



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

Διπλωματική Εργασία

**Στρατηγικές αδρανοποίησης σταθμών βάσης (*sleep mode*) σε πυκνά
κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς**

Συγγραφέας:

Κουκουλομάτης Θωμάς

A.M. 6091

Επιβλέπων:

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Μέλη Επιτροπής Αξιολόγησης:

Αλεξίου Γεώργιος, Καθηγητής

Βλάχος Κυριάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Πάτρα 2020

© Copyright συγγραφέας Κουκουλομάτης Θωμάς, 2020

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει υλοποιηθεί στα πλαίσια προπτυχιακής φοίτησης στο τμήμα των Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι «**Στρατηγικές αδρανοποίησης σταθμών βάσης (sleep mode) σε πυκνά κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς**».

Προτού όμως γίνει η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου στο οποίο στηριχθήκαμε καθώς και των συμπερασμάτων στα οποία καταλήξαμε θα ήθελα να ευχαριστήσω, θερμά τον καθηγητή του ΤΜΗΥΠ στο Πανεπιστήμιο Πατρών και Επιστημονικό Υπεύθυνο της Μονάδας 6 του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων (ΙΤΥΕ), κ. Χρήστο Μπούρα. Η καθοδήγηση του ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον συνάδελφο και φίλο Ραφαήλ με τη βοήθεια του οποίου μέσα από συζητήσεις κατάφερα να διευρύνω τις γνώσεις μου σε ότι αφορά τα ασύρματα δίκτυα πέμπτης γενιάς.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη που προσέφεραν απλόχερα καθόλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών. Αναμφίβολα, η υποστήριξη τους αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στην επιτυχή ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Πάτρα, 2020

Κουκουλομμάτης Θωμάς

Περίληψη

Είναι γεγονός ότι η σημερινή εποχή χαρακτηρίζεται από τους γοργούς ρυθμούς εξέλιξης της τεχνολογίας των ασύρματων κινητών δικτύων. Η έλευση της τεχνολογίας 5G, έδωσε το έναυσμα για την αυτοματοποίηση βασικών λειτουργιών επηρεάζοντας τόσο την εμπειρία του τελικού χρήστη, όσο και την κοινωνία μας. Βασικός πυλώνας της εν λόγω τεχνολογικής εξέλιξης αποτελούν τα νέα σημεία πρόσβασης τύπου Small Cell, τα οποία σε συνδυασμό με τους ήδη υπάρχοντες σταθμούς βάσης Macrocell συνθέτουν ένα ετερογενές πυκνό δίκτυο, το οποίο προσφέρει δυνατότητες σύνδεσης πολλαπλάσιων χρηστών σε σχέση με παλαιότερα δίκτυα, αυξημένες ταχύτητες, μηδαμινή καθυστέρηση σύνδεσης καθώς και μια πληθώρα νέων υπηρεσιών και εφαρμογών.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη ενός πυκνού ετερογενούς δικτύου πέμπτης γενιάς, το οποίο θα εμπεριέχει μεγάλο αριθμό σημείων πρόσβασης τύπου Femtocell, ως προς την συνολική απόδοση των χρηστών του δικτύου αλλά κυρίως τη μείωση της συνολικής ενέργειας που κατασπαταλάται. Χρησιμοποιώντας τόσο στρατηγικές αδρανοποίησης σταθμών βάσης όσο και την υβριδική πολιτική πρόσβασης στα εν λόγω σημεία καταλήγουμε σε συμπεράσματα αναφορικά με την μείωση της συνολικής ενέργειας.

Abstract

It is a fact that today's era is characterized by the rapid development of wireless mobile technology. The advent of 5G technology has enabled the rise of automation of basic functions affecting both the user and all society. Basic parameters of this technological evolution are the new Small Cell access points, which, in combination with existing macrocell stations, comprise a heterogeneous dense network, offering connectivity features to multiple users, compared with existing ones, with increased operating speeds, approximately zero latency but with the main focus being to reduce the total power required.

The purpose of this thesis is to study a dense fifth generation heterogeneous 5G network, which will include a large number of Femtocell access points, in terms of the overall performance of the network users focusing on the reduction of the total wasted energy. Using both base station hibernation strategies and the hybrid access policy at these points, we come to conclusions regarding the reduction of overall energy consumption.

Οι άνθρωποι γενικά κρίνουν περισσότερο
από τα φαινόμενα παρά από την πραγματικότητα,
γιατί η όραση ανήκει σε όλους, ενώ η αντίληψη σε λίγους.

Πλάτων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	1
1 Δίκτυα 1G-4G	3
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	3
1.2 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G)	5
1.3 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G).....	6
1.4 Δίκτυα Τρίτης γενιάς (3G)	7
1.5 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G)	8
2 Δίκτυα 5G.....	11
2.1 Εισαγωγή στα Δίκτυα 5G.....	11
2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 5G	12
2.3 Τεχνολογίες Δικτύων 5 ^{ης} Γενιάς.....	15
2.3.1 SDN (Software Defined Networking).....	16
2.3.2 NFV (Network Function Virtualization)	16
2.3.3 UDD (Ultra Dense Deployments)	17
2.3.4 Cloud Computing.....	17
2.3.5 Network Slicing	18
2.3.6 Millimeter Waves (mmWave).....	19
2.3.7 Small Cells.....	20
2.3.8 Massive MIMO	21
2.3.9 Beamforming	21
2.3.10 Full Duplex	22
2.3.11 D2D Communication (Device to Device)	23
2.4 Εφαρμογές 5G	24
3 Ανασκόπηση της Ερευνητικής Περιοχής	26
3.1 Εισαγωγή στα Small Cells	26
3.2 Γενικά Χαρακτηριστικά	27
3.3 Κατηγορίες Small Cells	29
3.3.1 Femtocell	30
3.3.2 Picocell.....	31

3.3.3	Microcell	33
3.4	Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G	35
3.5	Πρόκληση Παρεμβολών	36
3.6	Πολιτικές Προσβασιμότητας Femtocell (Femtocell Access Policy)	38
3.6.1	Closed Access (Κλειστή Προσβασιμότητα)	39
3.6.2	Open Access (Ανοικτή Προσβασιμότητα).....	39
3.6.3	Hybrid Access (Υβριδική Προσβασιμότητα)	39
3.7	Clustering (Ομαδοποίηση)	40
3.8	Sleep Mode.....	41
3.8.1	Εισαγωγή	41
3.8.2	Βασική Αρχιτεκτονική Small Cells	42
3.8.3	Καταστάσεις Sleep Mode	44
3.8.4	Κατηγορίες Sleep Mode	45
4	Περιγραφή Μηχανισμού	50
4.1	Μοντέλο Συστήματος.....	51
4.2	Προτεινόμενη Στρατηγική	53
4.3	Προτεινόμενος Αλγόριθμος	57
5	Πειραματική Προσομοίωση.....	58
5.1	Παράμετροι Προσομοίωσης	58
5.2	Πειραματικά Αποτελέσματα	61
6	Δίκτυα 6G.....	67
6.1	Εισαγωγή.....	67
6.2	Εφαρμογές του 6G	68
6.3	Τεχνολογίες 6G	71
7	Επίλογος.....	73
7.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα	73
7.2	Μελλοντική Εργασία.....	76
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ανύψωση Κεραίας από τον Marconi, December 1901.	3
Εικόνα 2: Η αποτελεσματική εκμετάλλευση του φάσματος στο πέρασμα των γενεών των ασύρματων Δικτύων.....	4
Εικόνα 3: Προσφερόμενες δυνατότητες τεχνολογίας 1G.	5
Εικόνα 4: Ανάγκη των Users για μεγαλύτερα Data Rates στα Δίκτυα 2G.	6
Εικόνα 5: Σύγκριση μεταξύ τεχνολογιών 2G-3G.....	7
Εικόνα 6: Χαρακτηριστικά και εφαρμογές για δίκτυα 1G-4G.	10
Εικόνα 7: Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων μέχρι και σήμερα.	12
Εικόνα 8: Χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων στα 5G δίκτυα.....	13
Εικόνα 9: Στόχοι-υπηρεσίες των δικτύων 5G.	15
Εικόνα 10: Τοπολογία ετερογενούς πυκνού δικτύου 5G.	17
Εικόνα 11: Cloud Computing Layers.....	18
Εικόνα 12: Φάσμα ραδιοσυχνότητας FR2.	20
Εικόνα 13: Τεχνολογικοί πυλώνες για την υλοποίηση των 5G δικτύων.	23
Εικόνα 14: Υπηρεσίες που θα καταστούν εφικτές με την υλοποίηση των 5G δικτύων.	25
Εικόνα 15: Εικόνα Smallcell.	29
Εικόνα 16: Εικόνα οικιακών femtocell.	30
Εικόνα 17: Εικόνα picocell.	32
Εικόνα 18: Εικόνα χρήσης όλων των Smallcells.....	34
Εικόνα 19: Απεικόνιση Αρχιτεκτονικής επιπέδου 5G.	36
Εικόνα 20: Απεικόνιση Παρεμβολών σε ένα ετερογενές δίκτυο.....	38
Εικόνα 21: Απεικόνιση clustering.....	41
Εικόνα 22: Κύκλωμα Αρχιτεκτονικής Smallcell.	42
Εικόνα 23: Στιγμιότυπο του Δικτύου με όλα τα femtocells Active.....	59
Εικόνα 24: Στιγμιότυπο του Δικτύου με απενεργοποιημένα femtocells.....	60
Εικόνα 25: Στιγμιότυπο του Δικτύου απεικονίζοντας τα Clusters.	61
Εικόνα 26: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells που εισέρχονται σε sleep mode.	62
Εικόνα 27: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells που εισέρχονται σε sleep mode καθώς αυξάνονται οι χρήστες.	63
Εικόνα 28: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells και σχηματιζόμενων clusters.....	64
Εικόνα 29: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells και του μέσου όρου τους στα σχηματιζόμενων clusters.	65
Εικόνα 30: Γραφική παράσταση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής των data rate των χρηστών.....	66
Εικόνα 31: Ιστορική αναδρομή μέχρι και το επερχόμενο 6G.....	68
Εικόνα 32: Τεχνολογίες που το 6G υπόσχεται να υλοποιήσει.	71
Εικόνα 33: Πως τα Small Cells λύνουν το πρόβλημα της πυκνοποίησης του Δικτύου.	75

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Macrocell-Smallcell.....	34
Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης ενέργειας smallcell.....	44
Πίνακας 3: Πειραματικές Παράμετροι προσομοίωσης.....	59

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Παρακάτω παραθέτονται συντομεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα Διπλωματική Εργασία, συνοδευόμενες από την επεξήγηση τους, τοποθετημένες σε αλφαβητική σειρά.

Συντόμευση	Επεξήγηση
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
6G	Sixth Generation
8-PSK	Eight Phase Shift Keying
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BBU	Baseband Unit
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code Division Multiple Access
CSG	Closed Subscribed Group
C-RAN	Cloud Radio Access Network
D2D	Device To Device
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data Rates GSM Environment
eMBB	Enhanced Mobile Broadband

EPC	Evolved Packet Core
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FPGA	Field Programmable Gate Array
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSK	Gaussian Minimum Shift Key
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System For Mobile Communications
HetNets	Heterogeneous Networks
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HSPA+	High Speed Packet Access Plus
IaaS	Infrastructure As A Service
IMT-2020	International Mobile Telecommunication System 2020
IoT	Internet Of Things
IP	Internet Protocol Address
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
M2M	Machine To Machine
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Management Entity
mMTC	Massive Machine Type Communications
mmWave	Millimeter Wave

MPS	Multimedia Priority Service
MSC	Mobile Switching Center
NFV	Network Function Virtualization
NR	New Radio
NTP	Network Time Protocol
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PA	Power Amplifier
PaaS	Platform As A Service
PL	Path Loss
QoS	Quality Of Service
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RE	Ready State
RF	Radio Frequency
RRU	Remote Radio Unit
SaaS	Software As A Service
SDN	Software Defined Networking
SINR	Signal To Interference And Noise Ratio
SL	Sleep State
SMARTER	Study On New Services And Market Technology Enablers
TDMA	Time-Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

URLCC	Ultra Reliable Low Latency Communications
V2X	Service Layer To Service
VR	Virtual Reality
WiMax	World Wide Interoperability Microwave Access
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Εισαγωγή

Εν έτη 2020 έχουμε τη τύχη να γινόμαστε μάρτυρες της τεχνολογικής εξέλιξης παγκοσμίως μέσω ενός “click” στην οθόνη του κινητού μας. Για να φτάσουμε στο σημείο αυτό, προυπήρξε μία σκληρή και επίπονη μελέτη της επιστημονικής κοινότητας πάνω στο θέμα των ασύρματων κινητών δικτύων. Ξεκινώντας από πολύ βασικές τοπολογίες δικτύων, φτάσαμε να βρισκόμαστε πλέον στην τεχνολογία 5G, η έλευση της οποίας έδωσε το έναυσμα για την αυτοματοποίηση βασικών λειτουργιών επηρεάζοντας τόσο το χρήστη, όσο και την κοινωνία μας. Βασικός πυλώνας της εν λόγω τεχνολογικής εξέλιξης αποτελούν τα νέα σημεία πρόσβασης τύπου Small Cells, τα οποία σε συνδυασμό με τους ήδη υπάρχοντες σταθμούς βάσης macrocell συνθέτουν ένα ετερογενές πυκνό δίκτυο, το οποίο προσφέρει δυνατότητες σύνδεσης πολλαπλάσιων χρηστών σε σχέση με παλαιότερα, αυξημένες ταχύτητες, μηδαμινή καθυστέρηση σύνδεσης καθώς και μια πληθώρα νέων υπηρεσιών και εφαρμογών. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη ενός πυκνού ετερογενούς δικτύου πέμπτης γενιάς, το οποίο θα εμπεριέχει μεγάλο αριθμό σημείων πρόσβασης τύπου Femtocell, ως προς την συνολική απόδοση του δικτύου αλλά κυρίως τη μείωση της συνολικής ενέργειας που κατασπαταλάται. Χρησιμοποιώντας τόσο στρατηγικές αδρανοποίησης σταθμών βάσης όσο και την υβριδική πολιτική πρόσβασης στα εν λόγω σημεία, καταλήγουμε σε συμπεράσματα αναφορικά με την μείωση της συνολικής ενέργειας. Παρακάτω λαμβάνει χώρα, μία μικρή προεπισκόπηση στο τι θα διαβάσει ο αναγνώστης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 1, ξεκινάμε κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας, εξετάζοντας την εξέλιξη τους από την πρώτη έως την τέταρτη γενιά. Είναι σημαντικό για τον αναγνώστη να είναι σε θέση να αντιληφθεί την πορεία εξέλιξης των δικτύων από γενιά σε γενιά, για να μπορεί να καταλάβει την διαφορά, σε ότι αφορά την παροχή υπηρεσιών, που έφερε η κάθε μια από αυτές στη ζωή μας. Θα συνεχίσουμε με μια σύντομη εισαγωγή στα δίκτυα 5G και τα χαρακτηριστικά τους που τα διαφοροποιούν από τις προηγούμενες αλλά και τα καθιστούν αναγκαία στην περίοδο που διανύουμε τεχνολογικά.

Στο Κεφάλαιο 2, θα γίνει μία εκτενής αναφορά στα δίκτυα 5G. Δίνεται έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές τις οποίες ακολούθησαν, τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες τα οποία είναι σε θέση να προσφέρουν. Επιπρόσθετα θα αναλυθούν, σε βάθος οι τεχνολογίες στις οποίες αναμένεται να στηριχθούν, τα δίκτυα πέμπτης γενιάς αναλύοντας εις βάθος, τους πέντε τεχνολογικούς πυλώνες (NR, Beamforming, MIMO, FULL DUPLEX, Small Cells) οι οποίοι αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην υλοποίησή τους.

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται η ανασκόπηση της ερευνητικής περιοχής. Αρχικά θα αναλύσουμε την τεχνολογία των μικρών σημείων Small Cell. Δίνονται κάποια γενικά χαρακτηριστικά τους καθώς και ο ρόλος που διαδραματίζουν στην αρχιτεκτονική των 5G Δικτύων. Έπειτα από την κατηγοριοποίηση τους με βάση την περιοχή κάλυψης που διαθέτει το καθένα, αναμένεται να γίνει ειδική μνεία στο κομμάτι, τόσο των παρεμβολών αλλά και των σημείων πρόσβασης που εμπεριέχει η παρούσα Διπλωματική Εργασία, δηλαδή τα Femtocells. Συγκεκριμένα αναλύονται, οι πολιτικές πρόσβασης σε αυτά, δίνοντας έμφαση στην πολιτική Hybrid Access, οι τεχνικές αδρανοποίησης των Femtocells καθώς και η μέθοδος ομαδοποίησης τους (clustering) και το τι σημαίνει το τελευταίο για το δίκτυο.

Στο κεφάλαιο 4, γίνεται εκτενής περιγραφή του μοντέλου του συστήματος στο οποίο δουλεύουμε (LTE-A), της προσέγγισης μας καθώς και του αλγορίθμου μας. Σημαντικό είναι να ελεγχθεί ο αλγόριθμος από τον αναγνώστη έτσι ώστε να είναι σε θέση να κατανοήσει το πώς προκύπτουν τα αποτελέσματα του επόμενου κεφαλαίου.

Στο κεφάλαιο 5, γίνεται παρουσίαση των παραμέτρων της προσομοίωσης όπως αυτά ορίζονται από το ακολουθούμενο πρότυπο, καθώς και παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από την χρήση του εργαλείου Matlab.

Στο κεφάλαιο 6, γίνεται μία προεπισκόπηση της τεχνολογίας δικτύων 6G η οποία βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο ερευνητικό στάδιο. Αναλύονται οι τεχνολογίες στις οποίες αναμένεται να στηριχθεί, οι διαφορές της αρχιτεκτονικής της σε σχέση με τις προηγούμενες γενεές δικτύων, καθώς και οι υπηρεσίες που υπόσχεται να προσφέρει.

Στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζεται μία σύνοψη και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα που έλαβε χώρα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δίνοντας έμφαση όπως ήταν αναμενόμενο στην εξοικονόμηση ενέργειας στην λειτουργία του δικτύου. Τέλος, προτείνονται τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να επεκταθεί η παρούσα Διπλωματική Εργασία δίνοντας έμφαση στο σενάριο υλοποίησης της με πραγματικούς, κινούμενους μέσα στο δίκτυο, χρήστες.

1 Δίκτυα 1G-4G

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας [1]. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και, επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικώς δίκτυα υπολογιστών.

Αναμφίβολα αποτελεί κοινό μυστικό ότι η αρχή της τρίτης χιλιετίας μπορεί να χαρακτηριστεί ως δικτυακή εποχή φέρνοντας έκρηξη στις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, την σχεδόν καθολική κάλυψη του δικτύου, αλλά και τις ολοένα και πιο βελτιωμένες υπηρεσίες, που προσφέρονται από το δίκτυο στο χρήστη. Τον χαρακτηρισμό αυτό, της δικτυακής εποχής, τον οφείλουμε λίγο-πολύ στον Ιταλό επιστήμονα *Guglielmo Marconi* του οποίου η συμβολή υπήρξε καθοριστική [2]. Ο Marconi το 1901, επέδειξε στο κοινό έναν ασύρματο τηλεγράφο ο οποίος εξέπεμπε ανάμεσα σε πλοία και στη ξηρά. Ουσιαστικά τόσο με τη χρήση του κώδικα Morse όσο και με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατάφερε να αποστείλει το γράμμα S σε μία απόσταση 3 χιλιομέτρων. Για την εδραίωση της κεραίας σε ένα απαιτητικό για την εποχή ύψος χρησιμοποιήθηκε χαρταετός ο οποίος ανυψώθηκε χειρωνακτικά όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.

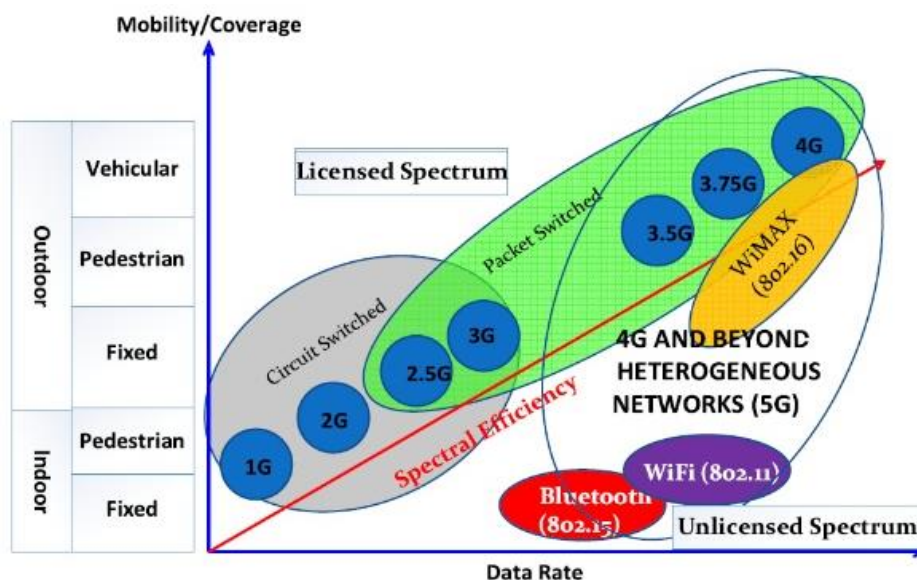


Εικόνα 1: Ανύψωση Κεραίας από τον Marconi, December 1901.

Ωστόσο αποτελεί πραγματικά απορίας άξιο, το πώς φτάσαμε από τον Marconi στη σημερινή τεχνολογική έκρηξη, στην εποχή της πληροφορίας. Μέχρι σήμερα έχουν υιοθετηθεί και χρησιμοποιηθεί 4 γενιές κυψελοειδών δικτύων (1G-4G). Παρατηρείται ότι περίπου κάθε 10 χρόνια εμφανίζεται μία καινούρια γενιά συστημάτων. Το 1980 έγινε η εμφάνιση της πρώτης γενιάς αναλογικών FM κυψελοειδών συστημάτων (1G), η δεύτερη γενιά (2G) ψηφιακής πλέον τεχνολογίας το 1992, η Τρίτη γενιά (3G) το 2001 και η τέταρτη γενιά (4G) το 2011.

Οι πρώτες γενιές δικτύων, δηλαδή οι τεχνολογίες 1G και 2G, χρησιμοποιούν εναλλαγή κυκλώματος ενώ οι τεχνολογίες 2.5G και 3G χρησιμοποιούν εναλλαγή κυκλώματος και πακέτων. Τον ίδιο τρόπο λειτουργίας χρησιμοποιούν και οι επόμενες γενιές μέχρι και σήμερα. Μαζί με αυτούς τους παράγοντες, διαφοροποιείται επίσης το αδειοδοτημένο φάσμα με το μη-αδειοδοτημένο φάσμα. Όλες οι εξελισσόμενες γενιές χρησιμοποιούν το αδειοδοτημένο φάσμα ενώ τεχνολογίες όπως το Wi-Fi, το Bluetooth και το WiMax χρησιμοποιούν το μη αδειοδοτημένο φάσμα. Τα σημαντικότερα πρωτόκολλα που εμφανίστηκαν τη δεκαετία εκείνη ήταν το Nordic Mobile Telephone (NMT), το Advanced Mobile Phone System (AMPS) και το Total Access Communications System (TACS), όλα σε διαφορετικές χώρες και διαφορετικές ηπείρους.

Τα ασύρματα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), έχουν κάνει την εμφάνιση τους σε ερευνητικό πλαίσιο από το 2013 και αναμένεται να είναι εμπορικά διαθέσιμα στην πλήρη τους μορφή στα τέλη του 2020. Το πώς καλύφθηκε το τεχνολογικό κενό από την απαρχή των ασύρματων δικτύων μέχρι την σημερινή εποχή θα αναλυθεί στο παρόν κεφάλαιο με μία σύντομη αναφορά, στις προηγούμενες γενιές ασύρματων δικτύων. Το εν λόγω κεφάλαιο έχει χαρακτήρα εισαγωγικό ώστε να δοθούν κατάλληλες πληροφορίες και ερεθίσματα στον αναγνώστη για την εισαγωγή στα 5G δίκτυα.



Εικόνα 2: Η αποτελεσματική εκμετάλλευση του φάσματος στο πέρασμα των γενεών των ασύρματων Δικτύων.

1.2 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G)

Από την πρώτη έκδοση των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας μέχρι και σήμερα, έχουν προταθεί, υλοποιηθεί και τροποποιηθεί πολλαπλά πρωτόκολλα και υπηρεσίες. Αυτό όμως που παραμένει αναλλοίωτο, είναι η κυψελοειδής σύσταση του δικτύου. Με τον όρο αυτό εννοούμε, ότι η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μικρές κυψέλες. Η μέθοδος αυτή είναι τύπου “διαίρει και βασίλευε”, τεμαχίζοντας τις γεωγραφικές περιοχές που το δίκτυο καλύπτει, προσθέτοντας κυψέλες (cells) σε κάθε μια από αυτές. Για την εποχή του κάτι τέτοιο ήταν ιδιαίτερα επαναστατικό, καθώς επιτρεπόταν η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας σε κάθε υποδίκτυο χωρίς την εμφάνιση μεγάλου μεγέθους παρεμβολών. Η επαναχρησιμοποίηση αυτή, συμβαίνει μέχρι και σήμερα ορίζοντας ουσιαστικά τα όρια στα οποία μπορούν να εξυπηρετηθούν οι χρήστες. Στην περίπτωση που ένας χρήστης βρίσκεται εκτός ορίων, ενώ αρχικά ήταν συνδεδεμένος σε μία κυψέλη, γίνεται handover του χρήστη σε μια καινούργια κυψέλη, αλλιώς εάν αυτό δεν είναι εφικτό η αρχική σύνδεση τερματίζεται. Η τεχνολογία 1G ανακοινώθηκε στα τέλη του 1970. Το σύστημα αυτό είχε σχεδιαστεί μόνο για φωνητική επικοινωνία με ταχύτητες μέχρι και 2.4kbps και εύρος ζώνης 30 kHz.

Παρόλη την καινοτομία και την πληθώρα υπηρεσιών, που προσέφερε η πρώτη γενιά ασύρματων δικτύων (1G) είχε και πολλά μειονεκτήματα όπως, χαμηλή ποιότητα και σχεδόν μηδαμινή ασφάλεια, διότι δεν χρησιμοποιούνταν κρυπτογράφηση για τα δεδομένα λόγω αναλογικής διαμόρφωσης, μικρό πλήθος χρηστών που μπορούσαν να εξυπηρετηθούν από το δίκτυο, λόγω της FDMA τεχνικής, ακτινοβολία ισχύος των σταθμών βάσης, καθώς και η έλλειψη ενός, διεθνώς αναγνωρισμένου standard (Unified International Standard) [3].

1G Wireless Technology

- Using Analog signals
- Listen to handset
- It's Speed was upto 2.4kbps.
- Frequency typically 150MHz & above



Εικόνα 3: Προσφερόμενες δυνατότητες τεχνολογίας 1G.

1.3 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G)

Η απαίτηση για ασφαλέστερη επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων καθώς και η ανάγκη για περισσότερους ταυτόχρονα διασυνδεδεμένους χρήστες, οδήγησε στην ανάπτυξη των Δικτύων Δεύτερης Γενιάς (Second Generation Networks, 2G Networks), η οποία υποστήριζε ψηφιακή μετάδοση ήχου και δεδομένων. Το GSM (Global System For Mobile Communications) ήταν το πρώτο σύστημα 2G και ανακοινώθηκε στην αρχή του 1990, υποστηρίζοντας ψηφιακή μετάδοση ήχου με data rates που έφταναν τα 9.6 kbps χρησιμοποιώντας, GMSK διαμόρφωση, TDMA τεχνολογία μετάδοσης και bandwidth 200kHz. Για να γίνει κατανοητό, το πόσο χαμηλές ήταν ακόμα οι ταχύτητες, πολλές εταιρείες στην προσπάθειά τους να πωλήσουν τα προϊόντα τους, κατέφευγαν σε επικοινωνιακά τεχνάσματα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4: Ανάγκη των Users για μεγαλύτερα Data Rates στα Δίκτυα 2G.





Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς λειτουργούσαν κάτω από ένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο (Unified International Standard For Mobile Communications) το οποίο όπως ήταν αναμενόμενο, έδωσε το έναυσμα για την τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων παγκοσμίως, διότι πλέον υπήρχε κοινό έδαφος, έτσι ώστε όλες οι χώρες να συμφωνήσουν σε ένα κοινό πρότυπο για την ανάπτυξη των συστημάτων τους. Επιπρόσθετα στα 2G δίκτυα, ενισχύθηκε η ασφάλεια του δικτύου με την ψηφιακή κωδικοποίηση των δεδομένων αλλά και αυξήθηκε η συνολική χωρητικότητα του. Ωστόσο επειδή το GSM εμφάνιζε ανεξήγητα χαμηλά data rates για την εποχή του, έμελλε να αντικατασταθεί από την τεχνολογία GPRS (General Packet Radio Services) [4].

Το GPRS θεωρείται ότι ανήκει στη γενιά 2.5G και χρησιμοποιεί τεχνολογία ανταλλαγής πακέτων, την οποία και υιοθέτησε από το GSM, βελτιώνοντας το data rate, φτάνοντας μέχρι και στα 50 kbps, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούσε παρόμοια τεχνολογία αποστολής δεδομένων αλλά και το ίδιο bandwidth με το GSM. Αναμφίβολα το GPRS

αποτελεί εξελικτικό βήμα για το EDGE (Enhanced Data GSM Environment). Η τεχνολογία EDGE θεωρείται από πολλούς ότι ανήκει στο τελευταίο εξελικτικό βήμα πριν το 3G, έχοντας data rates μέχρι και 200 kbps. Χρησιμοποιώντας το ίδιο bandwidth αλλά και την ίδια τεχνολογία αποστολής δεδομένων με το GSM, το EDGE, διαφοροποιείται σε ότι έχει να κάνει με την τεχνική διαμόρφωσης. Χρησιμοποιεί 8-PSK (Eight Phase Shift Keying) διαμόρφωση προσφέροντας υψηλότερα data rates σε μικρότερη εμβέλεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το 8-PSK να χρησιμοποιείται για μικρής εμβέλειας σύνδεσης ενώ η GMSK διαμόρφωση σε μεγάλης εμβέλειας συνδέσεις.

1.4 Δίκτυα Τρίτης γενιάς (3G)

Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω καινούργιες γενιές ασύρματων δικτύων κάνουν την εμφάνιση τους κάθε δέκα χρόνια. Όπως ήταν αναμενόμενο μια δεκαετία αργότερα, συγκεκριμένα το 2001, έρχονται στο φως τα Ευρυζωνικά δίκτυα Τρίτης Γενιάς. Τα δίκτυα 3G μεγιστοποίησαν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων εντός του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, με ελάχιστη ταχύτητα τα 144 kbps. Εν σύγκριση με τον ρυθμό μετάδοσης των 2G ο οποίος κυμαίνονταν από 40 έως 100 kbps η βελτίωση είναι εμφανής.

	3G	2G
 Speed	Download up to 21 Mbps; Upload up to 5.7 Mbps	Download up to 236 Kbps; Upload up to 236 Kbps
 Calls	Video calls	Voice calls
 Messages	MMS - Video Messages	Basic SMS
 VAS	Video on Demand, Location based services and lots more	Caller Ring Back Tunes, Ringtones, etc.

Εικόνα 5: Σύγκριση μεταξύ τεχνολογιών 2G-3G.

Επιπρόσθετα λίγα χρόνια μετά μέσω επεκτάσεων των βασικών πρωτοκόλλων οι ταχύτητες εκτοξεύθηκαν στα 10Mbps. Συγκεκριμένα τα 3G συστήματα συστήθηκαν στο ευρύ κοινό με δυνατότητες, όπως υψηλή ταχύτητα σύνδεσης στο διαδίκτυο καθώς και audio streaming, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και HSPA (High Speed Packet access). Η τεχνολογία HSPA αποτελεί ουσιαστικά μια συγχώνευση δύο διαφορετικών πρωτοκόλλων, ένα για το downlink HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) και ένα για το uplink HSUPA (High Speed Packet Access). Ουσιαστικά το HSPA αποτελεί την μετέπειτα εξέλιξη επεκτείνοντας και βελτιώνοντας το W-CDMA πρωτόκολλο, προσφέροντας τις προαναφερθείσες ταχύτητες. Αργότερα στα τέλη του 2008, συστήθηκε στο κοινό το HSPA+ και υιοθετήθηκε παγκόσμια στις αρχές του 2010, ενώ αναφερόμαστε σε αυτό ως 3.75G. Τελευταία τεχνολογία η οποία συστήθηκε στο κοινό, αρχικά ως μέλος της Τρίτης Γενιάς Ασύρματων Δικτύων, είναι η τεχνολογία LTE στην οποία αρχικά αναφέρονταν ως 3.9G. Επειδή προσέφερε δυνατότητες αρκετά βελτιωμένες σε σχέση με την οικογένεια του 3G, αλλά ταυτόχρονα ανεπαρκείς για να θεωρηθεί ως πρότυπο για τα δίκτυα 4G, οι οργανισμοί ITU και 3GPP αποφάσισαν η ονομασία να παραμείνει 3.9G [5].

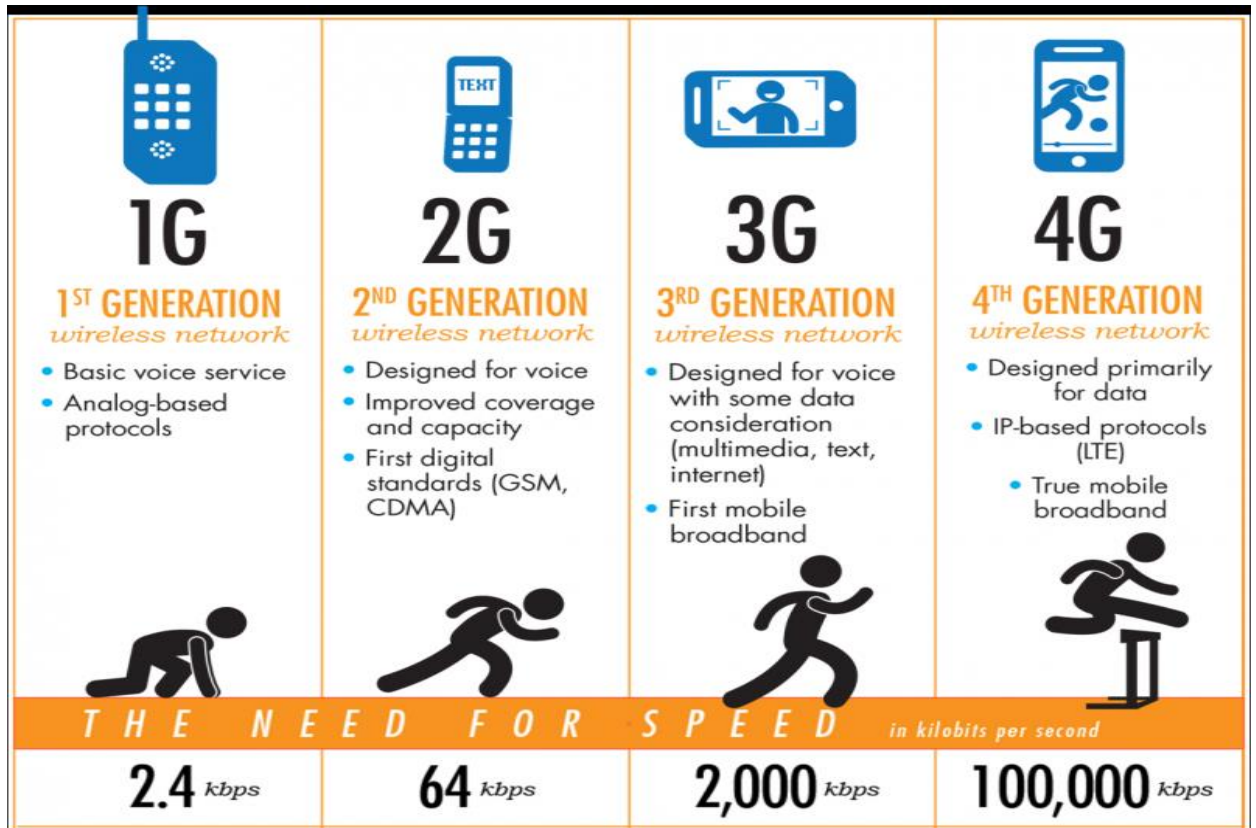
1.5 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G)

Τα δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G) είναι ο διάδοχος των 3G δικτύων και εμφανίστηκαν για τον ίδιο λόγο που εξελίχθηκαν όλα τα μοντέλα μέχρι τότε (1G-2G-3G). Κάθε γενιά δικτύων έχει ως στόχο τη καλύτερη κάλυψη των ολοένα και αυξανόμενων αναγκών των χρηστών. Τα 4G δίκτυα προσφέρουν υπερευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο και με αυτά έγινε η πρώτη εισαγωγή του χρήστη σε τεχνολογίες όπως smartphones, σε ότι αφορά την πλήρη αξιοποίηση τους, desktops που απαιτούσαν υψηλότερα data rates. Η LTE τεχνολογία προσέφερε μέχρι και 100 Mbps ταχύτητες οι οποίες όπως προαναφέραμε δεν ήταν αρκετές για να χαρακτηριστεί μέλος της οικογένειας του 4G. Έτσι το 2011 δημιουργήθηκε η σημαντικότερη επέκταση του προτύπου LTE, το LTE-ADVANCED (LTE-A) και αποτέλεσε το πρώτο επίσημα αποδεκτό πρότυπο για δίκτυα 4G. Προσέφερε ταχύτητες που θεωρητικά έφταναν το 1 Gigabit per second (Gbps). Το σύστημα 4G βελτιώνει τα υπάρχοντα δίκτυα επικοινωνιών, προσδίδοντας μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη λύση βασισμένη στην IP. Τρεις βασικές γραμμές έρευνας έχουν διερευνηθεί εκτενώς, από την ασύρματη κοινότητα, για την εκπλήρωση των απαιτήσεων χωρητικότητας των 4G κινητών δικτύων:

- Βελτιωμένη φασματική απόδοση: Τα συντονισμένα σχήματα εκπομπής / λήψης και οι λύσεις μετριάσμου παρεμβολών μεταξύ των κυψελών εκμεταλλεύονται, την προηγμένη επεξεργασία σήματος και τη χωρική ποικιλομορφία, για τη μείωση της παρεμβολής μεταξύ καναλιών και την αύξηση της φασματικής απόδοσης.

- **Επέκταση Φάσματος:** Η μέθοδος με την οποία επεκτείνεται το χρησιμοποιούμενο φάσμα καλείται Carrier Aggregation (CA). Πρόκειται για μία μέθοδο που προσφέρει τη δυνατότητα στους χρήστες του δικτύου να επαναχρησιμοποιούν συχνότητες του διαθέσιμου φάσματος των φορέων (carriers). Αυτό σημαίνει ότι εάν διατίθεται συχνότητα 20MHz, η μέθοδος CA μπορεί να συνδυάσει μέχρι και 5 φορές τον φορέα (carrier) και να προσφέρει 100MHz διαθέσιμο εύρος ζώνης και κατά συνέπεια αυξημένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων εντός του δικτύου.
- Τέλος τα δίκτυα 4G εισήγαγαν πρώτα την τεχνική πυκνοποίησης του δικτύου. Αυτή η τεχνική λαμβάνει χώρα σε γεωγραφικές περιοχές μικρού μεγέθους, όπου πολλοί διαφορετικοί χρήστες παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο έχοντας απαιτήσεις για υψηλά data rates, όπως στάδια, εμπορικά κέντρα συναυλίες κ.α. Αυτή η προσέγγιση, αποσκοπεί στη βελτίωση της κάλυψης του δικτύου και στην αύξηση της επαναχρησιμοποίησης του φάσματος, μέσω της ανάπτυξης Small Cells, μικρού κόστους κατασκευής και τοποθέτησης, αλλά και χαμηλής ισχύος λειτουργίας, που τοποθετώντας τα στην εν λόγω γεωγραφική περιοχή μειώνουμε την απόσταση του κινητού τερματικού σταθμού (User) και του σταθμού βάσης (BS). Τα μικρά κελιά (Small Cells) έχουν ακτίνα κάλυψης 50-150 m και ακτινοβολούν σε χαμηλή ισχύ (0,1-10 W), αυξάνοντας έτσι τόσο την ενεργειακή απόδοση, όσο και τη σχέση σήματος προς παρεμβολή συν το θόρυβο (SINR), λόγω της διαδρομής χαμηλής απώλειας (Χαμηλό Path Loss). Επιπλέον λόγω των αναγκών, για καλύτερα data rates σε πυκνά δίκτυα, οι χρήστες επιδιώκουν να χρησιμοποιήσουν τα Small Cells σχεδόν ιδιωτικά καθώς είναι εύκολα τοποθετήσιμα και δεν απαιτούν τακτική συντήρηση. Ουσιαστικά τα Small Cells, προσφέρουν κάλυψη των χρηστών σε περιοχές του δικτύου όπου το λαμβανόμενο σήμα από το Macrocell είναι ασθενές. Επομένως εάν ο χρήστης παραμείνει συνδεδεμένος στο Macrocell, βιώνει χαμηλές ταχύτητες οι οποίες δεν τον εξυπηρετούν πλήρως, ενώ εάν συνδεθεί στο Small Cell θα βιώσει ικανοποιητικές ταχύτητες και θα αποσυμφορήσει το δίκτυο, έτσι ώστε το Macrocell να μην πρέπει να εξυπηρετήσει όλους τους χρήστες μόνο του. Η συγκεκριμένη τεχνική της πυκνοποίησης του δικτύου θα αποτελέσει σημείο αναφοράς στην συνέχεια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας [6].

Μια πιο συνοπτική έκδοση της ιστορικής αυτής αναδρομής παρουσιάζεται παρακάτω στην Εικόνα 6, όπου παρατηρούμε την εξέλιξη των κυψελοειδών ασύρματων δικτύων τηλεπικοινωνίας από την αναλογική τους μορφή στις αρχές της δεκαετίας του 1980.

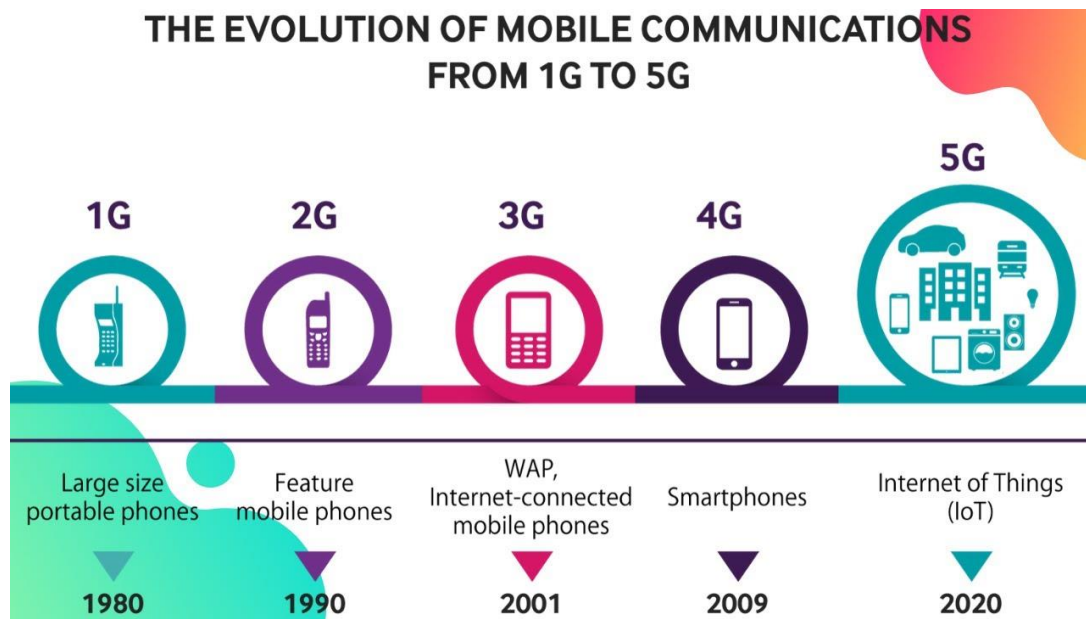


Εικόνα 6: Χαρακτηριστικά και εφαρμογές για δίκτυα 1G-4G.

2 Δίκτυα 5G

2.1 Εισαγωγή στα Δίκτυα 5G

Με την πάροδο του χρόνου, όπως ήταν αναμενόμενο, οι ανάγκες των χρηστών ενός ασύρματου δικτύου για μεγαλύτερες ταχύτητες αυξήθηκαν. Έτσι σχεδόν μία δεκαετία μετά την εμφάνιση του 4G, συστήθηκαν στο κοινό τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς, 5G. Όπως είδαμε παραπάνω στην ιστορική μας αναδρομή, σε όλες στις γενιές δικτύων απαιτείται ένα ετερογενές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (HetNets), με πολλές ταυτόχρονα χρησιμοποιήσιμες τεχνολογίες για να μπορέσει να καλύψει επαρκώς τις ανάγκες των χρηστών και συγκεκριμένα τις πολλαπλές διασυνδεδεμένες συσκευές σε αυτό. Τα δίκτυα 5G υπόσχονται να προσφέρουν αυξημένες ταχύτητες και βελτιωμένες υπηρεσίες σε πολλούς ταυτόχρονα συνδεδεμένους χρήστες, αυξάνοντας τόσο την χωρητικότητα του δικτύου, όσο και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Οι ανάγκες του χρήστη θα ικανοποιούνται σε πραγματικά μηδαμινό χρόνο ενώ ταυτόχρονα θα χρησιμοποιούνται, τεχνικές μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης του Δικτύου. Προφανώς εν αντιθέσει με τις προηγούμενες γενιές δικτύων, δεν υπάρχει ακόμα κάποιο καθολικά αποδεκτό πρότυπο πάνω στο οποίο να δουλεύουν ανελλιπώς όλοι οι οργανισμοί που ασχολούνται με το εν λόγω εγχείρημα παγκοσμίως. Αν και υπήρχαν διαφορετικές προσεγγίσεις, ως προς την κατεύθυνση την οποία τα δίκτυα 5G θα έπρεπε να κινηθούν, στο μόνο που όλοι οι εμπλεκόμενοι οργανισμοί συμφωνούσαν, ήταν εν τέλει, ότι τα δίκτυα αυτά θα είναι ετερογενή σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην χαρακτηρίζονται πλήρως από μια και μόνο τεχνική πρόσβασης, αλλά από έναν αποδοτικό διαχωρισμό των τεχνικών αυτών σε διαφορετικά επίπεδα μέσα στο δίκτυο (άλλα εικονικά, άλλα φυσικά), προσφέροντας καθολική συνδεσιμότητα και καλύπτοντας ένα αρκετά ευρύ φάσμα απαιτητικών εφαρμογών, που καθορίζουν τις ανάγκες της τεχνολογικής μας καθημερινότητας.



Εικόνα 7: Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων μέχρι και σήμερα.

2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 5G

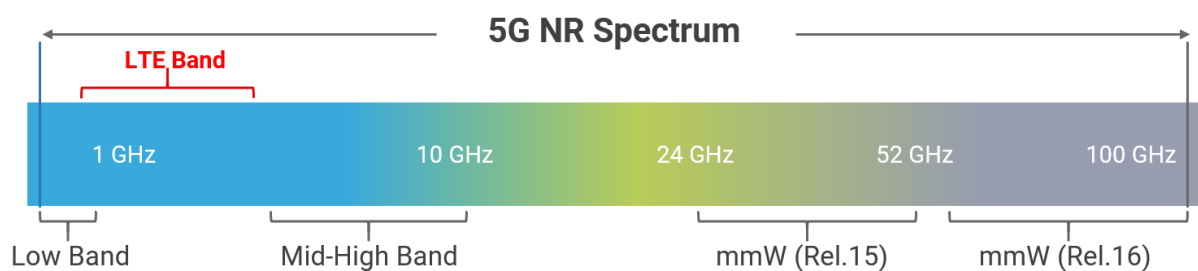
Μέσα στο 2020 αναμένεται ο οργανισμός 3GPP, να ανακοινώσει την πρώτη πλήρη έκδοση τεχνικών χαρακτηριστικών για τα δίκτυα 5G με το όνομα Έκδοση 16. Πριν όμως καταλήξουμε σε ένα καθολικά αποδεκτό πρότυπο για τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι πρέπει να ελεγχθεί, το αν οι επερχόμενες τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν ταχύτητες οι οποίες θα σπάσουν τα φράγματα του 4G, ώστε να χαρακτηριστούν ως 5G και όχι ως μία ενδιάμεση κατάσταση (4.5G). Επομένως είναι εμφανές, ότι χρειαζόμαστε καθολικά πρωτοποριακές υποδομές ώστε η καινούρια τεχνολογία να μπορεί να χαρακτηριστεί 5G.

Η τελευταία έκδοση που έχει δημοσιευθεί είναι η έκδοση 15 στις 26 Απριλίου του 2019 και περιέχει μία αρχική περιγραφή των 5G Δικτύων, για εμπορικούς λόγους, ώστε να ξεκινήσουν οι υλικές κατασκευές της νέας τεχνολογίας. Χαρακτηρίζεται ως η πρώτη φάση των τεχνικών χαρακτηριστικών 5G Δικτύων, δίνοντας έμφαση σε βελτιώσεις στο LTE και στο EPC (Evolved Packet Core). Στην έκδοση 15 αναφέρεται πως έχουν γίνει ήδη σημαντικές μελέτες σε ότι αφορά, το MPS (Multimedia Priority Service), το V2X (Service layer to service) και την αυτοματοποίηση του συνολικού Δικτύου. Ακόμα διεξήχθησαν ή προχώρησαν περαιτέρω μελέτες σχετικά, με την ασφάλεια, τους κωδικοποιητές και τις υπηρεσίες συνεχούς ροής, τη διαλειτουργικότητα LAN, τον τεμαχισμό σε δίκτυο (network slicing) και το IoT. Η έκδοση 16 αναμένεται 1 χρόνο μετά περίπου στις 16 Απριλίου του 2020 και θα ονομάζεται δεύτερη φάση. Επομένως, εάν οι τελικές προδιαγραφές των Δικτύων της αναμένουσας γενιάς πληρούν τα κριτήρια του προτύπου, που έχει τεθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU) και ακούει στο όνομα International 18 Mobile Telecommunication System-2020 ή απλούστατα IMT-2020, τότε θα μπορούμε να

ονομάσουμε τα δίκτυα αυτά ως 5G δίκτυα ικανά να καλύψουν πολλαπλές διασυνδεδεμένες συσκευές σε ένα ετερογενές Δίκτυο. [4]

Το πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας (Air Interface) για τα 5G δίκτυα, ξεκινώντας από την Έκδοση 15, θα ονομάζεται 5G New Radio (5G NR) και αναμένεται να αποτελέσει το διεθνές πρότυπο σε επίπεδο επικοινωνίας με μέσο διάδοσης τον αέρα. Το 5G NR (New Radio) είναι μια νέα τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης (RAT). Μελέτη της NR στο 3GPP ξεκίνησε το 2015 και η πρώτη προδιαγραφή διατέθηκε μέχρι το τέλος του 2017. Ενώ η διαδικασία τυποποίησης 3GPP ήταν σε εξέλιξη, η βιομηχανία είχε ήδη ξεκινήσει προσπάθειες για την υλοποίηση υποδομής συμβατής με το πρότυπο, με την προσδοκία ότι η πρώτη μεγάλης κλίμακας εμπορική εκτόξευση του 5G NR θα συμβεί το 2019.

Η εναέρια διεπαφή NR (New Radio) διαιρείται σε δύο ζώνες συχνοτήτων. Την FR1 η οποία λειτουργεί κάτω από τα 6GHz και FR2 (mmWave), η οποία λειτουργεί στο εύρος από 24GHz έως 100GHz και η καθεμία με διαφορετικές ικανότητες.



Εικόνα 8: Χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων στα 5G δίκτυα.

Αναλυτικότερα, σε ότι αφορά το εύρος συχνοτήτων FR1 (Frequency Range 1) το μέγιστο εύρος ζώνης καναλιού ορίζεται στα 100MHz. Το πρόβλημα το οποίο προκύπτει είναι το γεγονός ότι αρκετά από τα διαθέσιμα εύρη συχνοτήτων, χρησιμοποιούνται από προηγούμενες γενιές Δικτύων. Έτσι σε προσομοιώσεις μετρικών 5G, όπως η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και η καθυστέρηση απόκρισης του Δικτύου, η χρησιμοποίηση των συχνοτήτων του FR1, δεν προσφέρει τις απαιτούμενες βελτιώσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρικές στα 4G δίκτυα [6][7].

Εν συνεχεία, σε ότι αφορά το εύρος συχνοτήτων FR2 (Frequency Range 2), ορίζεται με παρόμοιο τρόπο ως το σύνολο των φασματικών συχνοτήτων άνω των 24GHz έως και τα 100GHz. Για αυτό όμως το εύρος συχνοτήτων, το εύρος ζώνης καναλιού θα μπορεί να κυμαίνεται από τα 50 έως και τα 400 MHz, εκμεταλλευόμενο την υποστήριξη της τεχνικής CA για δύο ταυτόχρονα κανάλια, όπως αυτή ορίζεται στην Έκδοση 15. Αυτό γίνεται διότι αναφερόμαστε σε συχνότητες οι οποίες μέχρι σήμερα παρέμεναν αχρησιμοποίητες, λόγω του ότι δεν είχε αναπτυχθεί η τεχνογνωσία και η τεχνολογία από τον ευρύ επιστημονικό κλάδο, ώστε να εκμεταλλευτούμε το εν λόγω φάσμα. Στην

ουσία μέχρι σήμερα υπήρξε εξαντλητική χρήση και εκμετάλλευση των συχνοτήτων κάτω από τα 6GHz και για την υλοποίηση των Δικτύων Πέμπτης Γενιάς κρίνεται επιτακτική η ανάγκη εκμετάλλευσης των υψηλών αυτών συχνοτήτων του FR2.

Συνεχίζοντας με το επίσημο πρότυπο τεχνικών προδιαγραφών IMT-2020, αναλύουμε στις παρακάτω παραγράφους 3 διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης στις οποίες τα δίκτυα Πέμπτης Γενιάς οφείλουν να ανταπεξέλθουν στην επόμενη Δεκαετία.

Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται Enhanced Mobile Broadband (eMBB) και είναι μία από τις τρεις βασικές περιπτώσεις χρήσης του 5G NR που ορίζονται από το 3GPP ως μέρος του SMARTER PROJECT (Study on New Services and Markets Technology Enablers). Ο στόχος πίσω από το SMARTER ήταν να αναπτυχθούν περιπτώσεις υψηλού επιπέδου και να προσδιοριστούν, τα χαρακτηριστικά και η λειτουργικότητα που θα χρειαζόταν το 5G για να καταφέρει να τις υλοποιήσει. Ξεκίνησε το 2015 και οδήγησε σε περισσότερες από 70 περιπτώσεις χρήσης, αρχικά ομαδοποιημένες σε πέντε κατηγορίες, οι οποίες έκτοτε έχουν συρρικνωθεί σε τρεις. Οι τρεις αυτές κατηγορίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές προδιαγραφές που διέπονται ξεχωριστά αλλά επικαλύπτονται σε κάποια σημεία. Ουσιαστικά η κατηγορία eMBB αναφέρεται στη μελέτη περιπτώσεων χρήσης αναφορικά με την παροχή πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης σε ευρυζωνικά δίκτυα Επόμενης Γενιάς. Για να επιτευχθεί αυτό βασιζόμαστε στους δύο βασικούς πυλώνες της τεχνολογίας 5G, δηλαδή στην αυξημένη χωρητικότητα και στην βελτιωμένη κάλυψη, του δικτύου. Οι δύο αυτοί πυλώνες αναμένεται να βρουν εφαρμογή στην επερχόμενη γενιά δικτύων μέσω των μικρών σταθμών βάσης (Small Cells) για τους οποίους θα μιλήσουμε στη συνέχεια σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

Η δεύτερη κατηγορία του IMT-2020 αναφέρεται σε Ultra Reliable Low Latency Communications (URLCC), δηλαδή σε περίπτωση όπου είναι τεράστιας σημασίας, η απρόσκοπτη λειτουργία της σύνδεσης. Μερικά παραδείγματα από την καθημερινότητα μας τα οποία ανήκουν στην εν λόγω κατηγορία είναι η πλοήγηση αυτόματων οχημάτων, η τηλεϊατρική και πιο συγκεκριμένα τα χειρουργεία τα οποία θα γίνονται πλέον από απόσταση.

Η τρίτη και κατηγορία ονομάζεται Massive Machine Type Communications (mMTC) και βρίσκει εφαρμογή σε ένα δίκτυο ετερογενές, με πολλές διασυνδεδεμένες συσκευές χρηστών ταυτόχρονα που όμως χρειάζεται η αποστολή δεδομένων ανά ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και όχι συνέχεια. Όπως γίνεται αντιληπτό, το mMTC αποτελεί ένα σενάριο χρήσης με πεδίο ενδιαφέροντος, περιπτώσεις στις οποίες στο δίκτυο θα εφαρμόζεται η τεχνολογία IoT. Επομένως εντός του δικτύου, θα πρέπει να υποστηρίζονται οι συνδέσεις πολλών διαφορετικών συσκευών όπως π.χ. Οικιακών (Ψυγεία, Κουζίνες) αλλά και άλλων συσκευών όπως Smart Watch κ.α.

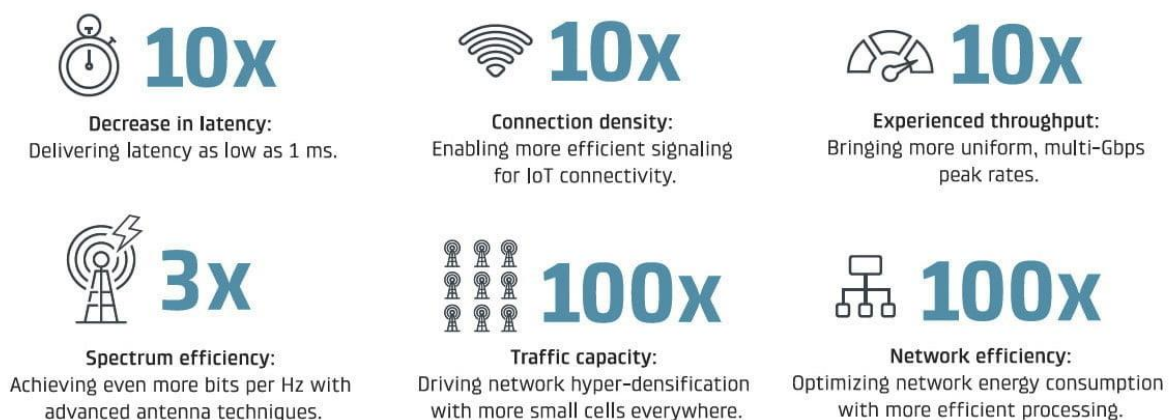
Τέλος, αναφορικά με το πότε οι παραπάνω περιπτώσεις χρήσης θα είναι διαθέσιμες, έχει γίνει γνωστό ότι σενάριο χρήσης eMBB θα είναι διαθέσιμο στη πρώτη φάση του 5G δηλαδή στην έκδοση 15 του 3GPP. Τα άλλα δύο σενάρια χρήσης URLLC και mMTC θα

είναι διαθέσιμα στην έκδοση 16, η οποία αναμένεται να γίνει μέχρι τα τέλη του 2020. Επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά που αναμένεται να έχουν τα δίκτυα 5G είναι:

- Δεδομένα έως 10Gbps, άρα 10 έως 100x βελτίωση σε σχέση με τα 4G και τα 4.5G
- Latency 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου
- 1000x Εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας
- Έως 100x συνδεδεμένων συσκευών ανά μονάδα επιφάνειας (συγκριτικά με 4G LTE)
- 99.999% Διαθεσιμότητα δικτύου
- 100% Κάλυψη
- Μείωση κατά 90% στη χρήση ενέργειας του δικτύου
- Έως και 10 χρόνια ζωής μπαταρίας για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης IoT
- Πολλαπλές συχνότητες και είδη πολυπλεξίας

The Landscape of 5G

5G will differentiate itself by delivering various improvements:



Εικόνα 9: Στόχοι-υπηρεσίες των δικτύων 5G.

2.3 Τεχνολογίες Δικτύων 5^{ης} Γενιάς

Όπως προαναφέραμε, ο λόγος για τον οποίο η έλευση της τεχνολογίας 5G είναι τόσο σημαντική, είναι η ικανοποίηση των αναγκών του χρήστη για μεγαλύτερα data rates, για μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, καθώς και για αυξημένη κάλυψη

ακόμα και στις πιο δυσπρόσιτες περιοχές. Για να ικανοποιηθούν λοιπόν οι παραπάνω απαιτήσεις του χρήστη και για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που απαιτούνται για να θεωρείται ένα σύστημα, 5ης γενιάς, χρειάζεται μια δραστική αλλαγή στο σχεδιασμό της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής του 5G.

Σε ότι αφορά το θέμα της κάλυψης του χρήστη, στις περισσότερες προσομοιώσεις με την τρέχων τεχνολογία (4G), οι χρήστες οι οποίοι κινούνται στα όρια του Δικτύου μένουν συνδεδεμένοι σε αυτό σε ένα ποσοστό που πλησιάζει το 80% ενώ στο υπόλοιπο 20% οι συνδέσεις τους διακόπτονται. Στα δίκτυα της ερχόμενης γενιάς είναι σημαντικό ο χρήστης να μπορεί να επικοινωνεί, είτε είναι εντός είτε είναι εκτός του Δικτύου. Για αυτό είναι σημαντικό να υπάρχουν οι νέες τεχνολογίες της πέμπτης γενιάς δικτύων, όπως είναι τα Small Cells τα οποία τοποθετούνται κοντινότερα στο χρήστη και έτσι να αποφεύγονται φυσικά εμπόδια, μειώνοντας όμως έτσι την απόδοση του φάσματος. Για να αντιμετωπιστεί αυτό προτάθηκε η τεχνολογία MIMO, με πολλαπλές κεραιές για ενίσχυση του σήματος αλλά και για κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής. Το παραπάνω σενάριο υλοποιείται στην περίπτωση που ο χρήστης είναι οριακά εκτός δικτύου. Για τις συνδέσεις εντός δικτύου η βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών που ο χρήστης απολαμβάνει γίνεται με τεχνολογίες όπως Wi-Fi, Small Cell, Ultra Wideband, Millimeter Wave και οπτικές ίνες που είναι χρήσιμες για επικοινωνία μικρής κάλυψης με μεγάλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Παρακάτω, θα δούμε αναλυτικά μερικές από τις προαναφερθείς τεχνολογίες καθώς και μερικές που δεν έχουν αναφερθεί ακόμα.

2.3.1 SDN (Software Defined Networking)

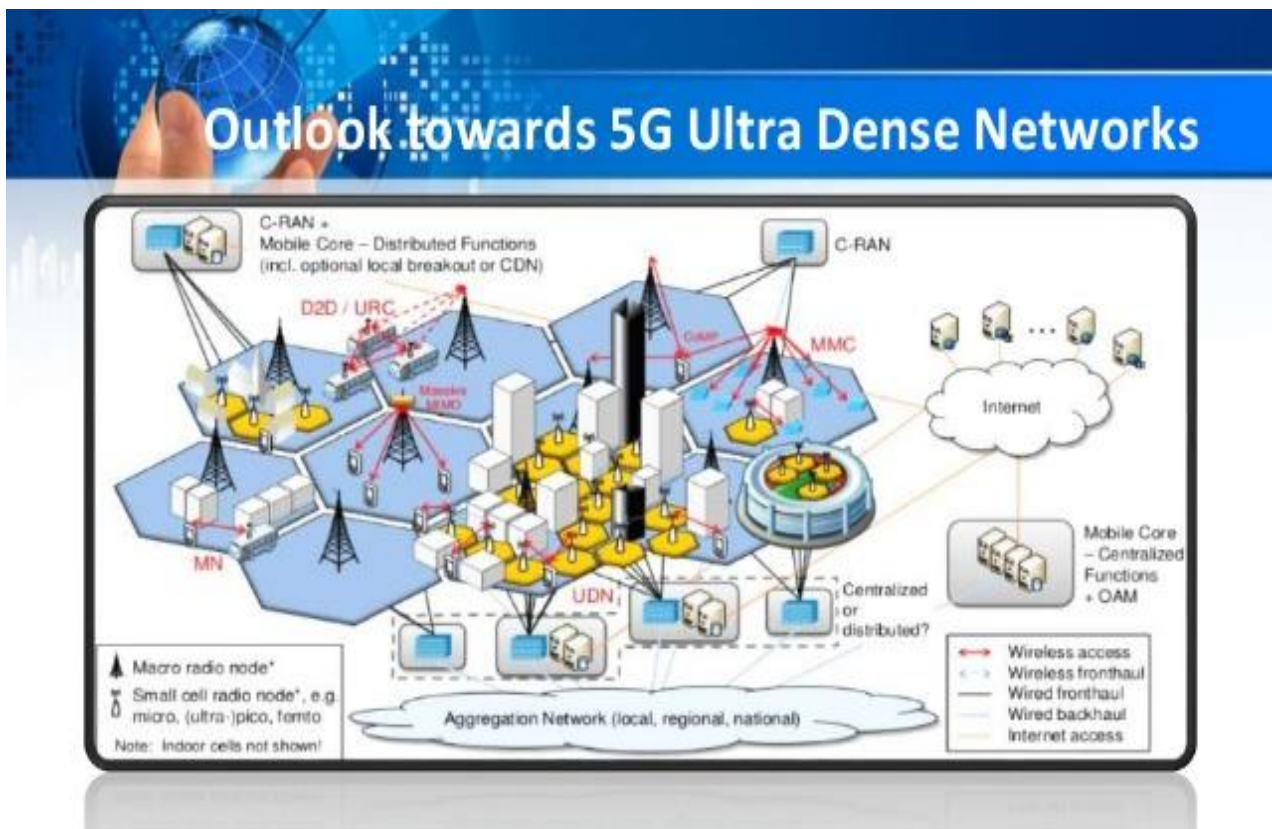
Η τεχνολογία SDN είναι μια αρχιτεκτονική στην οποία οι σταθμοί βάσης είναι προγραμματιζόμενοι και ελεγχόμενοι από έναν κεντρικό ελεγκτή. Η αρχιτεκτονική SDN χωρίζεται σε τρία στοιχεία, εφαρμογής, ελέγχου και υποδομής. Πρόκειται για μια προσέγγιση, που σε ασύρματα δίκτυα επιτρέπει στους διαχειριστές να ελέγχουν και να διαχειρίζονται τους εξυπηρετητές από το χαμηλότερο επίπεδο λειτουργικότητας.

2.3.2 NFV (Network Function Virtualization)

Το NFV είναι υπεύθυνο για την κληρονομικότητα. Με αυτό θέλουμε να πούμε, ότι το NFV ενσαρκώνει με την βοήθεια εικόνων, το σύνολο των λειτουργιών του δικτύου οι οποίες συγκεντρώνονται και συνδέονται ούτως ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν υπηρεσίες που υπήρχαν σε προηγούμενες γενιές δικτύων. Το NFV διαδέχεται τον κλασικό server virtualization, που μπορεί με πολλές εικονικές μηχανές να προγραμματίσει διάφορα λειτουργικά συστήματα, λογισμικά και λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα μεταφέρει εφαρμογές δικτυακού ή τηλεπικοινωνιακού τύπου που λειτουργούν σε εξειδικευμένες πλατφόρμες.

2.3.3 UDD (Ultra Dense Deployments)

Η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της ανερχόμενης τεχνολογίας 5G. Τα 5G δίκτυα θα λειτουργούν σε φάσμα συχνοτήτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις προηγούμενες γενεές δικτύων. Ένα βασικό κομμάτι το οποίο θα αναλυθεί ενδελεχώς στο κεφάλαιο τρία είναι η πυκνή τοποθέτηση Small Cells που θα συνυπάρχουν με τις ήδη υπάρχουσες δομές των Macrocells και των Microcells αλλά και με άλλα συστήματα όπως είναι το LTE-A και το HSPA συνθέτοντας έτσι τα ετερογενή δίκτυα (HetNets). Η πύκνωση λοιπόν που προκύπτει στα δίκτυα, παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς οδηγούν στην μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης αλλά και στη μείωση της απώλειας μετάδοσης.



Εικόνα 10: Τοπολογία ετερογενούς πυκνού δικτύου 5G.

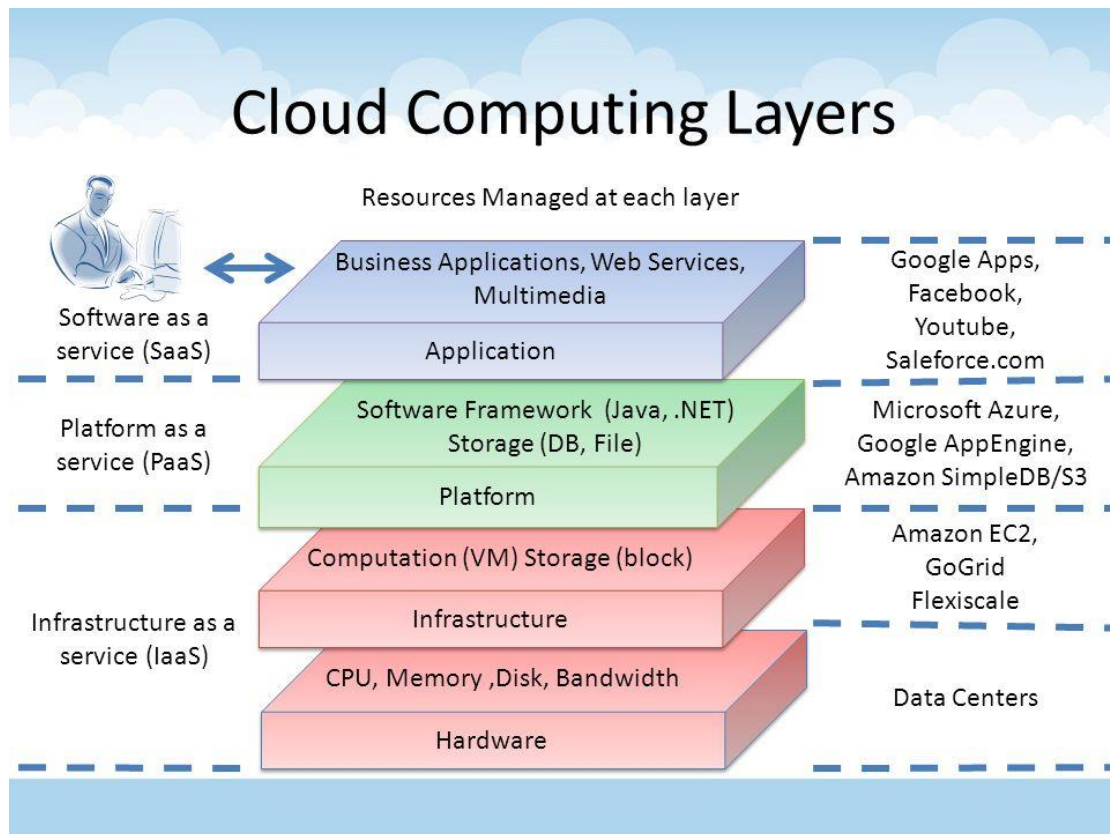
2.3.4 Cloud Computing

Το Cloud Computing αποτελεί το μέσο το οποίο φέρνει τον χρήστη σε επαφή με έναν τεράστιο αριθμό εικονικών πόρων. Αποτελεί ίσως την πιο ενδιαφέρουσα τεχνολογία η οποία αναμένεται να συμβαδίσει με την οικογένεια των Δικτύων Πέμπτης γενιάς. Το cloud computing αποτελείται από τρία επίπεδα, το IaaS, το PaaS και το SaaS.

Software-as-a-Service (SaaS): Αντί να εγκατασταθεί λογισμικό σε UE (User Equipment) επιβαρύνοντάς τον χρήστη με τακτικές επιδιορθώσεις, συχνές εκδόσεις κτλ., εφαρμογές όπως το Word, διατίθενται (φιλοξενούνται) στο σύννεφο (cloud) καταλήγοντας γρήγορα και με ασφάλεια στο τελικό χρήστη.

Platform-as-a-Service (PaaS): Αντί ο πελάτης να χρειαστεί να αγοράσει - πληρώσει τις άδειες λογισμικού τόσο για IDE όσο και για λειτουργικά συστήματα, μπορεί να το κάνει χρησιμοποιώντας εργαλεία τα οποία υπάρχουν στο cloud (όπως η Java, το .NET, Python, Ruby on Rails).

Infrastructure-as-a-Service (IaaS): Πρόκειται για τις απλές-βασικές υλικές συσκευές (raw computers) όπως είναι οι εικονικοί υπολογιστές, οι διακομιστές, οι συσκευές αποθήκευσης, η μεταφορά μέσω δικτύου, οι οποίες βρίσκονται φυσικά σε ένα κεντρικό σημείο (Data Center). Υπάρχει η δυνατότητα να προσπελαστούν και να χρησιμοποιηθούν μέσω internet από οποιοδήποτε UE.



Εικόνα 11: Cloud Computing Layers.

2.3.5 Network Slicing

Το Network Slicing δικτύου 5G είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει την πολυπλεξία εικονικοποιημένων ανεξάρτητων λογικών δικτύων, στην ίδια υποδομή του

φυσικού δικτύου. Κάθε slice του δικτύου είναι ένα απομονωμένο δίκτυο, end to end προσαρμοσμένο, ώστε να πληροί τις διάφορες απαιτήσεις που υπάρχουν από τους χρήστες του. Η υλοποίηση αυτής της αρχιτεκτονικής συνδέεται άρρηκτα με τις έννοιες του SDN και του NFV που επιτρέπουν την υλοποίηση ευέλικτων και κλιμακούμενων slice δικτύων πάνω από το φυσικό δίκτυο. [8]

2.3.6 Millimeter Waves (mmWave)

Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα παρουσιάζουν ένα πρόβλημα, ολοένα και περισσότεροι άνθρωποι και συσκευές καταναλώνουν περισσότερα δεδομένα από ποτέ άλλοτε, αλλά ο φασματικός χώρος παραμένει ίδιος και γεμάτος, λόγω της εκτενής χρησιμοποίησης των ζωνών ραδιοσυχνότητας από τους πάροχους κινητής τηλεφωνίας. Αυτό σημαίνει λιγότερο εύρος ζώνης για όλους, προκαλώντας πιο αργή εξυπηρέτηση και πιο πολλές συνδέσεις που σταματούν ή δεν ξεκινούν ποτέ να εξυπηρετούνται. Ένας τρόπος να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι να μεταδοθούν απλά τα σήματα σε ένα εντελώς νέο φάσμα, ένα που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ για κινητή υπηρεσία πριν. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι πάροχοι πειραματίζονται με την εκπομπή σημάτων σε mmWave, τα οποία χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες, από τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται, εδώ και καιρό στις τηλεφωνικές συνδέσεις. Τα mmWave μεταδίδονται σε συχνότητες μεταξύ 30 και 300 GHz, σε σύγκριση με τις ζώνες κάτω των 6 GHz που χρησιμοποιούνταν για κινητές συσκευές στο παρελθόν. Ονομάζονται χιλιοστά κύματα (mmWave) επειδή κυμαίνονται από 1 έως 10mm, σε σύγκριση με τα ραδιοκύματα που εξυπηρετούν τα σημερινά smartphones, τα οποία μετρούν δεκάδες εκατοστά σε μήκος. Μέχρι τώρα, μόνο φορείς δορυφόρων και συστήματα ραντάρ χρησιμοποίησαν χιλιοστά κύματα για πραγματικές εφαρμογές. Τώρα, ορισμένοι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν αρχίσει να τις χρησιμοποιούν για να στέλνουν δεδομένα μεταξύ σταθερών σημείων, όπως δύο σταθμών βάσης. Αλλά η χρήση mmWave κυμάτων για τη σύνδεση χρηστών κινητής τηλεφωνίας με κοντινό σταθμό βάσης είναι μια εντελώς νέα προσέγγιση. Ουσιαστικά αποτελεί την προ αναφέρουσα νέα ραδιοσυχνότητα FR2.



Εικόνα 12: Φάσμα ραδιοσυχνότητας FR2.

Ωστόσο τα mmWave έχουν μεγάλα μειονεκτήματα, τόσο διότι δεν μπορούν εύκολα να ταξιδέψουν μέσα από κτίρια ή εμπόδια, όσο και γιατί μπορούν να απορροφηθούν από φύλλωμα δέντρων και βροχή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα δίκτυα 5G θα αυξήσουν πιθανώς τους παραδοσιακούς κυψελοειδείς πύργους με μια άλλη νέα τεχνολογία, που ονομάζεται Small Cells. [8] [9]

2.3.7 Small Cells

Τα Small Cells είναι φορητοί μικροσκοπικοί σταθμοί βάσης που απαιτούν ελάχιστη ισχύ για να λειτουργούν και μπορούν να είναι τοποθετημένοι κάθε 250 μέτρα περίπου, σε όλες τις πόλεις. Για να αποφευχθεί η απώλεια των σημάτων, οι πάροχοι θα μπορούσαν να εγκαταστήσουν χιλιάδες από αυτούς τους σταθμούς σε μια πόλη έτσι ώστε να σχηματίσει ένα πυκνό δίκτυο που λειτουργεί σαν ομάδα, λαμβάνοντας σήματα από άλλους σταθμούς βάσης και αποστέλλοντας δεδομένα σε χρήστες σε οποιαδήποτε τοποθεσία. Ενώ τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα φαίνεται επίσης να βασίζονται σε έναν αυξανόμενο αριθμό σταθμών βάσης, η επίτευξη επιδόσεων 5G απαιτεί ακόμη μεγαλύτερη υποδομή. Ευτυχώς, οι κεραιές στα Small Cells μπορεί να είναι πολύ μικρότερες από τις παραδοσιακές κεραιές εάν μεταδίδουν μικροσκοπικά κύματα στο φάσμα mmWave. Αυτή η διαφορά στο μέγεθος της κεραιάς του Small Cell έναντι των Macrocell μας επιτρέπει να τα τοποθετούμε σε κορυφές κτηρίων ή πάνω σε φωτεινούς πόλους. Αυτή η ριζικά διαφορετική διάρθρωση του δικτύου θα πρέπει να παρέχει πιο στοχευμένη και αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Έχοντας περισσότερους σταθμούς σημαίνει ότι η συχνότητα που ένας σταθμός χρησιμοποιεί, για τη σύνδεση του με μια συσκευή, σε μια περιοχή, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν από άλλο σταθμό σε διαφορετική περιοχή για να εξυπηρετήσει έναν άλλο χρήστη.

Υπάρχει όμως ένα πρόβλημα. Το πλήθος των μικρών κυττάρων που απαιτούνται για την κατασκευή ενός δικτύου 5G μπορεί να δυσχεράνει τη δημιουργία του σε αγροτικές περιοχές. Εκτός από την εκπομπή σε mmWave, οι σταθμοί βάσης 5G θα έχουν επίσης πολλές περισσότερες κεραιές από τους σταθμούς βάσης των σημερινών κυψελοειδών

δικτύων. Έτσι μπορούμε να επωφεληθούμε από μια άλλη νέα τεχνολογία την Massive MIMO. [8] [9]

2.3.8 Massive MIMO

Οι σημερινοί σταθμοί βάσης 4G διαθέτουν δώδεκα θύρες για κεραιές που χειρίζονται όλη την κυψελοειδή κίνηση. Οκτώ για πομπούς και τέσσερις για δέκτες. Αλλά οι σταθμοί βάσης 5G, μπορούν να υποστηρίξουν περίπου εκατό τέτοιες θύρες, πράγμα που σημαίνει ότι πολλές περισσότερες κεραιές μπορούν να χωρέσουν σε μια ενιαία συστοιχία. Αυτή η δυνατότητα σημαίνει, ότι ο σταθμός βάσης θα μπορούσε να στέλνει και να λαμβάνει σήματα από πολλούς περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα, αυξάνοντας την χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου κατά 22% ή και σε κάποιες περιπτώσεις περισσότερο. Αυτή η τεχνολογία ονομάζεται MIMO (Massive Input Massive Output), δηλαδή πολλαπλή είσοδο πολλαπλή έξοδο. Η τεχνολογία MIMO περιγράφει ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους πομπούς και δέκτες για την αποστολή και λήψη πολλαπλών δεδομένων σε μια αποστολή. Η τεχνολογία Massive MIMO μεταφέρει αυτή την ιδέα σε ένα νέο επίπεδο, χρησιμοποιώντας δεκάδες κεραιές σε μία ενιαία συστοιχία. Η τεχνολογία MIMO βρίσκεται ήδη σε μερικούς σταθμούς βάσης 4G. Μέχρι στιγμής όμως, η τεχνολογία Massive MIMO έχει δοκιμαστεί μόνο σε εργαστήρια και σε ανοικτά πεδία. Στις πρώτες δοκιμές, έχει παρατηρηθεί πρωτοφανής αποδοτικότητα φάσματος, η οποία είναι ένα μέτρο για το πόσα bits των δεδομένων μπορεί να μεταδοθούν σε ένα συγκεκριμένο αριθμό χρηστών ανά δευτερόλεπτο.

Η τεχνολογία Massive MIMO αποτελεί ένα άκρος ελπιδοφόρο κομμάτι για το μέλλον του 5G. Ωστόσο, η εγκατάσταση τόσων πολλών περισσότερων κεραιών για να χειριστούμε τη κυψελοειδή κυκλοφορία προκαλεί σοβαρές παρεμβολές αν αυτά τα σήματα συναντηθούν (cross signaling). Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πρέπει να ενσωματωθεί στους σταθμούς 5G η τεχνολογία μορφοποίησης δέσμης. (Beamforming). [8] [9]

2.3.9 Beamforming

Η τεχνολογία Beamforming είναι ένα σύστημα διαχείρισης της κίνησης, της μεταγωγής δεδομένων από την κεραιά στο χρήστη και το αντίστροφο, για κυψελοειδής σταθμούς βάσης που προσδιορίζει την βέλτιστη διαδρομή για την παράδοση δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο χρήστη, μειώνοντας τις παρεμβολές για τους χρήστες που βρίσκονται κοντά σε αυτή την διαδικασία. Ανάλογα τη κατάσταση που εξετάζουμε, δηλαδή το δίκτυο στο οποίο θέλουμε να εφαρμοσθεί, αλλά και την τρέχουσα τεχνολογία, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να εφαρμοσθεί η εν λόγω τεχνολογία στα 5G δίκτυα. Η τεχνολογία beamforming μπορεί να βοηθήσει τις συστοιχίες Massive MIMO να κάνουν

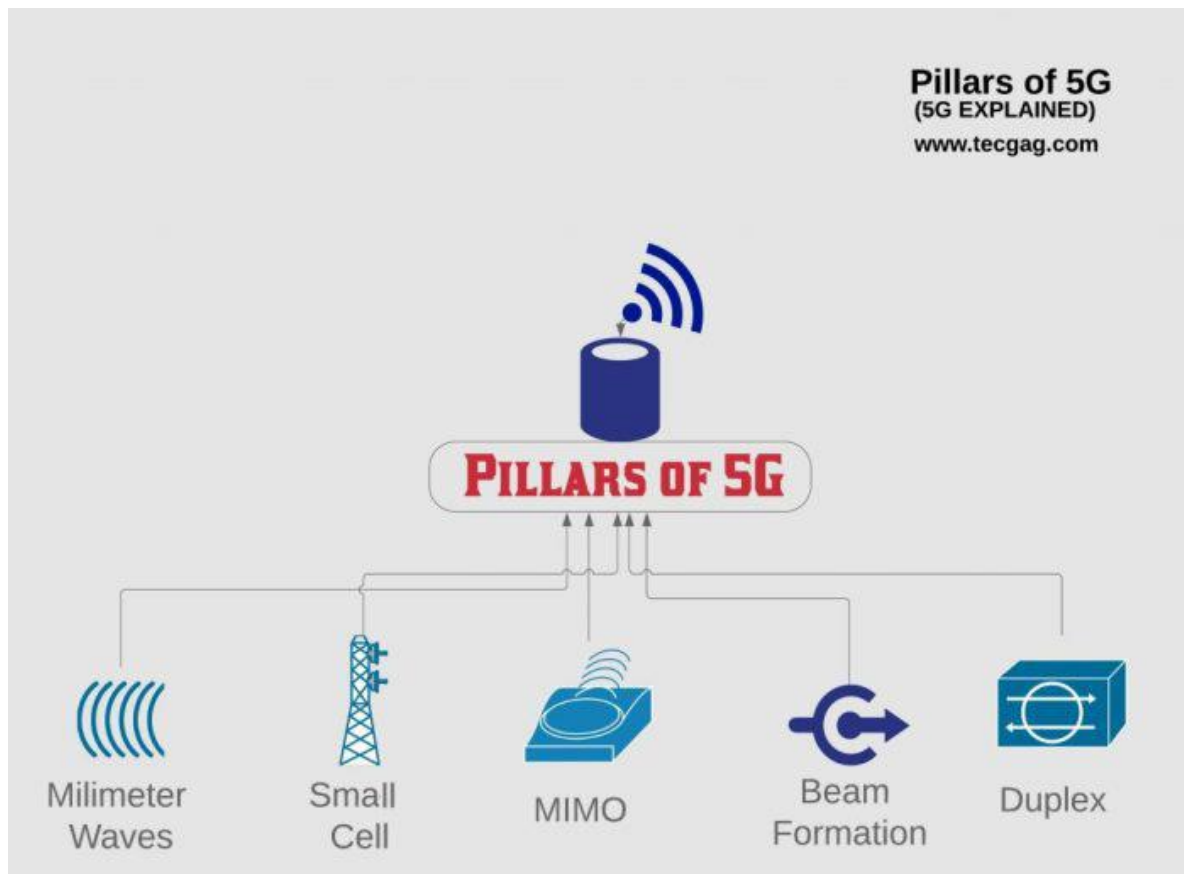
πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Η κύρια πρόκληση για την τεχνολογία του Massive MIMO είναι η μείωση των παρεμβολών κατά τη μετάδοση περισσότερων πληροφοριών από πολλές περισσότερες κεραιές ταυτόχρονα. Στους Massive MIMO σταθμούς βάσης, οι αλγόριθμοι επεξεργασίας σημάτων σχεδιάζουν την βέλτιστη διαδρομή για την μετάδοση του σήματος μέσω του αέρα σε κάθε χρήστη. Στη συνέχεια μπορούν να στείλουν μεμονωμένα πακέτα δεδομένων σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις, απομακρύνοντας τα εν λόγω πακέτα από τα κτίρια και άλλα αντικείμενα με ακρίβεια. Με χωρογράφηση των κινήσεων των πακέτων και την ώρα άφιξης τους, η τεχνολογία beamforming επιτρέπει σε πολλούς χρήστες και κεραιές, σε μια συστοιχία Massive MIMO, να ανταλλάσσουν πολύ περισσότερες πληροφορίες ταυτόχρονα, από ότι θα αντάλλαζαν χωρίς τη τεχνολογία beamforming. Για τα mmWave, η τεχνολογία beamforming χρησιμοποιείται κυρίως για την αντιμετώπιση διαφορετικών προβλημάτων. Τα κυψελοειδή σήματα εμποδίζονται εύκολα από αντικείμενα και τείνουν να εξασθενούν σε μεγάλες αποστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, το beamforming μπορεί να βοηθήσει με την εστίαση ενός σήματος σε μια συγκεντρωμένη δέσμη που κατευθύνετε μόνο προς την κατεύθυνση ενός χρήστη, αντί να μεταδίδει σε πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να ενισχύσει τις πιθανότητες του σήματος να φτάσει άθικτο και να μειώσει την παρεμβολή για όλους τους άλλους χρήστες.

Εκτός από την αύξηση των data rates με την εκπομπή σε mmWave και την ενίσχυση της αποδοτικότητας φάσματος με Massive MIMO, οι μηχανικοί ασύρματων δικτύων προσπαθούν να επιτύχουν υψηλή απόδοση και το χαμηλό latency που απαιτούνται για το 5G, μέσω μιας τεχνολογίας που ονομάζεται full duplex, η οποία τροποποιεί τον τρόπο με τον οποίο οι κεραιές μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα. [8] [9]

2.3.10 Full Duplex

Οι σημερινοί σταθμοί βάσης και τα κινητά τηλέφωνα βασίζονται σε πομποδέκτες οι οποίοι πρέπει να αλλάζουν όταν μεταδίδουν και λαμβάνουν πληροφορίες με την ίδια συχνότητα ή να λειτουργούν με διαφορετικές συχνότητες εάν επιθυμεί ο χρήστης να στείλει και να λάβει πληροφορίες ταυτόχρονα. Με το 5G, ένας πομποδέκτης θα μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα, στην ίδια συχνότητα. Αυτή η τεχνολογία είναι γνωστή ως full duplex και θα μπορούσε να διπλασιάσει την χωρητικότητα στα ασύρματα δίκτυα στο πιο θεμελιώδες φυσικό τους στρώμα. Για παράδειγμα ας σκεφτούμε δύο άτομα που μιλάνε ταυτόχρονα, αλλά ακόμα μπορούν να καταλάβουν ο ένας τον άλλο, πράγμα που σημαίνει ότι η συνομιλία τους μπορεί να διαρκέσει περίπου το μισό χρόνο από ότι θα διαρκούσε αρχικά και η επόμενη συζήτηση θα μπορούσε να ξεκινήσει γρηγορότερα. Ορισμένοι στρατιωτικοί οργανισμοί χρησιμοποιούν ήδη τεχνολογία full duplex που βασίζεται σε ογκώδες εξοπλισμό. Για την επίτευξη Full Duplex τεχνολογίας σε προσωπικές συσκευές, οι ερευνητές πρέπει να σχεδιάσουν ένα κύκλωμα που να μπορεί να δρομολογεί, εισερχόμενα και εξερχόμενα

σήματα έτσι ώστε να μην συγκρούονται ενώ η κεραία μεταδίδει και λαμβάνει ταυτόχρονα δεδομένα. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο, λόγω της τάσης των ραδιοκυμάτων να ταξιδεύουν τόσο προς τα εμπρός, όσο και προς τα πίσω στην ίδια συχνότητα - μια αρχή γνωστή ως αμοιβαιότητα. Αλλά πρόσφατα, ερευνητές δημιούργησαν τρανζίστορ πυριτίου που λειτουργούν σαν διακόπτες υψηλής ταχύτητας για να σταματήσουν το ταυτόχρονο "εμπρός-πίσω", επιτρέποντάς τους, να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα στην ίδια συχνότητα, ταυτόχρονα. Ένα μειονέκτημα για την Full Duplex επικοινωνία είναι ότι, δημιουργεί περισσότερες παρεμβολές, μέσω της pesky echo (Ενοχλητική Ηχώ). Όταν ένας πομπός εκπέμπει ένα σήμα, το σήμα αυτό είναι πολύ πιο κοντά στην κεραία της συσκευής και συνεπώς πιο ισχυρό από οποιοδήποτε σήμα η συσκευή παραλαμβάνει. Η κατασκευή μιας κεραίας που μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει ταυτόχρονα είναι δυνατή, μόνο με ειδική τεχνολογία echo-canceling. [8] [9]



Εικόνα 13: Τεχνολογικοί πυλώνες για την υλοποίηση των 5G δικτύων.

2.3.11 D2D Communication (Device to Device)

Η επικοινωνία D2D στα κινητά δίκτυα ορίζεται ως η άμεση επικοινωνία που επιτυγχάνεται μεταξύ δύο χρηστών χωρίς την παρέμβαση του σταθμού βάσης ή του

πυρήνα του δικτύου. Οι επικοινωνίες D2D σε συγκεκριμένα σενάρια μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη φασματική απόδοση του δικτύου.

2.4 Εφαρμογές 5G

Κάθε γενιά ασύρματων δικτύων από την 1G μέχρι και την επερχόμενη 5G έχει το δικό της σύνολο νέων λειτουργιών. Ωστόσο τα δίκτυα 5G αναμένεται, να προσφέρουν καινούριες και βελτιωμένες εφαρμογές στους χρήστες σχεδόν σε κάθε πτυχή της καθημερινότητάς τους. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι νέες τεχνολογίες που αποτελούν τις ναυαρχίδες του 5G, όπως είναι τα mmWave, και συγκεκριμένα η χρησιμοποίηση τους στο μη εξουσιοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz, τα Small Cells, η τεχνική του beam forming, οι κεραιές Massive MIMO καθώς και η λειτουργία Full Duplex θα προσφέρουν αυξημένες ταχύτητες στους χρήστες πολλαπλάσιων των 10Gbps, κάνοντας την ασύρματη ανταλλαγή δεδομένων να είναι πια ισοδύναμη σε ταχύτητα με την ενσύρματη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικών ινών. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό μάλιστα, με το latency να αγγίζει το 1ms, όπου η επικοινωνία εντός του δικτύου θα γίνεται με μηδαμινή χρονοκαθυστέρηση, συντελούν έναν κόσμο άπειρων δυνατοτήτων όπου όλες οι συσκευές μπορούν να αλληλοεπιδράσουν ή και να δράσουν μεμονωμένα με μια σχετική άνεση. Είναι λοιπόν δεδομένο πως η επερχόμενη γενιά δικτύων θα επικεντρωθεί σε διαδικτυακές εφαρμογές και εφαρμογές κρίσιμης επικοινωνίας. Τα παραδείγματα εφαρμογών ποικίλουν.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της ασύρματης πρόσβασης (5G for home and mobile) στο οποίο ο χρήστης με τεράστιες ταχύτητες θα μπορεί να προσπελάει δεδομένα με μηδενική σχεδόν καθυστέρηση. Επιπρόσθετα στο τομέα των media, το κομμάτι των διαφημίσεων θα γνωρίσει μεγάλη βελτίωση αφού σε συνδυασμό με την τεχνολογία big data, η εξατομίκευση των δεδομένων του χρήστη για την καλύτερη προβολή αυτών ανάλογα με τις προτιμήσεις του, θα γίνει πιο εύκολη. Ακόμα οι ταχύτατα εξελισσόμενες τεχνολογίες, όπως η Εικονική Πραγματικότητα (Virtual Reality, VR), η Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality, AR) και η παρακολούθηση Ροής Βίντεο (Video Streaming) σε ανάλυση 4K και παραπάνω θα καθίστανται πλέον εφικτές στη πλήρη μορφή τους.

Στο τομέα της βιομηχανίας, την εμφάνιση τους θα κάνουν τα πρώτα πλήρως αυτοματοποιημένα Smart Factories τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης από απόσταση, του συνολικού κύκλου κατασκευής του τελικού προϊόντος. Επίσης στο τομέα των μεταφορών, ήδη έχουν κάνει την εμφάνιση τους εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση οχήματος (autonomous driving), με πρωτοφανές για τα ελληνικά δεδομένα πείραμα έξυπνης οδήγησης όπου ο οδηγός κατάφερε να χειριστεί το όχημα από ένα cockpit. Το όχημα ανταποκρίθηκε σε πλήρη βαθμό στις εντολές του χειριστή

χάρη στην αξιοπιστία και την άριστη απόκριση του δικτύου λόγω χαμηλού latency. Ένας άλλος τομέας που επηρεάζεται από τον ερχομό του 5G είναι η εκπαίδευση. Χαρακτηριστικό είναι πως στην ίδια ημερίδα, στη χώρα μας, έγινε προβολή ολογράμματος ομιλητή. Ακόμη μια πολύ σημαντική εφαρμογή των δικτύων 5G στις ζωές μας, ίσως και η σημαντικότερη, είναι η τηλεϊατρική μέσω της οποίας ο θεράπων ιατρός μπορεί να διαγνώσει ή ακόμα και να χειρουργήσει τον ασθενή γλιτώνοντας έτσι πολύτιμο χρόνο, ο οποίος κάποιες φορές μπορεί να αποβεί μοιραίος. Τα παραπάνω παραδείγματα έλαβαν χώρα στο δήμο Τρικκαίων στις 12/12/2019. [10] [11].

Ωστόσο, οι εφαρμογές των 5G δικτύων δεν σταματάνε εδώ. Μέσω της M2M τεχνολογίας (Machine to Machine), της οποίας τα βασικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένα δεδομένα περιαγωγής, επεξεργασία, μεταφορά και ανταλλαγή δεδομένων, με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση συνδέοντας έναν τεράστιο αριθμό συσκευών μεταξύ τους, καθίσταται επιτέλους δυνατή η υλοποίηση του IoT (Internet Of Things). Το IoT στην ουσία αποτελείται από ποικίλες ταυτόχρονες συνδέσεις, που περιλαμβάνουν από απλές συσκευές μέχρι και ολόκληρα υπο-δίκτυα και συστήματα μεταφορών. Πρόκειται για την ψηφιακή διασύνδεση όλων των μέχρι σήμερα συσκευών, που υπάρχουν γύρω μας, καθώς και την ουσιαστική αλληλεπίδραση τους, με μόνο γνώμονα την βελτίωση της ποιότητας της ζωής του χρήστη. Στις μέρες μας το IoT βρίσκει εφαρμογή σε ένα πολύ μικρό κομμάτι του καθώς την εμφάνιση τους έχουν ήδη αρχίσει να κάνουν τα έξυπνα σπίτια (Smart Homes) στα οποία με ένα απλό app στο κινητό του ο κάτοχος – χρήστης μπορεί να έχει πρωτοφανής δυνατότητες όπως, η παρακολούθηση ζωντανής ροής από κάμερες στην οικεία του ή ακόμα και να μπορεί να χειριστεί ηλεκτρονικές συσκευές ασύρματα όπως το ψυγείο ή την κουζίνα του.

WHAT POSSIBILITIES WILL 5G ENABLE?

A full-fledged 5G network's ability to deliver a constant connection without lag will support mission-critical applications.



Telemedicine
Greater access to healthcare and surgery performed remotely



Autonomous vehicles
Safer cars due to better collision avoidance systems



Internet of Things
Real-time monitoring of places and processes



Autonomous drones
For building inspection and delivery of medical supplies



Industry automation
Robots that communicate with one another



Virtual/augmented reality
New modes of personal entertainment and professional training

Εικόνα 14: Υπηρεσίες που θα καταστούν εφικτές με την υλοποίηση των 5G δικτύων.

3 Ανασκόπηση της Ερευνητικής Περιοχής

3.1 Εισαγωγή στα Small Cells

Είναι προφανές γενικά, τόσο από την καθολική μελέτη της επιστημονικής κοινότητας επάνω στο αντικείμενο όσο και ειδικά, από την ανάλυση που έγινε στις τεχνολογίες 5G στο κεφάλαιο 2.3, ότι τα Small Cells αποτελούν επιτακτική ανάγκη και ναυαρχίδα της τεχνολογίας 5G Δικτύων. Πράγματι, η καθολική επίτευξη των στόχων των δικτύων της επόμενης γενιάς μπορεί να ολοκληρωθεί, μόνο μέσω της ενσωμάτωσης των Small Cells στις είδη υπάρχουσες κυψελοειδής δικτυακές υποδομές, βελτιώνοντας τόσο τις ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων από και προς τους χρήστες, την συνολική χωρητικότητα του Δικτύου, όσο και την μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η ιδέα υλοποίησης ενός ετερογενούς δικτύου (HetNets), με τον εμπλουτισμό του με μικρούς σταθμούς βάσης έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, που ασχολείται με την αποδοτική ανάπτυξη και υλοποίηση υποδομών 5G Δικτύων, με κύριο στόχο την βελτίωση της κάλυψης των χρηστών τόσο σε εσωτερικούς-μέχρι τώρα δυσπρόσιτους χώρους, για κάλυψη από της ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες, όσο και σε πυκνά δίκτυα στα οποία υπάρχουν πάρα πολλοί χρήστες, σε μια σχετικά μικρή γεωγραφική περιοχή.

Η βασική ιδέα υλοποίησης των μικρών σταθμών βάσης, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια του τρέχοντος κεφαλαίου, έγκειται στο γεγονός της αύξησης των αναγκών που πρέπει να καλύψει το δίκτυο λόγω της αύξησης του αριθμού των χρηστών σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Λόγω των περισσότερων χρηστών, εύλογα θα μπορούσε να σκεφθεί κανείς ότι η τοποθέτηση περισσότερων Macrocell (Μεγάλων Σταθμών Βάσης) θα έλυσε το πρόβλημα. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου κόστους κατασκευής και τοποθέτησης των εν λόγω σταθμών η επιστημονική κοινότητα έχει στραφεί στη μελέτη, την ανάπτυξη και την εγκατάσταση σταθμών βάσης αποτελούμενων τόσο, από Small Cells, όσο και από την συνύπαρξη τους με τις είδη υπάρχουσες υποδομές, από σταθμούς τύπου Macrocell. Γενικότερα τα Small Cells μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες κάλυψης των χρηστών σε σημεία του δικτύου, που τα Macrocell, λόγω του συνωστισμού των χρηστών προσφέρουν κακή κάλυψη (για παράδειγμα σε περιοχές κοντά στα όρια της περιοχής κάλυψης ενός Macrocell σταθμού). Μολονότι οι παραπάνω σταθμοί βάσης προσφέρουν μικρότερες περιοχές κάλυψης, καταφέρνουν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των χρηστών βελτιώνοντας τις ταχύτητες αποστολής και λήψης δεδομένων τους, με σχετικά χαμηλό οικονομικό κόστος. Όντας μικροί σταθμοί βάσης, χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, διότι μειώνουν την ενέργεια που χρειάζεται να καταναλώσει η συσκευή του χρήστη για να στείλει ή να λάβει δεδομένα από αυτά, αφού τα Small Cells τοποθετούνται κοντινότερα στο χρήστη από ότι θα τοποθετούνταν μία κεραία τύπου Macrocell.

Στη συνέχεια του τρίτου κεφαλαίου σε ότι αφορά τα Small Cells, θα αναλύσουμε τις τεχνικές προδιαγραφές που τα χαρακτηρίζουν, θα δούμε τις κατηγορίες στις οποίες αυτά χωρίζονται αλλά και τις προϋποθέσεις που μία συσκευή πρέπει να πληροί για να ανήκει σε κάποια από τις διαθέσιμες κατηγορίες. Τέλος, θα αναλύσουμε τόσο τα υπέρ όσο και τα κατά της υλοποίησης των 5G δικτύων με βασική υποδομή τα Small Cells, αλλά θα αναφερθούμε και σε μελέτες της επιστημονικής κοινότητας, που ασχολούνται με τον μετριασμό των μειονεκτημάτων της παραπάνω υλοποίησης.

3.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι μικροί σταθμοί βάσης (Small Cells) είναι χαμηλής κατανάλωσης κόμβοι του κυψελοειδούς δικτύου που λειτουργούν, τόσο στο αδειοδοτημένο όσο και στο μη-αδειοδοτημένο φάσμα έχοντας ως ελάχιστη περιοχή κάλυψης τα 10 μέτρα και μέγιστη περιοχή κάλυψης μερικά χιλιόμετρα. Είναι μικρότερα σε μέγεθος εν σύγκριση με τους σταθμούς βάσης τύπου Macrocell, επειδή κυρίως καλύπτουν μικρότερες σε εύρος περιοχές αλλά και επειδή χειρίζονται διαφορετικές καταστάσεις. Με τον όρο καταστάσεις εννοούμε ότι, τα Small Cells δεν έρχονται για να αντικαταστήσουν τις ήδη παρούσες υποδομές Macrocells αλλά για να παραμείνουν μαζί τους. Τα Small Cells ουσιαστικά θα έχουν μία υποστηρικτική λειτουργία, δίνοντας τη δυνατότητα σε όσους χρήστες βρίσκονται στο όριο της περιοχής κάλυψης των Macrocells να συνδεθούν σε αυτά. Εφόσον με τον ερχομό της επικείμενης γενιάς Δικτύων στοχεύουμε σε πυκνότερα δίκτυα είναι λογικό ότι τα Small Cells, θα διαδραματίσουν μείζον ρόλο, τόσο λόγω της εύκολης εγκατάστασής τους, όσο και για την ικανότητά τους να επαναχρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες στο συχνοτικό φάσμα. Η συνύπαρξη των υποστηρικτικών αυτών σταθμών βάσης με την ήδη προ υπάρχουσα δομή των Macrocells, στα κυψελοειδή δίκτυα αναμένεται να βελτιώσει τις προσφερόμενες στο χρήστη υπηρεσίες του Δικτύου, κυρίως αυξάνοντας την συνολική χωρητικότητα του δικτύου, το QoS (Quality Of Service) και να προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες αποστολής και λήψης δεδομένων.[13]

Ουσιαστικά για να κατανοήσουμε περισσότερο τα οφέλη της τοποθέτησης Small Cells στην ήδη υπάρχουσα δικτυακή δομή θα χρησιμοποιήσουμε ένα παράδειγμα. Ας σκεφτούμε ένα πραγματικά πυκνό δίκτυο διασυνδεδεμένων χρηστών και συσκευών έτσι ακριβώς όπως επιτάσσει η επερχόμενη γενιά δικτύων. Η σύνδεση όλων αυτών των χρηστών σε έναν σταθμό βάσης τύπου Macrocell, θα σήμαινε αυτόματα διαμοιρασμό όλων των πόρων του και επομένως μικρότερες ταχύτητες αποστολής και λήψης δεδομένων. Όμως με την χρήση κάποιου συγκεκριμένου αριθμού μικρών σταθμών βάσης θα μπορούσαμε να αποφορτίσουμε το Macrocell, αλλά και τους χρήστες του, που τώρα απολαμβάνουν μεγαλύτερες ταχύτητες και καλύτερες υπηρεσίες εξαιτίας της εν λόγω αποφόρτισης. Τα Small Cells ωστόσο, δεν είναι μία καινούργια τεχνολογία. Συστήθηκαν στο κοινό το μακρινό 2008, σχεδόν 12 χρόνια πριν, κάτω από την έκδοση 3GPP 9, μαζί με τις πρώτες ιδέες για την υπέρ-πύκνωση του Δικτύου. Με πολύ απλά

λόγια, αντί ο πάροχος του δικτύου να προσφέρει έναν κεντρικό κορμό σύνδεσης για όλες τις ασύρματες συσκευές του δικτύου, μπορεί πια να εκμεταλλευτεί τις πολλαπλές διακλαδώσεις που δημιουργούνται από την τοποθέτηση Small Cells και να προσφέρει εξειδικευμένες υπηρεσίες, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Ένα Small Cell λοιπόν είναι σε θέση, να υποστηρίξει τα διάφορα πρωτόκολλα προηγούμενων γενεών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, όπως τα πρωτόκολλα GSM, CDMA2000, TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access), W-CDMA (Wideband Code-Division Multiple Access), LTE και WiMAX. Αυτό κάνει την τεχνολογία των Small Cells να μην αποτελεί λύση μόνο για την επερχόμενη γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων αλλά ακόμη και για πυκνά προγενέστερα δίκτυα. Τα παραπάνω καθιστούν κατανοητό ότι πρακτικά, τα υπό ανάπτυξη δίκτυα 5G δεν προβλέπεται να είναι εξολοκλήρου αυτόνομα αλλά να στηρίζονται εν μέρει στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία δικτύων 4G που λειτουργούν κάτω από το LTE-A πρότυπο.



Εικόνα 15: Εικόνα Smallcell.

3.3 Κατηγορίες Small Cells

Όπως περιγράψαμε και στα προηγούμενα υπό-κεφάλαια τα Small Cells βρίσκουν εφαρμογή σε μικρού μεγέθους γεωγραφικές περιοχές, λόγω της μικρής εμβέλειας που έχουν. Ανάλογα με την εμβέλεια της περιοχής που μπορούν να καλύψουν χωρίζονται σε 3 κατηγορίες, τα Femtocells, τα Picocells και τα Microcells, οι οποίες θα αναλυθούν στο τρέχον υποκεφάλαιο.

3.3.1 Femtocell

Τα Femtocells είναι οι πιο μικροί, ως προς την περιοχή κάλυψης, κυψελοειδής σταθμοί βάσης της κατηγορίας Small Cells και έχουν σχεδιαστεί για να τοποθετούνται και να χρησιμοποιούνται προσωπικά από το χρήστη σε οικίες και επιχειρήσεις. Σε πολλά τεχνικά κείμενα μπορεί να τα συναντήσουμε με την ορολογία Femto Access Point (AP). Ένα Femtocell μπορεί να εγκατασταθεί στην οικεία ή στην επιχείρηση του χρήστη από τον ίδιο χωρίς την άμεση ανάγκη τοποθέτησης του από τον πάροχο. Η αγορά του γίνεται είτε με άμεση πληρωμή είτε με κάποιο διακανονισμό για τον δανεισμό του. Αρχικά όταν πρωτοεμφανίστηκε κύριο μέλημα του ήταν η κάλυψη εσωτερικών χώρων, καθώς το εξερχόμενο σήμα από τον σταθμό βάσης Macrocell εξασθενούσε όταν συναντούσε τα τοιχώματα των εσωτερικών χώρων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για καλύτερη κάλυψη των εσωτερικών χώρων, έχει καταστήσει το Femtocell ως την πλέον βασική μορφή Small Cell μέχρι σήμερα. [13].



Εικόνα 16: Εικόνα οικιακών femtocell.

Ένα Femtocell επιφέρει θετικά αποτελέσματα στον χρήστη πέρα των τετριμμένων όπως καλύτερη κάλυψη και επομένως αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Τα εν λόγω θετικά αποτελέσματα βρίσκουν εφαρμογή εάν εξετάσουμε τον χρήστη ως καταναλωτή εφόσον προμηθεύεται την εν λόγω συσκευή, και μπορεί να επωφεληθεί από ευνοϊκή τιμολόγηση για τις δικτυακές υπηρεσίες που έχει, εν συγκρίσει με την παραδοσιακή τιμολόγηση των router. Ένα άλλο πλεονέκτημα για τον χρήστη είναι ότι λόγω της τοποθέτησης του Femtocell εντός της οικίας του μειώνεται η απόσταση της συσκευής του από το σταθμό βάσης, σε σχέση με την περίπτωση που σταθμός βάσης που επικοινωνεί η συσκευή αποτελεί το macrocell, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το προσδοκώμενο εύρος ζωής της μπαταρίας της συσκευής του χρήστη. Ο πάροχος του

δικτύου επωφελείται και αυτός από τη μεριά του αφού η σύνδεση του χρήστη στο Femtocell μεταφράζεται στον τερματισμό της σύνδεσης και την έξοδο του χρήστη από το Macrocell. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιοχής κάλυψης του Δικτύου που προσφέρει ο πάροχος. Αποτελεί γεγονός ότι η λύση χρήσης του Femtocell σε πυκνά δίκτυα όπου παρατηρείται συνωστισμός πολλών χρηστών έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον εταιρικών κολοσσών στο τομέα των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών. Εταιρίες όπως η Vodafone, T-Mobile US, AT&T και η Verizon έχουν ήδη παράγει συσκευές τέτοιου τύπου αφουγκραζόμενες τις ανάγκες τόσο των επιχειρήσεων όσο και του κάθε χρήστη ξεχωριστά.

Μιλώντας με αριθμούς, ένα Femtocell συνδέεται στο δίκτυο του φορέα παροχής υπηρεσιών μέσω ευρυζωνικών δικτύων (όπως DSL ή καλώδιο). Ένα Femtocell επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών να επεκτείνουν την κάλυψη της υπηρεσίας σε εσωτερικούς χώρους ή στην άκρη των κυψελών, ειδικά όπου η πρόσβαση θα ήταν διαφορετικά περιορισμένη ή μη διαθέσιμη. Ο αριθμός των ταυτόχρονων συνδέσεων ασύρματων κινητών συσκευών κυμαίνεται από τέσσερις (4) έως και οχτώ (8). Βέβαια, σε ορισμένες περιπτώσεις και κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μια εταιρική εγκατάσταση, περιορίζοντας πάλι όμως τον αριθμό ταυτόχρονων συσκευών ασύρματης κινητής τηλεφωνίας από οχτώ (8) έως και δεκαέξι (16). Με κατανάλωση ενέργειας που ξεκινάει από το 1 mW μέχρι και τα 250 mW, μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά μια περιοχή η οποία ξεκινάει από τα 10 μέτρα και φτάνει μέχρι και τα 100 μέτρα. Ανάλογα με τις διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές τις οποίες ακολουθούν οι Femtocell συσκευές, ως μέγιστος αριθμός συνδέσεων χρηστών σε ένα Femtocell ορίζονται οι τριάντα (30) χρήστες.

Σε ότι αφορά την σύνδεση του χρήστη, ο καταναλωτής αρκεί να προσδιορίσει τουλάχιστον μία φορά τους αριθμούς των τηλεφώνων οι οποίοι επιθυμεί να συνδέονται στο Femtocell, έτσι ώστε όταν η συσκευή φτάσει εντός εμβέλειας του Femtocell, ενώ είναι ήδη συνδεδεμένη σε κάποιο Macrocell, να τερματιστεί η σύνδεση αυτή και να ξεκινήσει, η σύνδεση με το Femtocell. Η “αλλαγή” σύνδεσης σταθμού βάσης καλείται handover. Αντίστοιχα η απομάκρυνση της συσκευής από τη περιοχή κάλυψης του Femtocell και η εισαγωγή της στην περιοχή κάλυψης του Macrocell ακολουθεί την αντίστροφη λειτουργία από αυτή του handover. Ο καταναλωτής και ο πάροχος του Femtocell πρέπει να βρίσκονται σε αδιάκοπη επικοινωνία μεταξύ τους, διότι αν και η εγκατάσταση του Femtocell σε εσωτερικό σημείο, όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι απλή (Plug And Play), μόνο ο δεύτερος μπορεί να ορίσει την λειτουργία του Femtocell σε περίπτωση αλλαγής θέσης της αρχικής θέσης εγκατάστασης του.

3.3.2 Picocell

Το Picocell αποτελεί τη δεύτερη κατηγορία μικρών σταθμών βάσης με την έννοια ότι η εμβέλεια του είναι μεν μεγαλύτερη από αυτή του Femtocell, αλλά μικρότερη από αυτή του Microcell. Έχει την εν γένει λειτουργία ενός Small Cell, δηλαδή δεν αντικαθιστά

αλλά συνυπάρχει στην ήδη υπάρχων τοπολογία του κυψελοειδούς ετερογενούς δικτύου, διαδραματίζοντας ρόλο υποστηρικτικό, εκεί που η εμβέλεια των Macrocell δεν επαρκεί. Χρησιμοποιείται ως σταθμός βάσης καλύπτοντας περιοχές όπως γραφεία εταιριών, μεγάλα εμπορικά κέντρα, σταθμούς τρένων και γενικά χώρους που συνωστίζεται μεγάλος αριθμός ατόμων. Η πιο σημαντική δε εφαρμογή του, είναι η τοποθέτηση του σε αεροπλάνα ώστε οι χρήστες να απολαμβάνουν Δικτυακές υπηρεσίες και μετά την απογείωση. [15]



Εικόνα 17: Εικόνα picocell.

Ωστόσο μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, συνεπώς και περισσότεροι διασυνδεδεμένοι χρήστες, όπως είδαμε και με την συσχέτιση Macrocell-Femtocell παραπάνω, σημαίνει και μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση. Επεξηγηματικά ένα PicoCell, μπορεί να καλύψει μια περιοχή που ξεκινάει κατά ελάχιστο από εκατό (100) μέτρα και φτάνει μέχρι και τα διακόσια (200) μέτρα, με αποτέλεσμα την αύξηση του μέγιστου αριθμού διασυνδεδεμένων χρηστών από τους τριάντα (30) στους εκατό (100). Ως λογική συνεπαγωγή, για να γίνει αυτό πρέπει η ισχύς που καταναλώνετε να αυξηθεί, σε σχέση με αυτή που είδαμε ότι καταναλώνετε από τους σταθμούς βάσης Femtocell, από το εύρος των 1-250 mW, και να φτάσει το εύρος των 250mW κατά ελάχιστη και 1W μέγιστη. Αυτό σημαίνει ότι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών που συνδέονται στο PicoCell θα είναι μικρότερη από αυτών που συνδέονται στο Femtocell, αλλά θα συνεχίσει να παραμένει μεγαλύτερη από τις συσκευές που συνδέονται σε Macrocell λόγω της μειωμένης απόστασης μεταξύ της συσκευής και του σταθμού βάσης. Επιπρόσθετα μία τελευταία διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι εν αντιθέσει με το Femtocell το οποίο συνδεόταν plug and play από το χρήστη, το PicoCell για τις ανάγκες εγκατάστασης του πρέπει να παρέμβει ο πάροχος του δικτύου καθώς αυτός και μόνο αυτός είναι υπεύθυνος για την ασφαλή τοποθέτηση, λειτουργία και συντήρηση του.

Σε ότι αφορά την συνδεσιμότητα, κάθε PicoCell ως μονάδα συνδέεται με το λεγόμενο ελεγκτή σταθμού βάσης (Base Station Controller, BSC), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση ραδιοσυχνοτήτων και τη δρομολόγηση των δεδομένων που συλλέγονται, είτε στο κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Mobile Switching Centre, MSC), είτε στο δικτυακό κόμβο υποστήριξης πύλης (Gateway GPRS Support Node, GGSN). Συνολικά, πολλαπλές κεφαλές των εκάστοτε PicoCell μονάδων συνδέονται στον BSC εκμεταλλευόμενες τις υπάρχουσες κτηριακές καλωδιώσεις, δηλαδή μέσω Ethernet καλωδίωσης. Εξάιρεση στον κανόνα προφανώς είναι τα PicoCell που τοποθετούνται στα αεροσκάφη, στα οποία η αμφίδρομη επικοινωνία επιτελείται μέσω δορυφόρων.

Όπως και με την περίπτωση του Femtocell, ένα PicoCell υποστηρίζει πολλαπλές τεχνολογίες και πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων του GSM, του CDMA, του UMTS και του LTE. Ορισμένες από τις πιο γνωστές ψηφιακές τηλεπικοινωνιακές εταιρίες που έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη των PicoCells είναι οι Ericsson, η ZTE, η Huawei και η Airwalk, με την πρώτη εξ αυτών να αναπτύσσει το πρώτο PicoCell που κυκλοφόρησε στην αγορά με όνομα RBS 6402. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές που όριζε το πρότυπο του LTE το μέγιστο όριο μεταφοράς δεδομένων μέσω PicoCell είναι τα 300Mbps και η μέγιστη περιοχή κάλυψης εκτείνεται έως και πέντε χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα σε εσωτερικούς χώρους.

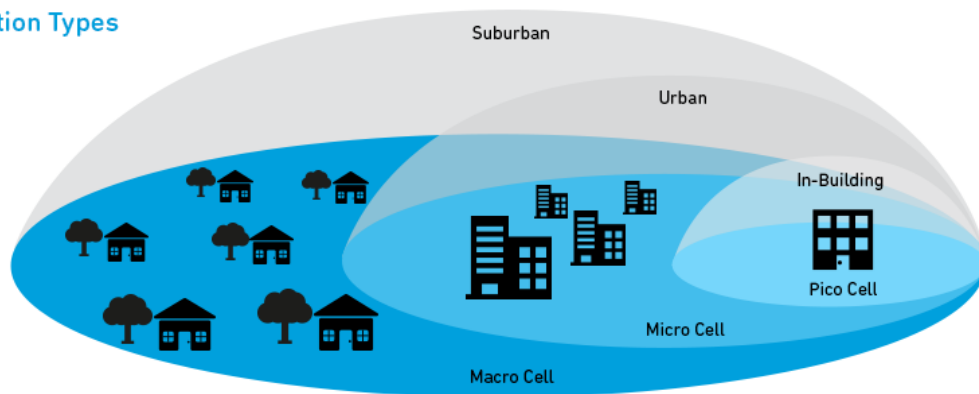
3.3.3 Microcell

Το Microcell αποτελεί την τελευταία κατηγορία και τη μεγαλύτερη, σε ότι αφορά την περιοχή κάλυψης, της οικογένειας των Small Cells. Οι περιοχές που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι μεγάλα σε έκταση συγκροτήματα όπως ξενοδοχειακές μονάδες, σταθμοί τραινών, αεροδρόμια, ψυχαγωγικά κέντρα και χώροι συναυλιών. Πολλές φορές μπορεί να υπάρξει συσχέτιση και ένα εύλογο ερώτημα στον αναγνώστη για ποιο λόγο πρέπει να υπάρχουν και τα PicoCell και τα Microcell από την στιγμή που καλύπτουν παρόμοιες γεωγραφικές περιοχές. Η διαφορά, που κάνει το Microcell τόσο διαφορετικό και αναγκαίο είναι ότι διαθέτει τεχνικές για την διαχείριση της ισχύος εκπομπής ώστε να περιορίζεται το γεωγραφικό πλάτος κάλυψης. Η ακτίνα κάλυψης μιας μονάδας Microcell εκτείνεται από τα διακόσια (200) μέτρα και μπορεί να φτάσει ακόμα και τα δύο (2) χιλιόμετρα. Ως λογικό συνεπακόλουθο, όπως είχαμε δει και στις άλλες δύο κατηγορίες παραπάνω, είναι οι ενεργειακές ανάγκες των Microcell να καλύπτουν ένα εύρος από ένα μέχρι δέκα W (1-10W) ενώ το σύνολο των χρηστών που μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα και να απολαύσει τις υπηρεσίες του συγκεκριμένου σταθμού βάσης κυμαίνεται σε ένα εύρος από εκατό (100) μέχρι δύο (2) χιλιάδες χρήστες.

Τις περισσότερες φορές, συνηθίζεται να εγκαθιστούνται σε χώρους στους οποίους αναμένεται σύντομα να μεταβεί πλήθος χρηστών ώστε να εξυπηρετηθούν επαρκώς αμέσως μόλις φτάσουν λόγω της συγκεκριμένης αύξησης της χωρητικότητας του

δικτύου. Ταυτόχρονα, η ευελιξία τους όσον αφορά τη διαχείριση ισχύος συμβάλλει στη μείωση των παρεμβολών από γειτονικές μονάδες-κυψέλες, ενώ η μέθοδος της διαίρεσης μιας πυκνής από χρήστες γεωγραφικής περιοχής σε πολλαπλές μονάδες συμβάλλει στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης στο δίκτυο. Επομένως λόγω της ιδιότητας του Microcell για την διαχείριση ισχύος εκπομπής προτιμάτε σε χώρους στους οποίους αναμένεται να υπάρξει συνωστισμός λόγω του ότι μπορεί να ελαχιστοποιήσει πιο εύκολα τις παρεμβολές.[16]

Base Station Types



Εικόνα 18: Εικόνα χρήσης όλων των Smallcells.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις τεχνικές προδιαγραφές των femtocells, Pico cells Microcells καθώς και του σταθμού βάσης macrocell. Είναι προφανές ότι κάθε διαφορετικός τύπος Small Cell χαρακτηρίζεται από διαφορετική παρεχόμενη ισχύ εκπομπής, εύρους περιοχής κάλυψης και ανώτατου αριθμού εξυπηρέτησης χρηστών. Κατά συνέπεια η επιλογή ενός Small Cell για να πλαισιώσει την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία των Macrocell για μία γεωγραφική περιοχή δεν είναι απλή υπόθεση. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και η σωστή επιλογή είναι μείζονος σημασίας για την αποδοτική λειτουργία και την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των χρηστών σε ένα πυκνό ετερογενές δίκτυο.

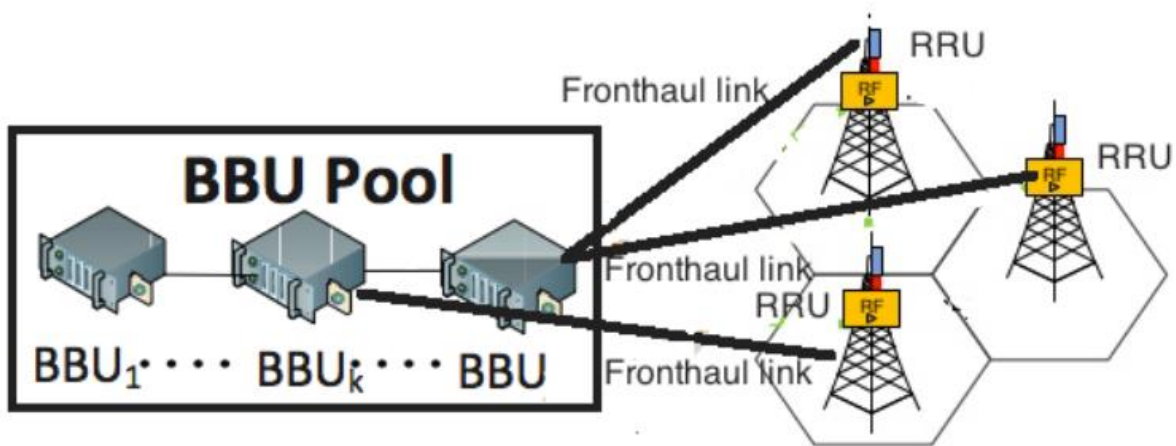
Cell Type	Output Power (W)	Cell Radius (km)	Users	Locations
Femtocell	0.001 to 0.25	0.010 to 0.1	1 to 30	Indoor
Pico Cell	0.25 to 1	0.1 to 0.2	30 to 100	Indoor/Outdoor
Micro Cell	1 to 10	0.2 to 2.0	100 to 2000	Indoor/Outdoor
Macro Cell	10 to >50	8 to 30	>2000	Outdoor

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Macrocell-Smallcell.

3.4 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G

Καθώς ο κλάδος των κινητών τηλεπικοινωνιών αναβαθμίζεται προς το εγγύς μέλλον της 5G τεχνολογίας, το μέγεθος της προς κίνηση πληροφορίας πολλαπλασιάζεται. Ένας από τους τρόπους με τους οποίους οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων (πάροχοι) αντιμετωπίζουν την εν λόγω κατάσταση και η προετοιμασία για να φέρουν εις πέρας, την αποστολή και τη λήψη τόσων πολλών δεδομένων που θα προκύψει με το 5G, είναι η μετατροπή του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN) [12]. Που ουσιαστικά σημαίνει η συγκέντρωση και η τοποθέτηση του στο cloud (σύννεφο). Η αρχιτεκτονική δικτύου που έχει προταθεί για τα δίκτυα 5G ονομάζεται Cloud Radio Access Network (C-RAN), αν και πολλές φορές ο ορισμός δίνεται και ως Centralized-Radio Access Network. Εμφανίστηκε για πρώτη φορά δέκα(10) χρόνια πριν (το 2010), όπου προτάθηκε στην Κίνα από το Ερευνητικό Ινστιτούτο Κινητής Τηλεφωνίας της Κίνας (China Mobile Research Institute) και βρίσκεται σε θέση να υποστηρίξει όχι μόνο τα δίκτυα επόμενης γενιάς, αλλά και τα ψηφιακά κυψελοειδή δίκτυα προηγούμενων γενεών (backwards compatibility). Το όνομα προέκυψε από το C-RAN σύστημα, το οποίο βασιζόταν σε τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ήταν “Clean, Centralized processing, Collaborative radio, and a real-time Cloud Radio Access Network”, δηλαδή Καθαρό, Με Κεντρική Επεξεργασία Δεδομένων, Συνεργασία ραδιοσυχνοτήτων και ένα Δίκτυο Πρόσβασης στο Σύννεφο (cloud) πραγματικού χρόνου [12] [14]. Η C-RAN (ή Cloud RAN), γνωστή και ως Centralized RAN, αρχιτεκτονική δικτύου έχει τρία κύρια στοιχεία - μια κεντρική μονάδα βασικής ζώνης (BBU), δίκτυα απομακρυσμένης ραδιοφωνικής μονάδας (RRU) και δίκτυο μεταφορών ή fronthaul:

- BBU Συλλογή Πόρων: Η BBU συλλογή πόρων, που βρίσκεται σε κεντρική τοποθεσία λειτουργεί ως cloud (σύννεφο) ή ως σύννεφο κεντρικής συλλογής δεδομένων (cloud data center). Οι πολλαπλοί κόμβοι του BBU εκχωρούν δυναμικά τους πόρους τους στους ασύρματους κόμβους RRU με βάση τις τρέχουσες ανάγκες δικτύου.
- Το Δίκτυο RRU: Το ασύρματο δίκτυο RRU συνδέει ασύρματες συσκευές παρόμοια με σημεία πρόσβασης ή πύργους σε παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα.
- Fronthaul / δίκτυο μεταφοράς: Χρησιμοποιώντας επικοινωνία οπτικών ινών, επικοινωνία κυψελών ή χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave) επικοινωνίας, το fronthaul είναι το στρώμα σύνδεσης μεταξύ ενός BBU και ενός συνόλου RRUs, παρέχοντας συνδέσεις υψηλού εύρους ζώνης για να χειριστούν τις απαιτήσεις πολλαπλών RRUs.



Εικόνα 19: Απεικόνιση Αρχιτεκτονικής επιπέδου 5G.

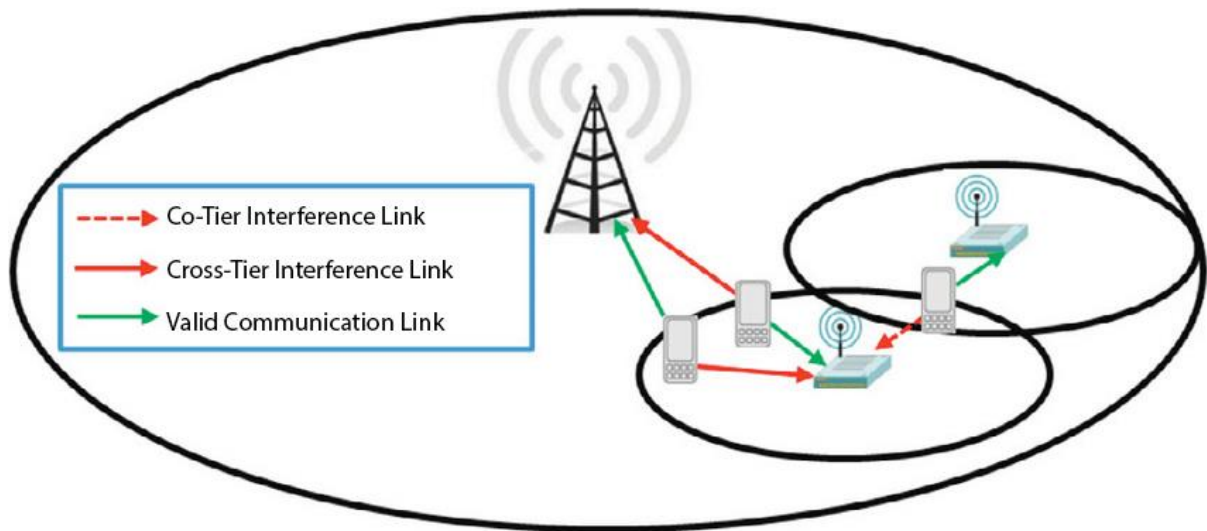
Η επιλογή της C-RAN αρχιτεκτονικής ως την κυρίαρχη αρχιτεκτονική για τα 5G δίκτυα προσφέρει μια πληθώρα πλεονεκτημάτων. Παρακάτω, παρουσιάζονται και αναλύονται τα σημαντικότερα εξ' αυτών. Το C-RAN μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO) και μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου. Είναι ιδιαίτερα ευεργετικό σε σενάρια δικτύου χαμηλής λανθάνουσας κατάστασης. Η κεντρική αρχιτεκτονική cloud RAN παρέχει επίσης το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί ανακατασκευή του δικτύου μεταφορών των δεδομένων. Άλλα πλεονεκτήματα του C-RAN είναι η δυνατότητα συγκέντρωσης πόρων, επαναχρησιμοποίησης υποδομών, απλούστευση των λειτουργιών και διαχείρισης δικτύων, υποστήριξης πολλαπλών τεχνολογιών, μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και μείωσης του καπνού και της πίεσης. Το δίκτυο γίνεται επίσης πιο ετερογενές και αυτο-οργανωτικό. Με την εφαρμογή του C-RAN, θα προκύψουν και άλλα οφέλη, όπως ευκολότερη και ταχύτερη ανάπτυξη δικτύων και η αυξημένη ευελιξία του δικτύου. Τέλος η αρχιτεκτονική C-RAN επιτρέπει στους χειριστές να εκτελούν ταυτόχρονα λειτουργίες RAN μαζί με άλλες λειτουργίες δικτύου σε ένα περιβάλλον κεντρικής συλλογής δεδομένων, παρέχοντάς τους τη δυνατότητα να προσφέρουν πιο γρήγορα νέες υπηρεσίες μέσω του ευρυζωνικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας.[14]

3.5 Πρόκληση Παρεμβολών

Μέχρι στιγμής έχουμε αναλύσει τους σταθμούς βάσεις τύπου Small Cells και έχουμε καταγράψει πολλές από τις ευεργετικές τους ιδιότητες για το Δίκτυο. Με μία σύντομη επισκόπηση μπορούμε να τις υπενθυμίσουμε στον αναγνώστη διότι όλες δυστυχώς έχουν έναν κοινό παρονομαστή. Η πρώτη είναι η αύξηση της χωρητικότητας του Δικτύου ως αποτέλεσμα προσθήκης Small Cells στο δίκτυο σε σημεία που η περιοχή

κάλυψης των Macrocell δεν υπήρχε ή ήταν ασθενής. Δεύτερον, υπάρχει βελτίωση της φασματικής απόδοσης του δικτύου και οι χρήστες έχουν κατά μέσο όρο πιο ισχυρή σύνδεση (λόγω βελτιωμένου Signal-to-Interference-plus-noise ratio, SINR), εφόσον συνδέονται με σταθμό βάσης τύπου Small Cell που βρίσκεται κοντά τους και όχι Macrocell, άρα και επαυξημένες ταχύτητες [17]. Εφόσον συνδέονται στην πιο κοντινή μονάδα τύπου small Cell είναι λογικό ότι αυτό θα επιφέρει μειωμένη κατανάλωση και κατά συνέπεια αυξημένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής του χρήστη. Τέλος είναι λογικό ότι η προσθήκη Small Cell έναντι της προσθήκης νέων macrocell για να βελτιωθεί η περιοχή κάλυψης του κυψελοειδούς δικτύου είναι σαφώς οικονομικότερη τόσο για τον πάροχο όσο και για τον χρήστη.

Όμως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα, δηλαδή η τοποθέτηση Small cells για να μεγαλώσει η περιοχή κάλυψης, μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση παρεμβολών. Δηλαδή η ύπαρξη πολλών σταθμών βάσης, είτε τύπου Small Cells είτε τύπου Macrocells, και η ταυτόχρονη μετάδοση σημάτων στο ίδιο συχνοτικό φάσμα, μπορεί να οδηγήσει σε παρεμβολές, δηλαδή προσθήκη μέρους ενός σήματος σε ένα άλλο. Υπάρχουν δύο είδη παρεμβολών. Το πρώτο καλείται Cross-tier interference και αναφέρεται στις παρεμβολές που μπορούν να προκύψουν μεταξύ δύο σημάτων που στέλνονται από ή και προς ένα Macrocell και ένα Small Cell. Ουσιαστικά πρόκειται για το πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί ανάμεσα στην ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ 2 ζευγαριών τύπου Macrocell-user, Femtocell user. Εάν οι 4 αυτές οντότητες βρίσκονται κοντά (σε γεωγραφικούς όρους πάντα) τότε υπάρχει περίπτωση το ένα σήμα να επηρεάσει το άλλο. Η άλλη κατηγορία παρεμβολών καλείται Co-tier interference και συναντάτε μεταξύ διαφορετικών Femtocells. Εδώ τα ζευγάρια που ανταλλάζουν την πληροφορία είναι τύπου, Femtocell – χρήστης και Femtocell – χρήστης. Αντίστοιχα υπάρχει περίπτωση κομμάτι του ενός σήματος να ενσωματωθεί με το άλλο.



Εικόνα 20: Απεικόνιση Παρεμβολών σε ένα ετερογενές δίκτυο.

Ας δώσουμε λίγο παραπάνω προσοχή στην Co-Tier-Interference και το πώς αυτή δημιουργείται. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, οι συσκευές Femtocell τοποθετούνται αποκλειστικά και μόνο με ευθύνη του χρήστη. Είναι λογικό ότι ο χρήστης, με την έννοια του καταναλωτή, δεν διακατέχει το τεχνολογικό υπόβαθρο για να τοποθετήσει την συσκευή του με κατάλληλο τρόπο ώστε να αποφευχθούν οι παρεμβολές. Επειδή με την τυχαία αυτή τοποθέτηση, οι Co-Tier παρεμβολές είναι μεγαλύτερες της ισχύος ενός Femtocell η ικανότητα αποστολής και λήψης δεδομένων του χρήστη δυσχεραίνεται. Η περιοχή από την οποία εκπέμπει ο χρήστης καλείται νεκρή ζώνη (dead zone). Η νεκρή ζώνη ουσιαστικά είναι η περιοχή στην οποία ο χρήστης έχει χαμηλό Quality Of Service (QoS). Παρακάτω θα παρουσιαστούν τρόποι με τους οποίους μπορούμε να μειώσουμε και να εξαλείψουμε το παραπάνω εγχείρημα.

3.6 Πολιτικές Προσβασιμότητας Femtocell (Femtocell Access Policy)

Όπως αναφέρετε και παραπάνω τα Femtocells είναι ένας τύπος Small Cells ο οποίος χρησιμοποιείται ως σταθμός βάσης χαμηλής κατανάλωσης από ένα περιορισμένο, μικρό, αριθμό χρηστών. Κυρίως τα Femtocells είναι ιδιωτικά με την έννοια ότι ο οποιοσδήποτε θελήσει μπορεί να εγκαταστήσει σπίτι του ένα, εύκολα και γρήγορα. Αυτό επιτρέπει μία ποικιλομορφία-κατηγοριοποίηση στις πολιτικές προσβασιμότητας που ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να έχει το ιδιωτικό του Femtocell. Υπάρχουν τρεις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα Femtocell. Με τον όρο κατάσταση εννοούμε τον τρόπο με τον οποίο ένα Femtocell δέχεται την συσκευή του χρήστη να αλληλοεπιδράσει μαζί του. Οι καταστάσεις αυτές είναι:

3.6.1 Closed Access (Κλειστή Προσβασιμότητα)

Όταν ένα Femtocell λειτουργεί στην κατάσταση Closed Access σημαίνει ότι διαθέτει το σύνολο των πόρων του, σε μία κλειστή ομάδα συνδρομητών CSG (Closed Subscriber Group). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι χρήστες που ανήκουν στην ομάδα αυτή να απολαμβάνουν το εκατό τοις εκατό των υπηρεσιών που πλήρωσαν για να έχουν, χωρίς να ανησυχούν για εξωτερικούς χρήστες οι οποίοι όπως θα δούμε παρακάτω, όταν τα Femtocell λειτουργούν σε διαφορετική κατάσταση, μπορούν να λαμβάνουν κομμάτι των διαθέσιμων πόρων. Για το λόγο αυτό, η λειτουργία Closed Access είναι προτιμητέα για τους κατόχους του Femtocell οι οποίοι εύλογα εφόσον έχουν επιβαρυνθεί οικονομικά για την αγορά του εξοπλισμού (δηλαδή του Femtocell), θέλουν να χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο εύρος πόρων που μπορεί να έχει. Επιπλέον οι χρήστες απολαμβάνουν ιδιωτικότητα και προστασία για τα δεδομένα τους εφόσον μόνο αυτοί χρησιμοποιούν το Femtocell που αγόρασαν.

3.6.2 Open Access (Ανοικτή Προσβασιμότητα)

Όταν ένα Femtocell λειτουργεί στην κατάσταση Open Access μπορεί να δεχτεί οποιονδήποτε χρήστη βρίσκεται μέσα στην περιοχή κάλυψης του, ανεξάρτητα εάν αυτός ο χρήστης μέχρι εκείνη την δεδομένη χρονική στιγμή είχε επισυνάψει σύνδεση με ένα άλλο Femtocell ή Macrocell. Η κατάσταση αυτή επιλέγεται κυρίως σε μικρές επιχειρήσεις όπως για παράδειγμα καφετέριες ή χώροι εστίασης. Τα Femtocells που λειτουργούν στη συγκεκριμένη κατάσταση, αυξάνουν την περιοχή κάλυψης του κυψελοειδούς δικτύου προκαλώντας μικρότερες παρεμβολές από ότι τα αντίστοιχα τα οποία λειτουργούν σε κατάσταση κλειστής προσβασιμότητας (Closed Access). Με αυτό τον τρόπο δίνεται η ευκαιρία σε έναν χρήστη που προηγουμένως εξυπηρετούνταν από ένα άλλο Femtocell ή Macrocell, να διαλέξει το αν θα εξυπηρετηθεί από το εν λόγω Femtocell ώστε να λάβει τις καλύτερες δυνατές υπηρεσίες.

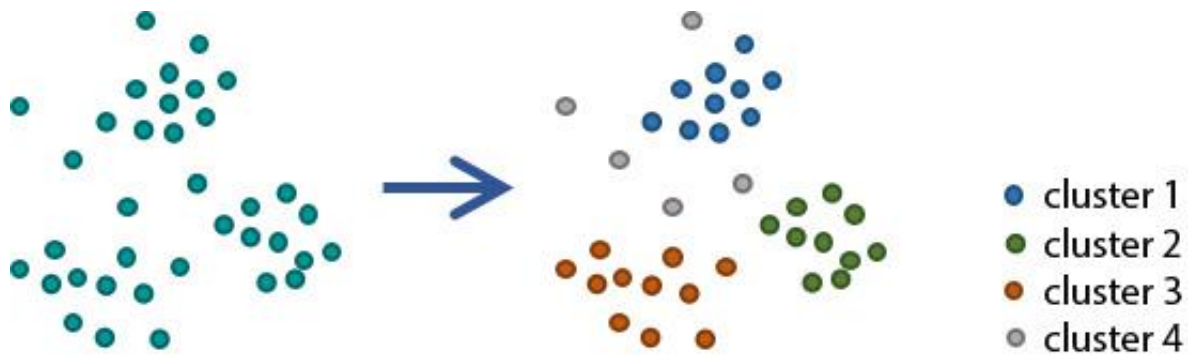
3.6.3 Hybrid Access (Υβριδική Προσβασιμότητα)

Το κύριο μειονέκτημα των Femtocell που λειτουργούν σε κατάσταση κλειστής πρόσβασης (Closed Access) είναι ότι εάν ένας χρήστης ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε ένα άλλο Femtocell ή Macrocell, βρίσκεται κοντά, τότε οι χρήστες του closed access Femtocell, βιώνουν παρεμβολές στο σήμα τους. Αυτό συμβαίνει διότι, ο χρήστης που είναι συνδεδεμένος στο δεύτερο Femtocell δεν έχει την δυνατότητα να συνδεθεί στο πρώτο, λόγω της κατάστασης που χρησιμοποιείται. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση που το Femtocell λειτουργεί σε κατάσταση ανοικτής προσβασιμότητας (Open Access) οι κάτοχοι των Femtocell δεν επιθυμούν να μοιραστούν τους πόρους για

τους οποίους επιβαρύνθηκαν οικονομικά. Ωστόσο, η χρυσή τομή στο πρόβλημα μας βρίσκεται κάπου στη μέση. Η Τρίτη και τελευταία κατάσταση λειτουργίας καλείται Υβριδική προσβασιμότητα (Hybrid Access). Σε αυτή την κατάσταση επιτρέπεται οι χρήστες οι οποίοι μόλις εισήλθαν στην περιοχή κάλυψης ενός Femtocell, που λειτουργεί κάτω από hybrid access αλλά δεν ανήκουν στο CSG του, να μπορέσουν να συνδεθούν σε αυτό. Παρόλα αυτά, οι χρήστες που δεν ανήκουν στο CSG, ενώ μπορούν να συνδεθούν, απολαμβάνουν ένα μέρος των συνολικών πόρων του. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος των πόρων του Femtocell που λειτουργεί σε hybrid access συνεχίζουν να το απολαμβάνουν οι χρήστες που είναι μέλη του CSG του, ενώ οι υπόλοιποι λαμβάνουν ένα μικρό αλλά αρκετό μερίδιο πόρων ώστε να καλύψουν τις ανάγκες τους. Με την υβριδική λειτουργία μπορούμε να ελέγξουμε το χρήστη που θέλει να συνδεθεί έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι τόσο αυτός όσο και οι υπόλοιποι χρήστες του CSG θα απολαύσουν υπηρεσίες που θα συνεχίσουν να ικανοποιούν τις ανάγκες τους. [18].

3.7 Clustering (Ομαδοποίηση)

Όπως έχουμε επισημάνει και παραπάνω τα επερχόμενα δίκτυα πέμπτης γενιάς αναμένεται να είναι πυκνά και ετερογενή. Το θέμα της πυκνότητας του δικτύου μπορεί να δημιουργήσει διάφορα προβλήματα όπως είναι οι παρεμβολές. Μία τεχνική η οποία μειώνει τις παρεμβολές σε ένα κυψελοειδές δίκτυο πέμπτης γενιάς, είναι η τεχνική της ομαδοποίησης (clustering). Σε ένα cluster ή αλλιώς σε μία ομάδα εμπεριέχονται σταθμοί βάσης τύπου Femtocell. Η ομαδοποίηση αυτή γίνεται με κοινό γνώμονα την γεωγραφική τοποθεσία που έχουν οι εν λόγω σταθμοί. Τα Femtocell που αποτελούν μέλη του cluster χρησιμοποιούν το καθένα δικιά του συχνότητα χωρίς την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της από άλλο Femtocell εντός του cluster. Αυτό σημαίνει ότι κάθε cluster έχει μια ομάδα Femtocell για μέλη του και ότι οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τα Femtocells ενός συγκεκριμένου cluster, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν από τα Femtocells ενός άλλου cluster. Το παραπάνω λειτουργεί ευεργετικά για την αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, καθώς και για την αύξηση της ταχύτητας αποστολής και λήψης δεδομένων του χρήστη, αφού μειώνονται τόσο οι co-tier όσο και οι cross-tier παρεμβολές. Λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τη τεχνική του clustering όσο και τη Υβριδική κατάσταση λειτουργίας ενός δικτύου σε ότι αφορά τα Femtocell καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι έχουμε στα χέρια μας δύο πολύ χρήσιμα εργαλεία για να καταπολεμήσουμε τις co-tier παρεμβολές. [19]



Εικόνα 21: Απεικόνιση clustering.

3.8 Sleep Mode

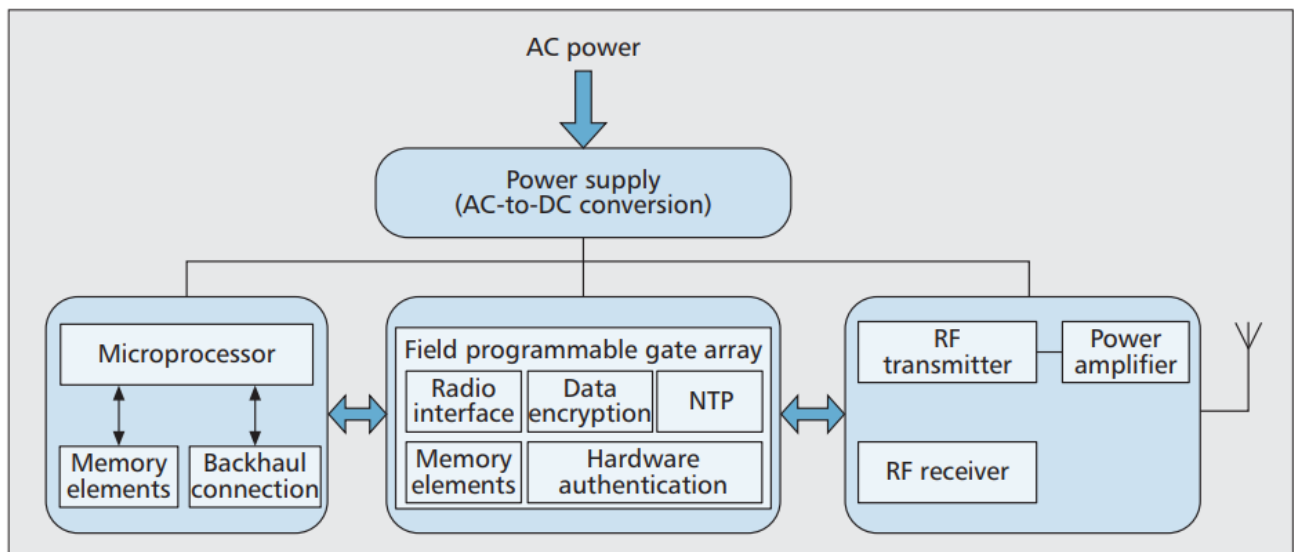
3.8.1 Εισαγωγή

Υπάρχει η ανησυχία πως για να φτάσουμε να πετύχουμε τους στόχους που έχουν τεθεί για την επερχόμενη γενιά Δικτύων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί τεράστιος αριθμός σταθμών βάσης. Πολλοί ερευνητές έχουν υποστηρίξει ότι κάποια στιγμή θα φτάσουμε στο σημείο να έχουμε περισσότερους σταθμούς βάσεις από ότι χρήστες. Παρόλα αυτά η κατασκευή και η εγκατάσταση ενός τεράστιου αριθμού σταθμών βάσης μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στην υποδομή του ήδη υπάρχοντος δικτύου. Επεξηγηματικά τα προβλήματα αυτά μπορούν να συνοψιστούν σε παρεμβολές και σε ενεργειακά προβλήματα. Σε ότι έχει να κάνει με τα ενεργειακά προβλήματα, τόσο τα Macrocells όσο και τα Small Cells καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας ενώ ανταγωνίζονται το ένα το άλλο σε θέματα συχνοτικού φάσματος και ισχύς λειτουργίας. Ευτυχώς η επιστημονική κοινότητα, έχει αναγνωρίσει προ πολλού το εν λόγω ενεργειακό πρόβλημα δίνοντας βάση στην αντιμετώπιση του τόσο για οικονομικούς όσο και για οικολογικούς λόγους. Ο συνδυασμός των παραπάνω μας οδηγεί να εισαγάγουμε στους σταθμούς βάσης την λειτουργία της κατάστασης ύπνου (Sleep Mode). Το Sleep Mode έχει διαδραματίσει μείζον ρόλο στην μείωση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται από τους σταθμούς βάσης τύπου Macrocell εδώ και χρόνια. Συγκεκριμένα όταν η κίνηση στους σταθμούς βάσης ελαττωνόταν απενεργοποιούντουσαν προσωρινά. Ακόμα η μεταβολή αυτή, από Active σε Sleep Mode, μπορούσε να συμβεί όταν λόγω των παρεμβολών, οι χρήστες μπορούσαν να εξυπηρετηθούν καλύτερα από γειτονικά Macrocell. Λόγω της μεγάλης εισαγωγής Small Cells η οποία αναμένεται να συμβεί, πρέπει οι παραπάνω τεχνική να εφαρμοστεί εκ νέου. Ενώ τα Pico-cells και τα Micro-cells είναι εύκολα διαχειρίσιμα, αφού η τοποθέτηση και η συντήρησή τους γίνεται από τον κατασκευαστή-πάρoχο, που μπορεί να συντονίσει την κατάσταση στην οποία βρίσκονται με έναν κεντροποιημένο τρόπο, τα Femtocell δεν είναι. Λόγω της ad-hoc τοποθέτησής τους αλλά και της τοποθέτησής τους από τους

χρήστες, οι ίδιες τεχνικές που εφαρμοζόντουσαν για το sleep mode στα Macrocell δεν είναι εύκολο να εφαρμοστούν και στα Femtocell. Για παράδειγμα δεν είναι εύκολο να αποφασιστεί από τον πάροχο το πότε θα απενεργοποιηθεί ένα Femtocell έστω και προσωρινά, διότι αυτό αφενός αποτελεί περιουσιακό στοιχείο του χρήστη και αφετέρου δεν είναι εύκολο οι χρήστες να μετατεθούν σε άλλο Femtocell λόγω του Closed Access Subscriber Group που ακολουθούν τα περισσότερα Femtocells.[20]

3.8.2 Βασική Αρχιτεκτονική Small Cells

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο μία συσκευή τύπου Small Cell μπορεί να απενεργοποιηθεί καθώς και το πώς μπορεί να μεταβεί από τη μία κατάσταση στην άλλη είναι σημαντικό να δούμε κάποια βασικά πράγματα για την αρχιτεκτονική τους. Η εικόνα 22 απεικονίζει μία σχηματική αναπαράσταση υψηλού επιπέδου ενός Femtocell.



Εικόνα 22: Κύκλωμα Αρχιτεκτονικής Smallcell.

Περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την υλοποίηση και τη διαχείριση της τυποποιημένης στοίβας ραδιοφωνικών πρωτοκόλλων (standardized radio protocol stack) και της σχετικής επεξεργασίας βασικής ζώνης, καθώς και τη διαχείριση της backhaul σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο. Αυτή η δυνατότητα γενικά υλοποιείται ως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα πολλαπλών εφαρμογών (ASIC), το οποίο έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Εκτός από τη μνήμη on-chip, ένα ή περισσότερα στοιχεία μνήμης τυχαίας προσπέλασης (random access memory) συνδέονται στον μικροεπεξεργαστή, τα οποία απαιτούνται για

διάφορες λειτουργίες διαχείρισης δεδομένων και για την εκκίνηση του συστήματος. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει επίσης μια προγραμματιζόμενη σειρά πεδίων (FPGA) και ορισμένα άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα για την υλοποίηση πλήθους λειτουργιών, όπως η κρυπτογράφηση δεδομένων, η πιστοποίηση υλικού και το πρωτόκολλο χρόνου δικτύου (NTP). Το ράδιο-συστατικό (radio component) εντός του FPGA λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ του μικροεπεξεργαστή και του πομποδέκτη ραδιοσυχνοτήτων (RF). Αν και δεν είναι τόσο οικονομικά αποδοτικό, η ύπαρξη ενός FPGA στο μοντέλο-υλικού μπορεί να προσφέρει την απαιτούμενη ευελιξία για την ενσωμάτωση λύσεων από τους ιδιοκτήτες στο υλικό των Small Cells. Ένα ενεργό στοιχείο ψύξης δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο υλικού επειδή το τρέχον Femtocell έχει σχεδιαστεί για να ψύχεται με φυσική μεταφορά και υποθέτουμε ότι αυτό θα είναι το πρότυπο για τα περισσότερα συστήματα Small Cells στο μέλλον. Υπάρχουν ξεχωριστά εξαρτήματα RF για τη μετάδοση και τη λήψη δεδομένων, καθένα από τα οποία καταναλώνει μια ορισμένη ποσότητα ενέργειας. Ένας RF ενισχυτής ισχύος (PA) υπάρχει για να στέλνει ένα σήμα υψηλής ισχύος στην κεραία μετάδοσης. Λόγω των εξαιρετικά σημαντικών συνεπειών κόστους στο σχεδιασμό υλικού των Small Cells, απαιτείται οικονομικά αποδοτικός και αξιόπιστος PA (power amplifier). Τυπικά, η απόδοση προστιθέμενης ισχύος (λόγος της απόδοσης ισχύος RF σε ισχύ DC IN) τέτοιων PA μπορεί να κυμαίνεται από 5-40 τοις εκατό, ανάλογα με την ισχύ εξόδου RF από την PA. Ο πίνακας 2 δείχνει τις τιμές κατανάλωσης ισχύος των εξαρτημάτων υλικού των Small Cells που επισημαίνονται στην εικόνα 22. Με την παραδοχή της στατικής κατανάλωσης ισχύος σε όλο το φορτίο κυκλοφορίας, τα κυκλώματα υλικού καταναλώνουν συνολικά PACT = 10,2 W όταν είναι πλήρως ενεργά (κατάσταση RE).

Hardware component	Power consumption (W)
Microprocessor	1.7
Associated memory	0.5
Backhaul circuitry	0.5
FPGA	2.0
Associated memory	0.5
Other hardware functions	1.5
RF transmitter	1.0
RF receiver	0.5
RF power amplifier	2.0

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης ενέργειας *smallcell*.

3.8.3 Καταστάσεις Sleep Mode

Η βασική ιδέα για την ενεργοποίηση της λειτουργίας SLEEP σε σταθμούς βάσης τύπου Small Cell είναι η εισαγωγή μιας κατάστασης χαμηλής ισχύος σε στοιχεία hardware, που αναφέρεται ως κατάσταση SLEEP. Υποθέτουμε ότι το Small Cell βρίσκεται σε μία από τις ακόλουθες καταστάσεις ανά πάσα στιγμή:

READY state (RE): Σε αυτή την κατάσταση, όλα τα εξαρτήματα υλικού στο σταθμό βάσης τύπου Small Cell είναι πλήρως ενεργοποιημένα. Οι μεταδόσεις ραδιοσυχνοτήτων μέσω πιλοτικού διαύλου διεξάγονται για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη περιοχή ραδιοφωνικής κάλυψης και όλοι οι επιτρεπόμενοι χρήστες στην περιοχή κάλυψης εξυπηρετούνται από την αποστολή των ραδιοφωνικών πόρων στα κανάλια δεδομένων. Όλη η κίνηση εξυπηρετείται κάτω από τους περιορισμούς της μέγιστης χωρητικότητας του σταθμού βάσης.

SLEEP state (SL): Σε αυτή την κατάσταση, ορισμένα από τα εξαρτήματα υλικού στο σταθμό βάσης τύπου Small Cell είτε απενεργοποιούνται εντελώς είτε λειτουργούν σε λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Το Small Cell αντίστοιχα λέγεται ότι διαμένει στη λειτουργία SLEEP. Τα ακριβή στοιχεία που πρέπει να απενεργοποιηθούν είναι συνάρτηση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής υλικού και του συγκεκριμένου αλγόριθμου εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτό όπως είναι αναμενόμενο έχει άμεση επίδραση στο χρόνο που χρειάζεται ο σταθμός βάσης για την αλλαγή της κατάστασης του από SL σε RE.

3.8.4 Κατηγορίες Sleep Mode

Στη συνέχεια, εισάγουμε τρεις στρατηγικές για να επιτρέψουμε τη μετάβαση των μικρών κελιών BS (Base Station) μεταξύ των καταστάσεων SL και RE (δηλαδή, Ενεργοποίηση /απενεργοποίηση λειτουργίας SLEEP). Αυτοί οι μηχανισμοί διαφέρουν θεμελιωδώς από την άποψη του ποιος ελέγχει τον τρόπο λειτουργίας SLEEP στο δίκτυο, το οποίο μπορεί να είναι είτε στο Small Cell, είτε στο κεντρικό δίκτυο είτε να κατευθύνεται από τον εξοπλισμό χρήστη (UE).

3.8.4.1 *Small Cell Controlled SLEEP Mode (Sleep Mode Ελεγχόμενο Από Το Small Cell)*

Με τη χρήση της επαρκούς κάλυψης των Macrocell, στο hardware των Small Cell μπορεί να προστεθεί ένας ανιχνευτής (sniffer) χαμηλής ισχύος που επιτρέπει την ανίχνευση μιας ενεργής κλήσης ένα χρήστη ο οποίος είναι διασυνδεδεμένος με ένα Macrocell και ζητάει να συνδεθεί με το Small Cell. Με αυτόν τον τρόπο, το Small Cell μπορεί να απενεργοποιήσει τις πιλοτικές εκπομπές του και τη σχετική ραδιοφωνική επεξεργασία (κατάσταση SL) όταν δεν πραγματοποιούνται ενεργές κλήσεις από χρήστες στην περιοχή κάλυψης του. Όταν ένας χρήστης που βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του Femtocell συνδεθεί με ένα Macrocell, ο sniffer ανιχνεύει αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος στη ζώνη συχνοτήτων ανερχόμενης ζεύξης (Uplink Band). Αυτή η άνοδος είναι εύκολα ανιχνεύσιμη αφού ο χρήστης μεταδίδει με μεγάλη ισχύ στο Macrocell ενώ βρίσκεται πολύ κοντά στο Small Cell. Εάν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο, το ανιχνευόμενο UE (User equipment) θεωρείται αρκετά κοντά ώστε να καλύπτεται ενδεχομένως από το Small Cell. Σε αυτό το σημείο, το Small Cell μεταβαίνει στην κατάσταση RE και ενεργοποιεί τη διαδικασία επεξεργασίας και μετάδοσης του πιλοτικού σήματος. Το ενεργό UE στην περιοχή του Small Cell μπορεί στη συνέχεια να αναφέρει τις πιλοτικές μετρήσεις των Small Cell στο Macrocell. Εάν επιτραπεί η πρόσβαση του UE στο Small Cell, θα ξεκινήσει η παράδοση Macrocell-to-Small Cell του UE (Handover). Διαφορετικά, το Small Cell μπορεί να επανέλθει στη λειτουργία SLEEP. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας παράδοσης, το Small Cell εξυπηρετεί το UE μέχρι να τερματιστεί η σύνδεσή του, μετά από το οποίο μπορεί να επανέλθει στη λειτουργία SLEEP. Να σημειωθεί ότι αυτή η διαδικασία απαιτεί την ύπαρξη Macrocell στο δίκτυο, καθώς βασίζεται στην ανίχνευση μεταδόσεων από μονάδα UE σε Macrocell. Επομένως, το Small Cell πρέπει να ελέγξει εάν υπάρχει επαρκής κάλυψη Macrocell, η οποία μπορεί να ανιχνευθεί μέσω των μετρήσεων των πιλοτικών καναλιών του Macrocell στα Small Cell και μέσω αναφορών μετρήσεων των UE. Επιπρόσθετα, η λειτουργία SLEEP που βασίζεται σε sniffer απαιτεί την ύπαρξη ενός handover μεταξύ Macrocell-Small Cell ανά σύνδεση. Ωστόσο, τα οφέλη από τα γεγονότα

με μειωμένη κινητικότητα και τη συναφή σηματοδότηση λόγω των πιλοτικών μεταδόσεων που έχουν απενεργοποιηθεί υπερτερούν αυτής. Αυτή η τεχνική μπορεί να πετύχει μέχρι και 39,2 τοις εκατό εξοικονόμηση ενέργειας με μια σύνδεση πάντα backhaul με το κεντρικό δίκτυο, έτσι ώστε ο χρόνος μετάβασης από SL σε RE κατάσταση είναι της τάξης των χιλιοστών του δευτερολέπτου.

3.8.4.2 Core Network Controlled SLEEP Mode

(Sleep Mode Ελεγχόμενο Από Το Κεντρικό Δίκτυο)

Διαφορετικά από την παραπάνω προσέγγιση, η συγκεκριμένη περίπτωση δεν απαιτεί τον sniffer χαμηλής ισχύος στο Small Cell για την ανίχνευση ενεργού UE. Εναλλακτικά, η μετάβαση του Small Cell από την κατάσταση SL σε RE ελέγχεται από το κεντρικό δίκτυο μέσω του backhaul χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα ελέγχου αφύπνισης. Η υπόθεση ύπαρξης Macrocell στη δικτυακή δομή που παρέχει κάλυψη στην UE ισχύει και στην περίπτωση αυτή. Επιπλέον, ο σταθμός βάσης Small Cell μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να βρίσκεται στη κατάσταση SL από προεπιλογή και να μεταβαίνει στην κατάσταση RE όπως εξηγείται στη συνέχεια. Μία σύνδεση μεταξύ του Macrocell και του UE ρυθμίζεται μετά την μετάδοση ενός μηνύματος τηλεειδοποίησης προς την UE στην κατερχόμενη ζεύξη (Downlink) ή ένα αίτημα σύνδεσης ζεύξης ανύψωσης (Uplink) από το UE γίνεται στο Macrocell. Μετά από μια επιτυχημένη ρύθμιση σύνδεσης, το κατάλληλο στοιχείο του πυρήνα του δικτύου προσδιορίζει το Macrocell το οποίο είναι συνδεδεμένος ο χρήστης και επαληθεύει εάν υπάρχει κάποιο Small Cell στην ίδια περιοχή κάλυψης του Macrocell. Για παράδειγμα, αυτή η επαλήθευση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της οντότητας διαχείρισης κινητικότητας (MME) στο LTE, ένα στοιχείο δικτύου που διατηρεί τις πληροφορίες πλαισίου UE. Στο συσχετιζόμενο σταθμό βάσης Small Cell στον οποίο επιτρέπεται να συνδεθεί ο εν λόγω χρήστης στέλνεται έπειτα ένα μήνυμα αφύπνισης μέσω backhaul, για μετάβαση στην κατάσταση RE και εξυπηρέτηση του UE. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι παρόλο που η μέθοδος που βασίζεται στο κεντρικό δίκτυο, παρέχει καλύτερο έλεγχο ενεργοποίησης, προκαλεί σηματοδότηση ελέγχου πάνω στο backhaul για να ξυπνήσει Small Cells. Για παράδειγμα, ένα πακέτο ελέγχου αφύπνισης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει ένα Small Cell. Η εν λόγω προσέγγιση μπορεί να πετύχει μέχρι και 75% εξοικονόμηση ενέργειας.

3.8.4.3 User Controlled SLEEP Mode

(Sleep Mode Ελεγχόμενο Από Το Χρήστη)

Μια τρίτη προσέγγιση είναι ο έλεγχος λειτουργίας SLEEP να γίνεται από τη πλευρά του χρήστη, ο οποίος μπορεί να μεταδίδει σήματα αφύπνισης για να ξυπνήσει σταθμούς βάσης τύπου Small Cell μέσα στην εμβέλειά του. Το Small Cell, όταν βρίσκεται σε

κατάσταση SL, διατηρεί την ικανότητα να λαμβάνει εκπομπές σήματος αφύπνισης από το UE και κάθε φορά που λαμβάνονται τέτοια σήματα, μεταβαίνει στην κατάσταση RE. Η λύση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται σε αδράνεια (idle mode), δηλαδή δεν έχει επισυνάψει καμία σύνδεση, ενώ οι προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω απαιτούν από τον χρήστη να δημιουργήσει μια σύνδεση με το δίκτυο. Η μετάδοση του χρήστη μπορεί επίσης να περιέχει πληροφορίες ταυτοποίησης έτσι ώστε το Small Cell που βρίσκεται σε SL να ξυπνά μόνο σε καταχωρημένο UE. Αυτή η λύση μπορεί να εφαρμοστεί με διάφορους τρόπους. Το UE μπορεί να εκπέμπει περιοδικά σήματα αφύπνισης συνεχώς, έτσι ώστε οποιαδήποτε από τα Small Cells που βρίσκονται σε κατάσταση SL να μεταβαίνουν σε κατάσταση RE όταν το πλησιάσει η UE. Αυτό σημαίνει ότι η κάλυψη που παρέχεται από τα Small Cells "ακολουθεί" μια μονάδα UE καθώς κινείται γύρω και εξασφαλίζει ότι οι μονάδες UE έχουν κάλυψη ενώ κινούνται όποτε είναι δυνατόν. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτή μειώνει την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς τα μικρά κελιά θα αφιερώνουν περισσότερο χρόνο στην κατάσταση RE, ακούγοντας ενεργά τα σήματα αφύπνισης των χρηστών. Ως άμεση συνέπεια, η κατανάλωση ενέργειας της συσκευής του χρήστη αυξάνεται λόγω περιοδικών εκπομπών. Μία εναλλακτική στρατηγική υλοποίησης αυτής της προσέγγισης είναι ο χρήστης να εκπέμπει σήματα αφύπνισης όταν απαιτείται, εφόσον δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη Macrocell ή για υψηλότερες απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων (data rates). Σε μια τέτοια περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να μεταδίδει εκπομπές για να προσπαθήσει να ξυπνήσει οποιοδήποτε Small Cell εντός της εμβέλειας. Ο χρήστης μπορεί επίσης να εκτελέσει αυτές τις εκπομπές πριν από τη δημιουργία μιας σύνδεσης με το δίκτυο. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να ξυπνήσει πρώτα όλα τα μικρά κελιά που βρίσκονται στην ακτίνα του και στη συνέχεια να συνδεθεί απευθείας σε όποιο από αυτά θελήσει. Η κατά απαίτηση (on demand) αυτή προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς το Small Cell μπορεί να είναι σε κατάσταση SL συχνότερα και μεταβαίνει μόνο στην κατάσταση RE όταν απαιτείται. Η εν λόγω προσέγγιση μπορεί σε κατάλληλες συνθήκες να πετύχει έως και 67% εξοικονόμηση ενέργειας.

3.8.4.4 Σύγκριση Πλεονεκτημάτων Τριών Προσεγγίσεων

Σε αντίθεση με τη προσέγγιση που ο έλεγχος ενεργοποίησης/απενεργοποίησης γίνεται από το Small Cell, ο ελεγχόμενος μηχανισμός του core network επιτρέπει τη διάκριση των εγγεγραμμένων και των μη εγγεγραμμένων χρηστών. Στη στρατηγική που βασίζεται σε sniffer, ένα σταθμός βάσης Small Cell που βρίσκεται σε SL μπορεί να ενεργοποιηθεί άσκοπα αν ανιχνεύσει αύξηση ισχύος από έναν μη εγγεγραμμένο χρήστη στην περιοχή του. Το πρόβλημα επιδεινώνεται περαιτέρω εάν το BS βρίσκεται σε μια πολυσύχναστη περιοχή με πολλούς ενεργούς χρήστες που κινούνται.

Η προσέγγιση του core network driven επιτρέπει τη λήψη μιας κεντρικής απόφασης, η οποία βασίζεται όχι μόνο σε ένα συγκεκριμένο UE αλλά και λαμβάνει υπόψη το φόρτο κίνησης του Macrocell, τη κατάσταση του χρήστη (δηλαδή εάν ανήκει ή όχι στο CSG), τον τύπο υπηρεσίας που ζητείται αλλά και την κίνηση του δικτύου.

Η Core network driven προσέγγιση επιτρέπει την εκτίμηση θέσης του UE (ή την τοποθεσία του) προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η αποτελεσματικότητα της απόφασης. Για παράδειγμα, το UE μπορεί να μεταβιβάσει τις πληροφορίες θέσης του στο κεντρικό δίκτυο, τόσο σε κατάσταση αδράνειας όσο και όταν είναι συνδεδεμένο, έτσι ώστε το δίκτυο να μπορεί να λάβει πιο ορθή απόφαση σχετικά με την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση των κοντινών Small Cells. Το UE μπορεί να ρυθμιστεί είτε για να ενημερώνει περιοδικά για την τοποθεσία του, είτε μόνο όταν αλλάζει, ή κατά τη στιγμή της δημιουργίας σύνδεσης.

Η ελεγχόμενη από τον χρήστη προσέγγιση δεν βασίζεται στην ύπαρξη Macrocell υποδομής για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση Small Cell. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς πολλά Small Cell θα μπορούσαν να αναπτυχθούν ως μέσο επίλυσης μαύρων σημείων κάλυψης των Macrocell. Τόσο οι Small Cell driven όσο και οι core network driven προσεγγίσεις απαιτούν επαρκή κάλυψη Macrocell για το χρήστη προκειμένου να ενεργοποιηθεί η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της λειτουργίας SLEEP.

Με την User driven προσέγγιση το ποσό των σημάτων που αποστέλλεται στο πυρήνα του δικτύου μειώνεται. Κάθε φορά που ο χρήστης στέλνει ένα σήμα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, δεν χρειάζεται να ξεκινήσει μια σύνδεση με το Macrocell layer και στη συνέχεια να γίνει το handover στο Small Cell αφού μεταβεί από την κατάσταση SL σε RE. Με βάση την προσέγγιση που καθορίζεται από το χρήστη, το Small Cell θα ήταν ήδη στην κατάσταση RE τη στιγμή της εγκατάστασης σύνδεσης, επιτρέποντας στην χρήστη να ξεκινήσει απευθείας σύνδεση με αυτήν.

Τέλος, η User driven προσέγγιση επιτρέπει την εφαρμογή της αρχής της «Η κάλυψη ακολουθεί τον User» χωρίς να είναι απαραίτητο να στέλνονται επιπρόσθετες πληροφορίες όπως η θέση του χρήστη μέσα στο μήνυμα αφύπνισης και κατά συνέπεια να εξοικονομείται η διαβίβαση τέτοιων πληροφοριών. [21]

4 Περιγραφή Μηχανισμού

Το βασικό πρόβλημα σε ένα ετερογενές πυκνό κυψελοειδές δίκτυο όπως προαναφέραμε είναι η ύπαρξη μεγάλου αριθμού σταθμών βάσης οι οποίοι σε ρεαλιστικά σενάρια θα είναι τοποθετημένοι πολύ κοντά ο ένας με τον άλλον με αποτέλεσμα την δημιουργία παρεμβολών. Συγκεκριμένα το πρόβλημα των πυκνών δικτυακών δομών Femtocell, είναι ότι με κάθε καινούρια προσθήκη ενός Femtocell το οποίο ακολουθεί την πολιτική της κλειστής πρόσβασης (Closed Access), οι κοντινοί του χρήστες θα βιώνουν παρεμβολές, γεγονός το οποίο μπορεί να τους οδηγήσει στην τοποθέτηση ενός δικού τους Femtocell, το οποίο και αυτό με τη σειρά του θα λειτουργεί με την προ-αναφέρουσα πολιτική πρόσβασης. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα υπέρ-πυκνό Δίκτυο όπου ο συνολικός αριθμός των Femtocell θα αντικατοπτρίζει την αποκλειστικότητα χρήσης τους από τον χρήστη και όχι τις πραγματικές ανάγκες τους. Σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία προτείνουμε έναν αλγόριθμο, με τον οποίο τα Femtocell σε πυκνά δίκτυα απενεργοποιούνται όταν η λειτουργία τους προκαλεί μεγαλύτερη επιβάρυνση στους χρήστες των άλλων Femtocell, από ότι ικανοποιούν τις ανάγκες των χρηστών τους. Για να ξεπεράσουμε το εμπόδιο της Κλειστής Πολιτικής Πρόσβασης που ακολουθούν τα Femtocells προτείνουμε μία Hybrid πολιτική στην οποία τα Femtocell πέρα από τους χρήστες που βρίσκονται στο CSG (Closed Subscriber Group) δέχονται και χρήστες που ανήκουν στα CSG των γειτονικών τους Femtocells. Παρόλα αυτά το να απενεργοποιήσουμε πλήρως την συσκευή δεν θα ήταν πρακτικό. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα πυκνό Δίκτυο Πέμπτης Γενιάς η ροή των χρηστών που μπαίνουν στο δίκτυο καθώς και η θέση των ήδη υπάρχοντων χρηστών μέσα σε αυτό, δεν μένει σχεδόν ποτέ σταθερή. Έτσι προτιμάται μία ενδιάμεση κατάσταση κατανάλωσης ενέργειας για τους σταθμούς βάσης η οποία καλείται Sleep Mode και έχει καλυφθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι ερευνητές στο [21] πρότειναν αλγορίθμους εξοικονόμησης ενέργειας που οδήγησαν πολλούς από τους σταθμούς βάσης (Femtocells) σε κατάσταση Sleep. Τρεις διαφορετικές εκδοχές του αλγορίθμου συζητήθηκαν σχετικά με το ποιος αποφασίζει την στιγμή που το Femtocell εισέρχεται σε sleep mode. Οι τρεις αυτές εκδοχές επιγραμματικά ήταν Core network driven, Small Cell driven και User equipment driven και κάθε μία από αυτές κατέληξε σε διαφορετικά αποτελέσματα σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας.

Οι ερευνητές στο [22] σύγκριναν διαφορετικούς μηχανισμούς που οδηγούν τα Femtocells σε sleep mode για να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι η εν λόγω κατάσταση μπορεί να προσφέρει ουσιαστική μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται ειδικά με την προσεκτική επιλογή των σταθμών που εισέρχονται στην εν λόγω λειτουργία.

Επίσης οι ερευνητές στο [23] ακολούθησαν μία τεχνική-ομαδοποίησης (clustering) για να βελτιώσουν την συνολική απόδοση του δικτύου. Για την ακρίβεια χωρίζοντας τους σταθμούς βάσεις σε ομάδες με την βοήθεια της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας

πετυχαίνουν έως και 40% εξοικονόμηση ενέργειας από τους σταθμούς που εισέρχονται σε sleep mode. Από την άλλη μεριά οι ερευνητές στο [24] ακολούθησαν στρατηγικές αναφορικά με το sleep mode στοχεύοντας στην εξάλειψη των παρεμβολών πετυχαίνοντας καλύτερη συνολική απόδοση του Δικτύου αλλά και μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας.

Η παραπάνω έρευνα λαμβάνει υπόψιν της το κλείσιμο των σταθμών βάσης με στόχο την βελτίωση της απόδοσης των χρηστών που είναι διασυνδεδεμένοι σε Macrocells. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία θα προσπαθήσουμε να απενεργοποιήσουμε όσο περισσότερους σταθμούς βάσης τύπου Femtocell γίνεται με σκοπό τις καλύτερες δυνατές προσφερόμενες υπηρεσίες από το δίκτυο, που μπορούν να απολαύσουν οι χρήστες των Femtocells.

Αρχικά προτείνουμε μία στρατηγική sleep mode η οποία εφαρμόζεται σε Femtocells τα οποία έχουν πρώτα ομαδοποιηθεί σε clusters. Συγκεκριμένα αφότου ομαδοποιήσουμε τα Femtocells σε clusters, προτείνουμε μία παραλλαγή της Hybrid Access Policy λειτουργίας των Femtocell. Επεξηγηματικά επιτρέπεται η μετακίνηση χρηστών από ένα Femtocell προς ένα άλλο με την προϋπόθεση ότι ανήκουν στο ίδιο cluster και ότι το Femtocell από το οποίο οι χρήστες θα εξέλθουν, να εισέλθει σε Sleep Mode. Παρακάτω ακολουθούν γραφικές παραστάσεις και υπολογισμοί από τα οποίες απορρέει τόσο η βελτίωση της προσφερόμενης ποιότητας στους χρήστες αλλά και η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας του δικτύου.

4.1 Μοντέλο Συστήματος

Για να έχουμε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε και να συσχετίσουμε τις παρακάτω οντότητες μεταξύ τους χρειάζεται να προσδιορίσουμε τις μετρικές τις οποίες ακολουθήσαμε. Συγκεκριμένα βασιστήκαμε στο πρότυπο αρχιτεκτονικής Δικτύου του Long Term Evolution Advanced (LTE-A) και χρησιμοποιήσαμε Orthogonal Frequency-division-multiple access (OFDMA) για την δέσμευση πόρων. Αυτό μας παρέχει τη δυνατότητα να διανείμουμε τους πόρους του συχνοτικού φάσματος σε μορφή resource blocks (RB) στους χρήστες. Έπειτα από την δέσμευση των πόρων και την σύνδεση των χρηστών με τα Femtocells αλλά και τα Macrocells υπολογίζουμε την απόδοση τους (throughput). Πιστεύουμε ότι οι περιπτώσεις πυκνών ετερογενών δικτύων αποτελούν μείζον θέμα έρευνας και οι νέες τεχνολογίες πρέπει να ασχοληθούν με αυτό. Σύμφωνα με το LTE-A πρότυπο παρουσιάζονται οι μαθηματικοί τύποι στους οποίους στηρίζεται η παρακάτω προσομοίωση.

Ο μαθηματικός τύπος για να εκφράσουμε το path loss για έναν χρήστη Femtocell είναι [25]:

$$PL_{FUE} = 38.46 + 20\log_{10}R + L_{ow}$$

Η τιμή των 7dB αποτελεί μία καλή προσέγγιση για το penetration loss και θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της απόδοσης των χρηστών ενός Femtocell. Ως Internal wall Penetration (Low) θεωρείται η τιμή που βοηθάει στον υπολογισμό της παρεμβολής που ένας χρήστης Femtocell βιώνει από ένα σήμα που εκπέμπεται από ένα άλλο Femtocell όταν και τα δύο ανήκουν στο ίδιο cluster. Όπου R συμβολίζει την απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης Femtocell και του χρήστη μέσα στο Δίκτυο.

Έπειτα υπολογίζουμε το κέρδος καναλιού G (Channel Gain), με την παρακάτω εξίσωση [26]:

$$G = 10^{-PL/10}$$

Όπου PL_{FUE} είναι το Path Loss το οποίο έχουμε ήδη υπολογίσει.

Έπειτα θα εκφράσουμε τον τύπο με τον οποίο υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνει ένα Femtocell (ισχύς) για να μεταδώσει ένα σήμα. Εφόσον η περιοχή κάλυψης ενός Macrocell είναι μεγάλη, η περιοχή κάλυψης ενός Femtocell κοντά στο κέντρο και η περιοχή κάλυψης ενός Femtocell κοντά στο όριο της περιοχής κάλυψης του Macrocell θα διαφέρουν αρκετά εάν όλα τα Femtocell καταναλώνουν την ίδια ενέργεια για να εκπέμψουν. Ο στόχος μας είναι να πετύχουμε μία ολοκληρωτική και μεγάλη περιοχή κάλυψης. Έτσι, κάθε Femtocell ρυθμίζει την ισχύ του σε μια τιμή η οποία είναι κατά μέσο όρο ίση με την ισχύ που λαμβάνεται από το πλησιέστερο Macrocell σε μια ακτίνα r, με την επιφύλαξη μιας μέγιστης ισχύος P_{max} . Συμπερασματικά ο τύπος είναι:

$$P_f = \min(P_m + G - PL_m(d) + PL_f(r), P_{max})$$

Όπου $PL_f(r)$ είναι το path loss σε συγκεκριμένη απόσταση r. P_m είναι η ισχύς μετάδοσης του Macrocell στο οποίο κοντά βρίσκεται το Femtocell και εικόνα G είναι το Channel Gain. Η μεταβλητή $PL_m(d)$ δηλώνει το μέσο path loss στην δοθείσα απόσταση d στην οποία βρίσκεται το Femtocell αγνοώντας επιπλέον wall losses.

Εφόσον οι εξισώσεις του Channel Gain (G) αλλά και του Power του Femtocell έχουν υπολογισθεί, θα πρέπει να υπολογίσουμε το μέγεθος που καλείται Signal-to-Interference-plus-noise ratio (SINR) για τον κάθε χρήστη. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα μέγεθος το οποίο εκφράζει συσχέτιση του χρήστη με τον σταθμό βάσης με τον οποίο είναι συνδεδεμένος. Όπως αναφέρεται στο [27] ο τύπος για τον υπολογισμό του SINR

ενός χρήστη που είναι συνδεδεμένος στο Femtocell είναι (αγνοώντας τις παρεμβολές από τα Macrocells):

$$SINR_{f,k} = \frac{P_{F,k}G_{f,F,k}}{N_0\Delta f + \sum_M P_{M,k}G_{f,M,k} + \sum_{F'} P_{F',k}G_{f,F',k}}$$

Επεξηγηματικά, η μεταβλητή $P_{F,k}$ είναι η ισχύς μετάδοσης του Femtocell στο subcarrier k . $G_{f,F,k}$ είναι το channel gain ανάμεσα στον χρήστη f το Femtocell και το subcarrier k . $P_{M,k}$ είναι ισχύς μετάδοσης του Macrocell στο subcarrier k . $G_{f,M,k}$ είναι το channel gain ανάμεσα στον χρήστη f του Macrocell M και το subcarrier k . N_0 είναι η ισχύς της φασματικής πυκνότητας του λευκού θορύβου και Δf είναι το κενό ανάμεσα στα subcarriers (subcarrier spacing).

Η χωρητικότητα ενός χρήστη Femtocell στο subcarrier k υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{f,k} = \Delta f \cdot \log_2(1 + \alpha SINR_{f,k})$$

Όπου το α ορίζεται από την εξίσωση: $\alpha = -1.5/\ln(5 BER)$.

Η συνολική απόδοση ενός Femtocell μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$T_F = \sum_f \sum_k \beta_{f,k} C_{f,k}$$

Όπου το $\beta_{f,k}$ γίνεται ίσο με 1 όταν συνδέεται κάποιος χρήστης στο Femtocell αλλιώς είναι ίσο με 0.

Τέλος για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ των Femtocells χρησιμοποιούμε τον γεωμετρικό τύπο ο οποίος και είναι:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

4.2 Προτεινόμενη Στρατηγική

Σε αυτό το σημείο της Διπλωματικής Εργασίας θα εξηγήσουμε την προσέγγιση λεπτομερώς. Το κύριο μέλημα μας είναι να βρούμε ένα τρόπο να αποφύγουμε την ταυτόχρονη λειτουργία μεγάλου αριθμού Femtocells και να αποδείξουμε ότι μειώνοντας τον αριθμό αυτό τόσο αυξάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας όσο φυσικά παραμένει αναλλοίωτη η απόδοση του χρήστη. Αυτό για να γίνει χρησιμοποιούνται

κάποιες τεχνικές ώστε να αλλάζει η τοπολογία του Δικτύου δυναμικά, κλείνοντας όποτε χρειάζεται τα femtocells με μοναδικό σκοπό την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Ένα μεγάλο πρόβλημα είναι, η εν γένει πολιτική των Femtocell τα οποία τείνουν να χρησιμοποιούνται μόνο από τους χρήστες που είναι εγγεγραμμένοι στο CSG (Closed Subscriber Group) τους. Δηλαδή για να γίνει πιο κατανοητό το παραπάνω, σε μία γεωγραφική περιοχή που χρησιμοποιούνται, Macrocells τα οποία έχουν τοποθετηθεί από το πάροχο και καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών, η τοποθέτηση Femtocell για την καλύτερη κάλυψη των αναγκών των χρηστών, όπως καλύτερα data rates ή για την αύξηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, μπορεί να οδηγήσει στα αντίθετα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, σε μία πολυκατοικία στην οποία ζουν 20 άνθρωποι θα μπορούσαν να εξυπηρετούνται ρεαλιστικά για την κάλυψη των αναγκών τους από 6 Femtocells. Εάν όμως αυτοί οι 20 άνθρωποι τυχαίνει να είναι 10 ζευγάρια, είναι βέβαιο ότι θα καταλήξουμε στην ύπαρξη ισάριθμων Femtocell (δέκα), ένα για κάθε ζευγάρι.

Δηλαδή υπάρχει ένα όριο στο πόσο κοντά τοποθετούνται τα Femtocell, που όταν ξεπεραστεί, οι παρεμβολές τις οποίες θα βιώνει ένας χρήστης από την τοποθέτηση των υπόλοιπων Femtocell τόσο κοντά του, θα είναι μεγάλου μεγέθους, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απόδοσης του. Ένα ακραίο παράδειγμα για να καταστεί σαφές αυτό το πρόβλημα θα ήταν όταν ένας χρήστης, που πρόσφατα έγινε κάτοχος ενός Femtocell, θα αντιμετώπιζε τόσο μεγάλη παρεμβολή από τα γειτονικά Femtocells, που θα είχε καλύτερο ρυθμό δεδομένων (data rate) αν κανείς (ούτε ο χρήστης ούτε οι γείτονες), δεν είχαν στην κατοχή τους εξ' αρχής Femtocell και ήταν συνδεδεμένοι στο Macrocell. Ο στόχος του αλγορίθμου μας είναι να πετύχουμε τον ισοσταθμισμό μεταξύ κέρδους σε data rates και προβλημάτων (αύξηση χωρητικότητας και παρεμβολές αντίστοιχα) σε μια πυκνή ανάπτυξη δικτύου, σεβόμενοι τον δισταγμό που διακατέχει τους χρήστες, σε ότι αφορά τον διαμοιρασμό των ιδιωτικών τους πόρων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μιας στρατηγικής λειτουργίας Sleep Mode έτσι ώστε οι ενεργοί σταθμοί βάσης να αντανakλούν καλύτερα τις πραγματικές ανάγκες εξυπηρέτησης και προτείνοντας μια μετατροπή της λειτουργίας Hybrid Access για καλύτερη χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Αρχικά, ορίζουμε την ομαδοποίηση των Femtocells (clustering). Δημιουργούμε κάθε cluster ξεχωριστά με μοναδικό γνώμονα την απόσταση μεταξύ των Femtocells. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται με τύπο που θα αναλύσουμε στη συνέχεια και τα Femtocell πρέπει να απέχουν 50m κατά μέγιστο το ένα από το άλλο. Ξεχωριστά τώρα σε κάθε cluster εξετάζουμε ποια Femtocell μπορούν να μεταβούν σε κατάσταση Sleep και ποια μπορούν να λάβουν τους χρήστες τους, λειτουργώντας σε Hybrid Mode. Η διαδικασία εύρεσης των Femtocell, που θα μεταβούν, σε κατάσταση sleep mode, ξεκινά από αυτό με τους λιγότερους ενεργούς χρήστες.

Ο περιορισμός των 50 μέτρων προκύπτει από το γεγονός ότι, πρέπει να υπάρχει επαρκές μέγεθος παρεμβολής μεταξύ δύο Femtocell για να έχει νόημα ο αλγόριθμος και πέρα από αυτή την απόσταση 50 m, αυτό φαίνεται απίθανο.

Στη συνέχεια εξηγούμε τι εννοούμε με τους όρους Sleep Mode και Hybrid Access. Η κατάσταση Sleep Mode είναι η κατάσταση ισχύος του Femtocell που είναι κατά κάποιο τρόπο μεταξύ της κανονικής κατάστασης λειτουργίας και της απενεργοποιημένης κατάστασης. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της κατάστασης, όπως χρησιμοποιείται από πολλές μελέτες πριν από την [22], είναι ότι είναι μια κατάσταση χαμηλής ισχύος όπου ορισμένα εξαρτήματα του Femtocell έχουν απενεργοποιηθεί ή λειτουργούν σε χαμηλό επίπεδο ισχύος. Σε αυτή την κατάσταση, το Femtocell δεν είναι σε θέση να εξυπηρετήσει έναν χρήστη. Το σημαντικό χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία είναι ότι θεωρούμε ότι ένα Femtocell σε αυτή την κατάσταση δεν εξυπηρετεί κανέναν χρήστη και οι μεταδόσεις του δεν προκαλούν παρεμβολές σε κανέναν χρήστη στην περιοχή του.

Η Hybrid Access από την άλλη πλευρά είναι όταν ένα Femtocell δέχεται οποιονδήποτε χρήστη βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης του ανεξάρτητα από το αν είναι εγγεγραμμένος στη λίστα CSG του. Αυτή η πολιτική πρόσβασης αντιμετωπίζεται απρόθυμα από τους ιδιοκτήτες των Femtocell. Αντ' αυτού, σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία, προτείνουμε μια παραλλαγή της Hybrid Access. Θα μας βοηθήσει να διαμορφώσουμε έναν μηχανισμό, ο οποίος θα επιβραβεύει, με την έννοια της βελτίωσης της απόδοσης, και τους χρήστες των Femtocell που εισέρχονται σε sleep mode όσο και τους χρήστες των Femtocell που λειτουργούν σε Hybrid Access. Συγκεκριμένα, με τη Hybrid Access, θα αναφερθούμε στην περίπτωση όπου ένα Femtocell, επεκτείνει τον κατάλογο CSG των εισερχόμενων χρηστών του ώστε να συμπεριλάβει χρήστες που είναι μέλη του CSG ενός Femtocell που ανήκει στην ίδια ομάδα (cluster), με αυτό. Έτσι, μπορεί να γίνει δεκτή μόνο μια υποομάδα πιθανών χρηστών σε σύγκριση με την τυπική υβριδική πρόσβαση και όπως εξηγούμε παρακάτω, αυτό γίνεται μόνο υπό αυστηρές συνθήκες.

Εξετάζοντας κάθε ένα cluster, ο αλγόριθμος ελέγχει κάθε σταθμό βάσης αν θα ήταν δυνατό να μεταβεί σε Sleep Mode. Όταν ένα Femtocell μεταβεί σε Sleep Mode, οι ενεργοί χρήστες του πρέπει να ανακατανεμηθούν. Τα υπόλοιπα Femtocells στο cluster εξετάζονται ξεκινώντας από αυτό που βρίσκεται την πλησιέστερη απόσταση και ούτω καθεξής, μέχρις ότου κάποιο από αυτά να εισέλθει στη λειτουργία Hybrid Access και να δεχθεί τους χρήστες. Περιορίζουμε την αναζήτηση σε απόσταση 50 μέτρων από τον χρήστη, για να αποφύγουμε άσκοπους υπολογισμούς. Εφόσον αναφερόμαστε σε ανεξάρτητα ιδιόκτητα Femtocells, όλοι οι εμπλεκόμενοι χρήστες πρέπει να έχουν ένα κέρδος για να δεχθούν μια τέτοια αλλαγή. Έτσι, ένας περιορισμός που πρέπει να πληρείται είναι ότι οι συνδρομητές του υποψήφιου Femtocell που θα εισέλθει σε Sleep

Mode, πρέπει να έχουν τουλάχιστον τα ίδια Data Rates όταν θα γίνουν μέλη του νέου Femtocell, με αυτά που είχαν αρχικά. Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$THR_{New} \geq THR_{Old}$$

Ο οποίος σύμφωνα με το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιούμε γίνεται:

$$SINR_{New} \geq \frac{(1 + aSINR_{Old})^{(N_2+1)/N_1} - 1}{a}$$

Όπου $SINR_{New}$ και $SINR_{Old}$ είναι το SINR που ο χρήστης θα είχε εάν ήταν συνδεδεμένος στο γειτονικό και αντίστοιχα στο αρχικό Femtocell. N_2 είναι ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται από το γειτονικό Femtocell και N_1 είναι ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται από το αρχικό Femtocell. Είναι προφανές ότι η παραπάνω εξίσωση καθίσταται δυνατή τόσο γιατί $N_2 \sim N_1$ όσο και γιατί, για τον υπολογισμό του $SINR_{New}$ υπάρχει μία λιγότερη πηγή παρεμβολών αφού ένα Femtocell εισέρχεται σε Sleep Mode.

Παρόμοια με την προηγούμενη συνθήκη έτσι και εδώ πρέπει να υπάρχει κίνητρο και για τους χρήστες των Femtocell που θα δεχτούν καινούργιους χρήστες. Έτσι, ένας δεύτερος περιορισμός που πρέπει να πληρείται, είναι ότι οι χρήστες ενός Femtocell υποψήφιου να εισέλθει σε Hybrid Mode, πρέπει επίσης να έχουν παρόμοια απόδοση σε σχέση με αυτή που εμφάνιζαν προηγουμένως. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι η επίδραση του Femtocell που πρόκειται να μπει σε Sleep Mode, επηρεάζει περισσότερο το Femtocell-υποψήφιο για Hybrid Access μέσω της μείωσης των παρεμβολών, από ότι η μείωση των διαθέσιμων πόρων του λόγω της αποδοχής των χρηστών. Αυτό μπορεί επίσης να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$SINR_{New} \geq \frac{(1 + aSINR_{Old})^{(N_2+1)/N_2} - 1}{a}$$

4.3 Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος συνδυάζει τις τεχνικές του clustering, sleep mode με τη Hybrid Access Policy και παρουσιάζεται παρακάτω σε μορφή ψευδογλώσσας:

1: Δημιουργία Χάρτη Με στατικές θέσεις Macrocell και τυχαίες θέσεις Macro-User σε προκαθορισμένη απόσταση (radius) από αυτά.
2: Τοποθέτηση Femtocell στο Χάρτη Με τη Βοήθεια τυχαίας συνάρτησης
3: Τοποθέτηση 1-3 χρηστών σε κάθε Femtocell
4: Δημιουργούμε τα clusters ως εξής:
5: Αν Femtocell <i>u</i> ανήκει στο cluster και η απόσταση των Femtocell <i>u-l</i> < 50m τότε
6: Femtocell <i>u</i> ανήκει στο cluster
7: Τέλος Αν
8: Για κάθε cluster
9: Εξετάζουμε όλα τα Femtocell στο cluster για να βρούμε υποψήφια για να εισέλθουν σε Sleep Mode αρχίζοντας την αναζήτηση μας από το Femtocell που έχει τους λιγότερους ενεργούς χρήστες τη δεδομένη χρονική στιγμή.
10: Για κάθε Femtocell που ανήκει στο Cluster
11: Εξετάζουμε όλα τα Femtocell του συγκεκριμένου cluster για να βρούμε υποψήφια Femtocell για να εισέλθουν σε Hybrid Access Mode ξεκινώντας από αυτό που βρίσκεται πιο κοντά στο υποψήφιο Femtocell που θα εισέλθει σε Sleep Mode.
12: Για τα 2 Femtocell, εκ των οποίων το ένα είναι υποψήφιο για να εισέλθει σε Sleep Mode και το άλλο να εισέλθει σε Hybrid Access Mode
13: Συνθήκη 1: Οι μετακινούμενοι χρήστες του Femtocell που είναι υποψήφιο να εισέλθει σε sleep mode πρέπει να διατηρήσουν ή να βελτιώσουν την απόδοσή τους:
$SINR_{New} \geq \frac{(1+aSINR_{Old})^{(N_2+1)/N_1}-1}{a}$
14: Συνθήκη 2: Οι χρήστες των οποίων τα Femtocell είναι υποψήφια να εισέλθουν σε Hybrid Mode Access πρέπει να διατηρήσουν ή να αυξήσουν την απόδοσή τους:
$SINR_{New} \geq \frac{(1+aSINR_{Old})^{(N_2+1)/N_2}-1}{a}$
15: Αν Συνθήκη 1 & Συνθήκη 2 Αληθής τότε
16: Τα εξεταζόμενα Femtocell εισέρχονται σε κατάσταση Sleep Mode και Hybrid Access αντίστοιχα.
18: break;
19: Τέλος Αν
20: Τέλος Για
21: Τέλος Για
22: Τέλος Για
23: Έξοδος

5 Πειραματική Προσομοίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε πληροφορίες σχετικά με την πειραματική προσομοίωση του Δικτύου, όπως οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι τιμές τους. Έπειτα θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση αυτή. Όπως προαναφέραμε η τεχνολογία 5G NR, σε συνδυασμό με το πρότυπο IMT-2020, είναι αρκετά πρόσφατα, δεν υπάρχει ικανοποιητική διαθεσιμότητα σε έμπιστους εξομοιωτές που να επιτρέπουν διαχείριση του δικτύου με τα καινοτόμα μοντέλα των 5G Δικτύων. Κατά συνέπεια, επιλέξαμε να υλοποιήσουμε την εξομοίωση του μοντέλου μας σε περιβάλλον MATLAB ακολουθώντας τις προδιαγραφές του LTE-A προτύπου.

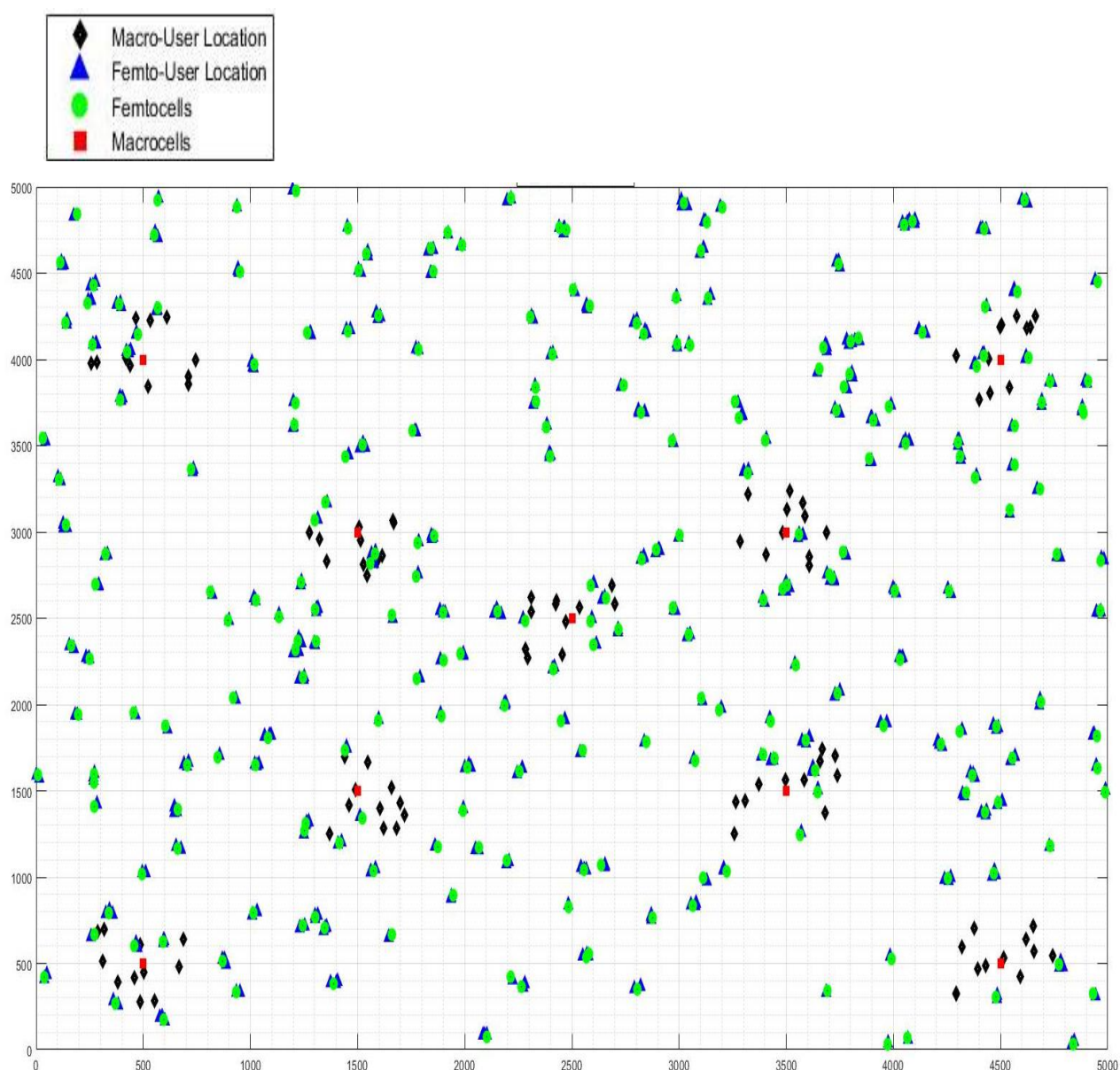
5.1 Παράμετροι Προσομοίωσης

Αναλυτικότερα η προσομοίωση του δικτύου εμπεριέχει εννέα (9) σταθμούς βάσης τύπου Macrocell οι οποίοι διαθέτουν περιοχή κάλυψης ίση με διακόσια πενήντα (250) μέτρα. Οι σταθμοί αυτοί τοποθετούνται στο κέντρο κάθε μίας από τις 9 περιοχές καλύπτοντας καθολικά το εν λόγω δίκτυο. Επιπρόσθετα η ισχύς μετάδοσης τους είναι ίση με την προκαθορισμένη τιμή των 46dBm. Έπειτα τοποθετούμε διακόσια πενήντα (250) Femtocells με τους χρήστες τους σε τυχαίες θέσεις στο δίκτυο ενώ μεταξύ τους έχουν την προκαθορισμένη απόσταση της περιοχής κάλυψης που χρησιμοποιούμε για τα Femtocells η οποία είναι ίση με δεκαοκτώ (18) μέτρα. Ο αριθμός των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα Femtocell ταυτόχρονα κυμαίνεται από έναν έως τρεις (1-3). Επιπρόσθετα τοποθετήσαμε εκατό (100) χρήστες Macrocell τυχαία γύρω τους εντός της περιοχής κάλυψης τους. Η εικόνα 23 μας παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του Δικτύου, με όλα τα παραπάνω στοιχεία, ενώ ο πίνακας 3 εμπεριέχει τις πειραματικές παραμέτρους της προσομοίωσης όπως επιτάσσει το τεχνολογικό πρότυπο LTE-A.

Παράμετρος	Τιμή
Macrocells	9
Περιοχή Κάλυψης Macrocell	500 μέτρα
Femtocells	250
Αριθμός Χρηστών Femtocell	1-3 σε κάθε Femtocell
Αριθμός Χρηστών Macrocell	100
Bandwidth	20MHz
Carrier Frequency	2GHz

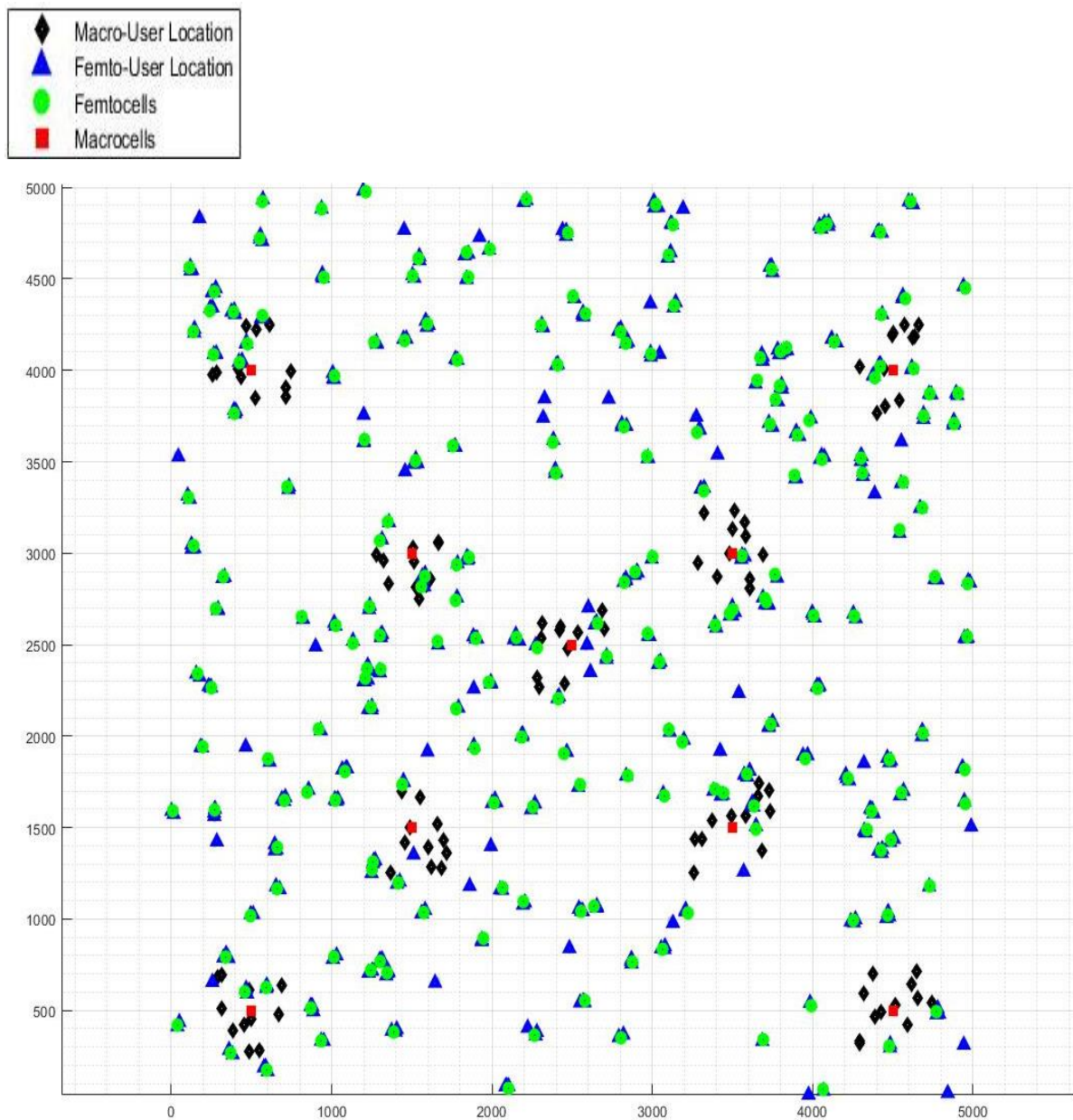
BS transmit power	46dBm
Femto BS transmit power	21dBm
Subcarrier Spacing	15kHz
White Noise Power Density	-174dBm/Hz

Πίνακας 3: Πειραματικές Παράμετροι προσομοίωσης

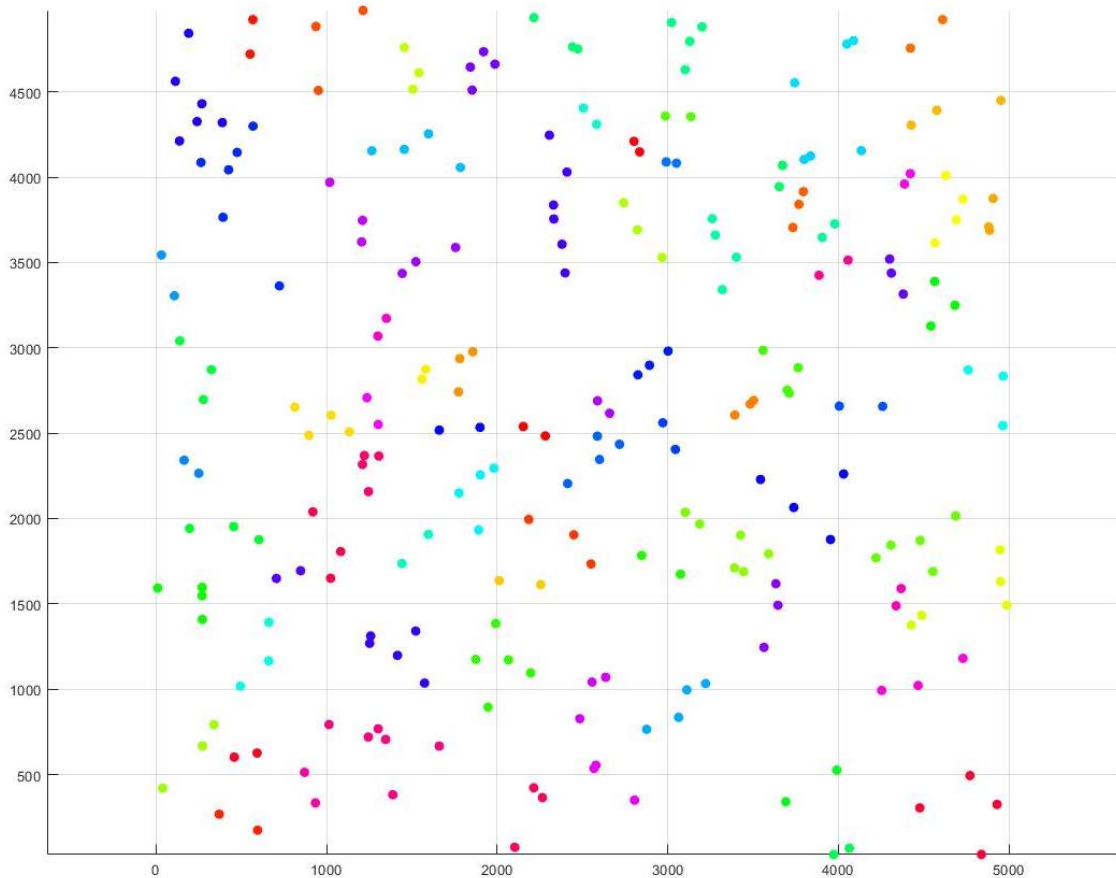


Εικόνα 23: Στιγμιότυπο του Δικτύου με όλα τα femtocells Active

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο του ίδιου δικτύου που οι σταθμοί βάσης έχουν απενεργοποιηθεί. Για την ευκολία της παρουσίασης και στα δύο (2) στιγμιότυπα του δικτύου οι σταθμοί βάσης τύπου Macrocell παρουσιάζονται με έναν κόκκινο σταυρό, τα Femtocells με πράσινο κύκλο, οι χρήστες τους με μπλε τρίγωνο και οι χρήστες των Macrocell με μαύρο ρόμβο. Ακόμα παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα Femtocells ομαδοποιούνται (clustering). Για την απλούστερη κατανόηση της εικόνας τα χρώματα αλλάζουν σε γειτονικά clusters έτσι ώστε να διαχωρίζονται τα Femtocells που βρίσκονται εξαιρετικά κοντά αλλά παρόλα αυτά ανήκουν σε διαφορετικά clusters. Στη συγκεκριμένη δοκιμή υπάρχουν 498 χρήστες οι οποίοι είναι διασυνδεδεμένοι σε 250 Femtocell 42 εκ των οποίων απενεργοποιήθηκαν και οι χρήστες τους μεταφέρθηκαν σε άλλο Femtocell του cluster που ανήκαν. Τέλος δημιουργήθηκαν 83 clusters.



Εικόνα 24: Στιγμιότυπο του Δικτύου με απενεργοποιημένα femtocells

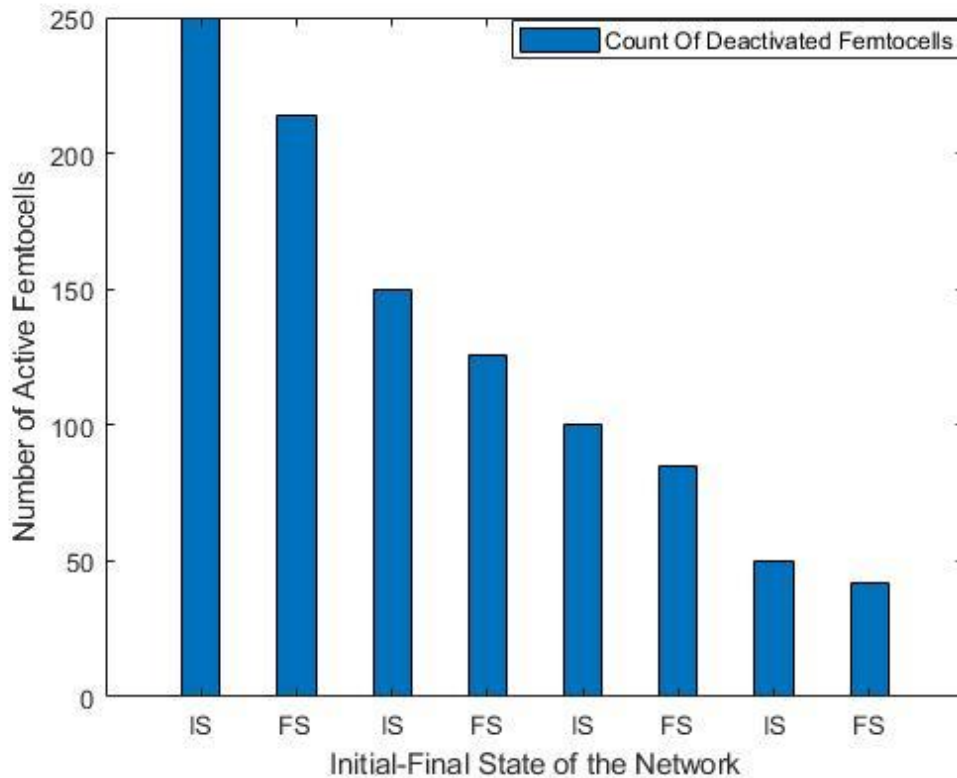


Εικόνα 25: Στιγμιότυπο του Δικτύου απεικονίζοντας τα Clusters.

5.2 Πειραματικά Αποτελέσματα

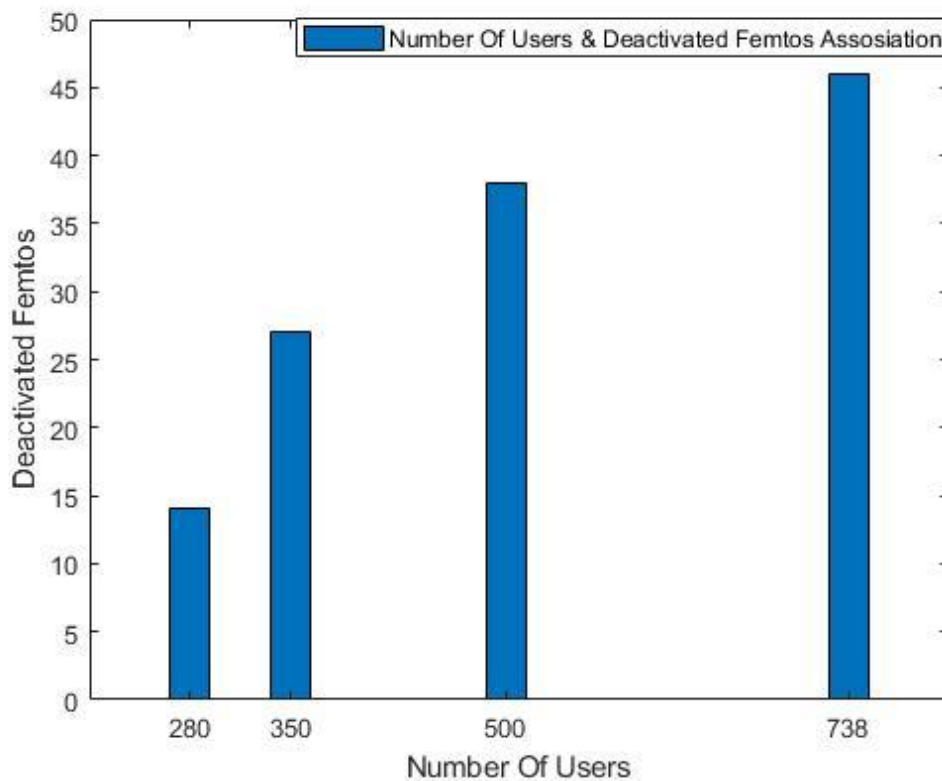
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σαράντα φορές (40) με σκοπό να καταφέρουμε να εξάγουμε πειραματικά δεδομένα τα οποία θα μας βοηθήσουν στο να εξαγάγουμε ορθά συμπεράσματα. Παρατηρώντας την εικόνα 26 μπορούμε να κατανοήσουμε ότι ανάλογα με τον αριθμό των Femtocells τον οποίο τοποθετούμε στο Δίκτυο κλείνει ένας ανάλογος αριθμός εξ αυτών. Στις προσομοιώσεις που έγιναν για 50, 100, 150 και 250 Femtocells και αντίστοιχα για 103, 192, 312 και 527 χρήστες, τα Femtocells τα οποία εισήχθησαν σε Sleep Mode ήταν αντίστοιχα περίπου 8, 15, 24 και 36. Αυτό συμβαίνει διότι όσο περισσότερο αυξάνονται τα Femtocells σε ένα πυκνό ετερογενές δίκτυο τόσο μεγαλύτερες είναι οι παρεμβολές που βιώνουν οι χρήστες. Με άλλα λόγια το δίκτυο φτάνει σε μια κατάσταση κορεσμού καθώς το πλήθος των τοποθετημένων Femtocell είναι υπέρμετρα μεγάλο σε σχέση με τις πραγματικές ανάγκες των χρηστών. Να σημειωθεί πως οι χρήστες διατηρώντας την απόδοσή τους επανατοποθετήθηκαν ή δέχθηκαν νέους χρήστες στα Femtocells τους με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η συνολική

απόδοση του δικτύου. Ο τρόπος δε, με τον οποίο κλείνουν τα Femtocells και στις 4 διαφορετικές περιπτώσεις εμφανίζει μία γραμμικότητα, πράγμα το οποίο δείχνει ότι θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερες τη τάξη δομές.



Εικόνα 26: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells που εισέρχονται σε sleep mode.

Μία άλλη πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε ήταν για σταθερό αριθμό Femtocells αλλά αυτήν τη φορά για μεταβλητό αριθμό χρηστών. Το πείραμα εκτυλίχθηκε και αυτό 40 φορές 10 για την κάθε μία από τις παρακάτω κατηγορίες ξεχωριστά. Και στις τέσσερις κατηγορίες έχουμε σταθερό αριθμό Femtocell ίσο με 250 και 4 διαφορετικούς αριθμούς χρηστών. Στη πρώτη κατηγορία έχουμε τον μικρότερο αριθμό χρηστών κατά μέσο όρο ο οποίος παρατηρήθηκε και είναι ίσος με 280 χρήστες. Στη δεύτερη κατηγορία ο μέσος αριθμός χρηστών που παρατηρήθηκε ήταν ίσος με 350. Στην Τρίτη αντίστοιχα ήταν ίσος με 500 και στη τέταρτη ίσως με 738. Θυμίζουμε πως οι αριθμοί χρηστών αυτοί αποτελούν τον μέσο όρο χρηστών 10 προσομοιώσεων για την κάθε κατηγορία ξεχωριστά. Για την κάθε κατηγορία παρατηρήθηκε διαφορετικός αριθμός Femtocell να εισέρχεται σε Sleep Mode όπως και ήταν αναμενόμενο. Οι αριθμοί αυτοί απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα 27.

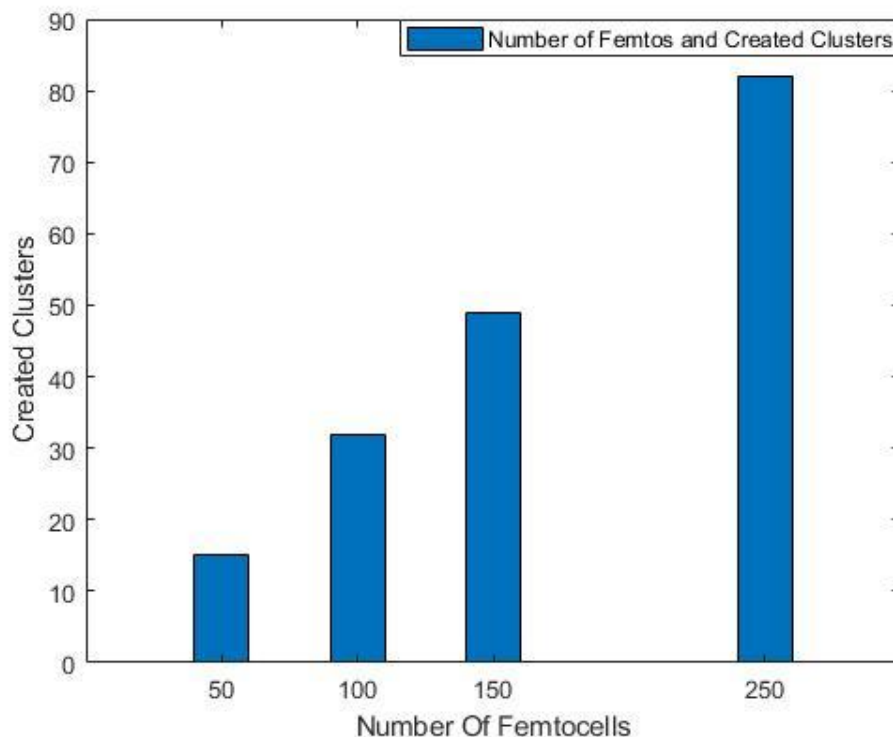


Εικόνα 27: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells που εισέρχονται σε sleep mode καθώς αυξάνονται οι χρήστες.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι αριθμοί που προκύπτουν στις τέσσερις κατηγορίες που εξετάστηκαν είναι αντίστοιχα, 14, 27, 38, 46 και αποτελούν τον μέσο όρο 10 προσομοιώσεων των Femtocell που απενεργοποιούνται για δεδομένους χρήστες. Εύλογα λοιπόν, προκύπτει το συμπέρασμα ότι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών στο Δίκτυο μας, για σταθερό αριθμό Femtocells, αυξάνονται και οι απενεργοποιήσεις των σταθμών βάσης τύπου Femtocell. Επομένως όσο πιο πυκνό γίνεται το δίκτυο μας, τόσο περισσότεροι σταθμοί βάσης απενεργοποιούνται, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει ακόμα περισσότερο το ποσό της ενέργειας που εξοικονομείται.

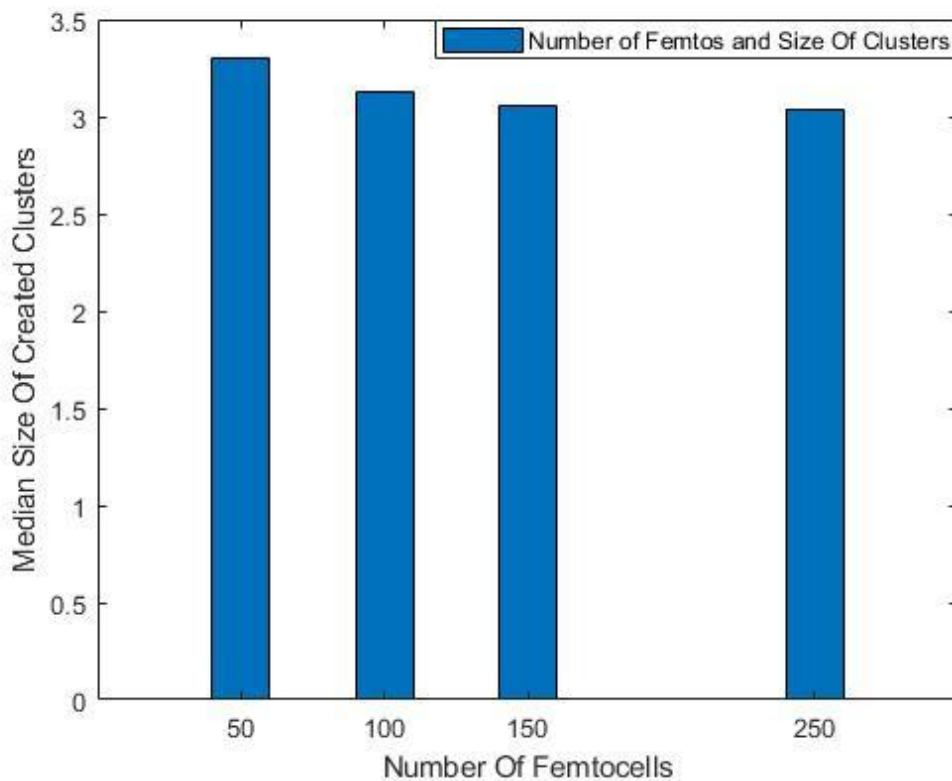
Επιπρόσθετα στο διάγραμμα 28 βλέπουμε το συσχετισμό μεταξύ των Femtocells που υπάρχουν στο δίκτυο και των clusters που δημιουργούνται. Η προσομοίωση αυτή επαναλήφθηκε συνολικά 40 φορές, 10 φορές για κάθε μία από τις παρακάτω περιπτώσεις. Για την πρώτη περίπτωση τοποθετήθηκαν στο Δίκτυο 50 σταθμοί βάσεις και κατά μέσο όρο 103 χρήστες. Το αποτέλεσμα ήταν να δημιουργηθούν 15 clusters. Αντίστοιχα για 100 Femtocells και 192 χρήστες δημιουργήθηκαν περίπου 32 clusters. Για 150 Femtocells και 312 χρήστες δημιουργήθηκαν κατά μέσο όρο 47 clusters ενώ για την κύρια περίπτωση μελέτης του δικτύου δημιουργήθηκαν για 250 Femtocells και 517 χρήστες, 82 clusters κατά μέσο όρο. Μπορούμε λοιπόν να παρατηρήσουμε ότι αυξάνοντας τα Femtocells που τοποθετούμε στην υλοποίηση μας, αυξάνεται και ο

αριθμός των clusters που δημιουργούνται. Αυτό αποδεικνύει ότι όσο πιο πυκνό γίνεται το ετερογενές δίκτυο μας τόσο περισσότερες είναι οι ομαδοποιήσεις των Femtocells. Αυτό λειτουργεί ευεργετικά για το δίκτυο μας με την έννοια, ότι σε ένα cluster τα Femtocell τα οποία το απαρτίζουν δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιήσουν το ένα την συχνότητα του άλλου. Ωστόσο 2 Femtocell που ανήκουν σε διαφορετικά clusters, μπορεί το ένα επαναχρησιμοποιεί την συχνότητα του άλλου αφού δεν μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση των χρηστών του λόγω απόστασης. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι παρεμβολές που βιώνουν οι χρήστες και έτσι η ποιότητα των υπηρεσιών που τους προσφέρεται βελτιώνεται (QoS↑).



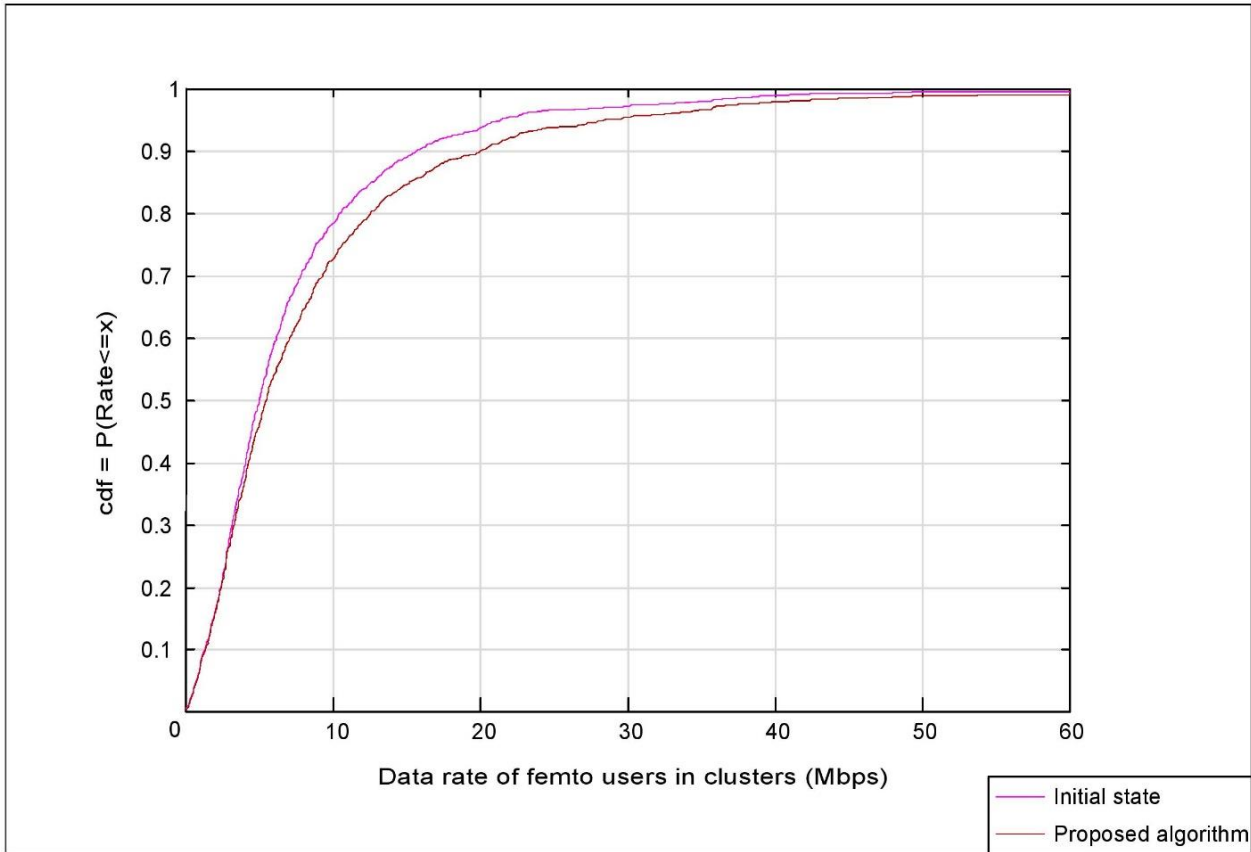
Εικόνα 28: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells και σχηματιζόμενων clusters.

Μία ακόμα παρατήρηση έχει να κάνει με το μέγεθος των clusters τα οποία δημιουργούνται. Μπορεί ο αριθμός των clusters να αυξάνεται, όσο ο αριθμός των Femtocell που τοποθετούμε στο Δίκτυο ομοίως αυξάνεται, όμως το μέσο μέγεθος των clusters μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι ο μέσος όρος Femtocell που ομαδοποιούνται σε ένα cluster για κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις στις οποίες τοποθετούμε στο Δίκτυο 50, 100, 150 και 250 Femtocells είναι αντίστοιχα 3,3 3,125 3,06 και 3,04. Μικρότερα σε αριθμό clusters σημαίνει λιγότερες “πηγές” παρεμβολών για ένα Femtocell το οποίο αποτελεί ενεργό μέλος της ομάδας. Οι λιγότερες παρεμβολές με την σειρά τους μεταφράζονται σε υψηλότερα data rates για τους χρήστες ολόκληρου του cluster. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα 29.



Εικόνα 29: Γραφική παράσταση αριθμού femtocells και του μέσου όρου τους στα σχηματιζόμενων clusters.

Ο αλγόριθμος μας στοχεύει εν τέλη να αυξήσει το συνολικό data rate των χρηστών, περιορίζοντας τις παρεμβολές, συνδυάζοντας το Sleep Mode και την Hybrid Access μέσα σε ένα cluster, προσαρμόζοντας τον αριθμό των ενεργών Femtocell στις πραγματικές ανάγκες της τοπολογίας. Η εικόνα 30 απεικονίζει τη βελτίωση του ρυθμού δεδομένων όλων των χρηστών των Femtocell, που ανήκουν σε cluster και συγκρίνει με την αρχική περίπτωση, όπου τα Femtocells δεν είναι οργανωμένα σε clusters και βρίσκονται όλα σε πλήρη λειτουργία. Η βελτίωση προέρχεται τόσο από την έξυπνη ανακατανομή χρηστών μέσα στα clusters όσο και από τη συνολική μείωση των παρεμβολών στην τοπολογία, από την απενεργοποίηση των Femtocell που εισήχθησαν σε sleep mode. Ενώ η εικόνα 30 παρουσιάζει τη συνολική απόδοση των χρηστών, κανένας από τους χρήστες δεν αντιμετωπίζει μεμονωμένα μείωση του data rate του, λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται. Αυτό μεταφράζεται εν ολίγοις, στο ότι πετυχαίνουμε παρόμοια data rates για το σύνολο των χρηστών, εξοικονομώντας σημαντικά ποσά ενέργειας από το κλείσιμο μεγάλου αριθμού Femtocells.

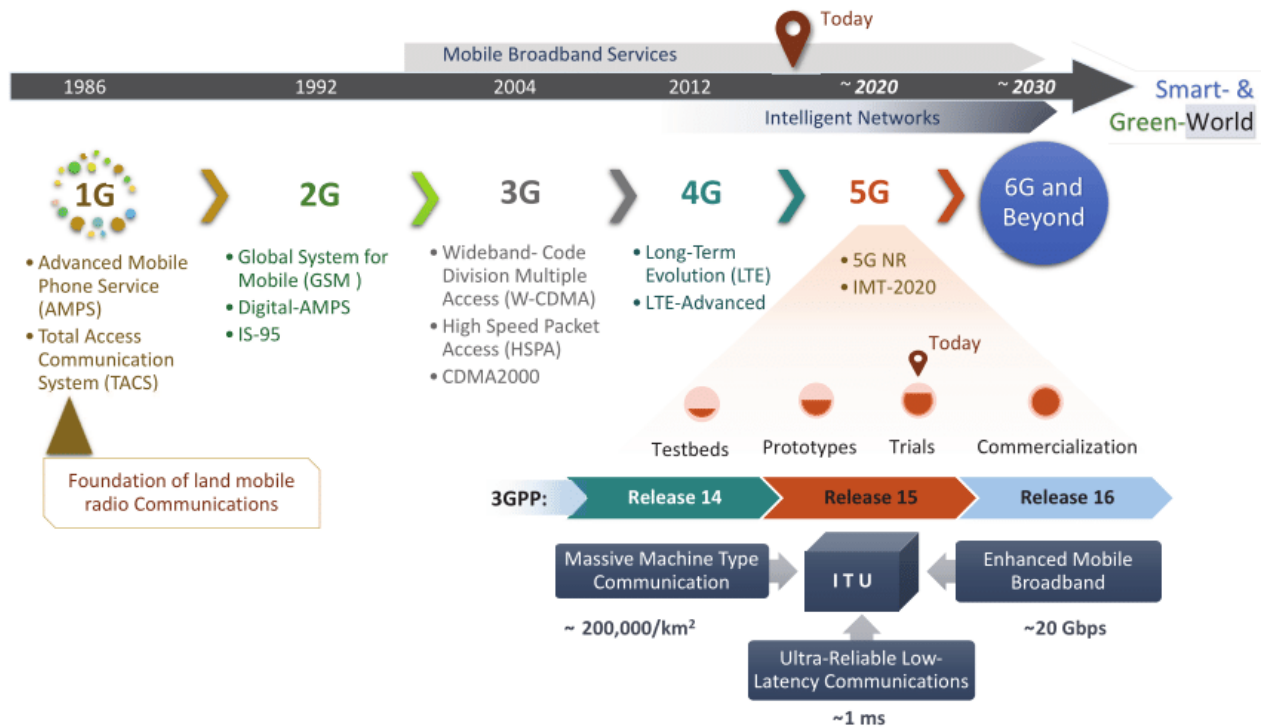


Εικόνα 30: Γραφική παράσταση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής των data rate των χρηστών

6 Δίκτυα 6G

6.1 Εισαγωγή

Κάθε γενιά ασύρματων δικτύων από την πρώτη μέχρι και τη πέμπτη έχει σχεδιαστεί τόσο για να καλύψει τις ανάγκες των τελικών χρηστών όσο και τις προσδοκίες των παρόχων των δικτύων όπως φαίνεται και στην εικόνα 31. Ωστόσο σήμερα, η κοινωνία μας γίνεται όλο και περισσότερο απαιτητική, ζητώντας μεγαλύτερα data rates σε ότι αφορά τους χρήστες και τις συσκευές τους. Για την ακρίβεια η ίδια η κοινωνία τείνει να αυτοματοποιηθεί πλήρως. Εκατομμύρια αισθητήρες εγκαθίστανται καθημερινά στον βιομηχανικό κλάδο, αυτόνομα συστήματα πλοήγησης εισάγονται στο οδικό δίκτυο, στον αέρα αλλά και στη θάλασσα. Ακόμα νέα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης βρίσκουν εφαρμογή σε νέες τεχνολογίες όπως το cloud δίνοντας μας απίστευτες δυνατότητες. Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας είναι υπεύθυνα για την υλοποίηση των παραπάνω. Ωστόσο οι ανάγκες για παροχή δεδομένων θα είναι τεράστιες. Συγκεκριμένα θα χρειάζεται η μεταφορά τεράστιου αριθμού δεδομένων, όπως και μεγαλύτερες ταχύτητες. Συνεχίζοντας την τάση των 4G & 5G δικτύων τα δίκτυα 6G θα προσπαθήσουν να προσφέρουν σύνδεση όχι μόνο μεταξύ των ανθρώπων αλλά και μεταξύ χιλιάδων αισθητήρων, αυτοκινήτων και εν γένει μηχανών καθιστώντας εφικτό το “όνειρο” του IoT (InternetOfthings). Όπως αναφέρεται στο [28] για να καταφέρουν να ικανοποιήσουν τις παραπάνω ανάγκες τα δίκτυα 6G, θα φέρουν νέες επικοινωνιακές τεχνολογίες και καινοτόμα αρχιτεκτονική δικτύου. Αναλυτικότερα αν και τα δίκτυα 5G έχουν σχεδιαστεί, για να λειτουργούν σε εξαιρετικά υψηλές συχνότητες όπως για παράδειγμα στις ζώνες mmWave στο FR2, η τεχνολογία 6G αναμένεται να λειτουργεί σε υψηλότερου φάσματος τεχνολογίες όπως μέσω ζωνών μεγέθους 100GHz έως και 10THz ή οπτικών ινών. Επιπρόσθετα τα δίκτυα 6G θα σχεδιαστούν πάνω σε καινοτόμες αρχιτεκτονικές δικτύων. Η ετερογένεια των μελλοντικών δικτυακών εφαρμογών όπως η ανάγκη για κάλυψη μιας 3D κλήσης ολογράμματος απαιτεί νέα αρχιτεκτονική δικτύου αφήνοντας πίσω μια για πάντα την κυψελοειδή μορφή του δικτύου όπως γνωρίζαμε μέχρι σήμερα. Περιμένουμε τα δίκτυα 6G να μεταφέρουν πληροφορίες από κεντρικές υπολογιστικές εγκαταστάσεις στις συσκευές των χρηστών παρέχοντας έτσι συγκεκριμένα καταναμεμένα μαθησιακά μοντέλα (distributed learning models), τα οποία θα εκπαιδεύσουν ουσιαστικά το δίκτυο, τόσο τις συσκευές των χρηστών όσο και τους σταθμούς βάσης να παίρνουν απόφαση σχετικά με την πρόβλεψη του δικτύου. Το παραπάνω καλείται από τους ερευνητές ενσωμάτωση νοημοσύνης στο δίκτυο.



Εικόνα 31: Ιστορική αναδρομή μέχρι και το επερχόμενο 6G.

6.2 Εφαρμογές του 6G

Τα δίκτυα 5G στη μορφή που έχουν μέχρι σήμερα έχουν παρουσιάσει μικρότερη εξέλιξη από την αναμενόμενη σε ότι αφορά το latency, την εξοικονόμηση ενέργειας, το κόστος του υλικού και γενικότερα την απόδοσή τους. Αντίθετα τα δίκτυα 6G θα κατασκευαστούν έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των χρηστών σε ότι αφορά την υψηλή χωρητικότητα του δικτύου, την αποδοτικότητα και το χαμηλό latency με ένα τρόπο καθολικό [28]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογικών εφαρμογών που αναμένεται να καλύψει πλήρως η τεχνολογία 6G (εικόνα 32).

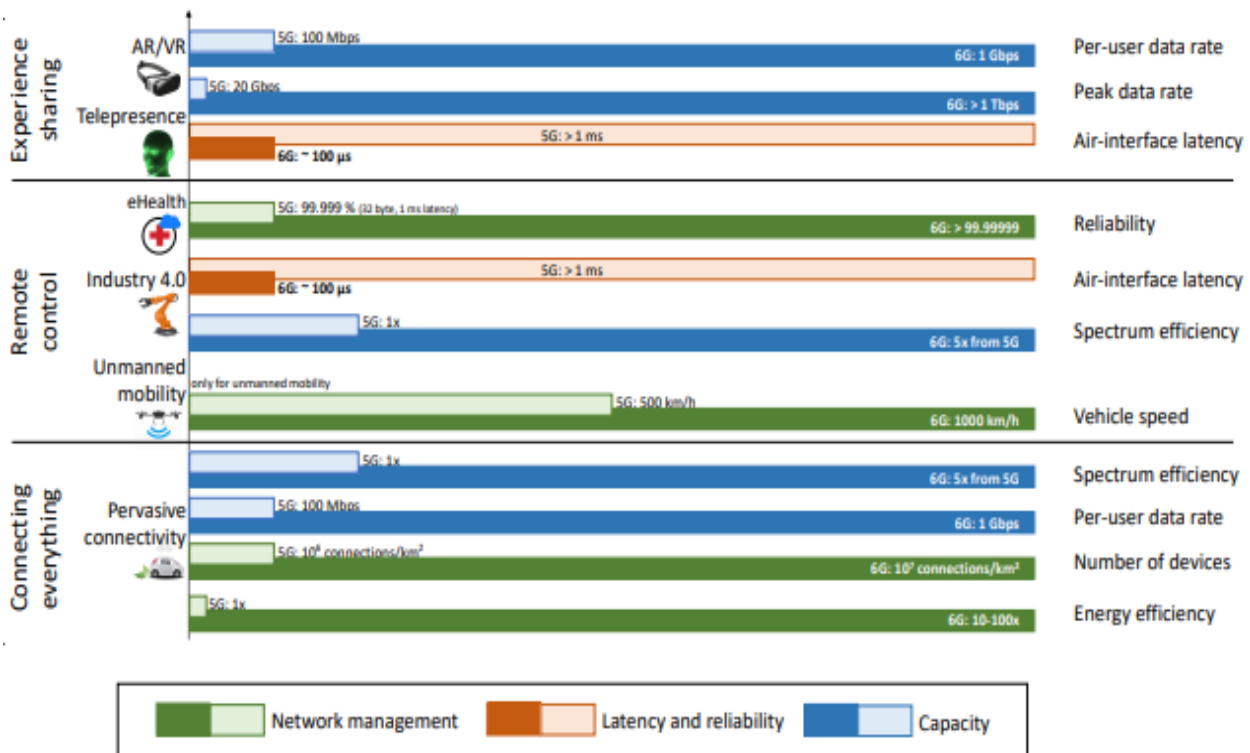
- Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR)/ Εικονική Πραγματικότητα (VR) : Τα 4G δίκτυα έκανα την αρχή κυκλοφορώντας για την τότε εποχή, μία εφαρμογή κοστοβόρα από άποψης πόρων την βίντεο κλίση σε ασύρματη σύνδεση. Η αυξανόμενη χρήση υπηρεσιών ροής (streaming) προς το παρόν δικαιολογεί την χρησιμοποίηση του νέου φάσματος (δηλ. mmWaves) από τα 5G δίκτυα. Ωστόσο, η ευκαιρία για ταχύτητες άνω του 1Gbps φέρνει στο προσκήνιο μία νέα εφαρμογή πολύ πιο κοστοβόρα σε data από ότι η δυσδιάστατη κλήση. Με τα δίκτυα 5G θα εισέλθουν στη ζωή του χρήστη οι τεχνολογίες AR/VR. Στην συνέχεια όπως ακριβώς συνέβη με τις βίντεο-κλίσεις στο 4G, όπου το

χρησιμοποιούμενο φάσμα υπερφορτώνονταν, έτσι και εδώ θα απαιτείται, η συνολική χωρητικότητα του συστήματος να είναι άνω του 1Tbps σε αντίθεση με τα 20Gbps που έχουν οριστεί για το 5G. Επιπλέον το latency για αυτού του είδους τις εφαρμογές πρέπει να εκμηδενιστεί σχεδόν, λόγω της βύθισης του χρήστη σε έναν νέο εικονικό κόσμο εν αντιθέσει με τα 5G δίκτυα στα οποία έχει τεθεί ο στόχος του 1ms.

- 3D Προβολή: Έρευνες έχουν δείξει ότι η προβολή ενός ολογράμματος 3D χωρίς συμπίεση, με χρώματα και πλήρη κινητική απόκριση στα 30fps (frames per second) θα απαιτούσε 4,32 Tbps. Το latency πρέπει επίσης να μειωθεί σε μικρότερο του ενός ms και χιλιάδες γωνίες λήψης θα απαιτούνται, σε αντίθεση με τις μερικές δεκάδες που απαιτούνται για το AR/VR. Επιπλέον, για να ζήσουμε πλήρως μια εντυπωσιακή απομακρυσμένη εμπειρία, και οι 5 ανθρώπινες αισθήσεις αναμένεται να ψηφιοποιηθούν και να μεταφερθούν σε μελλοντικά δίκτυα, αυξάνοντας το συνολικό ποσοστό δεδομένων που θα πρέπει να μεταφέρεται.
- eHealth: Η τεχνολογία 6G θα φέρει επανάσταση στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, εξαλείφοντας τους χρόνους και τους χιλιομετρικούς φραγμούς μέσω της απομακρυσμένης χειρουργικής και βελτιστοποιημένης ροής εργασίας της υγειονομικής περίθαλψης. Εκτός του υψηλού κόστους, ο σημερινός σοβαρός περιορισμός είναι η έλλειψη ανάδρασης σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η διάδοση των υπηρεσιών ηλεκτρονικής υγείας θα δοκιμάσει τις αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας (QoS), δηλαδή διαθεσιμότητα συνεχούς σύνδεσης (99,99999% αξιοπιστία), καθυστέρηση υπερφόρτωσης (sub-ms) και υποστήριξη κινητικότητας. Η αυξημένη διαθεσιμότητα φάσματος, σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη του 6G-δικτύου, εγγυώνται την επιτυχία υλοποίησης αυτής της εφαρμογής.
- Διάχυτη-συνδεσιμότητα: Η 6G τεχνολογία θα συνδέσει προσωπικές συσκευές, αισθητήρες, αυτοκίνητα για την εφαρμογή του μοντέλου Smart City. Επιπλέον, θα απαιτήσει υψηλότερη συνολική ενεργειακή απόδοση (10-100x σε σχέση με το 5G), ώστε να καταστεί δυνατή η υλοποίηση του SmartCity με χαμηλό κόστος για τον χρήστη αλλά και χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αν και το 80% της κινητής τηλεφωνίας παράγεται σε εσωτερικούς χώρους, 5G κυψελοειδή δίκτυα, τα οποία αναπτύσσονται κυρίως σε εξωτερικούς χώρους και μπορούν να λειτουργούν στο φάσμα mmWave, δύσκολα θα παρέχουν εσωτερική συνδεσιμότητα, καθώς τα ραδιοφωνικά σήματα υψηλής συχνότητας δεν

μπορούν εύκολα διεισδύουν στα διηλεκτρικά υλικά (π.χ. σκυρόδεμα). Τα δίκτυα 6G θα παράσχουν αντ' αυτού απρόσκοπτη και διαπεραστική συνδεσιμότητα σε μια ποικιλία διαφορετικών πλαισίων, που ταιριάζουν με τις αυστηρές QoS απαιτήσεις σε υπαίθρια και εσωτερικά σενάρια με μια υποδομή κόστους και ευελιξίας.

- Βιομηχανία 4.0 και Ρομποτική: Η αυτοματοποίηση της βιομηχανίας ξεκίνησε στο 5G, δηλαδή ο ψηφιακός μετασχηματισμός της κατασκευής μέσω των φυσικών συστημάτων του κυβερνοχώρου και τις υπηρεσίες IoT. Ξεπερνώντας τα όρια ανάμεσα στο πραγματικό εργοστάσιο και στο ψηφιακό υπολογιστικό χώρο θα δημιουργηθούν, διαγνωστικές υπηρεσίες βασισμένες στο διαδίκτυο που θα προσφέρουν συντήρηση, λειτουργία και άμεση επικοινωνία μεταξύ των μηχανών με οικονομικό, ευέλικτο και αποδοτικό τρόπο. Ο αυτοματισμός έρχεται με το δικό του σύνολο απαιτήσεων όσον αφορά την αξιόπιστη και ισοχρονική επικοινωνία, που η τεχνολογία 6G θα υλοποιήσει. Για παράδειγμα, ο βιομηχανικός έλεγχος απαιτεί εργασίες σε πραγματικό χρόνο με εγγύηση καθυστέρησης μικρότερη του 1μs, και data rates της τάξεως του ενός Gbps για AR / VR βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. για εκπαίδευση, παρακολούθηση εμπορεύματος κ.α.).
- Μη επανδρωμένη κινητικότητα: Η εξέλιξη προς πλήρως αυτόνομα συστήματα μεταφορών προσφέρει ασφαλέστερα ταξίδια και βελτιωμένη διαχείριση της κυκλοφορίας. Η σύνδεση μη επανδρωμένων οχημάτων μεταξύ τους, απαιτεί άνευ προηγουμένου επίπεδα αξιοπιστίας και χαμηλό latency δηλαδή πάνω από 99,99999% και κάτω από 1 ms αντίστοιχα έτσι ώστε ακόμη και σε σενάρια εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας (μέχρι 1000 km / h), να εξασφαλίζεται η ασφάλεια των επιβατών. Το παραπάνω αποτελεί μια απαίτηση που είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των αισθητήρων ανά όχημα θα απαιτήσει αυξανόμενα data rates (με την παραγωγή Terabytes ανά ώρα οδήγησης), πέραν της τρέχουσας χωρητικότητας του δικτύου. Τις παραπάνω προκλήσεις η τεχνολογία 6G θα είναι ικανή να τις αντιμετωπίσει μέσω καινοτόμων εξελίξεων στο υλικό, στο λογισμικό και της συνδεσιμότητας τόσο των σταθμών βάσης όσο και των αισθητήρων των οχημάτων.



Εικόνα 32: Τεχνολογίες που το 6G υπόσχεται να υλοποιήσει.

6.3 Τεχνολογίες 6G

Όπως προ-αναφέραμε τα δίκτυα 6^{ης} Γενιάς αναμένεται να στηριχθούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες τεχνολογιών. Η πρώτη καλείται καταστροφική επικοινωνία (Disruptive Communication) και εμπεριέχει τεχνολογίες όπως, Terahertz communications όπου αναφέρεται στη συχνότητα λειτουργίας των δικτύων 6G που θα κυμαίνεται από 100GHz έως 10THz. Μία άλλη τεχνολογία αυτής της οικογένειας είναι η τεχνική του VLC που αναφέρεται ότι μπορεί και να αντικαταστήσει τα κυψελοειδή δίκτυα. Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία καλείται Ενσωμάτωση της Νοημοσύνης στο δίκτυο. Ουσιαστικά εφόσον μιλάμε, για την καθολική σύνδεση πολλών διαφορετικών συσκευών μεταξύ τους, καθώς και την δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών για την κατάσταση τους ανά πάσα στιγμή, είναι εύλογο το ότι επεξεργαζόμενοι τις πληροφορίες αυτές κατάλληλα, μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα για την πρόβλεψη της κίνησης των χρηστών μέσα στο δίκτυο κ.α. Μερικές τεχνολογίες που ανήκουν σε αυτή την ευρύτερη “οικογένεια τεχνολογιών” είναι: Τεχνικές εκμάθησης για την επιλογή και τη εξαγωγή δεδομένων, Διαμοιρασμός γνώσης μεταξύ χρηστών και παρόχου και η αρχιτεκτονική δικτύου που βασίζεται στον χρήστη. Τέλος, υπάρχει η Τρίτη και τελευταία μεγάλη κατηγορία τεχνολογιών στις οποίες θα βασιστούν τα 6G Δίκτυα η οποία καλείται: Καινοτομικές Αρχιτεκτονικές Δικτύων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής αποτελούν, Στρατηγικές συγκομιδής ενέργειας για λειτουργίες δικτύων χαμηλής κατανάλωσης

ενέργειας και η 3D αρχιτεκτονική Δικτύου την οποία θα αναλύσουμε και λίγο παρακάτω. Είναι γεγονός ότι τόσο τα 5G δίκτυα όσο και οι προηγούμενες γενεές δικτύων, έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν συνδεσιμότητα για έναν ουσιαστικά δισδιάστατο χώρο, δηλαδή λειτουργούσαν με την τοποθέτηση σταθμών βάσης στο έδαφος δίνοντας την δυνατότητα στο χρήστη να συνδεθεί σε αυτούς όταν βρίσκονταν στην εμβέλεια του. Αντίθετα, οραματιζόμαστε το μέλλον με τις 6G ετερογενείς αρχιτεκτονικές να είναι υπεύθυνες για την παροχή τρισδιάστατης(3D) εν αέριας κάλυψης, συμπληρώνοντας έτσι τις επίγειες υποδομές, με μη επίγειες πλατφόρμες (π.χ. drones, μπαλόνια και δορυφόρους). Επιπλέον, αυτά τα στοιχεία θα μπορούσαν επίσης να αναπτυχθούν γρήγορα ώστε να εξασφαλίσουν απρόσκοπτη και αξιόπιστη εξυπηρέτηση, π.χ. σε αγροτικές περιοχές ή κατά τη διάρκεια συναυλιών, αποφεύγοντας τα λειτουργικά και διαχειριστικά έξοδα των επίγειων σταθμών βάσης. Παρά τις πολλά υποσχόμενες ευκαιρίες, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν πριν από την τοποθέτηση αέριων σταθμών βάσης στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, όπως για παράδειγμα, η μοντελοποίηση καναλιού αέρος-εδάφους, ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης, η διαχείριση των πόρων και η ενεργειακή απόδοση.[28]

7 Επίλογος

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

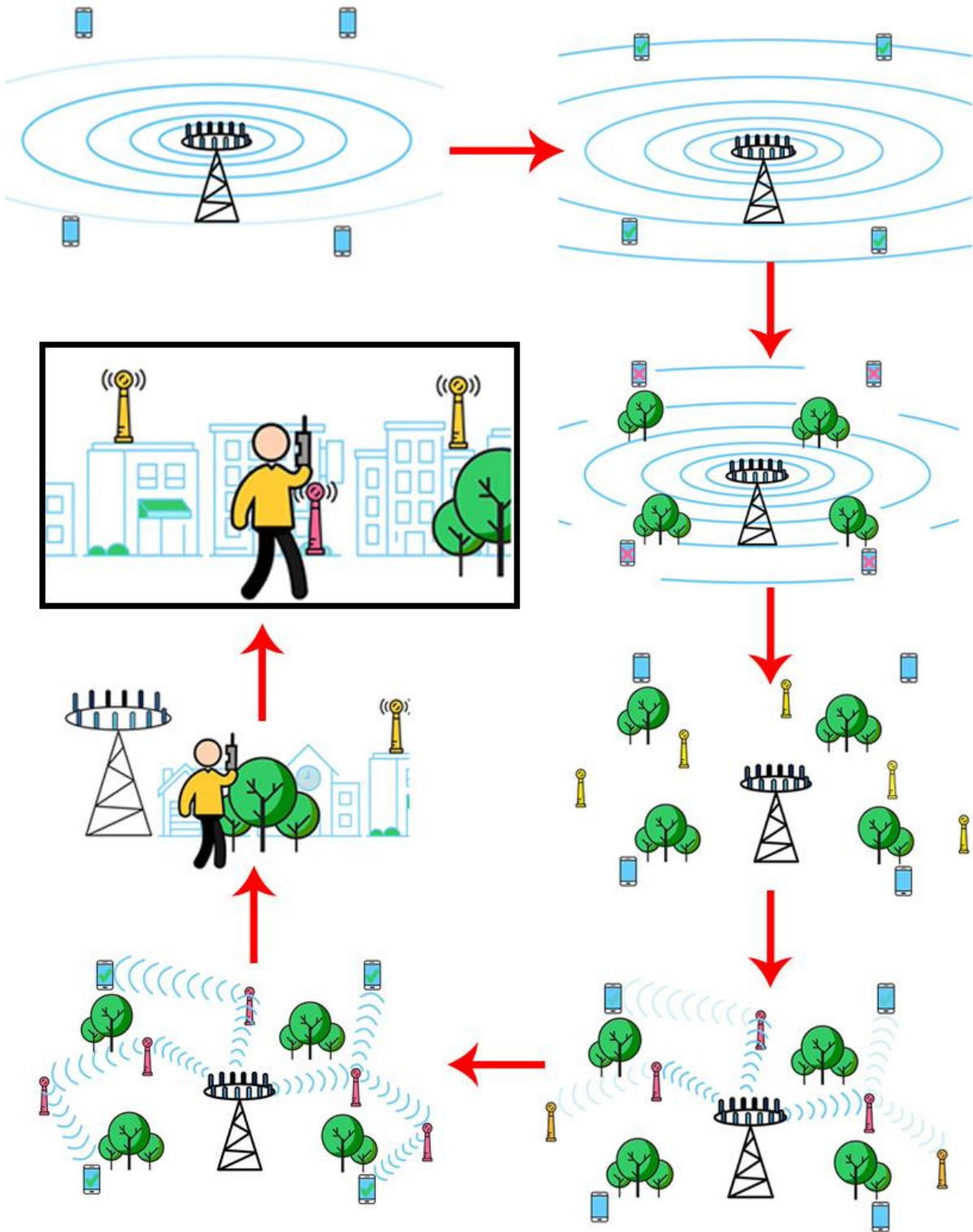
Αναμφίβολα τα επερχόμενα δίκτυα Πέμπτης γενιάς αναμένεται να αποτελέσουν βασικό κομμάτι της καθημερινότητας μας, δίνοντας μία διαφορετική προσέγγιση στο πως ο απλός χρήστης αντιλαμβάνεται την αλληλεπίδραση του, τόσο με τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όσο και με το ίδιο το περιβάλλον. Πρόκειται ίσως για την πιο σημαντική καμπή στην ιστορία των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, η ένταξη και η οριστικοποίηση των Δικτύων 5G μέσα στο 2020, ώστε να καταστεί εφικτή η υλοποίηση μιας πληθώρας εφαρμογών, οι οποίες θα αλλάξουν μια για πάντα οτιδήποτε γνωρίζαμε για τον κόσμο μέχρι σήμερα. Εισερχόμενοι λοιπόν στη τρίτη δεκαετία του αιώνα της πληροφορίας, είμαστε αντιμέτωποι με ακριβώς αυτό, την εξαγωγή, ασφαλή μεταφορά και επεξεργασία της πληροφορίας. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία αναφερθήκαμε, έπειτα από μία σύντομη ιστορική αναδρομή, στις ανάγκες του χρήστη στη σύγχρονη εποχή, αλλά και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η τρέχουσα τεχνολογία για να φέρει εις πέρας την κάλυψη αυτών με την παροχή σύγχρονων και αξιόπιστων υπηρεσιών.

Συγκεκριμένα μελετήσαμε την κατά πάσα πιθανότητα, πυκνή ετερογενή μορφή ενός Δικτύου 5G, αποτελούμενο από σταθμούς βάσης Macrocell και μικρότερους σταθμούς τύπου Femtocell. Οι τελευταίοι μελετήθηκαν διεξοδικά ως προς τις δυνατότητες που μπορούν να προσφέρουν στο χρήστη, στα πλαίσια της επερχόμενης γενιάς δικτύων, την αρχιτεκτονική τους καθώς και τις πολιτικές πρόσβασης τους. Αναλυτικότερα μελετήθηκε το σενάριο στο οποίο η τοποθέτηση πολλών μικρών σταθμών βάσης τύπου Femtocell σε μία μικρή σχετικά γεωγραφική περιοχή, προκαλεί παρεμβολές στην επικοινωνία μεταξύ των χρηστών και προτάθηκε ένας τρόπος αντιμετώπισης με την χρήση τεχνικών ύπνωσης (Sleep Mode) αλλά και την Υβριδική πολιτική πρόσβασης των χρηστών στα Femtocell (Hybrid Access Mode). Τα πειραματικά δεδομένα με την βοήθεια του εργαλείου Matlab έδειξαν ότι η συνολική απόδοση των χρηστών εντός του Δικτύου βελτιώθηκε όταν ένας ικανοποιητικός αριθμός Femtocell εισήλθε σε κατάσταση ύπνου (Sleep Mode) και οι χρήστες του μετατέθηκαν στο αμέσως κοντινότερο Femtocell, που άνηκε στην ίδια ομάδα (cluster). Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε ότι για αυξανόμενο αριθμό χρηστών αλλά σταθερό αριθμό σταθμών βάσης τύπου Femtocell, αυξήθηκε ο αριθμός των Femtocell τα οποία εισήλθαν σε κατάσταση ύπνου (Sleep Mode). Από το παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο αλγόριθμος μας προσέφερε παρόμοιες υπηρεσίες στον τελικό χρήστη αλλά με σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Άλλη μία σημαντική παρατήρηση η οποία προέκυψε είναι ότι ομαδοποιώντας τους σταθμούς βάσης σε clusters αυξάνεται η απρόσκοπτη παροχή υπηρεσιών (QoS) του Δικτύου προς τον τελικό χρήστη. Πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι για αυξανόμενο αριθμό Femtocells τα οποία τοποθετούνται σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, δημιουργούνται περισσότερα clusters αλλά με την ύπαρξη, κατά μέσο όρο λιγότερων Femtocell ανά

cluster. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες “πηγές” παρεμβολών για τους χρήστες αφού όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο των πειραματικών δοκιμών, τα σήματα εκπομπής και λήψης των χρηστών μεταδίδονται σε μη επικαλυπτόμενες συχνότητες, εντός του cluster, αλλά η επαναχρησιμοποίηση της εν λόγω συχνότητας, μπορεί να γίνει κανονικά σε διαφορετικά clusters. Επομένως εντός του cluster ο μέσος αριθμός Femtocell που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του χρήστη μειώνεται ενώ αυξάνεται ο αριθμός των Femtocell που τοποθετούνται στο δίκτυο.

Εν κατακλείδι, η ολοένα και αυξανόμενη τάση για τοποθέτηση πολλών μικρών σταθμών βάσης τύπου Femtocell σε ένα πυκνό ετερογενές δίκτυο πέμπτης γενιάς, μπορεί να οδηγήσει σε ευεργετικά αποτελέσματα για το δίκτυο αν τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπιστούν σωστά (εικόνα 33), είτε στα αντίθετα αποτελέσματα από αυτά για τα οποία εξαρχής προτάθηκε. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, ήταν να μελετήσει για αυξανόμενο αριθμό χρηστών και Femtocell την συνολική απόδοση του δικτύου και να μετριάσει την συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Πως τα Small Cell λύνουν το πρόβλημα της πυκνοποίησης του δικτύου;



Εικόνα 33: Πως τα Small Cells λύνουν το πρόβλημα της πυκνοποίησης του Δικτύου.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Στο παρόν κεφάλαιο θα προτείνουμε πιθανές ερευνητικές και μελλοντικές μελέτες που πιθανόν να μπορούν να εφαρμοστούν και να επεκτείνουν την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Γενικότερα είναι δεδομένο ότι η επερχόμενη γενιά των 5G Δικτύων έχει βασιστεί σε αρκετά αρχικές εκδόσεις τεχνολογιών όπως η MIMO και η NR τεχνολογία. Όπως έχουμε διαπιστώσει στο κεφάλαιο της ιστορικής αναδρομής, κάθε ξεχωριστή γενιά δικτύων χαρακτηρίζεται από πρότυπα και πρωτόκολλα τα οποία μελλοντικά επεκτάθηκαν για να καλύπτουν τις εκάστοτε ανάγκες των χρηστών. Στις μέρες μας όπου οι ανάγκες αυξάνονται με εκθετικό ρυθμό, κρίνεται απαραίτητη η πρόβλεψη των αναγκών αυτών δημιουργώντας αλγόριθμους και τεχνολογίες οι οποίοι θα είναι επεκτάσιμοι βοηθώντας έτσι στην συνολική εξέλιξη των ασύρματων δικτύων.

Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία παρουσιάστηκαν χρήστες των οποίων η θέση παρέμενε στατική καθόλη τη διάρκεια της προσημείωσης. Στόχος μιας μελλοντικής εργασίας θα ήταν ένας μηχανισμός στον οποίο οι χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα πραγματικής κίνησης μέσα στο Δίκτυο. Αυτό βέβαια αποτελεί μια δύσκολη και επίπονη εργασία καθώς πρέπει να οριστεί νέος αλγόριθμος πρόβλεψης των κινήσεων του χρήστη, ώστε να είναι αποδοτικός ο τρόπος με τον οποίο θα γίνεται το Handover. Ωστόσο, τα αποτελέσματα και οι μηχανισμοί που θα προταθούν για τη συγκεκριμένη περίπτωση θα είναι σίγουρα πιο αποδοτικοί αφού μία προσομοίωση με δυναμικά κινούμενους χρήστες είναι πιο ρεαλιστική σε ότι αφορά το δομή ενός πυκνού ετερογενούς δικτύου.

Μία άλλη ιδέα που μπορεί να μελετηθεί περαιτέρω, είναι η ενσωμάτωση της τεχνολογίας MIMO, που ήδη αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των προγενέστερων γενεών ασύρματων δικτύων. Ωστόσο η έρευνα γύρω από την εν λόγω τεχνολογία βρίσκεται ακόμα σε προγενέστερο στάδιο στα 5G δίκτυα. Παρόλα αυτά με την πάροδο του χρόνου ευελπιστούμε ότι θα καταστεί δυνατό, οι κυψελοειδής σταθμοί βάσεις να μπορούν να την εκμεταλλευτούν και κατά συνέπεια οι χρήστες, να μπορούν να εξυπηρετηθούν με πολλαπλάσια υψηλότερες ταχύτητες.

Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τρισδιάστατη αρχιτεκτονική των δικτύων 6G τα οποία όπως γίνεται αντιληπτό βρίσκονται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο έρευνας. Στην εν λόγω αρχιτεκτονική προτείνεται η χρήση εναέριων μέσων ως σταθμούς βάσης, με στόχο την αύξηση της περιοχής κάλυψης των ήδη υπάρχων κυψελοειδών δικτύων. Οι εναέριοι αυτοί σταθμοί αναμένεται να τοποθετούνται σε drones, αερόστατα ή ακόμα και δορυφόρους, προσφέροντας καλύτερη κάλυψη στο χρήστη καθώς και πολλαπλάσιες ταχύτητες αποστολής και λήψης δεδομένων. Αναμένεται να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια έκτακτης ανάγκης σε τομείς όπως η τηλεϊατρική, για ένα έκτακτο χειρουργείο ή σε χώρους που αναμένεται η ύπαρξη πολλών χρηστών ταυτόχρονα για περιορισμένο χρονικό διάστημα, για παράδειγμα σε μία επικείμενη συναυλία. Η μελέτη συνύπαρξης των παραπάνω σταθμών βάσης με αυτούς που

μελετήθηκαν εκτενώς στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, δηλαδή τα Femtocell, αποτελεί μία μελλοντική ερευνητική εργασία η οποία φαντάζει εξαιρετικά μακριά, αλλά δεν είναι.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_network
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Guglielmo_Marconi#Radio_work
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/2G>
- [5] Shim, J.P., Varshney, U., Dekleva, S. and Knoerzer, G. (2006) 'Mobile and wireless networks: services, evolution and issues', Int. J. Mobile Communications, Vol. 4, No. 4, pp.405–417.
- [6] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/5G_NR_frequency_bands
- [8] S. Kavanagh, 'What is enhanced Mobile Broadband (eMBB)', <https://5g.co.uk/guides/what-is-enhanced-mobile-broadband-emb/>
- [9] M. H. Alsharif, and R. Nordin, 'Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells', Telecommunication Systems Journal, Springer, vol. 64, no. 4, pp. 617-637, 2017.
- [10] https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/public-policy/position_paper_5g_applications.pdf
- [11] <https://www.cnn.gr/tech/story/200584/vodafone-poes-einai-oi-protos-efarmoges-poy-tha-axiopoioyn-to-5g>
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/C-RAN>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell
- [14] <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/cran/>
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Picocell>
- [16] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcell>
- [17] Saleem, Shahryar & Haneef, Muhammad. (2016). A Review of Techniques to Avoid Cross-tier and Co-tier Interference in Femtocell Networks. Journal of Engineering Research. 4. 57-84.
- [18] C. Bouras, G. Diles and D. Ntoutsos, "Sleep Mode Strategies for Dense Small Cell 5G Networks," 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Moscow, Russia, 2018, pp. 1-6.

- [19] S. Bassooy, H. Farooq, M. A. Imran and A. Imran, "Coordinated Multi-Point Clustering Schemes: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 743-764, Secondquarter 2017.
- [20] Bouras C., Diles G. (2017) Distributed Sleep Mode Power Control in 5G Ultra Dense Networks. In: Koucheryavy Y., Mamatas L., Matta I., Ometov A., Papadimitriou P. (eds) *Wired/Wireless Internet Communications. WWIC 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol 10372. Springer, Cham
- [21] Ashraf, F. Boccardi and L. Ho, "SLEEP mode techniques for small cell deployments," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 8, pp. 72-79, August 2011.
- [22] Bouras C., Diles G., Moulias T. (2018) Energy Savings in Power Control for 5G Dense Femtocells. In: Barolli L., Xhafa F., Conesa J. (eds) *Advances on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications. BWCCA 2017. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 12. Springer, Cham
- [23] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Latva-aho, "Dynamic clustering and sleep mode strategies for small cell networks," in *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*, Aug 2014, pp. 934–938.
- [24] S. Ali, M. Ismail, and R. Nordin, "Femtocell sleep mode activation based interference mitigation in twotier networks," *Procedia Technology*, vol. 11, pp. 1088 – 1095, 2013, 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics, {ICEEI} 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313004520>
- [25] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2010.
- [26] H. Lei, L. Zhang, X. Zhang, and D. Yang, "A novel multi-cell OFDMA system structure using fractional frequency reuse," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, 2007, pp. 1–5.
- [27] P. Lee, T. Lee, J. Jeong, and J. Shin, "Interference management in LTE femtocell systems using Fractional Frequency Reuse," in *12th International Conference on Advanced Communication Technology 2010 (ICACT'10)*, vol. 2, 2010, pp. 1047–1051.
- [28] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, M. Zorzi, "Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies," Accepted paper for publication at the *IEEE Communications Magazine*, 2020