαμόρφωσης δέσμης ζεύξης και την απόσταση από τους υπόλοιπους σταθμούς βάσης. Εκτός από αυτό, ο προγραμματισμός, που είναι σχεδόν ανεξάρτητος, και η φόρτωση στο UL και στο DL οδηγεί σε μεγαλύτερη τυχαιότητα στην παρέμβαση. Έτσι, η μέση παρεμβολή διαφέρει στο DL και το UL. Το DUDe δίνει την ελευθερία επιλογής της σύνδεσης με την μικρότερη παρεμβολή πράγμα που οδηγεί σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα. [32]



Εικόνα 26: Διάγραμμα SINR

Στην παραπάνω εικόνα με μπλε χρώμα αναπαρίσταται το SINR σε δίκτυο με ενοποιημένα DL/UL χωρίς small cells. Με πράσινη το SINR με ενοποιημένα DL/UL και υποδομές small cell και με κόκκινο χρώμα το SINR μέσω του DUDe.

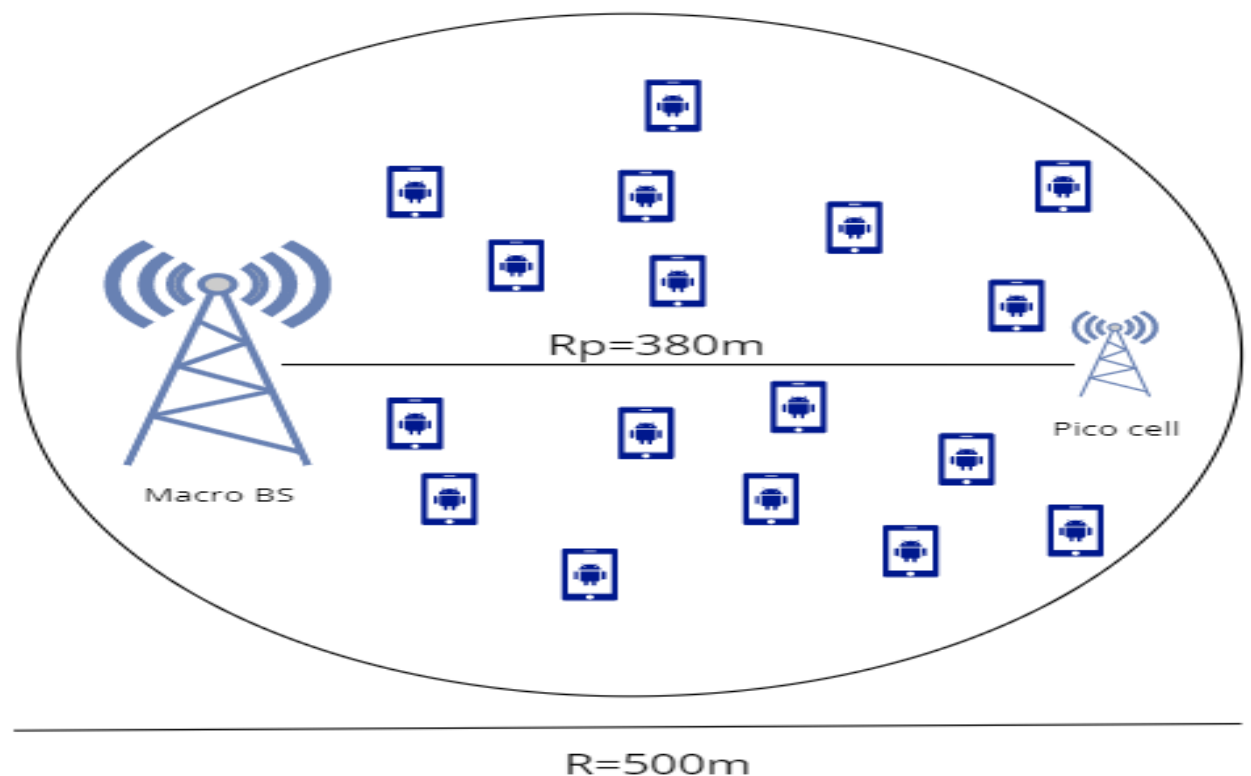
3. Διαφορετική εξισορρόπηση φορτίου Downlink και Uplink:

Το φορτίο που έχει ένα δεδομένο σταθμό βάσης στο UL μπορεί να είναι διαφορετικό από το φορτίο που μπορεί να έχει ο ίδιος σταθμός βάσης στο DL. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν είναι βέλτιστο να υπάρχει το ίδιο σύνολο συσκευών συνδεδεμένο με τον ίδιο σταθμό βάσης τόσο στο UL όσο και στο DL. Αυτό γίνεται Το DUDe επιτρέπει την ώθηση περισσότερων συσκευών σε μικρότερα κελιά στο UL μόνο εφόσον δεν περιορίζεται από παρεμβολές όπως συμβαίνει στο DL. Έτσι, πετυχαίνετε καλύτερη κατανομή των συσκευών μεταξύ macro και small cell που επιτρέπουν μια πιο αποτελεσματική χρήση πόρων και υψηλότερους ρυθμούς UL. [29]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μοντέλο συστήματος

5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια μεταξύ άλλων συζητήσαμε τα πλεονεκτήματα του DUDe και σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε κάποιες προσομοιώσεις για να αποδείξουμε το αυξημένο SINR στο UL και την μειωμένη ισχύ μετάδοσης στις DUDe συσχετίσεις. Θα κάνουμε 3 προσομοιώσεις με διαφορετικές παραμέτρους ώστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο έγκυρα. Θα ακολουθήσουν οι πίνακες με τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιήσουμε για τις προσομοιώσεις. Στην 1^η περίπτωση το μοντέλο που θα ακολουθήσουμε θα είναι αυτό με ένα κελί το οποίο έχει διάμετρο $R=300\text{m}$ και δύο BS, ένα macro cell και ένα pico cell. Το macro cell είναι τοποθετημένο στην άκρη του κελιού και το pico cell είναι στα 180m απόσταση από το macro cell. Οι συσκευές UEs που υπάρχουν σε αυτή την περίπτωση είναι 50. Το macro cell και το pico cell διαιρούν την μέγιστη ισχύ μετάδοσης ισότιμα σε κάθε χρήστη. Το κριτήριο με το οποίο θα αποφασίσουμε με ποιο BS θα συσχετιστεί το κάθε UE, στο DL και στο UL, είναι το SINR. Τα UEs μεταδίδουν σε όλο το εύρος ζώνης.



Εικόνα 27: Μοντέλο Συστήματος

Για την διαδικασία και την υλοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποίησα το εργαλείο της Matlab το οποίο μας προσφέρει η σχολή μας προς διευκόλυνση μας. Όλα τα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω έχουν δημιουργηθεί μέσω κώδικα σε γλώσσα Matlab.

Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιήσουμε παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα 1. Στην περίπτωση του DUCo σεναρίου, το DL SNR εκχωρεί στο BS στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η επικοινωνία χωρίς να λάβει υπόψη το UL SNR. Στην άλλη περίπτωση του DUDe σεναρίου, το DL και το UL είναι δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στις δικές μας προσομοιώσεις αποδεχόμαστε ότι στο DL έχουμε κεραιές με μεγάλα κέρδη και ισχύ μετάδοσης λόγω του ύψους του BS και του πραγματικού μεγέθους του. Σε αντίθεση, στο UL όλοι οι πομποί έχουν χαμηλή ισχύς μετάδοσης. Για τον λόγο αυτό, είναι πιθανό για ένα UE το οποίο είναι συσχετισμένο στο DL με ένα macro cell, στο UL να συσχετιστεί με το small cell ώστε να πάρει το πλεονέκτημα του μειωμένου path-loss. Έτσι, οι προσομοιώσεις έχουν σχέση με την συσχέτιση αυτή στο UL για να αποδείξουμε την υπεροχή του DUDe σεναρίου.

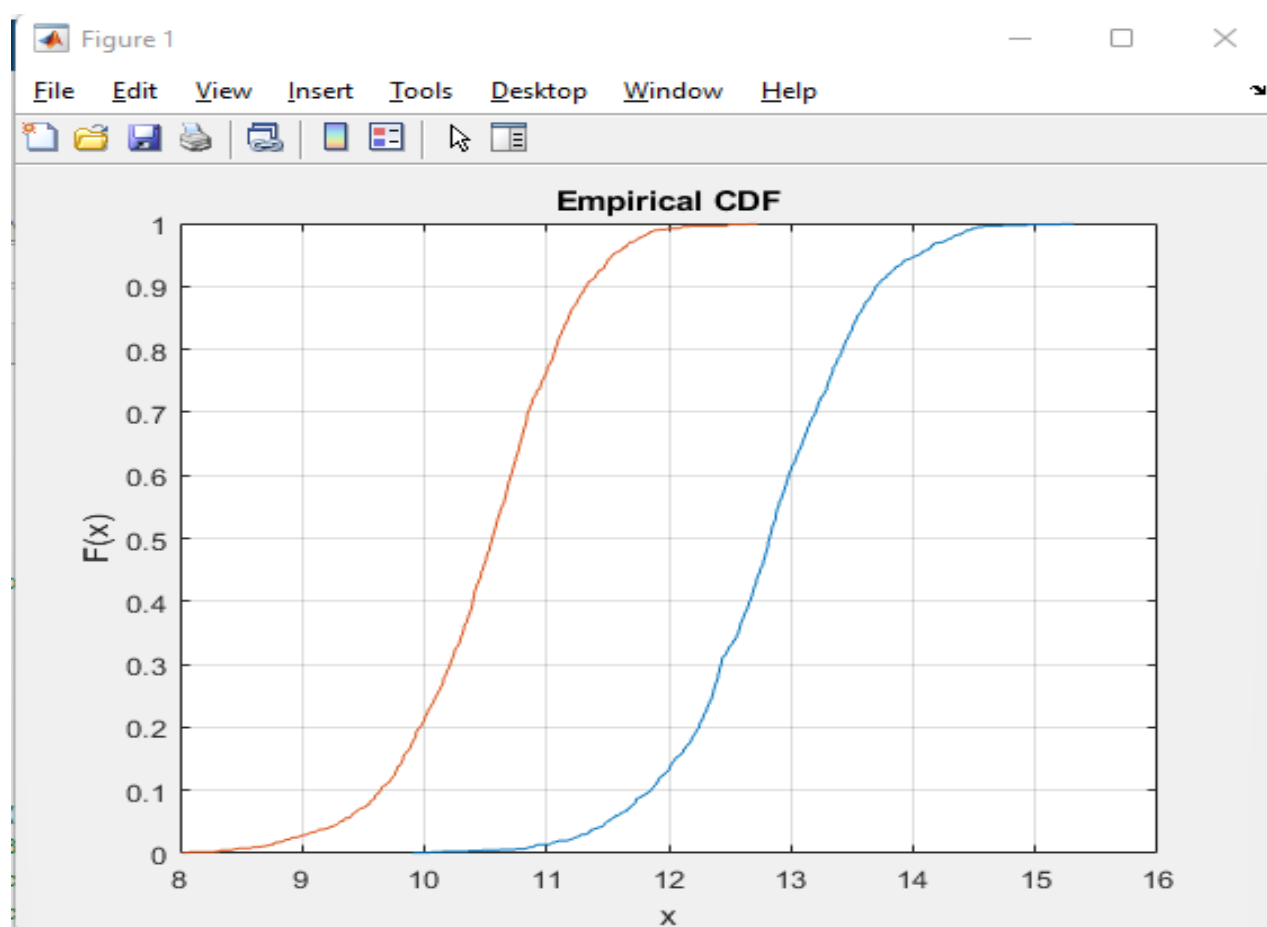
Πίνακας 1: Παράμετροι συστήματος

	Simulation 1	Simulation 2
Μέγιστη ισχύς μετάδοσης(dbm)	UEs=20 Macro cell=46 Pico cell=30	UEs=20 Macro cell=46 Pico cell=30
Κέρδος κεραιάς(dbi)	UEs=0 Macro cell=17.8 Pico cell=4	UEs=0 Macro cell=17.8 Pico cell=4
Εύρος ζώνης	20	20
Παράμετροι περιβάλλοντος	Χρήστες=80 Θέση χρηστών= Τυχαία Διάμετρος κελιού=500m Απόσταση macro και pico cell=380m	Χρήστες=80 Θέση χρηστών= Τυχαία Διάμετρος κελιού=500m Απόσταση macro και pico cell=380m
Δύναμη θορύβου	$P_{noise} = -174 + 10 \log(\text{Bandwidth}(\text{hz}))$	$P_{noise} = -174 + 10 \log(\text{Bandwidth}(\text{hz}))$
Μοντέλο path-loss	Απόσταση αναφοράς $d_0=100\text{m}$ Σταθερά path-loss $n=3.5$ Path-loss στην απόσταση αναφοράς $PL(d_0)=110\text{db}$	Απόσταση αναφοράς $d_0=100\text{m}$ Σταθερά path-loss $n=5$ Path-loss στην απόσταση αναφοράς $PL(d_0)=110\text{db}$
Στιγμιότυπα	1000	1000

5.2 Τυπική απόκλιση της προσομοίωσης του SNR

Στην προσομοίωση αυτή υπολογίζουμε το SNR για κάθε UE για 1000 στιγμιότυπα, πράγμα που μας οδηγεί στο να υπολογίσουμε το πιθανό SNR για τις δύο περιπτώσεις που εξετάζουμε (Coupled, DUDe). Στην συνέχεια υπολογίζουμε και απεικονίζουμε στο παρακάτω διάγραμμα την τυπική απόκλιση για κάθε στιγμιότυπο.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί ο οριζόντιος άξονας είναι η τυπική απόκλιση του SNR των UEs στο UL.



Εικόνα 28: Τυπική απόκλιση SNR

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από το παραπάνω διάγραμμα είναι τα εξής:

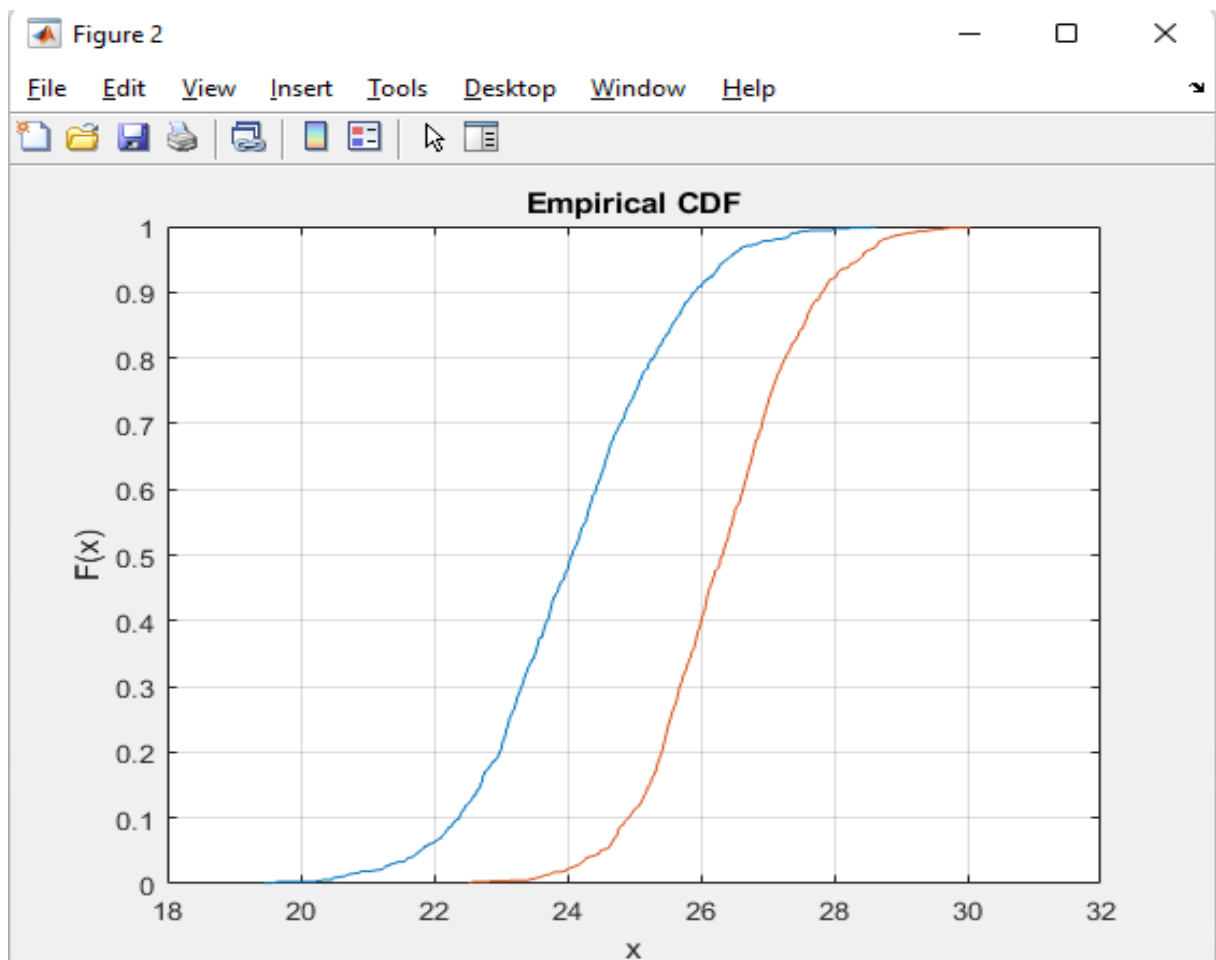
- Σε ένα περιβάλλον με μεγάλη απόκλιση είναι προτιμότερο να έχουμε συσχέτιση DUDe παρά coupled συσχέτιση.

- Βλέπουμε ότι για τιμές SNR 10 ή 11 db είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα υπάρχει DUDe συσχέτιση καθώς βλέπουμε ότι η πιθανότητα είναι από 60% και άνω.
- Από την άλλη παρατηρούμε ότι μόλις 2% με 5% είναι οι πιθανότητες να έχουμε coupled συσχέτιση στις ίδιες τιμές.

5.3 Μέσο SNR στο Uplink

Στο δεύτερο διάγραμμα της ίδιας προσομοίωσης και με τα στοιχεία που έχουμε για το SNR από το προηγούμενο διάγραμμα, υπολογίζουμε για τα 1000 στιγμιότυπα το μέσο SNR στο Uplink. Το διάγραμμα παρουσιάζεται για τα δύο σενάρια παρακάτω.

Στο παρακάτω διάγραμμα το x είναι το μέσο SNR των UEs στο UL.



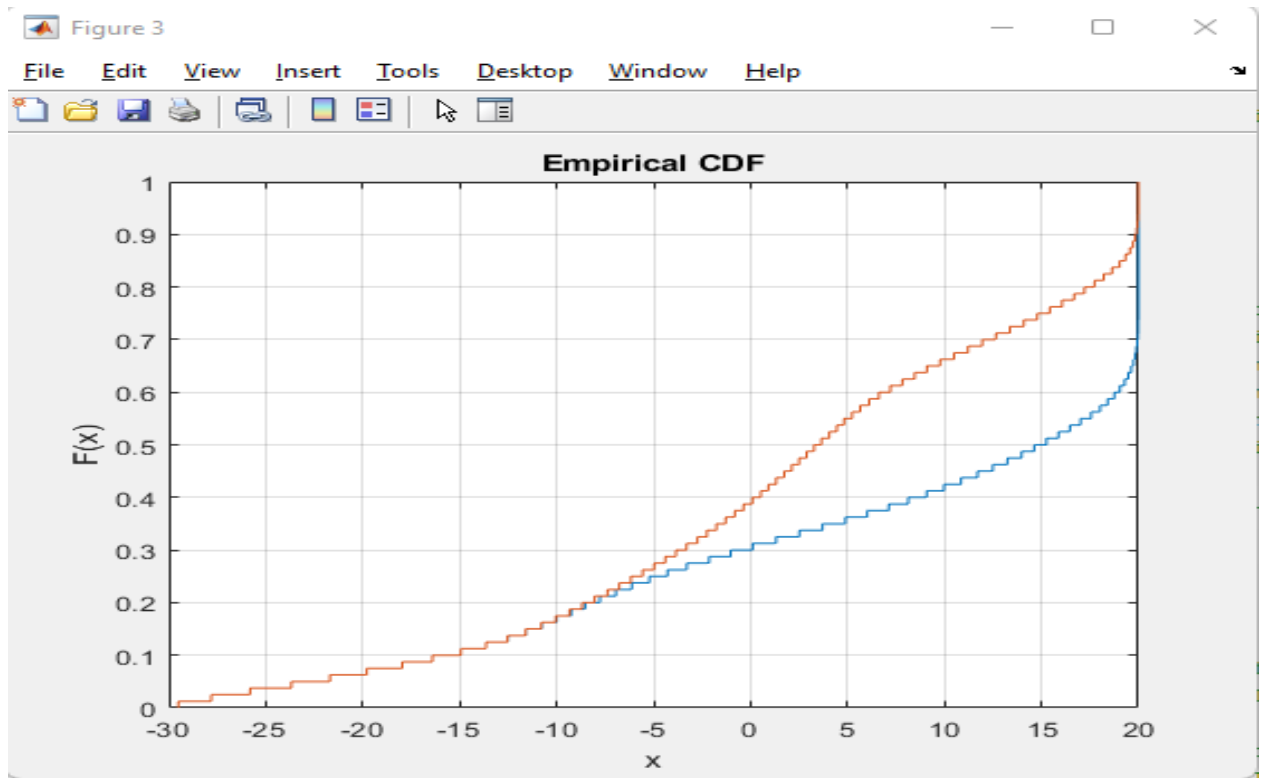
Εικόνα 29: Μέση τιμή SNR

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω προσομοίωσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο χαμηλότερο είναι το SNR, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να έχουμε coupled συσχέτιση. Τα συμπεράσματα που βγάζουμε από το παραπάνω διάγραμμα είναι τα εξής:

- Σε τιμές μέχρι 26dB η πιθανότητα να έχουμε coupled συσχέτιση είναι μεγαλύτερη(μέχρι και 90%) σε σχέση με αυτή της DUDe συσχέτισης που δεν ξεπερνά το 40%.
- Από 28dB και πάνω βλέπουμε πως είναι μεγαλύτερη πιθανότητα να έχουμε DUDe συσχέτιση καθώς η πιθανότητα είναι 80% και άνω.
- Αυτό συμβαίνει γιατί στις περιπτώσεις με χαμηλότερο SNR η σύνδεση είναι αποτελεσματικότερη από το macro cell, λόγω του μεγάλου κέρδους της κεραίας.

5.4 Προσομοίωση ισχύς μετάδοσης

Για το παρακάτω διάγραμμα, πρώτα υπολογίζουμε, για τις τιμές του SNR που υπολογίσαμε και πριν, τη μέση τιμή κάθε UE για κάθε στιγμιότυπο. Οι τιμές αυτές είναι οι επιθυμητές τιμές για το SNR που χρησιμοποιούμε για τους παρακάτω υπολογισμούς μας. Ανεξάρτητα από αυτό, η ισχύς που πρέπει να μεταδώσουν υπολογίζεται με σκοπό να επιτευχθεί το SNR που έχουμε σαν στόχο. Στην περίπτωση που η τιμή που υπολογίσαμε είναι πάνω από 20 dBm, τότε παίρνουμε σαν δεδομένο ότι το $P_{\text{transmit}} = 20\text{dBm}$, ανεξάρτητα με το τι υπολογίζουμε. Στο παρακάτω διάγραμμα το x είναι η μέση ισχύς μετάδοσης των UEs.



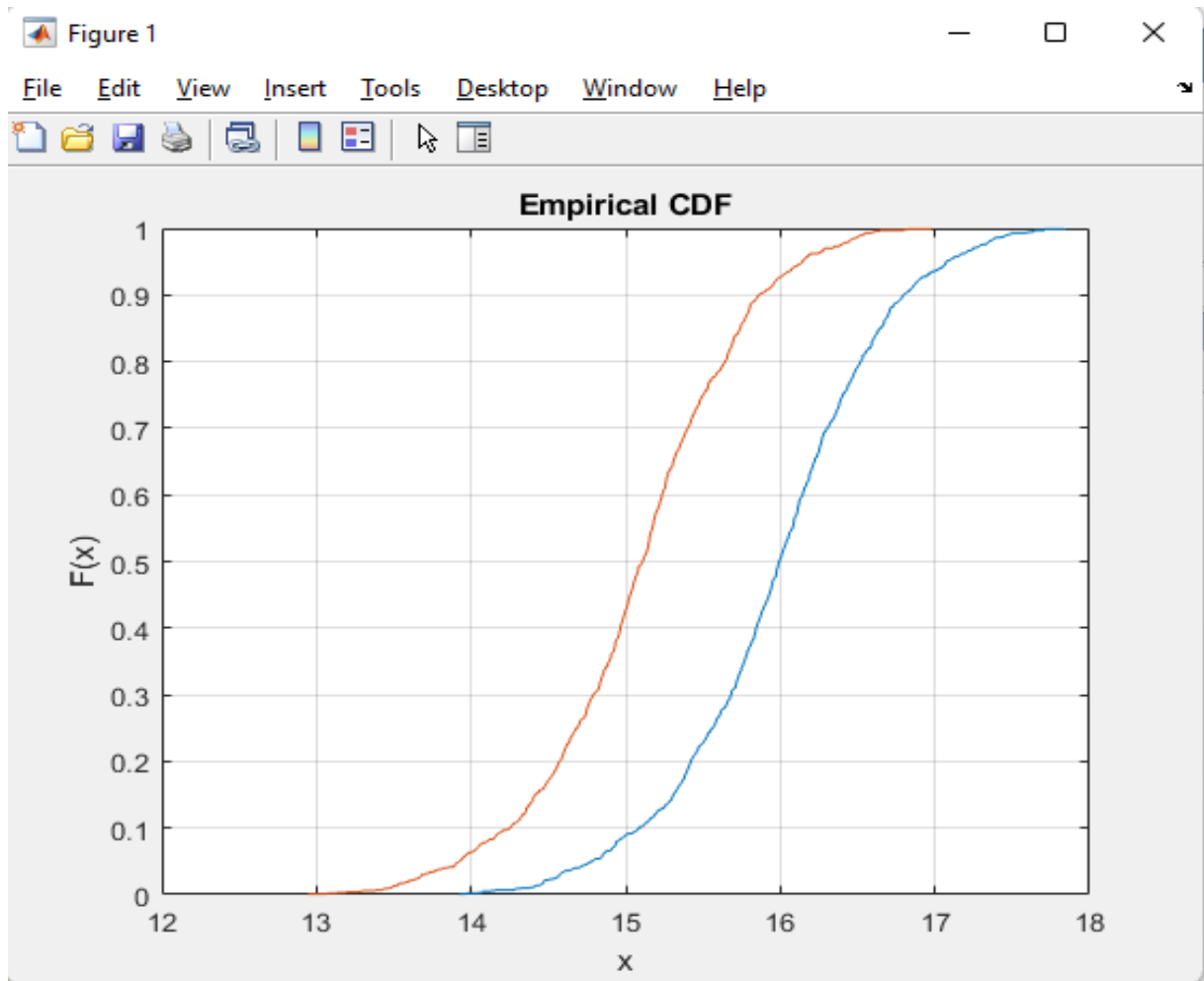
Εικόνα 30: Ισχύς μετάδοσης

Εξετάζοντας το παραπάνω διάγραμμα καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Όταν η ισχύς μετάδοσης ενός UE αυξάνεται τότε βλέπουμε ότι έχουμε πάνω από 60% πιθανότητα να έχουμε DUDe συσχέτιση.
- Συγκεκριμένα για τιμές από 11db και άνω έχουμε κοντά στο 70% πιθανότητα να έχουμε συσχέτιση DUDe.
- Ως αποτέλεσμα του διαγράμματος και ειδικότερα των δεδομένων που αναφέραμε μόλις, μπορούμε να πούμε ότι το DUDe σενάριο χρειάζεται λιγότερη ισχύ μετάδοσης για να έχει το ίδιο αποτέλεσμα με το coupled σενάριο.

5.5 Τυπική απόκλιση της προσομοίωσης του SNR

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε την δεύτερη προσομοίωση στην οποία όπως φαίνεται και στην δεύτερη στήλη του Πίνακα. Η μόνη παράμετρος η οποία έχει αλλαχτεί για να δούμε πόσο επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι η σταθερά του path-loss.



Εικόνα 31: Τυπική απόκλιση SNR

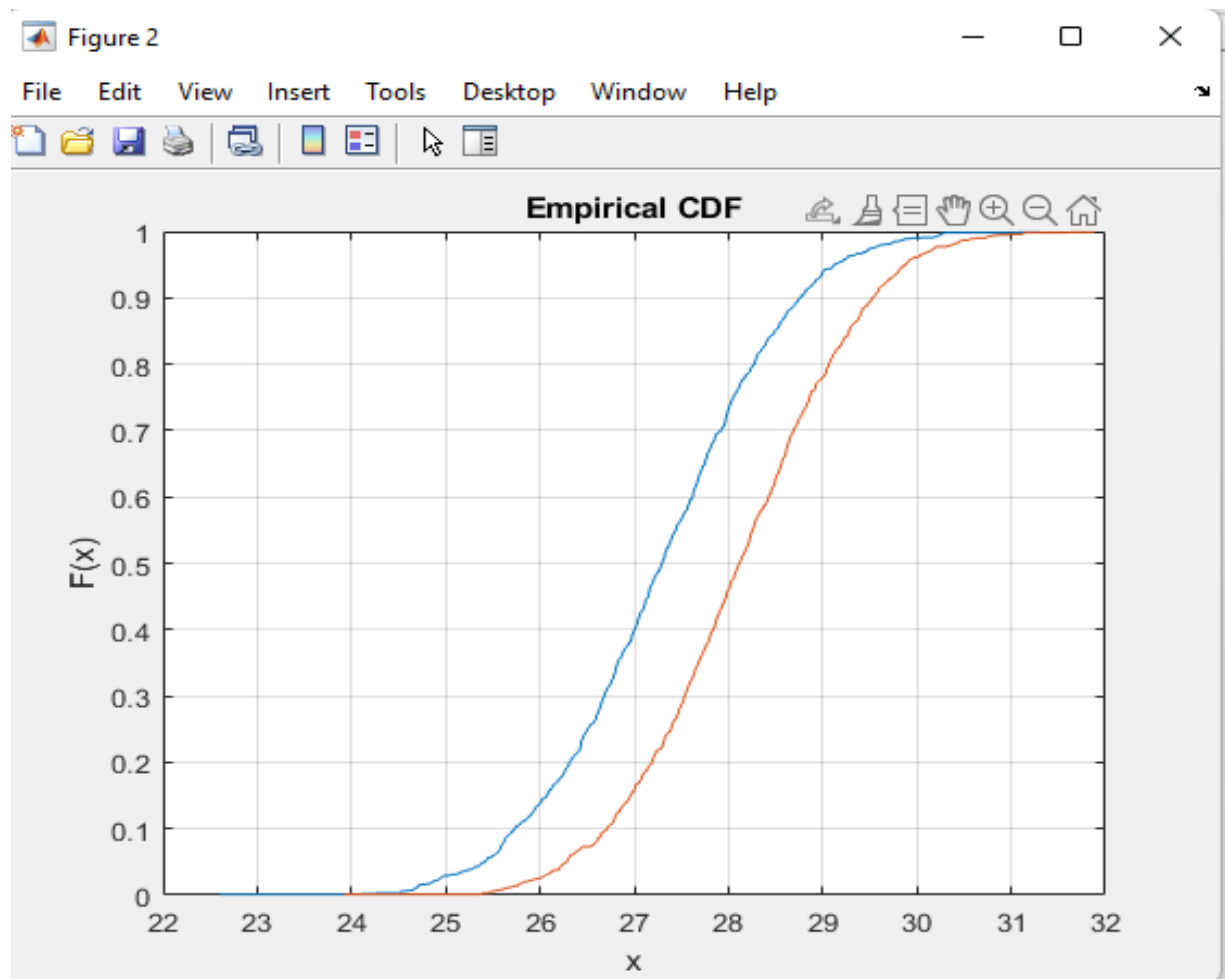
Σε αντίθεση με την πρώτη προσομοίωση από το παραπάνω διάγραμμα βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα για την δεύτερη προσομοίωση:

- Η αύξηση της σταθεράς του pathloss από 3.5 σε 5 όπως είναι φυσιολογικό επηρέασε τον υπολογισμό του SNR για κάθε UE.
- Βλέπουμε ότι σε αντίθεση με την πρώτη προσομοίωση που είχαμε σαφές συμπέρασμα ότι για υψηλή απόκλιση θα προτιμούσαμε DUDe συσχέτιση εδώ δεν έχουμε κάτι τέτοιο.
- Για τιμές από 15.5 dB βλέπουμε ότι έχουμε κοντά στο 80% πιθανότητα DUDe συσχέτισης και κοντά στα 30% coupled συσχέτισης.

5.6 Μέσο SNR στο Uplink

Στο παρακάτω διάγραμμα θα δούμε πόσο επηρέασε το μέσο SNR στο Uplink η αύξηση της σταθεράς pathloss n . Χωρίς να κοιτάξουμε το διάγραμμα μπορούμε να

σκεφτούμε ότι θα υπάρχει διαφοροποίηση καθώς είδαμε προηγουμένως ότι ο υπολογισμός του SNR για κάθε UE επηρεάστηκε.



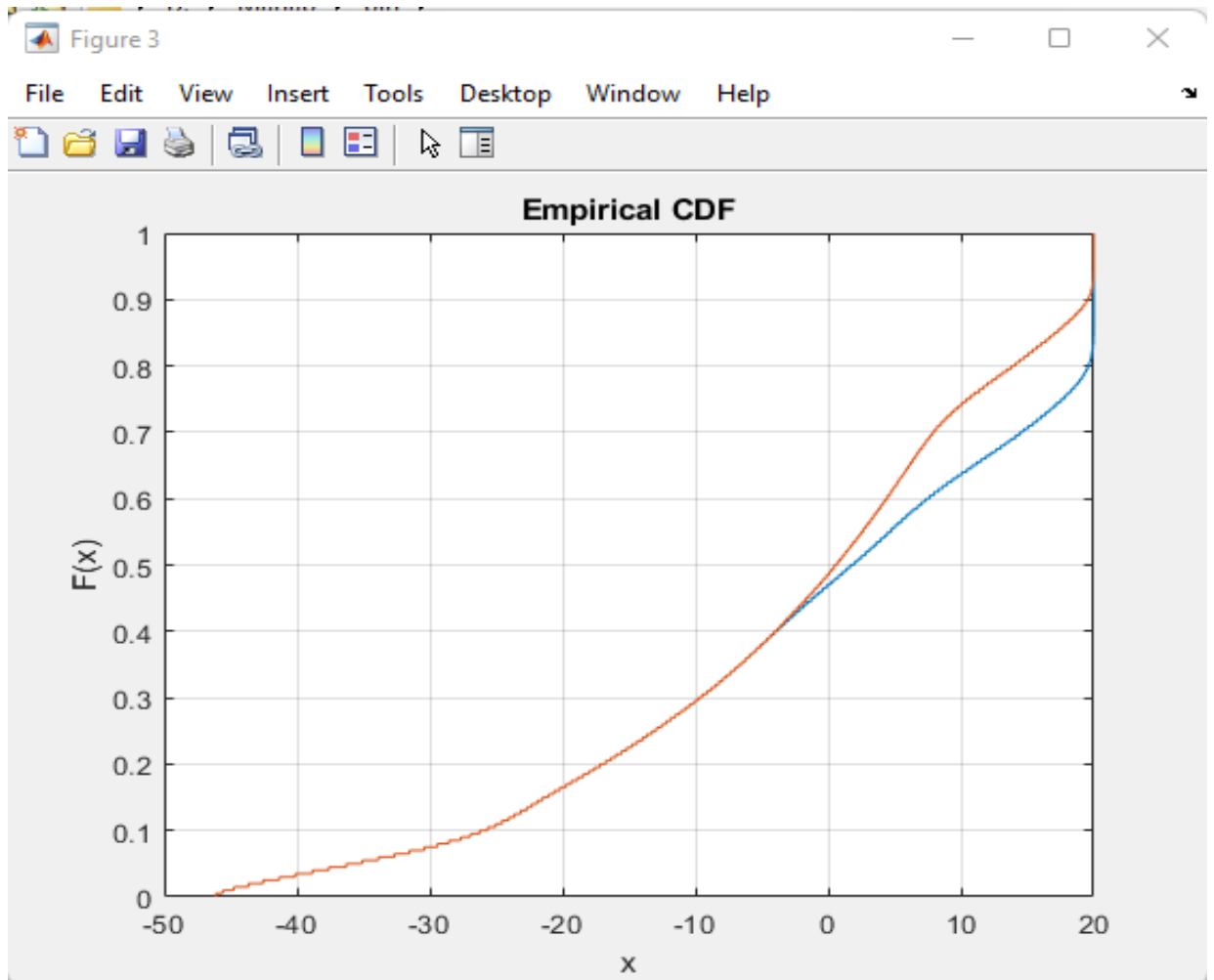
Εικόνα 32: Μέση τιμή SNR

Επομένως, από το παραπάνω διάγραμμα βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Για τιμές από 22db μέχρι 24db δεν έχουμε κάποια εικόνα.
- Από 25db και πάνω βλέπουμε μία διαφοροποίηση η οποία είναι μικρή και σταθερή.
- Παρόλα αυτά και πάλι βλέπουμε ότι και με αυξημένο το pathloss σε χαμηλότερες τιμές του SNR οι πιθανότητα να έχουμε DUDe συσχέτιση είναι μεγαλύτερη από αυτή του coupled.

5.7 Προσομοίωση ισχύς μετάδοσης

Τέλος, όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση θα υπολογίσουμε πρώτα για τις τιμές SNR που έχουμε από πριν, την μέση τιμή για κάθε UE για τα 1000 στιγμιότυπα.



Εικόνα 33: Ισχύς μετάδοσης

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε μία εικόνα σχετικά ίδια με την αντίστοιχη της προηγούμενης προσομοίωσης με την διαφορά να παρατηρείται στο ότι οι τιμές της μέσης τιμής ισχύος μετάδοσης των UEs φτάνει αρκετά χαμηλά. Στις πολύ χαμηλές τιμές έχουμε DUDe συσχέτιση και καταλήγουμε ότι χρειάζεται χαμηλότερη ισχύς μετάδοσης σε ένα DUDe σενάριο για να επιτύχουμε τα ίδια αποτελέσματα με ένα coupled σενάριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

6.1 Εισαγωγή Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μιλήσουμε για τα συμπεράσματα τα οποία βγάλαμε από την προσομοίωση που υλοποιήσαμε, σε τι ωφελεί η αποσύνδεση και ποιες μετρικές επηρεάζει θετικά.

Τέλος, θα κάνουμε και μία σύντομη αναφορά σε πιθανή μελλοντική εργασία που μπορεί να υλοποιηθεί.

6.2 Συμπεράσματα

Εάν κρίνουμε την ραγδαία αύξηση των χρηστών και των συσκευών IoT τα τελευταία χρόνια καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας θα είναι συνέχεια στο επίκεντρο τεχνολογικών ερευνών και επεκτάσεων.

Με τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς φτάσαμε στο σημείο όλη αυτή η αύξηση χρηστών και συσκευών να μπορεί να καλυφθεί σε μεγάλο βαθμό και να έχουμε πλέον ασύρματα δίκτυα στα οποία υπάρχει αλληλεπίδραση πολλών και διαφορετικών συσκευών.

Στην διπλωματική εργασία αυτή παρουσιάσαμε την εφαρμογή Downlink και Uplink Decoupling σε κινητά δίκτυα 5^{ης} γενιάς. Δείξαμε δύο προσομοιώσεις στις οποίες η μόνη διαφορά ήταν το pathloss. Οι μετρικές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ήταν το SNR και η ισχύς μετάδοσης των UEs. Αποδείχθηκε θεωρητικά και πρακτικά ότι με την DUDe συσχέτιση μπορεί να αυξηθεί το Uplink SNR και να μειωθεί η ισχύς μετάδοσης. Με τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι για την τυπική απόκλιση του SNR είναι προτιμότερη η DUDe συσχέτιση. Δεύτερον, για την μέση τιμή του SNR, όσο μικρότερη είναι η τιμή του SNR, η πιθανότητα να έχουμε coupled συσχέτιση είναι πολύ μεγαλύτερη εξαιτίας του μεγαλύτερου κέρδους της κεραίας του macro cell. Έτσι όσο μεγαλύτερο γίνεται το SNR στο Uplink τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα να έχουμε DUDe συσχέτιση. Στο DUDe έχουμε μεγαλύτερες τιμές SNR και επομένως μεγαλύτερο QoS. Τέλος, καταλήξαμε στο ότι χρειάζεται λιγότερη ισχύς μετάδοσης ενός UE στο DUDe σενάριο για να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα με το coupled σενάριο.

6.3 Μελλοντική εργασία

Η εφαρμογή της αποσύνδεσης του downlink και uplink μπορεί να χρησιμοποιείται αλλά δεν παύει να είναι ακόμα προς έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη. Υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις για την εφαρμογή της αποσύνδεσης στην πράξη. Το φορτίο και η χωρητικότητα των BSs μπορεί να επηρεάσουν την συσχέτιση των χρηστών. Επιπλέον, θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί περαιτέρω η κατανομή της ενέργειας και η πολλαπλή σύνδεση στα HetNets. Τέλος, θα μπορούσε μελλοντικά και με την έλευση των δικτύων 6^{ης} γενιάς να δούμε τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής σε αυτά τα δίκτυα.

Βιβλιογραφία

- [1] A. G. Lakshmi Kurup, "Overview on Generations of Network : 1G, 2G, 3G, 4G, 5G", Vivek Sanghvi et al, Int.J.Computer Technology & Applications, vol 5, Sept-Oct 2014.
- [2] D. J. W. Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", United States: Fifth Edition, Pearson Education. Inc, , 2011.
- [3] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.brainbridge.be/en/blog/1g-5g-brief-history-evolution-mobile-standards>.
- [4] S. D. K. S. Nikhil Bhandari, «Evolution of Cellular Network: From 1G to 5G,» *International Journal of Engineering and Techniques*, Sep - Oct 2017 .
- [5] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.bluwireless.com/insight/wireless-backhaul-and-small-cells/>.
- [6] R. S. Campos., «Evolution of Positioning Techniques in Cellular Networks, from 2G to 4G,» 12 Jan 2017.
- [7] N. N. S Kasera, 3G Networks: Architecture, Protocols and Procedures, 2004.
- [8] M. A. E.-s. M. S. Ayman ElNashar, Design, Deployment and Performance of 4G LTE Networks, 2014.
- [9] W. F. Y. F. P. K. A. L. A. R. P. F. J. D. F. G. V. K.-W. W. K. R. A. A. O. L. M. C. S. S. Sami Kekki, «MEC in 5G networks,» 2018.
- [10] F. Hu, Opportunities in 5G Networks.
- [11] N. a. A. O. Al-Falahy, «Technologies for 5G networks : challenges and opportunities,» 2017.
- [12] B. J. S. M. A.-M. GODFREY ANUGA AKPAKWU, «A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges,» 2017.
- [13] I. K. T. L. M. O. J. Y. M. & G. Ahmad, «. Overview of 5G security challenges and solutions.,» 2018.
- [14] K. M. S. H. S. M. R. Antonio Morgado, «A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives,» τόμ. 4, αρ. 2, 2018.
- [15] R. K. G. M. Haenggi, "Interference in Large Wireless Networks", Foundations and TrendsR in Networking Vol. 3, No. 2, 2009.
- [16] A. C. Maaly A. Hassan, "A Review of Interference Reduction In Wireless Networks Using Graph Coloring Methods", International journal on applications of graph theory in wireless ad hoc networks and sensor networks, March 2011.

- [17] I. S. A. Maaly A. Hassan, "Interference Reduction in mobile ad hoc and sensor networks", Journal of Engineering and Computer Innovations, 2011.
- [18] M. I. R. S. K. R. P. Nicola Marchetti, "OFDM: Principles and Challenges", Denmark: Center for TeleInfrastruktur (CTIF), 2009.
- [19] M. Engels, Wireless OFDM Systems, Belgium: KLUWER ACADEMIC , 2002.
- [20] N. Marchetti και e. al, "OFDM: Principles and Challenges" Center for TeleInfrastruktur, Aalborg University, Denmark, 2019.
- [21] S. Ahmadi, 5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards, 2019.
- [22] M. B. C.-P. Mario H. Castañeda Garcia, «A Tutorial on 5G NR V2X Communications,» *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, τόμ. 23, αρ. 3, 2021.
- [23] F. R. F. T. G. L. E. Jose Flordelis, «Massive MIMO Performance—TDD Versus FDD:What Do Measurements Say?,» 2017.
- [24] J. B. S. N. L. Hanzo, 3G,HSPA and FDD versus TDD Networking, 2008.
- [25] [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Heterogeneous_network.
- [26] J. G. Andrews, "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift", IEEE Communications Magazine, March 2013.
- [27] F. B. M. D. R. I. H. Elshaer, «"Downlink and Uplink Decoupling: a Distruptive Architectural Design for 5G Networks.",» 2014.
- [28] P. P. L. K. Smiljkovikj, «"Analysis of the Decoupled Access for Downlink and Uplink in Wireless Heterogeneous Networks",» 2015.
- [29] F. Boccardi, J. Andrews και H. Elshaer, "Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do it", IEEE Communications Magazine, March 2016.
- [30] V. B. H. Boostanimehr, «"Joint Downlink and Uplink Aware Cell Association in HetNets with QoS Provisioning"».
- [31] X. Z. a. J. G. A. S. Singh, «"Joint Rate and SINR Coverage Analysis for Decoupled Uplink-Downlink Biased Cell Associations in HetNets",» 2014.
- [32] F. e. a. Muhammad, "Decoupled downlink-uplink coverage analysis with interference management for enriched heterogeneous cellular networks", IEEE Access 4, 2016.

ΚΩΔΙΚΑΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας σε Matlab με τον οποίο έγινε η προσομοίωση στο Κεφάλαιο 5. Με κίτρινο χρώμα είναι τα σχόλια για να είναι πιο κατανοητή η διαδικασία που ακολουθήσαμε.

```
clear all

%παράμετροι περιβάλλοντος
BW=20; %bandwidth σε MHz
NOISE=-174+10*log10(BW*1000000);
N=200; %αριθμός χρηστών
do=100; %απόσταση αναφοράς
PL0=110; % path loss απόστασης αναφοράς σε db
n=3.5; %σταθερά path loss
R=500; %διάμετρος κελιού σε μέτρα
hbsm=25; % ύψος macro BS σε μέτρα
hbsp=10; % ύψος pico BS σε μέτρα
Rp=380; % οριζόντια απόσταση pico cell
ptmall=46; % ισχύς μετάδοσης macro cell σε dBm (για όλο το BW)
ptrpall=30; % ισχύς μετάδοσης pico cell σε dBm (για όλο το BW)
prtue=20; % ισχύς μετάδοσης user equipment σε dBm (για όλο το BW)
ptrp=ptrpall-10*log10(N); % ισχύς μετάδοσης από το pico cell άνα χρήστη σε dBm
ptm=ptmall-10*log10(N); % ισχύς μετάδοσης από το macro cell άνα χρήστη σε dBm
Gm=17.8; % κέρδος κεραίας Macro BS σε dBi
Gr=4; %κέρδος κεραίας Pico BS σε dBi
Gue=0; %κέρδος κεραίας UE σε dBi
% τυχαία οριζόντια θέση χρηστών
snar=1000; %αριθμός στιγμιοτύπων
x=randi(R,snar,N);
```

```

for i=1:snap
for j=1:N
%macro cell
dm(i,j)=sqrt(x(i,j)^2+hbsm^2); % απόσταση χρήστη και macro cell
PLm(i,j)=PL0+10*n*log10(dm(i,j)/do); %path loss ανάμεσα σε macro cell και χρήστη
%pico cell
dp(i,j)=sqrt((abs(Rp-x(i,j)))^2+hbsp^2); % απόσταση χρήστη και pico cell
PLp(i,j)=PL0+10*n*log10(dp(i,j)/do); %path loss ανάμεσα σε pico cell και χρήστη
end
end
%uplink
for i=1:snap
for j=1:N
prm(i,j)=ptue+Gm+Gue-PLm(i,j); % ισχύς που λαμβάνεται από το macro cell
SNRmU(i,j)=prm(i,j)-NOISE;
prp(i,j)=ptue+Gr+Gue-PLp(i,j); %ισχύς που λαμβάνεται από το pico cell
SNRpU(i,j)=prp(i,j)-NOISE;
end
end
%downlink
for i=1:snap
for j=1:N
pruem(i,j)=ptm+Gm+Gue-PLm(i,j); % ισχύς που λαμβάνεται από το macro cell
SNRuemD(i,j)=pruem(i,j)-NOISE;
pruer(i,j)=ptr+Gr+Gue-PLp(i,j); %ισχύς που λαμβάνεται από το pico cell
SNRuempD(i,j)=pruer(i,j)-NOISE;
end
end
%coupled σενάριο

```

```

for i=1:snap
    for j=1:N
        if SNRuemD(i,j)>=SNRuepD(i,j)
            SNRcoupledU(i,j)=SNRmU(i,j);
        else
            SNRcoupledU(i,j)=SNRpU(i,j);
        end
    end
end

%decoupled uplink σενάριο
for i=1:snap
    for j=1:N
        if SNRmU(i,j)>=SNRpU(i,j)
            SNRdecoupledU(i,j)=SNRmU(i,j);
        else
            SNRdecoupledU(i,j)=SNRpU(i,j);
        end
    end
end

%plot τυπικής απόκλισης
SNRdevcoupledU=std(SNRcoupledU,0,2);
SNRdevdecoupledU=std(SNRdecoupledU,0,2);
figure(1)
cdfplot(SNRdevcoupledU)
hold
cdfplot(SNRdevdecoupledU)

%plot για μέση τιμή SNR
for i=1:snap
    SNRcoupledUmean(i)=mean(sort(SNRcoupledU(i,:),2));

```

```

SNRdecoupledUmean(i)=mean(sort(SNRdecoupledU(i,:),2));
end
figure(2)
cdfplot(SNRcoupledUmean)
hold
cdfplot(SNRdecoupledUmean)
% ισχύς μετάδοσης του UE όταν απαιτείται συγκεκριμένο SNR
SNRtargetmU=(sum(sum(SNRmU),2))/(snap*N);
SNRtargetpU=(sum(sum(SNRpU),2))/(snap*N);
%macro cell
for i=1:snap
for j=1:N
%macro cell
pttargetUm(i,j)=SNRtargetmU+NOISE+PLm(i,j)-Gue-Gm;
%pico cell
pttargetUp(i,j)=SNRtargetpU+NOISE+PLp(i,j)-Gue-Gm;
end
end
%coupled ισχύς μετάδοση για συγκεκριμένο SNR
for i=1:snap
for j=1:N
if SNRuemD(i,j)>=SNRuepD(i,j)
if pttargetUm(i,j)<=20
pttargetUcoupled(i,j)=pttargetUm(i,j);
else
pttargetUcoupled(i,j)=20;
end
else
if pttargetUp(i,j)<=20

```

```

pttargetUcoupled(i,j)=pttargetUp(i,j);
else
pttargetUcoupled(i,j)=20;
end
end
end
end
end
% decoupled ισχύς μετάδοση για συγκεκριμένο SNR
for i=1:snap
for j=1:N
if SNRmU(i,j)>=SNRpU(i,j)
if pttargetUm(i,j)<=20
pttargetUdecoupled(i,j)=pttargetUm(i,j);
else
pttargetUdecoupled(i,j)=20;
end
else
if pttargetUp(i,j)<=20
pttargetUdecoupled(i,j)=pttargetUp(i,j);
else
pttargetUdecoupled(i,j)=20;
end
end
end
end
pttargetUcoupledsorted=sort(pttargetUcoupled,2);
pttargetUdecoupledsorted=sort(pttargetUdecoupled,2);
figure(3)
cdfplot(mean(pttargetUcoupledsorted))

```

```
hold
```

```
cdfplot(mean(pttargetUdecoupledsorted))
```