



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάπτυξη Τεχνικών Συντονισμού
Συστάδων Femtocells σε 5G δίκτυα»

ΝΙΚΟΛΑΡΕΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

A.M 4505

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ 2018

Ευχαριστίες

Αρχικά, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα, για την καθοδήγηση που μου παρείχε σε ολόκληρο το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, την ευκαιρία να ασχοληθώ και να συνεργαστώ με την επιστημονική του ομάδα με ένα ιδιαίτερος ενδιαφέρον και καινοτόμο θέμα, καθώς, επίσης, για τις γνώσεις, που μου μετέδωσε στην πενταετή μου πορεία στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής.

Ιδιαίτερος θέλω να ευχαριστήσω για την συνεχή καθοδήγηση και αμέριστη συμβολή στην εκπόνηση της Διπλωματικής αυτής Εργασίας, τον Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής Γεώργιο Δηλέ. Χωρίς την συνεχή επικοινωνία και υπομονετική συνδρομή του θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο των διδασκόντων του τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής για την προσφορά τους και τον ζήλο τους να μεταδώσουν την αγάπη τους για την Επιστήμη της Πληροφορικής σε όλους τους σπουδαστές, και σε μένα προσωπικά, του τμήματος, διατηρώντας σε υψηλό επίπεδο το κύρος του Τμήματος, αλλά και κατ'επέκταση το επίπεδο σπουδών του Ελληνικού Δημόσιου Πανεπιστημίου.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να λησμονήσω να ευχαριστήσω εγκάρδια την οικογένεια μου, χωρίς την στήριξη των οποίων δεν θα είχα ολοκληρώσει τις σπουδές μου, τους φίλους μου και ιδιαίτερος τη Νίνα, τη φίλη μου που με υποστήριξε όσο κανένας στην προσπάθεια να επιτύχω την λήψη του διπλώματος του τμήματος.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

Νικολαρέας Κωνσταντίνος

Περίληψη

Η ασύρματη επικοινωνία και η δικτύωση των χρηστών του διαδικτύου σε υψηλές ταχύτητες υλοποιείται μέσω προτύπων που έχουν απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα. Στο κοντινό μέλλον τον ρόλο αυτόν αναμένεται να παίζει το πολυαναμενόμενο 5G και οι υψηλού επιπέδου υπηρεσίες που θα προσφέρει. Παράλληλα με την αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερες ταχύτητες διακίνησης δεδομένων μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας, παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση στη χρησιμοποίηση ασύρματων συσκευών (smartphones, tablets, gadgets), καθώς και στην ανάγκη για πρόσβαση ανά πάσα στιγμή, σε οποιοδήποτε μέρος. Αναδεικνύεται συνεπώς το ζήτημα της αντιμετώπισης της κάλυψης σήματος σε εσωτερικούς ή δυσπρόσιτους χώρους, ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα, όπου οι σχετικές πυκνότητες σταθμών αλλά και χρηστών είναι ιδιαίτερα απαιτητικές.

Την πρόκληση της κάλυψης του δικτύου σε οποιαδήποτε συνθήκη αντιμετωπίζει η εγκατάσταση small cells. Τα small cells προσφέρουν αυξημένη κάλυψη και χωρητικότητα, αναβαθμίζοντας την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου, ενώ παράλληλα διέπονται από συγκεκριμένες πολιτικές πρόσβασης. Η δημιουργία ετερογενών δικτύων αποτελούμενα από small cells μπορεί να αποτελεί μια ιδιαίτερα χρηστική λύση, εγείρει όμως ζητήματα και εμπόδια προς αντιμετώπιση. Τέτοια είναι η απόδοση των χρηστών, η συνεννόηση σε επίπεδο πρόσβασης μεταξύ των αυτών και η αντιμετώπιση των παρεμβολών που ενδέχεται να αποτελέσουν κεντρικό πρόβλημα σε τέτοιου τύπου πυκνές διατάξεις.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα αναλύσουμε τα ετερογενή κυτταρικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν σταθμούς femtocells και macrocells σε πυκνό αστικό περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της τεχνολογίας LTE και LTE-Advanced, θα προσομοιώσουμε την λειτουργία τέτοιων διατάξεων, καθώς και την συμπεριφορά των χρηστών που συμπεριλαμβάνονται σε αυτές με την κατασκευή ενός κατάλληλου traffic model.

Το αντικείμενο που μας απασχόλησε είναι ο εμπλουτισμός με την προσομοίωση της χρήσης των χρηστών, ενός ήδη υπάρχοντος αλγορίθμου που διαχειρίζεται τον συντονισμό της λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης.

Σκοπός μας είναι να επιβεβαιώσουμε τα οφέλη της εφαρμογής του αναφερόμενου αλγορίθμου σε αληθοφανή σενάρια χρήσης, με απώτερο στόχο την διαχείριση της απόδοσης και την αντιμετώπιση του ζητήματος των παρεμβολών σε ετερογενή πυκνά αστικά δίκτυα.

Λέξεις Κλειδιά: heterogeneous network, small cell, femtocell, macrocell, traffic model, DBMAP, IPP, hybrid access, sleep mode, cluster

Abstract

The upcoming 5G networks require an advanced planning in terms of coordinating various mechanisms to achieve the highly expected performance growths that they pledge. This coordination becomes more challenging due to the increased density in urban environments of the deployment of small radius base stations, such as femtocells. While promised to increase the performance of the base station owners, an adaptation of a femtocell might result to interference issues for the neighboring users and an entire downfall for all the subscribers in the regarding area. In order to surpass these obstacles, in this thesis we test our proposed mechanism for sleep mode power control in femtocell networks, over a widely used simulated traffic model, adjusted to our scenario. With the addition of the aforementioned traffic model we enrich the results of the mechanism that is utilized, as we are offering a more realistic and adjusted approach to the whole scheme. Our sleep mode strategy has been developed for femtocell clusters with the goal of reducing the number of operating femtocells without compromising the data rate performance of their subscribers. In order to persuade the femtocells' owners to accept our hybrid access policy and allow external users to be served by their femtocell, we offer counters, such as guaranteeing that everyone's performance will be maintained or even improved. Our simulations reaffirm the benefits of our algorithm, especially the reduced number of operating femtocells and the increased offered capacity, when tested in realistic environments.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή 12

2. Κινητά Δίκτυα

2.1 Εισαγωγή 16

2.2 Εξέλιξη Κυψελωτών Δικτύων 17

2.2.1 Πρώτη (1G) Γενιά Δικτύων 17

2.2.2 Δεύτερη Γενιά Κινητών Δικτύων (2G) 18

2.2.3 Τρίτη Γενιά Κινητών Δικτύων (3G) 20

2.3 Τέταρτη Γενιά Κινητών Δικτύων (4G) 23

2.3.1 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access) 26

2.3.2 LTE-Advanced (Long Term Evolution -Advanced) 27

2.4 Δίκτυα Επόμενης Γενιάς 5G 29

2.4.1 Στόχοι του 5G 30

2.4.2 Προκλήσεις 32

3. Ετερογενή Δίκτυα

3.1 Εισαγωγή 34

3.2.1 Τύποι Small Cells 35

3.2.1 Τύποι των Small Cells 37

3.2.2 Χαρακτηριστικά των Small Cells	38
3.3 Femtocells	41
3.3.1 Τεχνολογία και Αρχιτεκτονική	42
3.3.2 Σενάρια λειτουργίας	46
3.3.3 Πολιτικές Πρόσβασης χρηστών	48
3.3.4 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις	51
3.3.4.1 Τύποι Παρεμβολών	55
4. Αλγόριθμος βελτίωσης απόδοσης χρηστών σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα	
4.1 Εισαγωγή	57
4.2 Περιγραφή Παραμέτρων Μηχανισμού	61
4.2.1 Traffic Model	62
4.2.2 Λογική Αλγόριθμου (User Allocation Mechanism)	67
4.2.3 4IPP DBMAP Traffic Model	71
5. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα	
5.1 Περιβάλλον και Παράμετροι Προσομοίωσης	74
5.2 Πειραματικά αποτελέσματα	78
6. Μελλοντική εργασία	82
Ακρωνύμια	84
Βιβλιογραφία	90

Κατάλογος εικόνων

1.1 Ετήσια διαδικτυακή χρήση ανά μήνα , σύμφωνα με την Cisco (Exabytes/ Μήνα)

2.1 Αρχιτεκτονική του UMTS

2.2 Εξέλιξη των κινητών δικτύων

2.3 Σύγκριση ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων 3G, 3GHSPA+,LTE, LTE-A

2.4 Παράδειγμα MIMO για 4 πομπούς και 2 δέκτες

2.5 Στόχοι και απαιτήσεις για το 5G

2.6 Παράδειγμα εισχώρησης του 5G σε μελλοντικές εφαρμογές

3.1 Τύποι και χαρακτηριστικά Small Cells

3.2 Στοιχεία αναφοράς femtocell όπως ορίζονται από το Femto Forum

3.3 Γενική Αρχιτεκτονική femtocell

3.4 Οικιακό femtocell

3.5 Fixed Relay και Mobile Femtocells

3.6 Πολιτικές Πρόσβασης Femtocell

3.7 Παγκόσμια μεγέθη αγοράς Femtocell 2012 -2020

3.8 Τύποι παρεμβολών στα Femtocells

4.1 Ετερογενή δίκτυα 5G

4.2 Handover σε 5G δίκτυο

4.3 Χρονική κατανομή ON και OFF περιόδων σε ένα διαδικτυακό session

4.4 Τυπικό ON OFF μοντέλο

4.5 Αλυσίδα Markov IPP διαδικασιών

5.1 Στιγμιότυπο του δικτύου

5.2 Αριθμός σταθμών βάσης που τέθηκαν σε sleep mode ανά πυκνότητα κατανομής

5.3 CDF εγγεγραμμένων χρηστών σε femtocell clusters

5.4 Data rate χρηστών macrocell σε εμβέλεια

Κατάλογος πινάκων

4.1 Πιθανότητες μεταβάσεων 4IPP ανά μονάδα χρόνου

5.1 Παράμετροι Προσομοιώσεων

1. Εισαγωγή

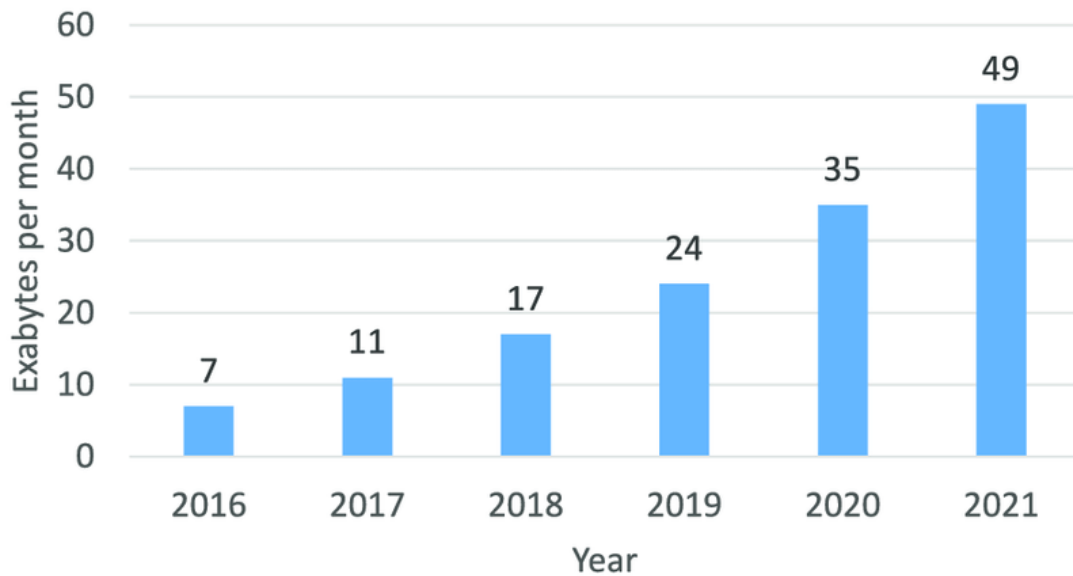
1.1 Εισαγωγή

Η πρώτη γενιά ασύρματων δικτύων, γνωστή και ως 1G (First Generation), εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 80. Προσέφερε κυρίως υπηρεσίες φωνής, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αναλογικής μετάδοσης σήματος. Η δεύτερη γενιά δικτύων (2G) έκανε την εμφάνισή της στα τέλη της ίδιας δεκαετίας, ενώ για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή μετάδοση δεδομένων. Ένα χαρακτηριστικό αυτής της γενιάς αποτέλεσε η κινητικότητα των χρηστών, η οποία έπρεπε και να είναι ελάχιστη προκειμένου να μπορεί να υπάρχει εξυπηρέτηση. Βελτίωση από την σκοπιά της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων αποτέλεσε μια ενδιάμεση γενιά, η 2.5G. Η τρίτη γενιά (3G), προσέφερε υψηλότερες ταχύτητες, οι οποίες συνδυάστηκαν με μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης των χρηστών.

Στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας πραγματοποίησε την εμφάνισή του το 4G ή LTE, το οποίο με την σειρά του εγκαινίασε αναβαθμισμένες ταχύτητες πρόσβασης καθώς και ένα νέο σύνολο υπηρεσιών. Παράλληλα, εισάγοντας καινοτόμες τεχνικές διαμόρφωσης, αύξησε την χωρητικότητα και την ταχύτητα του δικτύου, ικανοποιώντας και τους πιο απαιτητικούς χρήστες. Η πέμπτη γενιά κινητών δικτύων 5G, θα είναι η επόμενη και αναμένεται να αποτελέσει μια ουσιαστική αναβάθμιση της 4ης γενιάς υλοποιώντας σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες, αυξημένη πυκνότητα χρηστών, χαμηλότερη καθυστέρηση, εξοικονόμηση ενέργειας, μεγαλύτερη αξιοπιστία και ολοκληρωμένη επικοινωνία μεταξύ συσκευών.

Η αλματώδης αύξηση της κίνησης στα σύγχρονα δίκτυα σε συνδυασμό με τις ολοένα αναβαθμισμένες απαιτήσεις οδηγούν σε συνεχείς βελτιώσεις των υπηρεσιών που παρέχονται στους χρήστες κάθε είδους. Μια ενδεικτική εικόνα της σχετικής αύξησης της παγκόσμιας χρήσης περιγράφεται στην εικόνα 1.1, όπου απεικονίζεται η ετήσια διαδικτυακή χρήση ανά μήνα, σύμφωνα με την Cisco (Exabytes/ Μήνα). Είναι προφανές ότι η αλματώδης αύξηση της ζήτησης των χρηστών δημιουργεί μια απαιτητική πραγματικότητα στην οποία τα σύγχρονα δίκτυα οφείλουν να ανταποκριθούν.

Στα πλαίσια των αυτονοήτων πλέον απαιτήσεων των χρηστών ανακύπτει και το ζήτημα της κάλυψης του δικτύου κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες. Είτε πρόκειται για εσωτερικούς χώρους κτηρίων, είτε για εταιρική χρήση σε πυκνό περιβάλλον με πολλαπλούς χρήστες, είτε για ιδιωτική χρήση σε οποιοδήποτε γεωγραφικό και χωρικό σημείο, οι απαιτήσεις για αυξημένη και πλήρη κάλυψη είναι δεδομένες και αποτελούν βασικό συστατικό της ποιοτικής αξιολόγησης ενός ασύρματου δικτύου. Την σχετική ανάγκη έρχονται να καλύψουν τα small cells, προσφέροντας πρόσβαση κάτω από μια ποικιλία συνθηκών. Τα small cells είναι σταθμοί ασύρματης κυψελοειδούς πρόσβασης, οι οποίοι λειτουργούν σε αδειοδοτημένο ή μη φάσμα και επιτυγχάνουν την εξυπηρέτηση ενός συγκεκριμένου αριθμού χρηστών, ανάλογα με τη κλίμακα της περιοχής που πρόκειται να καλυφθεί και τις σχετικές απαιτήσεις.



Εικόνα 1.1 Ετήσια διαδικτυακή χρήση ανά μήνα , σύμφωνα με την Cisco (Exabytes/ Μήνα)

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία small cell είναι τα femtocell, τα οποία εξυπηρετούν χρήστες σε μικρή εμβέλεια, επιτυγχάνοντας παράλληλα χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Εγκαθίστανται συνήθως από τον χρήστη και εξυπηρετούν περίπου 4 – 16 χρήστες, σε αποστάσεις που κυμαίνονται στα 20 με 50 μέτρα. Υλοποιούν διάφορες τεχνολογίες λειτουργίας και πρόσβασης, τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε και στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Αυτές οι δυνατότητές τους, τα καθιστούν ικανά να προσαρμόζονται στις παραμέτρους του κάθε δικτύου.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα επεκτείνουμε τα αποτελέσματα ενός αλγορίθμου κατανομής χρηστών με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης, την μείωση των παρεμβολών και της καλύτερης ενεργειακής διαχείρισης, με την παράμετρο της προσομοίωσης της διαδικτυακής χρήσης των χρηστών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατασκευής ενός traffic model το οποίο προσδίδει μια επιπλέον αξιοπιστία στα πειραματικά αποτελέσματα του αλγορίθμου που προκύπτουν.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η εξέλιξη των κινητών δικτύων, η οποία καταλήγει σε μια περιγραφή της τελευταίας γενιάς δικτύων 5G, η οποία και αναμένεται να αρχίσει να υλοποιείται στις αρχές της επόμενης δεκαετίας.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά των small cells, τους σκοπούς και τις ανάγκες που καλύπτουν, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που ανακύπτουν κατά την χρήση τους. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα Femtocells, παρουσιάζοντας εκτενώς τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες λειτουργίας τους, αφού χρησιμοποιούνται εκτενώς στις προσομοιώσεις στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα βασικά μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των χρηστών ενός δικτύου και η σημαντικότητα που διέπει αυτά τα μοντέλα στα πλαίσια της πρόβλεψης και της παρακολούθησης της διαδικτυακής χρήσης. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται το traffic model που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας, το οποίο βασίζεται στα πλέον διαδεδομένα μοντέλα προσομοίωσης κίνησης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται συνολικά ο αλγόριθμος ο οποίος κατανέμει τους χρήστες στους σταθμούς βάσης femtocells, εκμεταλλεύμενος την συμπεριφορά τους και τις δυνατότητες παραμετροποίησης των femtocells.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται εκτενής παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που εκπονήθηκαν, με σκοπό την αξιολόγηση των μετρικών και των παραμέτρων που επιλέχθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 7 προτείνονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας, με την εισαγωγή παραμέτρων οι οποίες δεν έχουν συμπεριληφθεί στην μέχρι τώρα έρευνα.

Τέλος, περιέχεται παράρτημα ακρωνυμίων τα οποία χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και ακολουθεί η παράθεση των βιβλιογραφικών αναφορών.

2. Κινητά Δίκτυα

2.1 Εισαγωγή

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας. Σε όλα τα επίπεδα της κοινωνικής ζωής, η παρουσία των κινητών δικτύων είναι διαδεδομένη. Παράλληλα, η πρωτοφανής αύξηση του αριθμού των κινητών τηλεφώνων, των φορητών συσκευών πάσης φύσεως που συνδέονται στο διαδίκτυο και των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας οδηγεί σε νέες προκλήσεις και στόχους κάθε γενιά δικτύων. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στις πρώτες γενιές κινητών δικτύων, με την μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στα δίκτυα 4ης γενιάς και στα δίκτυα 5ης και τελευταίας γενιάς τα οποία θα μας απασχολήσουν τα επόμενα χρόνια.

2.2 Εξέλιξη Κυψελωτών Δικτύων

2.2.1 Πρώτη (1G) Γενιά Δικτύων

Η πρώτη γενιά αναλογικών κινητών συστημάτων εμφανίστηκε για πρώτη φορά στην Αμερική το 1983. Αποτελείτο από την τεχνολογία AMPS (Advanced Mobile Phone Systems) η οποία υλοποιήθηκε από τα εργαστήρια της εταιρείας Bell [1]. Η Ομοσπονδιακή επιτροπή επικοινωνιών (FCC) παρείχε για το AMPS 40MHz φάσματος από τα 800MHz που διατίθεντο ενώ παράλληλα εξασφάλιζε εξυπηρέτηση σε απόσταση 2100 τετραγωνικών μιλίων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο ρυθμός δεδομένων (data rate) που προσφερόταν έφτανε τα 10kbps, ενώ υπήρχαν 832 διαθέσιμα κανάλια.

Κατά την αρχική εφαρμογή της τεχνολογίας AMPS, οι κεραιές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν προς πάσα κατεύθυνση (omnidirectional), ενώ στην συνέχεια έδωσαν την θέση τους σε κατευθυντήριες (directional), επιτυγχάνοντας βελτιωμένη επαναχρησιμοποίηση κυψέλης [2]. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι οι μεταδόσεις από τους σταθμούς βάσης προς τα κινητά συστήματα υλοποιούνταν με συχνότητες που κυμαίνονταν ανάμεσα στα 869 και στα 894 MHz, ενώ οι μεταδόσεις από τα κινητά στους σταθμούς βάσεις στα 824 και στα 849 MHz.

Την ίδια χρονιά, στην Ευρώπη εμφανίστηκε η τεχνολογία TACS (Total Access Communication System), που ουσιαστικά αποτελούσε μια παραλλαγή του AMPS. Το TACS χρησιμοποιούσε 1000 κανάλια και μετά από αναπροσαρμογές, ανέπτυξε ρυθμό δεδομένων της τάξης των 8kbps. Και οι δύο τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν την τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας (FM) και τη μέθοδο FDMA (Frequency Division Multiple Access) για την πρόσβαση καναλιών.

Σε γενικές γραμμές, η πρώτη γενιά κινητών δικτύων έθεσε τα θεμέλια για τις μετέπειτα γενιές, μέσω καινοτομιών, όπως η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων χωρίς παρεμβολές μέσω γεωγραφικού διαχωρισμού, το συντονισμένο δίκτυο για απρόσκοπτη πρόσβαση και κινητικότητα, καθώς και το αδειοδοτημένο φάσμα για την αποκλειστική χρήση του από τις κινητές τεχνολογίες.

Παρόλα αυτά, το αναλογικό σήμα μετάδοσης που χρησιμοποιούνταν οδηγούσε σε ανεπάρκειες, λόγω περιορισμένου φάσματος, μη ασφαλής μετάδοσης χαμηλής χωρητικότητας, χαμηλής ποιότητας ήχου και γενικά πολύ χαμηλό επίπεδο αποδοτικότητας φάσματος. Με αυτά τα χαρακτηριστικά να χαρακτηρίζουν την πρώτη γενιά, η εξέλιξη στα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς κρίθηκε γρήγορα αναγκαία [3].

2.2.2 Δεύτερη Γενιά Κινητών Δικτύων (2G)

Το πέρασμα στη δεύτερη γενιά χαρακτηρίζεται από το ότι τα συστήματα πλέον είναι ψηφιακά, σε αντίθεση με τα συστήματα πρώτης γενιάς. Βασικές τεχνολογίες που συνέβαλλαν στη γενικότερη εξέλιξη αυτής της γενιάς, είναι οι τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης TDMA (Time Division Multiple Access) και CDMA (Code Division Multiple Access). Η βελτιωμένη απόδοση φάσματος επέτρεψε αναβαθμισμένη ασύρματη διείσδυση, ενώ παράλληλα δόθηκε για πρώτη φορά η δυνατότητα υπηρεσιών δεδομένων στα κινητά, όπως για παράδειγμα τα μηνύματα κειμένου, τα μηνύματα εικόνας και πολυμέσων (MMS). Χαρακτηριστική αναβάθμιση αποτέλεσε η ταχύτητα δεδομένων, η οποία έφτασε τα 64kbps, ενώ καινοτομίες έκαναν την εμφάνισή τους, όπως για παράδειγμα ένα νέο σχέδιο για την ελάττωση του φορτίου στα κινητά κέντρα μεταγωγής (Mobile Switching Centers). Σημαντική προσθήκη αποτέλεσε το handover, ένας μηχανισμός μεταβίβασης μιας συνεδρίας δεδομένων από έναν σταθμό βάσης σε έναν άλλο, χωρίς διακοπή της συνεδρίας. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο των σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών.

Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι, παρόλο που τα συστήματα δεύτερης γενιάς έχουν παγκοσμίως αρχίσει να μπαίνουν σε διαδικασία τερματισμού, σε σχέση με τα συστήματα πρώτης γενιάς αποτέλεσαν μια ουσιαστική αναβάθμιση. Η για την εποχή αυξημένη αποδοτικότητα φάσματος, οι καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και η προηγμένη περιαγωγή εγγαίניהσαν μια ολοκληρωτικά πρωτόγνωρη αλλαγή στις μεθόδους επικοινωνίας.

Η δεύτερη γενιά δικτύων εισήγαγε μια σειρά από συστήματα τα οποία εισήγαγαν υπηρεσίες και δυνατότητες που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως και με μεγάλη επιτυχία.

Η τεχνολογία GSM αποτελεί το επικρατέστερο πρότυπο στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, ενώ έκανε την εμφάνισή της στις αγορές το 1991 στην Φινλανδία [4]. Αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) και υποστηρίζει 8 χρήστες για κάθε κανάλι με συχνότητα στα 200KHz. Η συχνότητα ανοδικής ζεύξης του δικτύου κυψέλλης από το σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό είναι μεταξύ 890 και 915MHz και η συχνότητα καθοδικής ζεύξης είναι μεταξύ 935 και 960MHz. Ο διαχωρισμός του φέροντος σήματος για την τεχνολογία GSM είναι 200KHz και το εύρος ζώνης του GSM αντιστοιχεί στα 25MHz.

Βασικό χαρακτηριστικό του GSM είναι η κάρτα SIM (Subscriber Identity Module), η οποία περιέχει τα στοιχεία συνδρομής του χρήστη, αλλά μπορεί να υποστηρίξει και την αποθήκευση της λίστας επαφών του χρήστη. Οι δημοφιλέστερες υπηρεσίες που εισήγαγε το GSM είναι η υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων (SMS), το fax, οι κλήσεις έκτακτης ανάγκης, το videotext και το teletext.

Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι το 2008 το GSM έφτασε τους 6 δισεκατομμύρια χρήστες. Η καθολική χρήση του εξηγείται από την πληθώρα πλεονεκτημάτων που συγκεντρώνει. Μερικά από αυτά είναι η ευελιξία φάσματος με τις υπάρχουσες υποδομές δικτύου ώστε να προσφέρεται διαθεσιμότητα στις συσκευές για χρήση διαφορετικών ζωνών φάσματος, η εγγενής προστασία φωνητικών και λοιπών δεδομένων καθώς και η δυνατότητα διεθνούς περιήγησης σε 219 χώρες, χαρακτηριστικό το οποίο εμφανίστηκε πρώτη φορά στα κινητά δίκτυα. Η τελευταία αυτή δυνατότητα προσέφερε προσβασιμότητα και εκτός συνόρων, η οποία και εξαιτίας της συνεργασίας μεταξύ των κοινοτήτων GSM στις διαθέσιμες χώρες, συντέλεσε στη διατήρηση των τελών περιαγωγής σε προσιτές τιμές για τους χρήστες.

Οι συνεχείς αναβαθμίσεις της τεχνολογίας GSM οδήγησαν στη δημιουργία μιας ενδιάμεσης γενιάς δικτύων η οποία ονομάστηκε 2.5G. Οι δυνατότητες που ήταν πλέον διαθέσιμες προς τους χρήστες ήταν σε παραπλήσιο επίπεδο με αυτό των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς. Οι σχετικές τεχνολογίες οι οποίες χαρακτήρισαν τη γενιά 2.5G είναι: η High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD), η General Packet Radio Services (GPRS) και η Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE).

Το GPRS υποστηρίζει ασύρματες υπηρεσίες δεδομένων όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail) και η πρόσβαση στο internet [5], ενώ συντέλεσε και στη βελτιστοποίηση της φωνητικής χωρητικότητας. Το GPRS επιτυγχάνει λήψη ρυθμού δεδομένων μέχρι και 115kbps, αραιετά βήματα μπροστά από τις ανάλογες τεχνολογίες της εποχής που είχαν μέσο όρο ρυθμού λήψης δεδομένων 40-50kbps.

Τελευταία σημαντική τεχνολογία της δεύτερης γενιάς δικτύων στην οποία θα αναφερθούμε, είναι η τεχνολογία EDGE, η οποία προτάθηκε για πρώτη φορά στο Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) το 1997 σαν εξέλιξη του GSM και ξεκίνησε να είναι εμπορικά διαθέσιμη στις ΗΠΑ το 2003. Χαρακτηριστικό είναι το ότι η EDGE συχνά αναφέρεται και σαν 2.75G και δίνει στα δίκτυα GSM τη δυνατότητα να προσφέρουν υπηρεσίες 3G, δηλαδή της επόμενης γενιάς δικτύων. Η ανάπτυξη της επέτρεψε μετάδοση μεγάλης ποσότητας δεδομένων που έφτασε ρυθμό μέχρι και 472 kbps.

2.2.3 Τρίτη Γενιά Κινητών Δικτύων (3G)

Η συντριπτική αύξηση των χρηστών κινητών συσκευών, σε συνδυασμό με την συνεχή εξέλιξη των προσφερόμενων υπηρεσιών οδήγησε γρήγορα σε ανάγκες για μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων, κάλυψη σε οποιοδήποτε σημείο και οποιαδήποτε χρονική στιγμή επιθυμεί ο χρήστης. Τα παραπάνω αποτέλεσαν κεντρική στοχοθεσία της 3ης γενιάς κινητών δικτύων.

Αναλύοντας τα βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων της τρίτης γενιάς, μπορούμε να αναφέρουμε τις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, την πρόσβαση σε προηγμένα συστήματα και υπηρεσίες πολυμέσων (multimedia), για πρώτη φορά σε τέτοιο επίπεδο και τις αναβαθμισμένες, παγκόσμιας εμβέλειας, δυνατότητες περιαγωγής (roaming).

Πιο συγκεκριμένα, τα 3G δίκτυα υποστηρίζουν ταυτόχρονη χρήση υπηρεσιών φωνής και δεδομένων, ενώ πλέον οι ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων φτάνουν τα 2 Mbps. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει την δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών όπως κλήσεις βίντεο, μηνυμάτων πολυμέσων (Multi Media Messaging Services - MMS), υποστήριξης τρισδιάστατων παιχνιδιών, καθώς και πολλαπλών παικτών (3D gaming και Multi-Player-Gaming), καθώς και υπηρεσίες κινητού διαδικτύου (mobile internet), τις οποίες οι εταιρείες ξεκινάνε να προσφέρουν σε ευρεία κλίμακα κατά την περίοδο ανάπτυξης της 3ης γενιάς δικτύων.

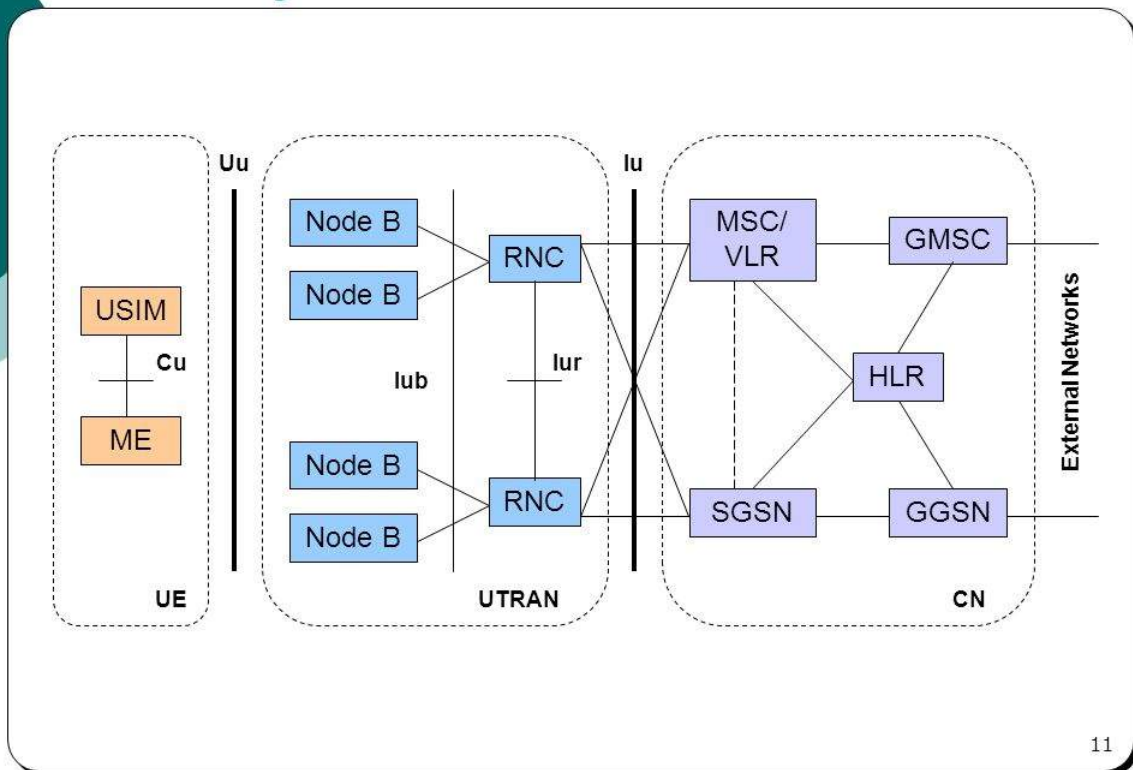
Επιπρόσθετα, οι μεταφορές μεγάλων αρχείων είναι πλέον πιο εφικτές, ενώ κάνουν την εμφάνισή τους και σύνθετες υπηρεσίες (π.χ. triple-play services), που θα ήταν αδύνατο να υποστηριχθούν στο παρελθόν.

Αρχικά επιχειρήθηκε να επικρατήσει ένα παγκόσμιο πρότυπο για τις τεχνολογίες των δικτύων 3ης γενιάς. Παρόλα αυτά, επιμέρους ανταγωνισμοί κατέστησαν αυτό το σχέδιο αδύνατο, αλλά στη συνέχεια, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) καθόρισε εντέλει ένα πλαίσιο απαιτήσεων που οριοθέτησε μια συλλογή προτύπων για τα δίκτυα 3G, ονομαζόμενη και ως Διεθνείς Τηλεπικοινωνίες-2000 (IMT-2000) [6]. Το IMT-2000 παρέχει παγκόσμιες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων, χρησιμοποιώντας μια ενιαία παγκόσμια ζώνη συχνοτήτων στα 2000MHz. Οι απαιτήσεις που καθορίστηκαν για τα IMT-2000, εκτός των άλλων όριζαν την υψηλή απόδοση φάσματος, υψηλές ταχύτητες δεδομένων μέχρι 2Mbps, την ενσωμάτωση των δορυφορικών και επίγειων συστημάτων με στόχο παγκόσμια κάλυψη, την χρήση σε όλα τα ραδιοφωνικά περιβάλλοντα (ασύρματο, κυψελοειδές, δορυφορικό), μεγάλο φάσμα τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (φωνή, δεδομένα, πολυμέσα, διαδίκτυο), καθώς και την υποστήριξη της μετάδοσης πακέτων (PS – Packet Switched) όσο και της μετάδοσης δεδομένων (CS- Circuit Switched)[7].

Στα πλαίσια του IMT-2000 εντάχθηκαν μια σειρά από πρότυπα: το Σύστημα Παγκόσμιας Κινητής Τηλεπικοινωνίας (UMTS, επίσης αναφερόμενο ως Σχέδιο Σύμπραξης Τρίτης Γενιάς – 3GPP) που καθιερώθηκε στην Ευρώπη και αντίστοιχα στην Αμερική, το CDMA 2000 (που αναφέρεται ως Σχέδιο Συνεργασίας Τρίτης Γενιάς – 3GPP2) [8].

Το πρώτο εμπορικό UMTS δίκτυο μεγάλης κλίμακας υλοποιήθηκε πρώτα στην Ιαπωνία το 2001 και ακολούθησε η Αυστρία το 2002. Το UMTS δεσμεύει ένα κανάλι εύρους ζώνης 5 MHz (σε αντίθεση με το CDMA2000 που δεσμεύει μόνο 1.5MHz) και υποστηρίζει την ταυτόχρονη μεταφορά πάνω από 100 φωνητικών κλήσεων και ταυτόχρονα δεδομένων με ταχύτητες πάνω από 2Mbps. Οι κινητές συσκευές απέκτησαν για πρώτη φορά τέτοια πληθώρα δυνατοτήτων και αξιόπιστων εφαρμογών. Παράλληλα, η ανάπτυξη του UMTS προσέφερε σταθερές υποδομές δικτύου και βασίστηκε σε στοιχεία από το Δίκτυο Κορμού (Core Network- CN) του GSM όπου παρέχονται υπηρεσίες GPRS.

UMTS System Architecture



Εικόνα 2.1 Αρχιτεκτονική του UMTS

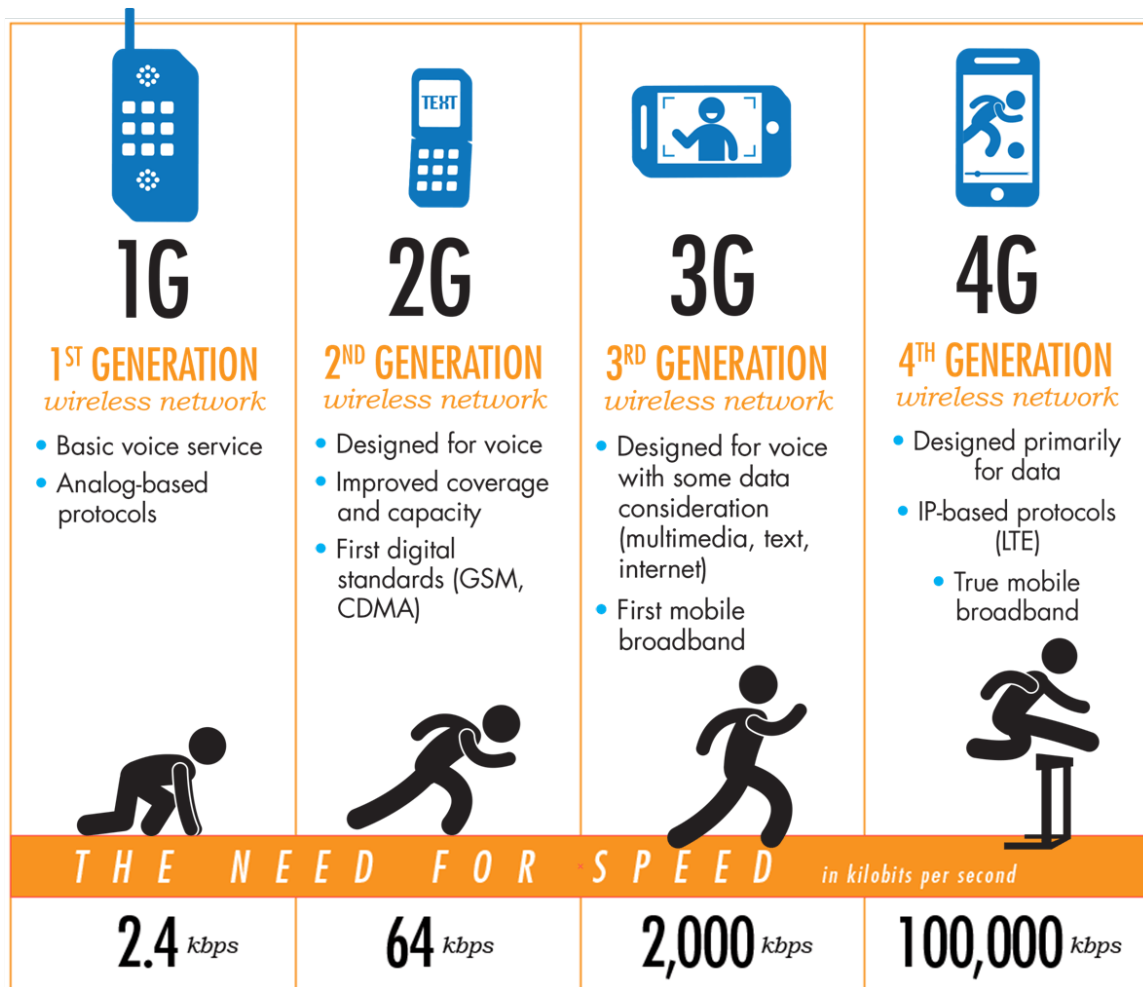
Η αρχιτεκτονική του UMTS περιγράφεται στην Εικόνα 2.1, και αφορά σε γενικές γραμμές τον εξοπλισμό του χρήστη (User Equipment), το δίκτυο UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network, υπεύθυνο για την διαχείριση των ραδιοσυχνοτήτων, και το CN- (Core Network), υπεύθυνο για τις λειτουργίες μεταφορών όπως εναλλαγή και δρομολόγηση κλήσεων και δεδομένων και παρακολούθηση χρηστών.

2.3 Τέταρτη Γενιά Κινητών Δικτύων (4G)

Ο Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών της ITU (ITU-R) βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της καθιέρωσης ενός παγκοσμίως αποδεκτού και συμφωνημένου ορισμού του 4G. Μπορούμε όμως να ισχυριστούμε ότι τα δίκτυα 4ης γενιάς αποτελούν μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη λύση ευρυζωνικής επικοινωνίας, η οποία καλύπτει smartphones, φορητούς υπολογιστές και οποιοδήποτε φορητή συσκευή επιθυμεί ο χρήστης.

Εκτός από τις αναμενόμενες βελτιώσεις της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων και της κάλυψης, βασικός στόχος του 4G είναι η ανάπτυξη ενός παγκόσμιου πλέον δικτύου, το οποίο να ενσωματώνει όλα τα προϋπάρχοντα δίκτυα και πρωτόκολλα, εξασφαλίζοντας την διασύνδεση συσκευών διαφορετικών τεχνολογιών, αντιλαμβανόμενο τις ανάγκες και της απαιτήσεις της εποχής του. Προκειμένου να καταστεί η ενοποίηση αυτή δυνατή, απαραίτητη είναι η υλοποίηση της ενοποίησης τερματικών δικτύων αλλά και εφαρμογών.

Παράλληλα, τα 4G δίκτυα υποστηρίζουν ακόμα πιο ψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι αγγίζουν τα 40mbps, ενώ προσφέρουν υπηρεσίες ποιότητας (Quality of Service- QoS) [9], όπως η υπευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, η τηλεφωνία IP (Internet Protocol), υπηρεσίες παιχνιδιών πολλών διαφορετικών δυνατοτήτων, καθώς και συνεχούς ροής πολυμεσικές εφαρμογές (streamed multimedia, web tv on demand κτλ).



Εικόνα 2.2 Εξέλιξη των κινητών δικτύων

Τα δύο πρότυπα τα οποία ικανοποιούν τις απαιτήσεις που καθορίστηκαν από την ITU, ώστε να εφαρμοστεί μια κατάταξη των τεχνολογιών στις 4G τεχνολογίες, είναι το LTE-Advanced και το WiMAX.

Το σύνολο των αναφερόμενων απαιτήσεων ονομάστηκε IMT-Advanced. Ορισμένες από τις απαιτήσεις είναι οι εξής:

- Τα συστήματα 4G θα πρέπει να προσφέρουν υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS) για την υποστήριξη πολυμέσων της επόμενης γενιάς.
- Τα 4G συστήματα θα παρέχουν μέγιστο ρυθμό δεδομένων, διατηρώντας χαμηλό κόστος μετάδοσης. Θα υποστηρίζονται ρυθμοί δυαδικών που θα αντιστοιχούν περίπου στα 100 Mbps για την υψηλή κινητικότητα (mobile access) και 1 Gbps για την χαμηλή κινητικότητα (local wireless access ή hot spots).
- Τα συστήματα 4G θα παρέχουν απρόσκοπτη κινητικότητα (seamless mobility) σε συνδυασμό με ομαλή μεταφορά χρήστη (soft handover), υλοποιημένες πάνω σε ένα πλήθος διαφορετικών ετερογενών ασύρματων δικτύων με ένα μοντέλο Always Best Connect (ABC).
- Τα συστήματα 4G θα χρησιμοποιούν κλιμακωτό εύρος ζώνης καναλιού από 5-20 MHz με τη δυνατότητα να φτάσει μέχρι και τα 40MHz.
- Τα συστήματα 4G θα μοιράζονται δυναμικά και θα αξιοποιούν έξυπνα τους διαθέσιμους πόρους δικτύου, ώστε να επιτυγχάνουν την ταυτόχρονη υποστήριξη περισσότερων χρηστών ανά κυψέλη.

Στην συνέχεια θα παραθέσουμε μια σύντομη περιγραφή του WiMax και του LTE-A.

2.3.1 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)

Το IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) το 1999 ανέπτυξε το πρότυπο 802.16 το οποίο στη συνέχεια μετεξελίχθηκε στο πρότυπο 802.16e για να προσφέρει κινητικότητα και ολοκληρώθηκε το 2005 [10]. Το 2006, στα πλαίσια του IMT-Advance, ξεκίνησε η υλοποίηση του προτύπου 802.16m, με την τελευταία έκδοση του WiMAX ο ρυθμός δεδομένων να μπορεί να φτάσει μέχρι και το 1 Gbps. Το WiMAX είναι μια τεχνολογία βασισμένη στα πρότυπα 802.16 που υλοποιεί την ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση last mile.

Παραθέτουμε μια συλλογή των κυριότερων χαρακτηριστικών του WiMAX [11]:

- Το WiMAX μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό δεδομένων μέχρι και 74Mbps όταν χρησιμοποιεί φάσμα 20MHz, ενώ όταν χρησιμοποιεί φάσμα των 5MHz μπορεί να φτάσει τα 18Mbps. Αυτοί οι ρυθμοί είναι εφικτοί με την προϋπόθεση να χρησιμοποιείται η 64QAM διαμόρφωση.
- Η χωρητικότητα κατανέμεται σε πολλούς χρήστες ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Η δυναμική και η ευέλικτη κατανομή πόρων ελέγχεται στο σταθμό βάσης.
- Η μέθοδος OFDM εφαρμόζεται στο WiMAX και του επιτρέπει να λειτουργεί με μεγάλο εύρος ζώνης και σε συνθήκες non-line-of sight (NLOS). Για την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης χρησιμοποιείται το OFDMA.
- Η αρχιτεκτονική φυσικού επιπέδου του WiMAX δίνει τη δυνατότητα κλιμακούμενου ρυθμού δεδομένων, ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης καναλιού. Αυτή η κλιμάκωση γίνεται δυναμικά και δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα περιαγωγής σε μια ποικιλία δικτύων.
- Η υποστήριξη για προηγμένες τεχνικές κεραιάς υλοποιείται με διάφορες τεχνικές, όπως η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), η μορφοποίηση δέσμης (beamforming) και χωρο-χρονική κωδικοποίηση (space-time coding), επιτυγχάνοντας αποδοτικότητα της χωρητικότητας και του φάσματος με την χρήση πολλαπλών κεραιών στο πομπό και στον δέκτη.

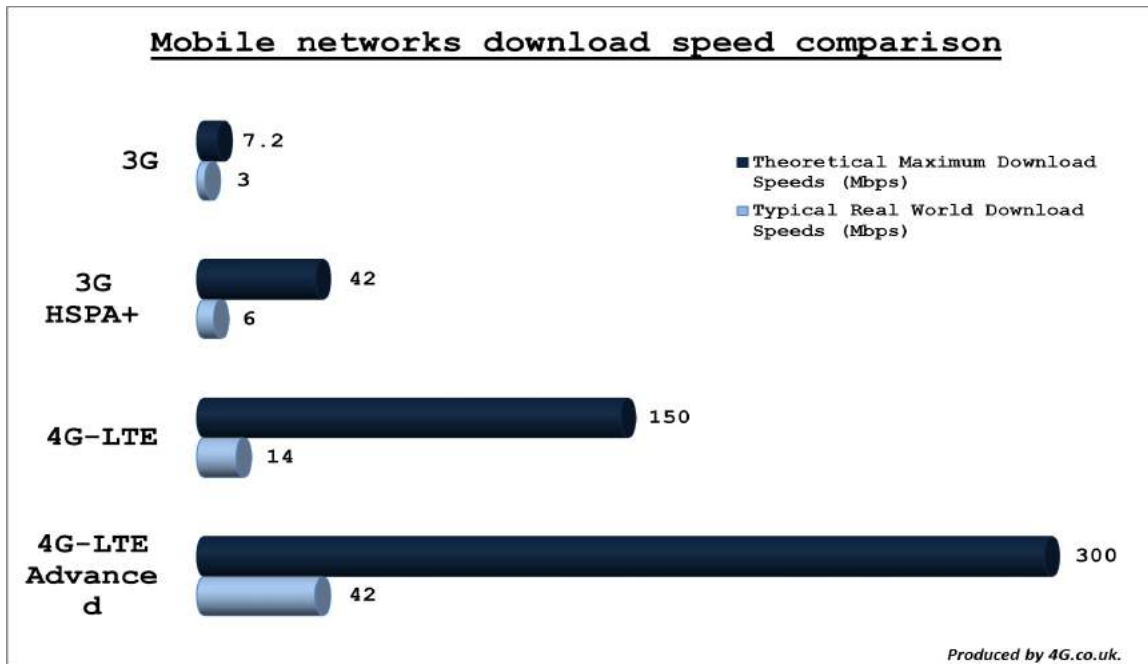
- Όλες οι διατεματικές (end-to-end) υπηρεσίες διανέμονται πάνω από μια IP αρχιτεκτονική που βασίζεται σε IP πρωτόκολλα για διατεματική μεταφορά, για την ποιότητα (QoS), την ασφάλεια, την κινητικότητα και για τη διαχείριση συνεδριών.

2.3.2 LTE-Advanced (Long Term Evolution -Advanced)

Το LTE-Advanced αποτελεί μια περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας LTE το οποίο εισήχθη το 2009. Το LTE-A δημιουργήθηκε με σκοπό να ικανοποιήσει το πλαίσιο των απαιτήσεων του IMT-A, ενώ είναι πλήρως συμβατό με το LTE, ώστε να είναι σε θέση να χρησιμοποιεί το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Οι πιο βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο LTE-A ώστε να επιτευχθεί υψηλότερος ρυθμός δεδομένων είναι το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και το MIMO (Multiple Input Multiple Output). Μια χαρακτηριστική ιδιότητα του LTE-A, την οποία και χρησιμοποιούμε στα πλαίσια της εργασίας αυτής, είναι η δυνατότητα υποστήριξης βελτιστοποιημένων ετερογενών δικτύων.

Τέτοια δίκτυα ενδέχεται να αποτελούνται από ένα μείγμα μακροκυψέλων (macrocells), σε συνδυασμό με κόμβους χαμηλής ισχύος όπως τα picocells, τα femtocells και τα relays βελτιώνοντας έτσι την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου.

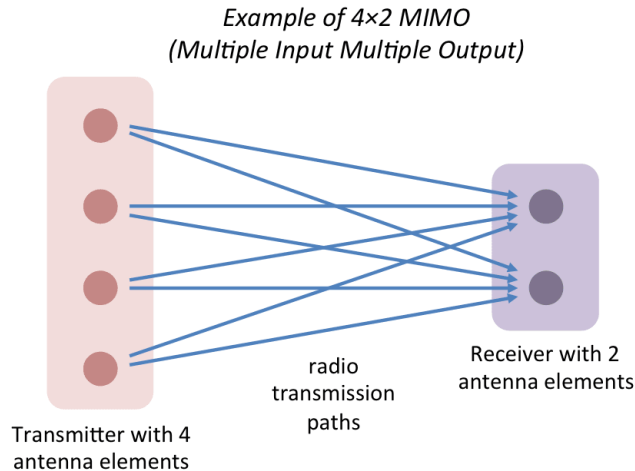
Επιπροσθέτως, το LTE-A πετυχαίνει μικρότερες καθυστερήσεις, μειώνοντας το χρόνο μετάβασης που χρειάζεται για να φτάσει από απραξία σε σύνδεση σε λιγότερο από 50ms, σε αντίθεση με τα LTE που ο αντίστοιχος χρόνος ήταν 100ms. Παράλληλα, μείωση δέχεται και ο χρόνος μετάβασης από την κατάσταση αδράνειας σε ενεργή σε λιγότερο από 10ms, σε σχέση με τα 50 ms που ίσχυε για την τεχνολογία LTE.



Εικόνα 2.3 Σύγκριση ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων 3G, 3GHSPA+,LTE, LTE-A

Οι κυριότερες αναβαθμίσεις του LTE-A παρατίθενται παρακάτω [12]:

- Η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing): είναι μια τεχνική μετάδοσης στην ασύρματη επικοινωνία MIMO για τη μετάδοση ανεξάρτητων και χωριστά κωδικοποιημένων σημάτων δεδομένων, γνωστών ως ροών (streams), από κάθε μία από τις πολλαπλές κεραιές μετάδοσης.
- Ο συσσωρευτής φορέα (carrier aggregation-CA) χρησιμοποιείται στη τεχνολογία LTE-A με σκοπό να αυξήσει το εύρος ζώνης και κατ' επέκταση το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Υποστηρίζεται η χρησιμοποίηση πολλαπλών καναλιών ώστε να παρέχεται το απαιτούμενο εύρος ζώνης.
- Τα συντονισμένα πολλαπλά σημεία μετάδοσης (coordinated multipoint -CoMP) αποτελούν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών που επιτρέπουν τον δυναμικό συντονισμό ή τη μετάδοση και τη λήψη με πολλαπλούς γεωγραφικά διαχωρισμένους κόμβους (eNBs).



Εικόνα 2.4 Παράδειγμα MIMO για 4 πομπούς και 2 δέκτες

2.4 Δίκτυα Επόμενης Γενιάς 5G

Η επόμενη γενιά κινητών δικτύων, ή αλλιώς 5G, αναμένεται να υπερκαλύψει τις προσδοκίες και τις απαιτήσεις ακόμα και του πιο απαιτητικού χρήστη. Σε πραγματική κλίμακα, τα χαρακτηριστικά του 5G είναι κατά ένα μεγάλο μέγεθος υπεραρκετά για οποιοδήποτε σενάριο χρήσης. Με τις ιλιγγιώδεις ταχύτητες που θα υλοποιεί αναμένεται να επαναπροσδιορίσει την χρησιμότητα των κινητών συσκευών που θα το υποστηρίζουν. Οι ευρύτερες επιλογές πολυμέσων, η μηδενικά καθυστέρηση και γενικότερα το σύνολο των υπηρεσιών που θα προσφέρει θα κινούνται στο υψηλότερο επίπεδο που θα μπορούσε ένας σημερινός χρήστης να επιδιώξει.

Το 2020 αναμένεται ότι οι κινητές συσκευές που θα έχουν πρόσβαση στο 5G θα αγγίζουν τις 50 δισεκατομμύρια. Οι προδιαγραφές του 5G εισάγουν για πρώτη φορά έννοιες όπως το Internet of everything (IoE)[13], ενώ η έννοια της M2M (Machine to Machine) επικοινωνίας θα αποκτήσει πραγματική υπόσταση, με την δυνατότητα κινητών συσκευών να επικοινωνούν μεταξύ τους.

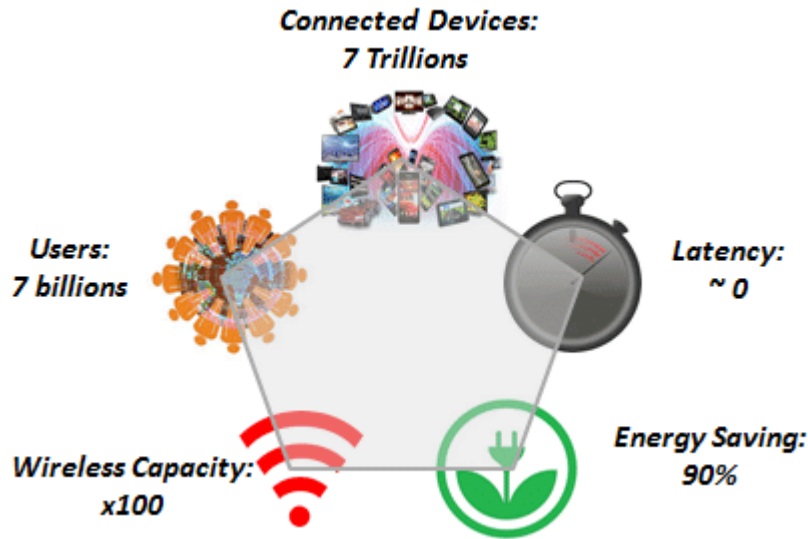
Μερικές από τις απαιτήσεις που θα ικανοποιεί το 5G αφορούν την αυξημένη φασματική απόδοση, την μεγαλύτερη χωρητικότητα με την υποστήριξη της ταυτόχρονης σύνδεσης πολλών συσκευών, την μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, την κάλυψη σε οποιοδήποτε γεωγραφικό σημείο σε συνδυασμό με το χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης υποδομών, στοχεύοντας σε μια συνολικά βελτιωμένη αξιοπιστία επικοινωνιών.

2.4.1 Στόχοι του 5G

Στα πλαίσια της ανάπτυξης της επόμενης γενιάς δικτύων, έχουν καθοριστεί ορισμένοι στόχοι προς επίτευξη, μερικούς από τους οποίους θα αναφέρουμε στην συνέχεια[14]:

- Συνδέσεις 1-10 Gbps στα τελικά σημεία του δικτύου
- 1ms καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end to end)
- 1000 φορές περισσότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας (bandwidth per unit area)
- Ολοκληρωτική κάλυψη 100%
- Διαθεσιμότητα 99,99%
- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συνόλου του δικτύου έως 90%
- Χρόνος ζωής μπαταρίας για μηχανικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης έως και 10 χρόνια

Η ολοκληρωτική κάλυψη και διαθεσιμότητα αφορούν σε ένα μεγάλο βαθμό επιχειρηματικές αποφάσεις, με την έννοια ότι οποιοσδήποτε φορέας έχει τη δυνατότητα να τις υλοποιήσει χρησιμοποιώντας υπάρχουσες τεχνολογίες. Το ζήτημα της τοποθέτησης ενός κυττάρου εξυπηρέτησης εξαρτάται από τον σχεδιασμό του κάθε φορέα και τις ανάγκες εξυπηρέτησης.



Εικόνα 2.5 Στόχοι και απαιτήσεις για το 5G

Το αυξημένο εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας (1000x) και ο πολλαπλασιασμός του αριθμού των συνδέσεων (10-100x) αφορούν την παραμετροποίηση μια σειράς υφιστάμενων τεχνολογιών, όπως το 3G, 4G, Wi-fi, Bluetooth και άλλες σχετικές τεχνολογίες. Άλλωστε, η επέκταση του Wi-fi και η ενσωμάτωση των δικτύων του με τα κυβερνοειδή δίκτυα συνιστά ένα βήμα προς την κατεύθυνση της υποστήριξης μεγαλύτερων ποσοστών μεταφοράς δεδομένων. Με αυτή την έννοια, η προσθήκη του 5G σε αυτό το πλαίσιο τεχνολογιών αφορά μια γενικότερη εξέλιξη, με απώτερο στόχο την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (M2M), την υλοποίηση της έννοιας του IoT και άλλων γενικότερων στόχων της επόμενης γενιάς δικτύων.

Από την άλλη πλευρά, ο στόχος της μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας των συσκευών, αποτελούν κομμάτι του παράλληλου βηματισμού της τεχνολογικής ανάπτυξης με την οικολογική βιωσιμότητα και την οικονομική ισορροπία των μελλοντικών τεχνολογιών.



Εικόνα 2.6 Παράδειγμα εισχώρησης του 5G σε μελλοντικές εφαρμογές

2.4.2 Προκλήσεις

Η ανάπτυξη της επόμενης γενιάς δικτύων, όπως και κάθε νέα τεχνολογία προς υλοποίηση και εφαρμογή, συνοδεύεται από μια σειρά από προκλήσεις. Πόσο μάλλον αν αναλογιστούμε ότι η εφαρμογή του 5G θα στηριχτεί σε ένα ήδη προϋπάρχον δίκτυο επικοινωνιών, το οποίο συνοδεύεται από ένα σύνολο συγκεκριμένων δυνατοτήτων αλλά και περιορισμών [15].

Οι ελλείψεις υποδομών και συνολικού σχεδιασμού έρευνας και κόστους, καθώς και το γεγονός ότι σε πολλές χώρες χρησιμοποιούνται ακόμα τεχνολογίες προηγούμενων γενιών δικτύων εγείρουν ερωτήματα σχετικά με το κατά πόσο είναι βιώσιμο το 5G και σε ποιο βαθμό θα επηρεάσει τεχνολογίες αναπτυσσόμενων χωρών.

Μπορούμε να ξεχωρίσουμε το σύνολο των προκλήσεων σε τεχνολογικές και ευρύτερες.

- Τεχνολογικές Προκλήσεις

Η διαχείριση της κυκλοφορίας αφορά ένα ζήτημα προς αντιμετώπιση, αντιλαμβανόμενοι τα μεγέθη της παραδοσιακής κυκλοφορίας στα κυψελωτά δίκτυα και τον αναμενόμενο όγκο πληροφορίας που θα πρέπει να καταστεί διαχειρίσιμη, προκειμένου να αποφευχθούν περιστατικά συμφόρησης και υπερφόρτωσης.

Η υποστήριξη της μεσαίας πρόσβασης που αφορά την ανάπτυξη πυκνών τερματικών εγείρει την πρόκληση της διατήρησης της απόδοσης του χρήστη σε ικανοποιητικά επίπεδα, της διαχείρισης των καθυστερήσεων και της απόδοσης των εγκατεστημένων hot spots.

Οι διακυτταρικές παρεμβολές που ενδέχεται να προκύψουν λόγω της εγκατάστασης νέων σταθμών με σκοπό την εξυπηρέτηση των αυξημένων αναγκών αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που θα απασχολήσουν την υλοποίηση και την υποστήριξη του 5G στους εκάστοτε σταθμούς βάσης.

- Ευρύτερες Προκλήσεις

Το πρώτο πλαίσιο ευρύτερων προκλήσεων αφορά την υποστήριξη της γενικότερης υποδομής του δικτύου, ώστε να υποστηρίζεται η διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων. Στην συνέχεια, η προσφορά υπηρεσιών σε ετερογενή δίκτυα και σε δίκτυα διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών, εγείρουν ζητήματα τυποποίησης και παραδοχής καθολικών προσανατολισμών με σκοπό την ικανοποίηση των αναμενόμενων προσδοκιών.

Ένα πλαίσιο απαιτήσεων το οποίο αναμένεται να απασχολήσει εκτενώς την υλοποίηση του 5G, αφορά και την προστασία των προσωπικών δεδομένων των χρηστών, της ιδιωτικότητάς τους και της ασφάλειάς τους στον κυβερνοχώρο. Σε συνδυασμό με την εφαρμογή σχετικών νομοθεσιών από το σύνολο των κρατών, δημιουργείται ένα καινούριο πλαίσιο προδιαγραφών με το οποίο το 5G οφείλει να συμβαδίσει.

3. Ετερογενή Δίκτυα





3.1 Εισαγωγή

Ένα ετερογενές δίκτυο (HetNet) είναι ένα σύγχρονο δίκτυο κινητών επικοινωνιών το οποίο υλοποιείται από ένα συνδυασμό διαφορετικών τύπων κυψελών, οι οποίες ενδέχεται να υποστηρίζουν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι αυξημένες ανάγκες χωρητικότητας και κάλυψης στα κινητά δίκτυα δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης τέτοιων δικτυακών διατάξεων, εγκαινιάζοντας παράλληλα μια σχετική ερευνητική περιοχή με αξιόλογο ενδιαφέρον [16].

3.2 Small Cells

Ο όρος small cell περιγράφει χαμηλής ισχύος κερυλωτές μονάδες πρόσβασης, οι οποίες λειτουργούν υπό αδειοδοτημένο ή μη φάσμα και ακτίνα εξυπηρέτησης από 10 μέτρα έως και μερικά χιλιόμετρα [17]. Αρχικά περιγράφηκε με αυτή την ορολογία το μέγεθος της κυψέλης σε

μητροπολιτικές περιοχές, όπου λάμβανε χώρα ένας διαχωρισμός από επίπεδα κυψελών με μειωμένη ισχύ μετάδοσης και με ακτίνα μερικών εκατοντάδων μέτρων.

Indoor:	10-100mW	
Outdoor:	0.2-1W	
Coverage radius:	10s of meters	
Indoor:	100-250mW	
Outdoor:	1-5W	
Coverage radius:	10s of meters	
Outdoor:	5-10W	
Coverage radius:	100s of meters	
Outdoor:	>10W	
Coverage radius:	kilometer(s)	

Εικόνα 3.1 Τύποι και χαρακτηριστικά Small Cells

Αρχικά το ερευνητικό ενδιαφέρον στράφηκε προς την υλοποίηση επαναληπτών (repeaters) ως εναλλακτική λύση για τους σταθμούς βάσης, με αποτρεπτικό εμπόδιο να αποτελεί η περιορισμένη απόδοση λόγω επαναχρησιμοποίησης του αδειοδοτηθέντος φάσματος. Το 1990 ξεκίνησαν κάποιες πρώιμες υλοποιήσεις small cells, οι οποίες μπορούν να αντιστοιχηθούν σε αντίστοιχες εκδοχές των picocells, με την κλίμακα της κυψέλης να αντιστοιχεί σε μερικές δεκάδες μέτρα.

Πρωταρχικός στόχος ήταν η χρησιμοποίηση για την κάλυψη χωρητικότητας και την παροχή αξιόπιστης σύνδεσης σε σημεία στα οποία τα macrocells δεν μπορούσαν να εκπέμψουν.

Σε γενικές γραμμές οι πρωταρχικές απόπειρες ανάπτυξης τεχνολογιών μικρών κυττάρων αποδείχθηκαν οικονομικά ανεπιτυχείς, επειδή το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας ενός μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών δεν αντιστοιχίζονταν με το σύνολο των βελτιώσεων που παρείχαν κατά την εφαρμογή τους.

Τα πρώτα small cells αναπτύχθηκαν το 2002 από την ip.access και αφορούσε μια end-to-end GSM υπηρεσία για εσωτερικούς χώρους, η οποία ονομάστηκε nanoGSM. Στη συνέχεια, το 2007 διάφορες εταιρίες ξεκίνησαν να αναπτύσσουν 3G small cells εσωτερικού χώρου, προορισμένα για οικιακή χρήση. Στον εμπορικό τομέα, η Samsung επέλεξε την τεχνολογία CDMA και με αυτή την επιλογή μπόρεσε να βγει πρώτη στις αγορές, ενώ την ίδια περίοδο οι περισσότερες επέλεξαν την πιο δημοφιλή τεχνολογία 3G UMTS.

Τα χρόνια που ακολούθησαν, εταιρίες όπως η Vodafone, η Verizon και άλλες, ξεκίνησαν να υλοποιούν femtocells σε μεγάλη κλίμακα, καθώς ο αριθμός των femtocells από φορείς εκμετάλλευσης στην Αμερική ξεπέρασε το ένα εκατομμύριο. Τον Οκτώβρη του 2012 ο αριθμός των femtocells ξεπέρασε τον αριθμό των υπαρχόντων macrocells, ενώ ο αριθμός τους συνεχίζει να αυξάνεται [19] με λογική εξήγηση τα πλεονεκτήματα τα οποία παρέχουν έναντι των άλλων small cells.

3.2.1 Τύποι Small Cells

Τα microrcells, τα picocells και τα femtocells ανήκουν στην κατηγορία των small cells και χαρακτηρίζονται ως τέτοια, καθώς συγκρίνονται με τα macrocells, των οποίων η εμβέλεια φτάνει τα 30 χιλιόμετρα.

Ο κυριότερος σκοπός που επιτελούν αφορά την παροχή ασύρματων υπηρεσιών εντός κτιρίων σε αστικά περιβάλλοντα καθώς και στην ύπαιθρο. Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας τις χρησιμοποιούν για να επεκτείνουν την κάλυψη των υπηρεσιών τους και να αυξήσουν την χωρητικότητα του δικτύου.

- Macrocells

Τα macrocells είναι κυψέλες που χρησιμοποιούνται για την παροχή κάλυψης, η οποία υποστηρίζεται από ένα σταθμό βάσης υψηλής ισχύος. Παρέχουν κάλυψη σε μεγαλύτερη κλίμακα σε σχέση με τις άλλες κυψέλες που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες. Η απόδοσή τους εξαρτάται από την τοποθέτησή τους, η οποία συνήθως γίνεται σε επίγειους ιστούς, στέγες και λοιπές κατασκευές οι οποίες προσφέρουν καθαρή θέα της στοχευμένης περιοχής.

- Microcells

Τα microcells μπορούν να καλύψουν περιοχές με διάμετρο μικρότερη από δύο χιλιόμετρα, ενώ μέσω ελέγχου ισχύος, είναι δυνατόν να περιοριστεί η ακτίνα τους. Σύνηθες φαινόμενο αποτελεί η προσωρινή εγκατάστασή τους, σε περιπτώσεις όπου αναμένεται μεγάλη κυκλοφορία εντός μιας περιορισμένης περιοχής, όπως πχ ένα αθλητικό γεγονός. Παρόλα αυτά, εγκαθίστανται και ως μόνιμη προσθήκη σε περιοχές με αντίστοιχες απαιτήσεις.

- Picocells

Τα picocells έχουν σχεδιαστεί για υποστηρίζουν μέχρι και 100 χρήστες και να καλύπτουν περιοχές όπως γραφεία, εμπορικά κέντρα, γήπεδα ή σταθμούς τρένων που έχουν πυκνή χρήση κινητών δικτύων, ενώ πρόσφατη είναι και η χρήση τους μέσα σε αεροσιγάφη.

Συχνή είναι η χρησιμοποίησή τους για την παροχή χωρητικότητας σε αστικές περιοχές με μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού, αποσυμφορίζοντας με αυτό το τρόπο σταθμούς βάσης ευρύτερης εμβέλειας. Η κύρια διαφορά τους σε σχέση με τα femtocells αφορά την διαχείρισή τους από το φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου, ο οποίος αναλαμβάνει το κόστος της υποστήριξής τους.

- Femtocells

Τα femtocells, τα οποία είναι γνωστά και ως home base stations, είναι σημεία πρόσβασης κυψελοειδούς δικτύου που εξυπηρετούν τυπικές κινητές συσκευές σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιώντας οικιακό DSL, καλωδιακές ευρυζωνικές συνδέσεις, οπτικές ίνες και άλλες τεχνολογίες τελευταίου μιλίου (lastmile) [19].

Χαρακτηρίζονται από τις ποικίλες δυνατότητες διαμόρφωσής τους και χρησιμοποιούνται κυρίως για οικιακή χρήση ή σε μικρές επιχειρήσεις, αφού υποστηρίζουν έως 16 κινητές συσκευές.

Θα ακολουθήσει εκτενέστερη παρουσίαση των χαρακτηριστικών των femtocells στην συνέχεια του κεφαλαίου, αφού αποτελούν κύριο συστατικό της παρούσας εργασίας.

3.2.2 Χαρακτηριστικά των Small Cells

Υπάρχουν διαφορετικές πολιτικές και προσεγγίσεις όσον αφορά τις πολιτικές πρόσβασης των small cells, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του συνόλου των χρηστών που εξυπηρετούν. Ενώ τα picocells υιοθετούν την πολιτική της ανοιχτής πρόσβασης με σκοπό την άμεση αποφόρτιση του δικτύου, τα femtocells μπορούν να εφαρμόσουν οποιαδήποτε από τις τρεις διαθέσιμες πολιτικές, ανάλογα με την προτίμηση του ιδιοκτήτη τους.

Οι πολιτικές πρόσβασης είναι η Κλειστή πρόσβαση (Closed Access), η Ανοιχτή πρόσβαση (Open access) μια ενδιάμεση προσέγγιση, η Υβριδική πρόσβαση. Εκτενέστερη παρουσίαση των πολιτικών πρόσβασης θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο το οποίο εστιάζει στα femtocells.

Η κατανομή φάσματος είναι μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς στα ετερογενή δίκτυα, επιτρέποντας την από κοινού χρήση των ζωνών συχνοτήτων (frequency bands) μεταξύ macrocells και small cells [20].

Οι τρεις σχετικές προσεγγίσεις που ακολουθούνται για την κατανομή φάσματος είναι, η dedicated προσέγγιση στην οποία έχουν ανατεθεί διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για τα macrocells και τα small cells, η co-channel όπου τα macrocells και τα small cells μοιράζονται όλες τις διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων και η partial προσέγγιση όπου τα macrocells και τα small cells μοιράζονται κάποιες από τις ζώνες συχνοτήτων που είναι διαθέσιμες και οι υπόλοιπες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από τα macrocells.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες σχετικές έννοιες με τα small cells:

- Αυτοδιοργάνωση

Τα picocells και τα femtocells εγκαθίστανται από τους χρήστες τους χωρίς να υπάρχει κάποια σχετική πρόβλεψη ή επίβλεψη από τους διαχειριστές του δικτύου. Η αυτόνομη λειτουργία αυτών των συσκευών μέσα στο δίκτυο εξασφαλίζεται από τις εξής ιδιότητες: την αυτόματη διαμόρφωση (self-configuration), την αυτο-ίαση (self-healing) και την αυτόματη βελτιστοποίηση (self-optimization).

Η αυτόματη διαμόρφωση περιγράφει την ικανότητα της κυψέλης προτού να λειτουργήσει μέσα στο δίκτυο, να μπορεί να ρυθμίζεται αυτόματα κατά την εγκατάστασή της μέσω της λήψης κατάλληλου λογισμικού. Επίσης, η αυτο-θεραπεία αφορά την ικανότητα των κυψελών να μπορούν να αποκαταστήσουν αυτόματα βλάβες που μπορεί να προκύψουν ή σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η διόρθωση τους από κάποιον τεχνικό και να είναι σε θέση να υλοποιούν κάποιους μηχανισμούς αντιστάθμισης.

Η αυτόματη βελτιστοποίηση σχετίζεται με την ικανότητα των κυψελών να παρακολουθούν την κατάσταση των παραμέτρων του δικτύου και να βελτιστοποιούν τις ρυθμίσεις τους έτσι ώστε να παρέχουν καλύτερη κάλυψη μέσα στο δίκτυο, πετυχαίνοντας ακόμα και μείωση των παρεμβολών [21].

Είναι προφανές ότι η απρόβλεπτη, ανομοιογενής και χρονικά μεταβαλλόμενη φύση των αφίξεων των χρηστών και το φορτίο που προκύπτει από αυτές, επιδεινώνει τις δυσκολίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη ενός πλήρως αυτο-οργανωμένου ετερογενούς δικτύου.

Συνεπάγεται ότι η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων HetNets είναι μια ιδιαίτερος περίπλοκη διαδικασία λόγω των διαφόρων τύπων κυψελών που συνυπάρχουν καθώς και του αυξανόμενου αριθμού παραμέτρων δικτύου που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

- Backhauling

Το backhaul είναι ο σύνδεσμος που υλοποιεί την ενοποίηση του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (BS) στο βασικό δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης. Ο σχεδιασμός ενός δικτύου backhaul αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα προς επίλυση εξαιτίας της πολύπλοκης τοπολογίας των διαφόρων τύπων κυψελών που υπάρχουν στα ετερογενή δίκτυα.

- Handover

Το handover είναι ένας απαραίτητος μηχανισμός, ώστε να παρέχεται ομοιόμορφη εξυπηρέτηση χωρίς διακοπές, όταν οι χρήστες μετακινούνται μέσα ή έξω από την ακτίνα κάλυψης μιας κυψέλης. Επιπλέον, το handover διευκολύνει και την εξισορρόπηση του φορτίου κυκλοφορίας, καθώς αναλαμβάνει την μεταφορά των χρηστών σε διπλανές ή αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες έτσι ώστε να αποφορτίσει τις κυψέλες στις οποίες παρατηρείται συμφόρηση. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα αποτυχίας του handover αυξάνει την πιθανότητα αποσύνδεσης του χρήστη από το δίκτυο.

- Παρεμβολές

Στα ετερογενή δίκτυα συνηθίζονται σημαντικά cross-tier και two-tier προβλήματα παρεμβολών. Το δίκτυο backhaul λόγω των διαφορετικών τύπων κυψέλης που το απαρτίζουν, ενδέχεται να υποστηρίζει διαφορετικό εύρος ζώνης και να εγείρει περιορισμούς καθυστέρησης.

Ένας ακόμα παράγοντας σχετίζεται με το ότι, οι περιορισμοί πρόσβασης (CSG) που σχετίζονται με τα picocells και τα femtocells μπορούν να οδηγήσουν σε ισχυρά και απρόβλεπτα σενάρια παρεμβολών τόσο στο uplink όσο και στο downlink, δεδομένου ότι οι χρήστες δεν μπορούν να μεταβούν στις πλησιέστερες κυψέλες. Με αυτό τον τρόπο, αναγκαστικά συνδέονται σε κυψέλες οι οποίες βρίσκονται πιο μακριά, με αποτέλεσμα τις ενισχυμένες παρεμβολές στην αντίστοιχη περιοχή.

Επίσης, η ικανότητα αυτο-οργάνωσης των κυψελών απαιτεί συνεχή ανίχνευση και παρακολούθηση του περιβάλλοντος, προκειμένου οι παρεμβολές να μετριάζονται ή να αποφεύγονται [22]. Από την άλλη πλευρά, οι παραπάνω λειτουργίες έχουν κάποιους περιορισμούς σε σχέση με το ποιες καταστάσεις μπορούν να αντιμετωπίσουν.

3.3 Femtocells

Με την έλευση του LTE, ο αριθμός των κινητών συσκευών που υιοθέτησαν το πρότυπο αυξήθηκε θεαματικά και μαζί με αυτόν και το επίπεδο των απαιτήσεων για μεγαλύτερη χωρητικότητα αλλά και γενικότερα για υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών σε όλα τα επίπεδα. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές και κεντρικές απαιτήσεις αφορά την βελτίωση της κάλυψης του δικτύου, ανεξάρτητα από το σημείο στο οποίο βρίσκεται ο εκάστοτε χρήστης.

Αποδοτική αλλά και οικονομική λύση στο παραπάνω πρόβλημα, αποτελεί η εγκατάσταση femtocell, οδηγώντας ουσιαστικά στην μείωση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Τα femtocells, τα οποία αποκαλούνται και Home Base Stations (οικιακοί σταθμοί βάσης), εγκαθίστανται εύκολα από τον χρήστη σε ιδιωτικούς χώρους ή σε χώρους με έναν μικρό αριθμό χρηστών προς εξυπηρέτηση (<16), βελτιώνοντας σημαντικά το επίπεδο υπηρεσιών φωνής και δεδομένων. Ένα femtocell προσφέρει πρόσβαση στο διαδίκτυο στο σύνολο των χρηστών στους οποίους επιτρέπεται η σύνδεση και βρίσκονται στην εμβέλεια του χαμηλής ισχύος πομπού του.

Οι πρώτοι σχεδιασμοί υλοποίησης femtocells, ξεκίνησαν το 2002 από μια ομάδα μηχανικών της Motorola, ενώ στην συνέχεια το 2004 τα femtocells άρχισαν να ελκύουν το ενδιαφέρον εταιρειών, με αποτέλεσμα οι εταιρείες Obiquisys και 3WayNetworks, να ξεκινήσουν τον σχεδιασμό των χαρακτηριστικών της λειτουργίας τους. Λίγο καιρό αργότερα, το 2007, δημιουργήθηκε ο πρώτος οργανισμός προτυποποίησης των femtocells, το Femto Forum, το οποίο έχει μετονομαστεί σήμερα σε Small Cell Forum [23]. Σκοπός του οργανισμού αυτού αποτέλεσε ο συντονισμός των εταιρειών παραγωγής femtocells πάνω σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά, ώστε η κατασκευή τους να οριοθετηθεί από διεθνή και λειτουργικά αποδεκτά πρότυπα λειτουργίας.

Οι τεχνολογίες μετάδοσης βασίστηκαν σε πρώτο στάδιο στο πρότυπο UMTS, ενώ με την ανάπτυξη του 3G εμπλουτίστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό.

Αυτή τη στιγμή, τα femtocells αποτελούν μια ιδιαίτερη αποδοτική λύση προσφέροντας ποικίλα πλεονεκτήματα κάλυψης και απόδοσης, συνδυασμένα με ένα ολοκληρωμένο πακέτο λειτουργιών και σε χαμηλό κόστος.

Είτε αφορά οικιακή είτε επαγγελματική χρήση σε εταιρείες μικρής κλίμακας ή σε γραφεία, τα femtocells αναμένεται να εξαπλωθούν τα επόμενα χρόνια, προσφέροντας πρόσβαση σε διάφορα σενάρια χρήσης.

3.3.1 Τεχνολογία και Αρχιτεκτονική

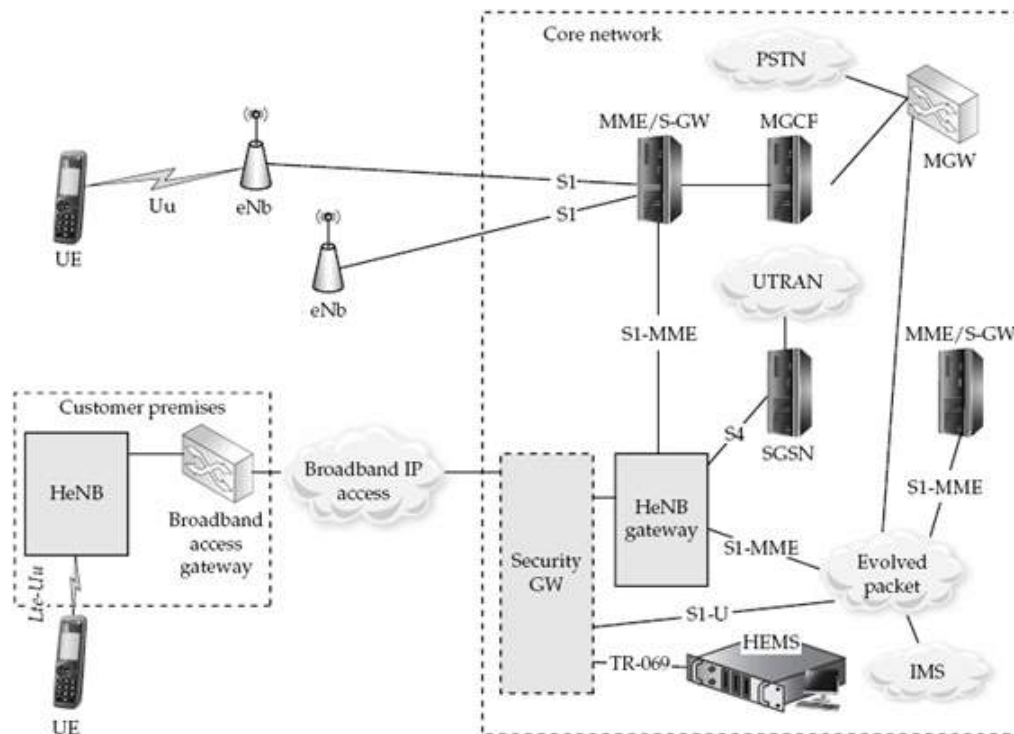
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις σε πυκνές διατάξεις femtocells, χρησιμοποιώντας τα δικτυακά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LTE. Τα femtocells αναμένεται να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στα δίκτυα επόμενης γενιάς. Παρόλα αυτά, σε μεγάλο βαθμό η μετάβαση προς την επόμενη γενιά θα είναι μια σταδιακή διαδικασία η οποία θα χρειαστεί χρόνο για να υλοποιηθεί, όπως και με την εφαρμογή των προηγούμενων γενιών κινητών δικτύων. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, εφαρμόσαμε τις οδηγίες του LTE για αστικά σενάρια χρήσης.

Συνεπώς, στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε τα βασικά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής του δικτύου femtocell για λειτουργία με την ασύρματη τεχνολογία LTE.

Τα femtocells επιτρέπουν την πρόσβαση στο διαδίκτυο, μέσω μιας τυπικής ευρυζωνικής σύνδεσης, συνήθως σε ένα σύνολο χρηστών από 4 έως 10 άτομα. Ο αριθμός των χρηστών που έχουν πρόσβαση σε κάθε σταθμό εξαρτάται από την επιλογή του χρήστη του σταθμού βάσης. Για παράδειγμα, σε ένα οικιακό femtocell οι χρήστες μπορεί να είναι ένας μικρός αριθμός, ενώ σε ένα femtocell σε έναν κοινόχρηστο χώρο, ενδέχεται ο σταθμός βάσης να εξυπηρετεί όσους περισσότερους χρήστες μπορεί.

Η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η τεχνολογία ασύρματης σύνδεσης, η ευρυζωνική σύνδεση, καθώς και οι παρεμβολές από κοντινούς σταθμούς βάσης. Αντίστοιχα, σε κάθε σενάριο χρήσης (όπως θα δούμε παρακάτω) οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός femtocell διαφοροποιούνται.

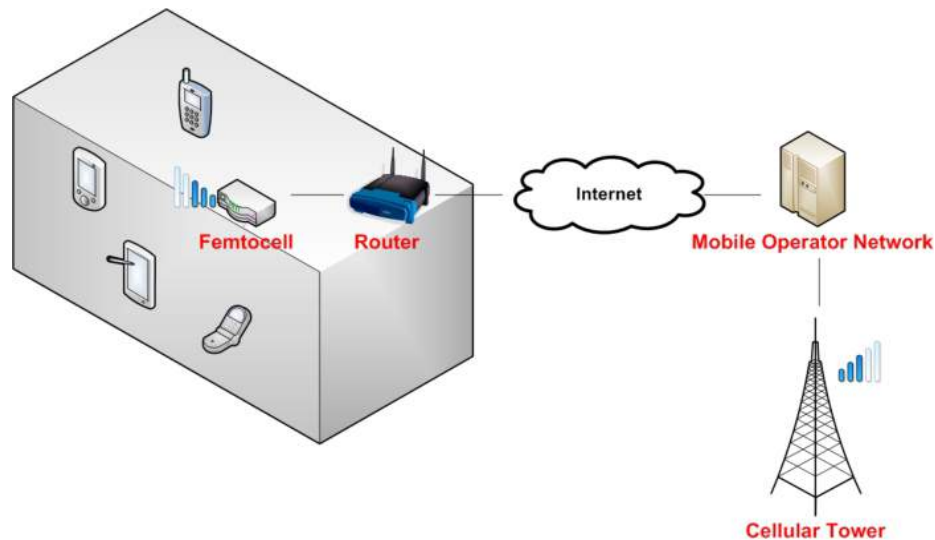
Κατά την έκδοση 8 του δικτύου, εισήχθησαν το Home eNodeB Gateway (HeNB GW) και το Home Management System eNodeB (HeMS), με το πρώτο να αναλαμβάνει την συγκέντρωση της κίνησης, σαν χειριστής του δικτύου, ενώ τοποθετείται στις εγκαταστάσεις του χρήστη. Από την άλλη πλευρά, το HeMS λειτουργεί ως εγγυητής της υψηλής ποιότητας των υπηρεσιών.



Εικόνα 3.2 Στοιχεία αναφοράς femtocell όπως ορίζονται από το Femto Forum

Αφού ο χρήστης αποκτήσει ένα femtocell, αρκεί να το θέσει σε λειτουργία και το HeNB θα πραγματοποιήσει τις απαραίτητες συνδέσεις και ρυθμίσεις, σύμφωνα με την πολιτική συνδρομής του χρήστη.

Η πρόσβαση είναι διαθέσιμη σε ένα συγκεκριμένο σύνολο ανθρώπων και στη συνέχεια θα αναφερθούμε περαιτέρω σε αυτό το ζήτημα. Μπορούμε να ορίσουμε ότι σε ένα δίκτυο ενός femtocell συνυπάρχουν κάποιες οντότητες, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την παροχή υπηρεσιών, ασφάλειας και γενικότερα διαχείρισης του δικτύου.



Εικόνα 3.3 Γενική Αρχιτεκτονική femtocell

Στην συνέχεια παραθέτουμε ορισμένα στοιχεία για κάθε μια από τις αναφερόμενες οντότητες [24]:

- Home eNodeB

Θεωρείται το σημείο πρόσβασης ενός femtocell, το οποίο χαρακτηρίζεται και ως συσκευή plug 'n play, αφού εγκαθίστανται εύκολα από τον χρήστη και αυτορυθμίζεται σε μεγάλο βαθμό. Από την πλευρά του, το Home eNodeB, υποστηρίζει την επικοινωνία με τις κινητές συσκευές μέσω της διεπαφής 3GPP S1 over-the-air, παρέχοντας εξειδικευμένη κάλυψη στο σύνολο των χρηστών του. Η χρήση εξουσιοδοτημένου φάσματος εγγυάται την υψηλή ποιότητα υπηρεσιών.

- Home eNodeB Gateway (HeNodeB)

Οι λειτουργίες της μονάδας RAN μοιράζονται ανάμεσα στις οντότητες Home eNodeB και Home eNodeB GW, βασισμένες σε μια λογική συνεργασίας, με την δεύτερη να υλοποιεί λειτουργίες ελέγχου και ασφάλειας της σύνδεσης. Μερικές από αυτές ονομάζονται AAA και είναι έλεγχοι ταυτότητας (Authentication), εξουσιοδότησης (Authorization) και λογιστικής (Accounting), προσφέροντας ένα ασφαλές περιβάλλον.

Ανάμεσα στο HeNB και το MME πραγματοποιούνται έλεγχοι γνωστοί όπως οι Extensible Authentication Protocol-Subscriber Identity Module και Key Agreement. Διαθέσιμη είναι επίσης η λειτουργία πύλης πολυμέσων (MGW) με κατάληξη το κεντρικό δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης.

Τέλος, αναφέρουμε ότι, οι παραπάνω λειτουργίες ελέγχου και ασφαλείας μπορούν να υλοποιηθούν και ως αυτόνομες συσκευές, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου.

- Security Gateway

Η διεπαφή αυτή είναι υπεύθυνη για την ακεραιότητα των δεδομένων των συνδεδεμένων χρηστών και για την ασφαλή επικοινωνία και τ. HomeNodeB με το κεντρικό δίκτυο, χρησιμοποιώντας διαύλους επικοινωνίας μέσω του πρωτοκόλλου ασφαλείας Internet (IPsec) και GPRS Tunneling Protocol (GTPS) μέσω της διασύνδεσης S1.

- HeNodeB Management System

Βασισμένο στην οικογένεια προτύπων TR – 069, χρησιμοποιείται για την υποστήριξη λειτουργιών συντήρησης και διαχείρισης των λειτουργιών του HeNBs. Επιπλέον, παράγει αναφορές βλαβών λειτουργίας και καταγράφει αποκλίσεις από την προβλεπόμενη απόδοση του HeNB, υλοποιώντας παράλληλα και πολιτικές χρήσεις υπηρεσιών ενός femtocell.

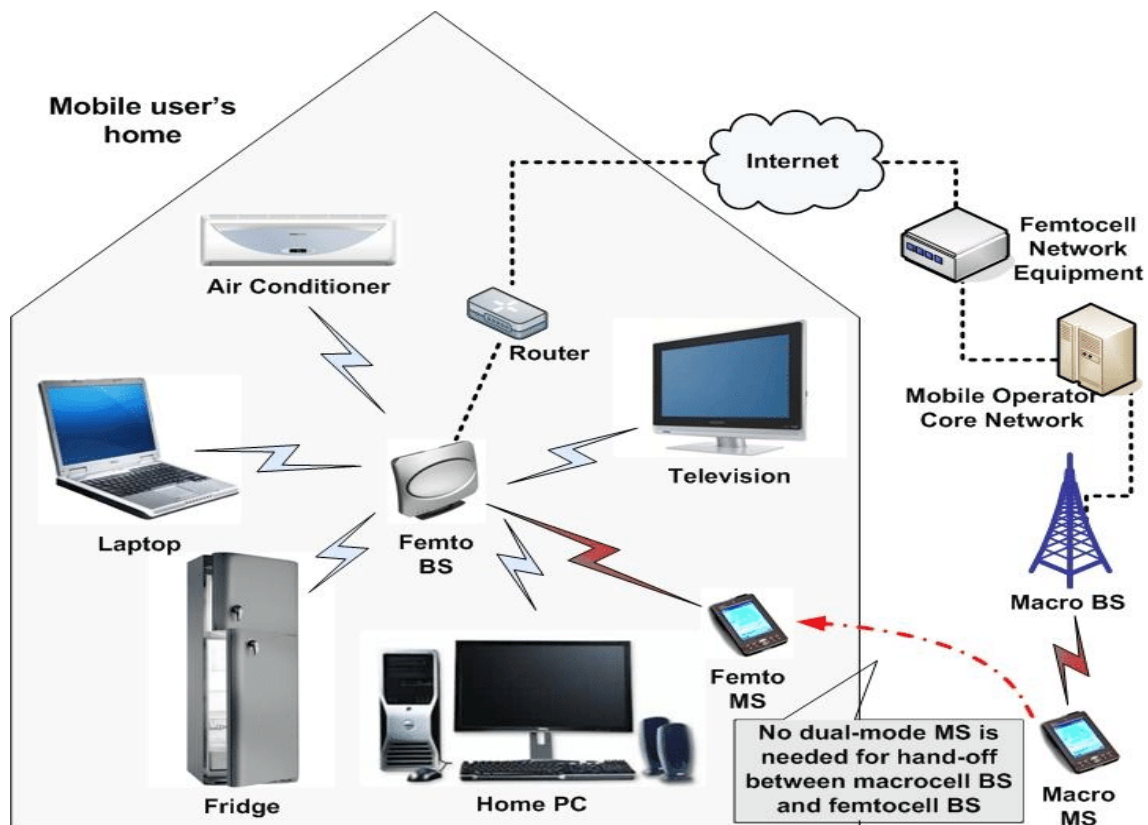
- S1 Interface

Αποτελεί μια πολυεπίπεδη διεπαφή μεταξύ του HeNB και του HeNB GW, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο μετάδοσης ελέγχου ροής (Stream Control Transmission Protocol), για την μεταφορά μηνυμάτων ελέγχου και σημάτων επικοινωνίας μέσω IPv4 και IPv6. Αποτελεί την μοναδική διεπαφή IPsec της SeGW εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα των δεδομένων.

3.3.2 Σενάρια λειτουργίας

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των femtocells τα καθιστούν μια πρακτική και άμεση λύση σε μια σειρά από σενάρια λειτουργίας. Η ευκολία εγκατάστασής τους η οποία πραγματοποιείται άμεσα και χωρίς τεχνική υποστήριξη, οι δυνατότητες αυτο-βελτίωσης και προσαρμογής σε διάφορα είδη δικτύου, καθώς και η δυνατότητα τους να εξυπηρετούν έναν ικανοποιητικό αριθμό χρηστών τα καθιστούν μια ιδιαίτερος πρακτική, οικονομική και αποδοτική λύση σε μια σειρά από διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Στη συνέχεια παραθέτουμε 4 διαφορετικά σενάρια λειτουργίας τα οποία ένα femtocell μπορεί να υποστηρίξει.



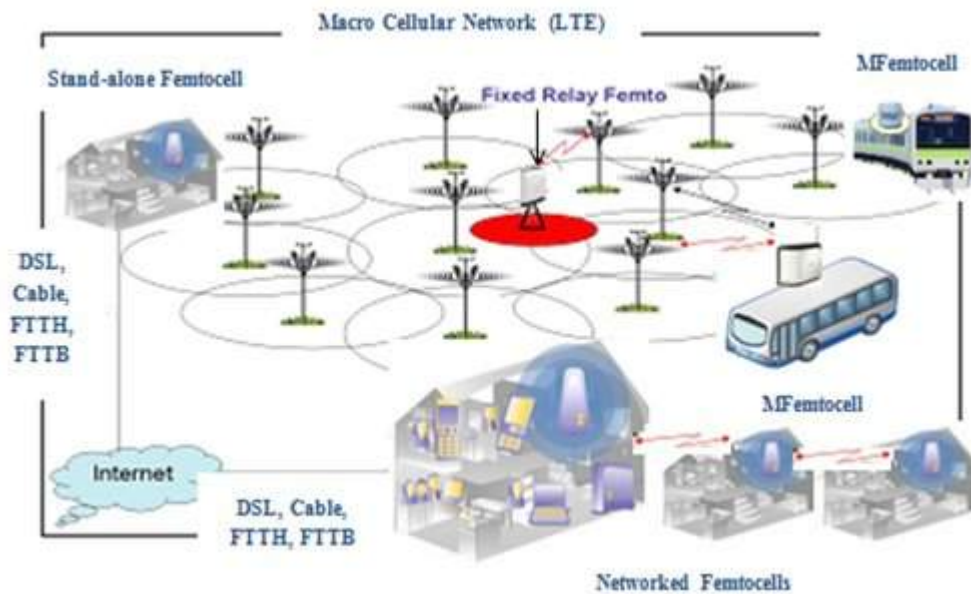
Εικόνα 3.4 Οικιακό femtocell

- Home Femtocell

Η τοποθέτηση πραγματοποιείται σε εσωτερικό χώρο και συνήθως αφορά τοποθέτηση σε σενάρια όπου η κάλυψη του δικτύου είναι ανεπαρκής, είτε παρουσιάζονται αυξημένες ανάγκες εξυπηρέτησης. Ενδέχεται να αφορά αστικά σενάρια χρήσης, όπως στην παρούσα εργασία όπου συνυπάρχουν πολλοί σταθμοί σε μικρό γεωγραφικό χώρο και ένας χρήστης να επιθυμεί την βελτίωση των υπηρεσιών του. Αντίστοιχα, ενδέχεται να αφορά και οικιακά σενάρια χρήσης σε απομακρυσμένες από τον αστικό ιστό περιοχές, όπου υπάρχει ανάγκη βελτίωσης των παρεχόμενων υπηρεσιών και της δικτυακής κάλυψης. Ανάλογα με την περίπτωση, η σύνδεση του femtocell με το backhaul δίκτυο ενδέχεται να είναι ενσύρματη ή ασύρματη.

- Δίκτυα Femtocells

Πολύ συχνή είναι η εγκατάσταση δικτύων femtocells σε εσωτερικούς δημόσιους χώρους και σε αρκετό πλήθος σταθμών βάσης, όπως για παράδειγμα σε εμπορικά κέντρα, σε επιχειρησιακά κτήρια ή σε εγκαταστάσεις οργανισμών. Σε αυτή την περίπτωση τα femtocells αποδεικνύονται μια πολύ χρηστική και αποτελεσματική λύση, η οποία επιτυγχάνεται και με μικρό κόστος. Η σύνδεση των femtocells με το backhaul δίκτυο υλοποιείται κατά κανόνα ενσύρματα.



Εικόνα 3.5 Fixed Relay και Mobile Femtocells

- Fixed Relay Femtocells

Αυτή η περίπτωση αφορά την τοποθέτηση femtocells σε εξωτερικούς χώρους, τους οποίους δεν μπορεί να καλύψει επαρκώς ένα macrocell. Η τοποθέτηση των επιπλέον σταθμών συνιστά στην βελτίωση της κάλυψης αλλά και της χωρητικότητας. Για αυτό το σενάριο είναι απαραίτητη μια ασύρματη σύνδεση με το backhaul δίκτυο.

- Mobile Femtocells

Το συγκεκριμένο σενάριο αφορά τις περιπτώσεις εγκατάστασης femtocell σε αυτοκίνητα, λεωφορεία, τρένα ή οποιοδήποτε κινητό μέσο, με σκοπό την απρόσκοπτη και ποιοτική παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Είναι προφανές το ότι η σύνδεση του femtocell με το κεντρικό δίκτυο πραγματοποιείται ασύρματα.

3.3.3 Πολιτικές Πρόσβασης χρηστών

Στα δίκτυα macrocell παρέχεται πρόσβαση σε οποιονδήποτε χρήστη βρίσκεται εντός της εμβέλειάς του, χωρίς κανέναν περιορισμό ή έλεγχο. Σε αντίθεση, τα femtocells παρέχουν τη δυνατότητα του αυστηρού ελέγχου του συνόλου των χρηστών το οποίο εξυπηρετούν. Η επιλογή της πολιτικής πρόσβασης αφορά αποκλειστικά τον ιδιοκτήτη του σταθμού βάσης,

Αυτό συμβαίνει λόγω του συγκεκριμένου αριθμού χρηστών τον οποίο μπορούν να εξυπηρετήσουν λόγω συγκεκριμένης σύνδεσης με το backhaul δίκτυο, αλλά και επειδή στην περίπτωση ενός οικιακού femtocell, ο χρήστης – ιδιοκτήτης είναι προφανές ότι θα επιθυμεί τον έλεγχο της πρόσβασης στο femtocell του, ή τουλάχιστον όπως θα δούμε και στην συνέχεια αυτής της εργασίας μπορεί και να δεχτεί την εξυπηρέτηση κάποιου εξωτερικού χρήστη με τα κατάλληλα ανταλλάγματα. Στην παρούσα εργασία, η επιλογή της κατάλληλης πολιτικής πρόσβασης αποτελεί κεντρικό συστατικό της υλοποίησης του αλγόριθμου υπολογισμού.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τις 3 ξεχωριστές πολιτικές πρόσβασης που παρέχουν τα femtocells [25]:

- Open Access

Η πολιτική της ανοιχτής πρόσβασης επιτρέπει σε οποιονδήποτε χρήστη εντός εμβέλειας να συνδεθεί στο femtocell που επιθυμεί. Αφορά συνήθως οι περιπτώσεις αφορούν femtocells σε κινητά οχήματα, εμπορικά κέντρα ή δημόσια κτήρια, προκειμένω να αποφορτιστεί η κυκλοφορία στο επικαλυπτόμενο macrocell. Είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι σε αυτά τα σενάρια πρόσβασης, η απόδοση ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένη λόγω του μεγάλου αριθμού χρηστών που μπορούν να συνδεθούν στο ίδιο femtocell.

- Closed Subscriber Group Closed Access (CSG)

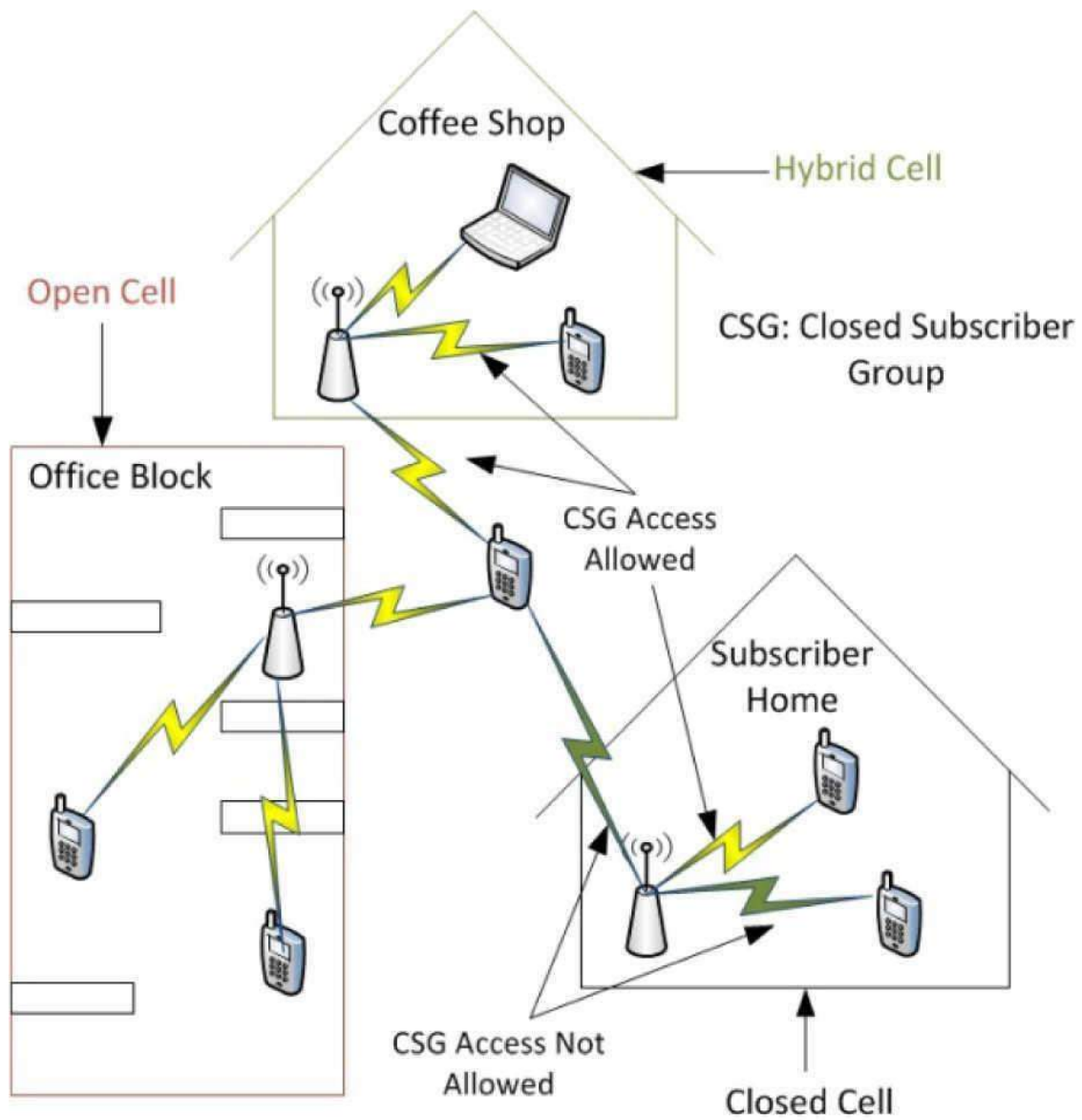
Οι σταθμοί βάσης femtocell που υιοθετούν τη συγκεκριμένη πολιτική πρόσβασης εξυπηρετούν ένα συγκεκριμένο σύνολο χρηστών, το οποίο βρίσκεται καταχωρημένο σε μια κλειστή ομάδα συνδρομητών (CSG). Σε αυτή την περίπτωση έχουμε να κάνουμε συνήθως με περιπτώσεις οικιακής χρήσης, όπου ο ιδιοκτήτης του femtocell καθορίζει το ποιος έχει δικαίωμα πρόσβασης.

- Hybrid Access

Η πολιτική υβριδικής πρόσβασης επιτρέπει τη σύνδεση χρηστών που δεν ανήκουν στην CSG, κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Βέβαια, οι χρήστες που συγκαταλέγονται στην CSG, έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τους υπόλοιπους και απολαμβάνουν και μεγαλύτερο ποσοστό των διαθέσιμων πόρων. Αφού πρώτα οι χρήστες του CSG έχουν ικανοποιητική πρόσβαση, οι εναπομείναντες διαθέσιμοι πόροι διατίθενται σε ορισμένους εξωτερικούς χρήστες.

Προκειμένω να υλοποιηθεί μια τέτοια πολιτική, συνήθως χρειάζεται ένα σύνολο προϋποθέσεων οι οποίες πρέπει να ικανοποιούνται, όπως για παράδειγμα η εγγύηση της ικανοποιητικής εξυπηρέτησης των χρηστών του CSG ακόμα και όταν γίνουν αποδεικτοί οι εξωτερικοί χρήστες.

Στην συνέχεια αυτής της εργασίας θα αναφερθούμε ξανά στην υβριδική πολιτική πρόσβασης, αφού αποτελεί σημαντικό κομμάτι του μηχανισμού που θα παρουσιαστεί.



Εικόνα 3.6 Πολιτικές Πρόσβασης Femtocell

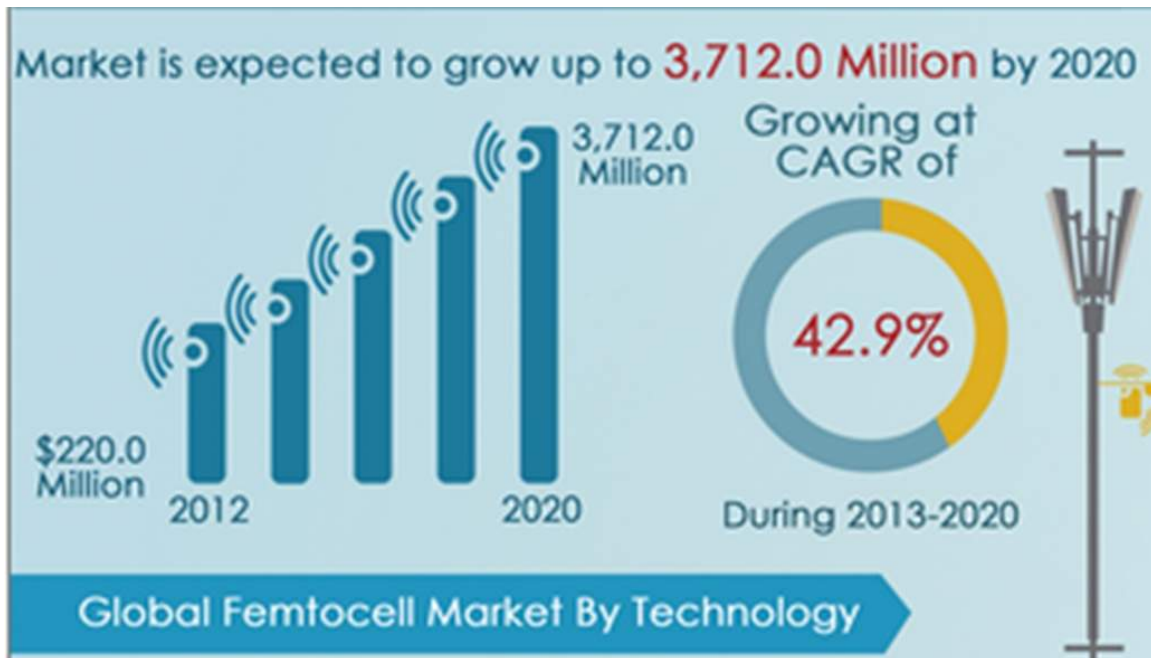
3.3.4 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις

Τα femtocells παρουσιάζουν μια πολύ χρηστική λύση κάλυψης και εξυπηρέτησης, συνδυάζοντας μια πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία θα επιχειρήσουμε να συνοψίσουμε παρακάτω.

- Τα femtocells πραγματοποιούν επαναχρησιμοποίηση πόρων και υποστηρίζουν τεχνικές διείσδυσης τοίχων σε περιπτώσεις κάλυψης σε κτηριακά σενάρια, με αποτέλεσμα οι χρήστες να απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, αναπτύσσοντας στρώματα femtocell κάτω από το στρώμα macrocell, η συνολική χωρητικότητα του δικτύου αυξάνεται. Αποτελούν συνεπώς μια πολύ χρηστική λύση και για τους φορείς ειμετάλλευσης, οι οποίοι με την ανάπτυξη ενός στρώματος femtocell κάτω από το στρώμα macrocell πετυχαίνουν την ικανοποίηση των χρηστών τους.
- Η διασύνδεση συχνοτήτων των femtocell με τα επικαλυπτόμενα macrocell υλοποιείται με τον ίδιο τρόπο έτσι ώστε οι χρήστες να χρησιμοποιούν με την ίδια μέθοδο και τα δύο στρώματα σταθμών. Αυτό το χαρακτηριστικό διευκολύνει την τυποποίηση, οδηγώντας σε ευκολότερες εφαρμογές.
- Η μικρή απόσταση πομπού και δέκτη οδηγεί στην λήψη σήματος με υψηλό δείκτη ισχύος με παρεμβολή συν θόρυβο (Signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR). Εκτός από αυτό το θετικό χαρακτηριστικό, επειδή μια κινητή συσκευή καταναλώνει λιγότερη ενέργεια για να συνδεθεί σε έναν κοντινό σταθμό βάσης, βελτιώνεται όχι μόνο η κατανάλωση ενέργειας από την συσκευή, αλλά και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας της. Επίσης μειώνεται με αυτό τον τρόπο η κατανάλωση ενέργειας όλου του δικτύου.
- Η ανάπτυξη δικτυακών διατάξεων femtocell μειώνει την αντίστοιχη ανάγκη για ανάπτυξη macrocell. Αυτό το δεδομένο είναι ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα για τους φορείς ειμετάλλευσης, αφού η ανάπτυξη macrocell είναι σημαντικά πιο επιβαρυνμένη οικονομικά από την ανάπτυξη femtocell. Εκτός από το κόστος του συνολικού υλικού και εξοπλισμού, για την ανάπτυξη macrocell συνυπολογίζεται ένα σημαντικό κόστος για την μίσθωση backhaul αλλά και για την θεαματικά υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

- Σε πλήρη αντίθεση, για την μίσθωση ή για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από ένα femtocell, ο φορέας δεν αναλαμβάνει κανένα κόστος. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος το αναλαμβάνει ο χρήστης, όπως και την εγκατάσταση του σταθμού βάσης femtocell. Από την άλλη πλευρά μπορούμε να σχολιάσουμε ότι το κόστος το οποίο μεταφέρεται στον χρήστη συνδυάζεται με σημαντικά αυξημένη απόδοση, κάλυψη και ποιότητα υπηρεσιών, συνεπώς προσφέροντας σημαντικά ανταλλάγματα.

Εκτός από ένα σύνολο πλεονεκτημάτων, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν και πολύ σημαντικά και δελεαστικά, η ανάπτυξη femtocell έχει να αντιμετωπίσει και μια σειρά από προκλήσεις και θέματα προς διευθέτηση. Αν αναλογιστούμε ότι αρχικά η ανάπτυξη femtocell προοριζόταν για κάλυψη υπό τον έλεγχο των φορέων κινητών δικτύων, αλλά στην συνέχεια η εμπορευματοποίησή τους από το κοινό σημείωσε θεαματική αύξηση, είναι λογικά να εγείρονται κάποια ζητήματα τα οποία δεν είχαν προβλεφθεί εξ αρχής. Ενώ στις αρχές του 2010 ο αριθμός των femtocell αντιστοιχούσε σε 2,5 περίπου εκατομμύρια, το 2015 έφτασε τα 60 και συνεχίζει να αυξάνεται με θεαματικό ρυθμό.



Εικόνα 3.7 Παγκόσμια μεγέθη αγοράς Femtocell 2012 -2020

Τα σημαντικότερα ζητήματα προς αντιμετώπιση που παρουσιάζονται με την ανάπτυξη και εφαρμογή femtocells συνοψίζονται στα εξής:

- Το κυριότερο και πιο σοβαρό πρόβλημα που προκύπτει από την ανάπτυξη διατάξεων femtocells είναι οι παρεμβολές. Ειδικά σε πολύ πυκνές διατάξεις σταθμών βάσης, οι πιθανές παρεμβολές ενδέχεται να προκαλέσουν πολύ σημαντικά ζητήματα απόδοσης. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ένας από τους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψιν είναι οι παρεμβολές, οι οποίες μετριάζονται μετά από την εφαρμογή μιας σειράς ελέγχων και μετακινήσεων χρηστών, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στην συνέχεια.
- Μια δυσκολία η οποία παρουσιάζεται λόγω της φύσης των femtocells είναι η προσαρμοστικότητα και η αυτορύθμιση τους. Ενώ είναι ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό που τους επιτρέπει να προσαρμόζονται σε πολλαπλά και διαφορετικά περιβάλλοντα, από την άλλη πλευρά αποτελεί πρόκληση η βελτιστοποίηση αυτού του μηχανισμού ο οποίος αυτόματα προσαρμόζει τις ρυθμίσεις στο ελάχιστο περιβάλλον.
- Ένα στοιχείο το οποίο αναμένεται να ρυθμιστεί είναι η ευθυγράμμιση του χρόνου μετάδοσης των femtocells με αυτόν των macrocells. Αυτή η βελτίωση θα συνιστούσε σε ευκολότερη μεταβίβαση μεταξύ των δύο αυτών επιπέδων για τους χρήστες, αλλά και σε ελαχιστοποίηση των παρεμβολών πολλαπλής πρόσβασης.
- Η backhaul υποστήριξη των femtocell δεν είναι στο ίδιο επίπεδο με αυτή των macrocell και αποτελεί ένα χαρακτηριστικό το οποίο αναμένεται να βελτιωθεί. Επίσης, μια άλλη δυσκολία είναι η απόδοση του backhaul η οποία εξαρτάται και από αν άλλες υπηρεσίες, όπως πχ το Wi-fi είναι ταυρόχρονα ενεργές.
- Το αδειοδοτημένο φάσμα το οποίο χρησιμοποιούν τα femtocells ελέγχεται αυστηρά και ρυθμίζεται από τις κυβερνήσεις. Αυτό το γεγονός μεταφέρει ευθύνες στους χειριστές των σταθμών βάσης, όσον αφορά παραμέτρους που αφορούν τον περιορισμό της ισχύος ενός femtocell.

- Κάθε σταθμός βάσης σε ένα δίκτυο αναλαμβάνει μια μοναδική φυσική κυτταρική ταυτότητα (PCI). Αυτό συμβαίνει ώστε να αναγνωρίζονται τα γειτονικά κύτταρα του δικτύου και να μην παρουσιάζεται σύγχυση σε αυτή την διαδικασία. Ενώ λοιπόν στην περίπτωση των macrocell δεν τίθενται ζητήματα ανάθεσης αφού τα macrocell δεν αλλάζουν θέση, στην περίπτωση των femtocell όπου η θέση τους μπορεί να αλλάξει προκύπτει το ζήτημα της εκ νέου ανάθεσης PCI. Είναι λογικό λοιπόν να αποτελεί μια πρόκληση η δυναμική ανάθεση ταυτότητας PCI στην περίπτωση όπου ένας σταθμός βάσης αλλάξει γεωγραφικά θέση και προστεθεί στην διάταξη ενός άλλου δικτύου.
- Η αύξηση της σηματοδότησης και των εξόδων της είναι ένα ακόμα ζήτημα το οποίο προκύπτει από την ανάγκη συγχρονισμού και επικοινωνίας των σταθμών βάσης. Ειδικά στην περίπτωση της εφαρμογής ανοικτής ή και υβριδικής πρόσβασης, οι σταθμοί βάσης πρέπει να επικοινωνούν ώστε να ανταλλάσσουν πληροφορίες για την κατάστασή τους και τους χρήστες που ενδέχεται να μεταφέρουν ο ένας στον άλλο μέσω του handover.
- Η απόκτηση ενός femtocell από έναν χρήστη και η τοποθέτησή του, ενώ αποτελεί μια προφανή ευκολία εγείρει το ζήτημα της μη προμελετημένης τοποθέτησης ενός σταθμού εξυπηρέτησης στο δίκτυο. Σε αντίθεση με άλλα επίπεδα small cells, όπως στα macrocell, δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός σχεδιασμός ή μελέτη με αποτέλεσμα μερικές φορές η τοποθέτηση ενός femtocell να συνοδεύεται από προκλήσεις παρεμβολών και υποβάθμισης της απόδοσης. Παρόλα αυτά, αναπτύσσονται μηχανισμοί οι οποίοι μετριάζουν αυτά τα φαινόμενα μέσω διαχείρισης της κατανομής των πόρων και των χρηστών.
- Μια ιδιαίτερη πρόκληση συνιστάται στην επιλογή της κατάλληλης πολιτικής πρόσβασης. Από την μια πλευρά ένας ιδιοκτήτης ενός σταθμού βάσης femtocell είναι λογικό να επιζητά την εξυπηρέτηση μόνον των χρηστών που ο ίδιος επιθυμεί, υιοθετώντας την πολιτική κλειστής πρόσβασης. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία παρεμβολών ενδέχεται να κάνει δελεαστική την υιοθέτηση μιας εναλλακτικής προσέγγισης, όπου χρήστες θα εξυπηρετούνται με απώτερο σκοπό την συνολική βελτίωση της απόδοσης για το σύνολο όλων των χρηστών.

- Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή της ιδανικότερης πολιτικής πρόσβασης αποτελεί μια πρόκληση και μια απόφαση η οποία σχετίζεται με πολλές μεταβλητές οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψιν.
- Ο προγραμματισμός της διαχείρισης του φάσματος είναι ένα ζήτημα το οποίο είναι αρκετά σύνθετο και αναμένεται να απασχολήσει μελλοντικές έρευνες όσον αφορά την βελτιστοποίηση της χρήσης του. Όσον αφορά την αδειοδότηση του φάσματος, αφού τα femtocells χρησιμοποιούν αδειοδοτημένο φάσμα (σε αντίθεση με το Wi-fi πχ), απαιτείται κανονιστική έγκριση η οποία από χώρα σε χώρα ενδέχεται να είναι διαφορετική.
- Μια πιθανή ανησυχία την οποία και μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε στις πιθανές προκλήσεις είναι οι ανησυχίες στο κομμάτι των πιθανών κινδύνων της ακτινοβολίας ραδιοσυχνότητας. Παρόλα αυτά, τα επίπεδα ισχύος των femtocells κινούνται σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτά των Wi-fi με αποτέλεσμα αυτές οι ανησυχίες προς το παρόν να μην είναι ιδιαίτερα βάσιμες. Από την άλλη πλευρά μένει να εξεταστεί το κατά πόσον σε ενδεχόμενες πυκνές διατάξεις σταθμών βάσης ο παράγοντας αυτός θα αλλάξει.

3.3.4.1 Τύποι Παρεμβολών

Στην παρούσα εργασία η διαχείριση των παρεμβολών γειτονικών femtocells παίζει σημαντικό ρόλο και αποτελεί κεντρικό στόχο του μηχανισμού τοποθέτησης χρηστών που αναπτύσσουμε. Σε αυτό το πλαίσιο, στην συνέχεια θα αναφέρουμε συνοπτικά τα δύο είδη παρεμβολών στα femtocells, τα οποία χωρίζονται σε παρεμβολές μεταξύ γειτονικών femtocell και μεταξύ femtocell και macrocell [26].

- Co-tier Interference

Αντιστοιχεί σε παρεμβολές ανάμεσα σε σταθμούς βάσης της ίδιας βαθμίδας, στην παρούσα εργασία ανάμεσα σε γειτονικά femtocells. Ένας σταθμός βάσης femtocell ενδέχεται να προκαλεί co-tier παρεμβολή ανερχόμενης ή κατερχόμενης ζεύξης προς τα γειτονικά του femtocell. Στην περίπτωση των συστημάτων με OFDMA τέτοιου είδους παρεμβολές συμβαίνουν όταν χρησιμοποιούνται κοινά υπο-κανάλια.

Συνεπώς αποτελεί ουσιαστικό στόχο η αποδοτική και προσεκτική κατανομή υπο-καναλιών σε OFDMA-based δίκτυα, ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές.

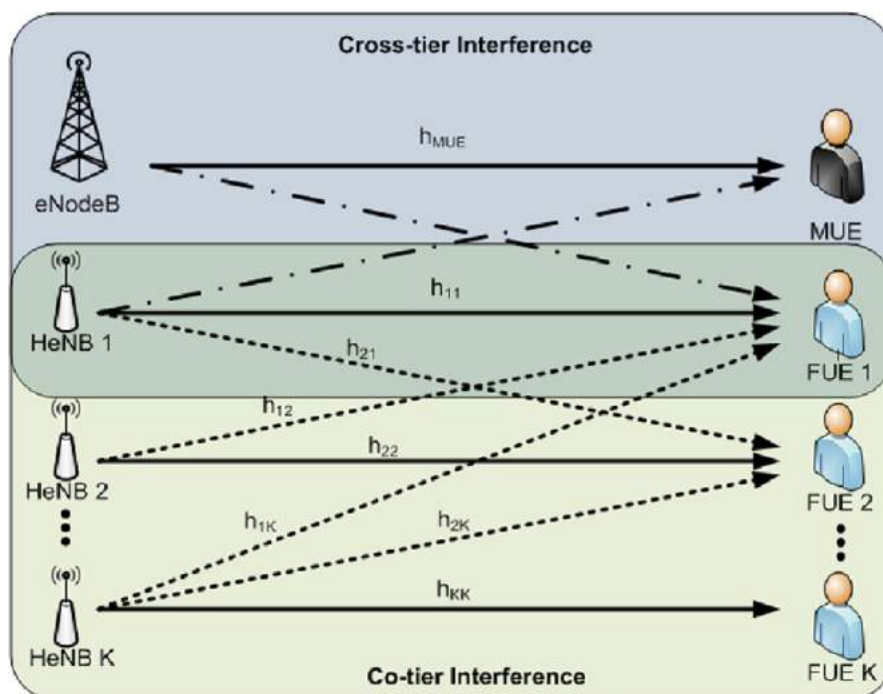
- Cross-tier Interference

Αντιστοιχεί σε παρεμβολές ανάμεσα σε σταθμούς βάσης διαφορετικών βαθμίδων, δηλαδή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ανάμεσα σε femtocells και επικαλυπτόμενα macrocells. Τον ρόλο του σταθμού που προκαλεί την παρεμβολή μπορεί να τον παίξει και ένας σταθμός femtocell ή και ένας σταθμός macrocell. Αντίστοιχα και εδώ όπως και στην Co-tier περίπτωση, η διαχείριση των παρεμβολών εξαρτάται από την χρήση των υπο-καναλιών.

Η επαναχρησιμοποίηση φάσματος ανάμεσα στους σταθμούς βάσης οδηγεί σε πιθανές cross-tier παρεμβολές, ενώ από την άλλη πλευρά η διαχείριση εύρους ζώνης δύναται να οδηγήσει σε αποφυγή co-tier παρεμβολών. Παράλληλα, η ύπαρξη παρεμβολών σημαντικού μεγέθους ενδέχεται να οδηγήσει σε ζώνες με ισχυρές παρεμβολές και υποβαθμισμένο QoS, οι οποίες ονομάζονται νεκρές ζώνες (Dead Zones).

Τέτοιες ζώνες είναι πιθανό να δημιουργηθούν λόγω μη υπολογισμένου επιπέδου ισχύος μετάδοσης σε συνδυασμό με τις αποστάσεις των χρηστών με τους σταθμούς βάσης. Με αυτή την έννοια είναι σημαντικό να αναπτυχθεί μια συνολική λύση, η οποία στα πλαίσια των OFDMA-based δικτύων υπάρχουν λόγω της δεδομένης ευελιξίας στην κατανομή φάσματος. Στην εικόνα 3.7 παρουσιάζονται τα προαναφερόμενα είδη παρεμβολών στα femtocells.

Εικόνα 3.8 Τύποι παρεμβολών στα Femtocells

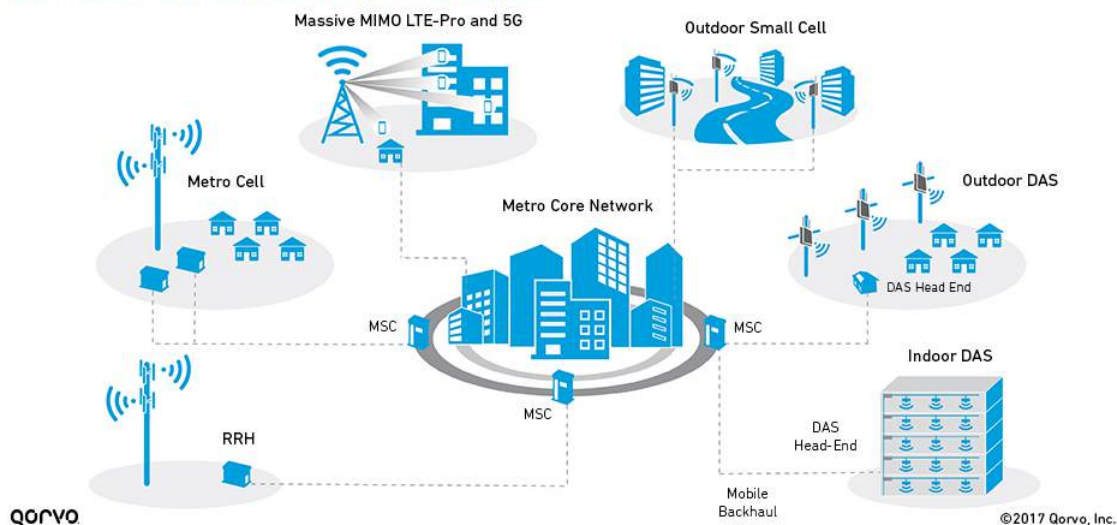


4. Αλγόριθμος βελτίωσης απόδοσης χρηστών σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα

4.1 Εισαγωγή

Οι αναβαθμισμένες απαιτήσεις των χρηστών με την πάροδο των τελευταίων γενιών κινητών δικτύων συνοδεύτηκε από αντίστοιχες βελτιώσεις στο επίπεδο παροχής υπηρεσιών από τους φορείς εκμετάλλευσης. Οι πιο βασικές απαιτήσεις που έχει ένας χρήστης ενός κινητού κινητού δικτύου τελευταίας γενιάς είναι σαφώς η ταχύτητα εξυπηρέτησης και η κάλυψή του, κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες και σε οποιοδήποτε σενάριο χρήσης. Επιπρόσθετα, ήδη από την έλευση του 4G, οι φορείς εξυπηρέτησης αναζήτησαν διάφορες προσεγγίσεις λύσεων για την ικανοποίηση των αναφερόμενων αναγκών. Είναι συνεπώς αντιληπτό, πως με την έλευση του 5G, αντίστοιχες λύσεις και προτάσεις εξυπηρέτησης θα εξετάζονται και θα προτείνονται συνεχώς.

Wireless Infrastructure: A Heterogeneous Network



Εικόνα 4.1 Ετερογενή δίκτυα 5G

Αναλύσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια αναλυτικά τους λόγους για τους οποίους τα τελευταία χρόνια η χρήση small cells έχει αυξηθεί με αλματώδεις ρυθμούς, για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων απόδοσης. Ειδικά εστιάσαμε στα femtocells και στα πλεονεκτήματά τους, καθώς αποτελούν μια ιδιαίτερα εύχρηστη και αποδοτική λύση για την βελτίωση της κάλυψης σε μια σειρά από σενάρια χρήσης. Εξυπηρετώντας έναν μικρό, αλλά αρκετό σε πολλές περιπτώσεις αριθμό χρηστών σε μια ορισμένη εμβέλεια, με χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ευκολία στην απόκτηση και την εγκατάσταση, τα femtocells προσαρμόζονται και υιοθετούνται σε μια σειρά από πιθανές περιπτώσεις[27].

Μια από τις λειτουργίες ενός femtocell, η οποία είναι ιδανική για εφαρμογή σε μια σειρά από μηχανισμούς βελτιστοποίησης, είναι η δυνατότητα ενός σταθμού βάσης femtocell να αναστείλει κάποια στοιχεία του, και να διατηρήσει μια κατάσταση πολύ χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, έως ότου χρειαστεί να ενεργοποιηθεί ξανά. Η κατάσταση αυτή ενός ονομάζεται sleep mode και αναλύεται ενδελεχώς σε διάφορες σχετικές έρευνες [28].

Μια από τις πρώτες έρευνες πάνω στην εφαρμογή της κατάστασης λειτουργίας sleep mode σε πυκνές διατάξεις σταθμών βάσης αναφέρει ότι υπάρχουν πολλαπλά οφέλη όσον αφορά την υιοθέτηση αυτού του εργαλείου [28].

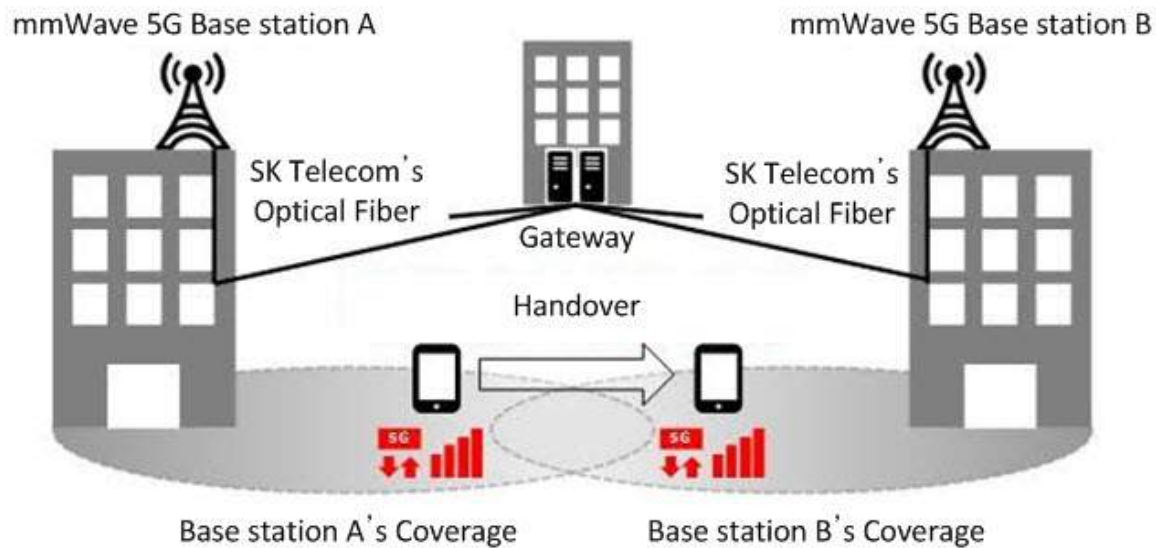
Τα αναφερόμενα οφέλη αφορούν την αύξηση της απόδοσης και την μείωση της κατανάλωσης του συνόλου του δικτύου, με την κατάλληλη επιλογή σταθμών βάσης για μετάβαση σε λειτουργία sleep mode.

Σχετικές έρευνες [29], [30], πρόσθεσαν στον υπολογισμό για την επιλογή των κατάλληλων σταθμών βάσης για μετάβαση σε sleep mode, την χρησιμοποίηση συστάδων (clusters). Με αυτό τον τρόπο έχουν προταθεί αλγόριθμοι οι οποίοι επιτυγχάνουν ενεργειακά οφέλη, εξυπηρετώντας κατά μια αυστηρή ιεραρχία το σύνολο των χρηστών.

Στο σκεπτικό των αναφερόμενων μηχανισμών διαχείρισης πυκνών συστάδων σταθμών βάσης femtocells, προστέθηκε αργά ή γρήγορα μια καινοτόμα παράμετρος που αφορά τα κίνητρα για έναν ιδιοκτήτη ενός femtocell να μοιραστεί τους πόρους του ιδιόκτητου σταθμού βάσης του.

Προκειμένω να επωφεληθεί το σύνολο των χρηστών, προτάθηκε η δυνατότητα υιοθέτησης υβριδικής πρόσβασης στο σύνολο των σταθμών βάσης, με την αυστηρή προϋπόθεση της διατήρησης της απόδοσης για το σύνολο των χρηστών.

Με άλλα λόγια, ακόμα και σταθμοί των οποίων οι χρήστες είναι ενεργοί, είναι πιθανόν να τεθούν σε κατάσταση sleep mode, αρκεί η απόδοση των χρηστών τους τα βελτιωθεί ή να διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα [31]. Οι χρήστες των οποίων οι σταθμοί βάσης τίθενται σε sleep mode, κατανέμονται σε γειτονικούς σταθμούς βάσης μέσω της τεχνικής του handover. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, υιοθετήσαμε τον αναφερόμενο μηχανισμό, συνυπολογίζοντας μια σημαντική παράμετρο.



Εικόνα 4.2 Handover σε 5G δίκτυο

Στον αναφερόμενο αλγόριθμο, προσθέσαμε ένα κατασκευασμένο σενάριο κίνησης (traffic model), το οποίο προκύπτει ως επέκταση ενός υπάρχοντος DBMAP traffic model[32]. Αναπτύσσοντάς το, επεκτείναμε την αρχική του προσέγγιση, ώστε να προσομοιώνει 4 IPP διαδικασίες, αντί για 1 στην αρχική του παρουσίαση.

Περισσότερες πληροφορίες για τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα παρατεθούν στην συνέχεια. Με την προσθήκη του συγκεκριμένου traffic model στον αναφερόμενο μηχανισμό, προστίθεται ένας βαθμός ρεαλισμού στα πειραματικά αποτελέσματα. Α

υτό συμβαίνει διότι θεωρούμε ανά πάσα προσομοίωση ότι οι χρήστες συμπεριφέρονται σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο κίνησης, αντί να θεωρούμε ότι είναι συνεχώς ενεργοί. Με αυτή την έννοια ένας χρήστης ενδέχεται να είναι ενεργός για ένα χρονικό διάστημα προσομοιώσεων και ανενεργός για ένα άλλο.

Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα του μηχανισμού παρέμειναν σε πολύ θετικό επίπεδο, αφού ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων οδηγεί σε μια ιομψή αλλά και ουσιαστική κατανομή χρηστών.

Επιτυγχάνεται βελτίωση της απόδοσης για το σύνολο των χρηστών, ακόμα και αυτών οι οποίοι δεν έχουν κάποιο femtocell στην κατοχή τους, συνδυάζοντας ενεργειακά οφέλη, αφού ένας σημαντικός αριθμός σταθμών βάσης αναστέλλει την λειτουργία του.

4.2 Περιγραφή Παραμέτρων Μηχανισμού

Με στόχο την αξιολόγηση του μηχανισμού που κατασκευάσαμε, μετρήσαμε την απόδοση του κάθε χρήστη μέσα από διαδοχικές προσομοιώσεις, με συνυπολογισμό της παραμέτρου του μοντέλου κίνησης (traffic model) που κατασκευάσαμε. Ο υπολογισμός των μετρικών του throughput και λόγου Σήματος προς Παρεμβολή συν Θόρυβος (SINR) αποτέλεσαν καθοδηγήτριες μεταβλητές, ενώ πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο που ακολουθείται στην παρουσίαση [31]. Οι συνθήκες προσομοίωσης αφορούσαν αστικά σενάρια χρήσης, συνεπώς χρησιμοποιήσαμε τις ντιρεκτίβες του LTE-A για αστικά περιβάλλοντα [32].

Όσον αφορά την υιοθέτηση της λειτουργίας sleep mode για τους σταθμούς βάσης οι οποίοι πληρούν τα κριτήρια της μεταβολής, αναφέρουμε ότι τα femtocells έχουν την δυνατότητα να διατηρούν ενεργά μόνο τα κυκλώματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο.

Συνεπώς, άλλα στοιχεία του σταθμού βάσης, όπως η κεραία εκπομπής σήματος, τίθενται σε αδράνεια. Με αυτό τον τρόπο όχι μόνο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας, αλλά μειώνονται και σε σημαντικό βαθμό οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών σταθμών βάσης. Αυτό είναι ένα ιδιαιτέρως σημαντικό επίτευγμα του μηχανισμού, αν αναλογιστεί κανείς ότι, όπως περιγράψαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι παρεμβολές είναι από τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε πυκνά ετερογενή δίκτυα.

4.2.1 Traffic Model

Το traffic model το οποίο εφαρμόσαμε στις προσομοιώσεις μας είναι μια επέκταση ενός DBMAP-based μοντέλου, το οποίο παρουσιάστηκε προκειμένου να συνδυάσει την πρακτικότητα και την αποτελεσματικότητα των ipp-based traffic model, με την ευκολία που παρέχει ένα διακριτό μοντέλο υπολογισμών [34]. Παράλληλα, η διακριτή του φύση το καθιστά εύκολο στην εφαρμογή προσομοιώσεων, χωρίς να χάνει τις ιδιότητες μίμησης της συμπεριφοράς ενός διαδικτυακού χρήστη.

Προσθέσαμε παραπάνω παραμέτρους από ότι στην αρχική εισαγωγή του συγκεκριμένου μοντέλου, προκειμένου το παραγόμενο traffic model να είναι πιο ρεαλιστικό, αξιόπιστο και πιστό.

Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός του προτεινόμενου traffic model, παραθέτουμε μια σύντομη παρουσίαση του Interrupted Poisson Process (IPP) traffic model, καθώς θα χρησιμοποιήσουμε τις παραμέτρους του ώστε να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά των χρηστών του ετερογενούς δικτύου. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός είναι ουσιαστικά η διακριτή έκδοχή του IPP.

Τα μοντέλα κίνησης έχουν αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο ανάπτυξης, πρόβλεψης και ανάλυσης των κινητών δικτύων. Η δυνατότητα προσομοιώσεων και εξαγωγής συμπερασμάτων σχετικά με μετρικές και μεταβλητές, είναι μερικές φορές δύσκολο ή και δαπανηρό να πραγματοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες.

Με την εφαρμογή ενός αξιόπιστου μοντέλου κίνησης, είναι εύκολο να προβλεφθεί η συμπεριφορά ενός δικτύου και να καταγραφούν ενδεχόμενα προβλήματα και εμπόδια. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η ανάπτυξη των διαδικτυακών τεχνολογιών και της υιοθέτησης μηχανισμών αποφυγής εμποδίων, όπως οι συγκεντρωτικές παρεμβολές, οι αδυναμίες κάλυψης σε ορισμένες περιοχές του δικτύου και όποια άλλη μετρική είναι επιθυμητό να ερευνηθεί.

Το traffic model που χρησιμοποιήσαμε είναι ένας συγκεκριμένος 4 IPP διαδικασιών. Μοντέλα κίνησης τα οποία βασίζονται σε IPP διαδικασίες έχουν χρησιμοποιηθεί ενδελεχώς στο παρελθόν για την προσομοίωση διαδικτυακής κίνησης σε διάφορες τεχνολογίες.

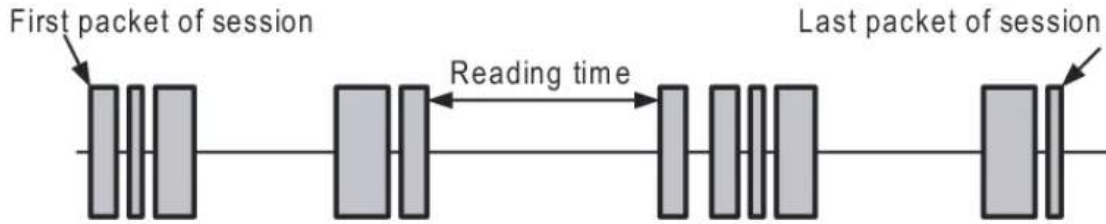
Από την εφαρμογή τους στο τυπικό Ethernet και το Wi-fi[34], μέχρι και στα πιο σύγχρονα κινητά δίκτυα, τα Traffic Models με βάση IPP διαδικασίες έχουν αποδειχτεί μια αξιόπιστη λύση για την πραγματοποίηση προσομοιώσεων.

Προκειμένου να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο το οποίο μιμείται την συμπεριφορά ενός χρήστη στο διαδίκτυο, ξεκινάμε από την εξέταση της κατανομής των πακέτων στον χρόνο. Η κεντρική ιδέα στηρίζεται στην παραδοχή ότι μια τυπική σύνδεση (session) κατά την πλοήγηση στο διαδίκτυο, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια αλληλουχία ενεργών (ON) και ανενεργών (OFF) χρονικών περιόδων.

Κατά την διάρκεια των ενεργών περιόδων θεωρούμε ότι παράγεται διαδικτυακή κίνηση (traffic), ενώ κατά την διάρκεια των ανενεργών περιόδων η κίνηση μπορεί να θεωρηθεί μηδενική.

Ένα παράδειγμα το οποίο απεικονίζει πιο κατανοητά το παραπάνω σχήμα, είναι οι περιπτώσεις όπου ο χρήστης κατεβάζει ένα αρχείο, στέλνει μια αίτηση για την λήψη μιας ιστοσελίδας, παρακολουθεί με live stream διάφορα πολυμέσα (ON), ενώ αντίστοιχα οι περίοδοι όπου ο χρήστης μπορεί να διαβάζει ένα κείμενο, να βλέπει τις φωτογραφίες του ή να πλοηγείται στο σύστημα αρχείων του υπολογιστή ή του κινητού του, μπορούν να χαρακτηριστούν ως ανενεργές (OFF).

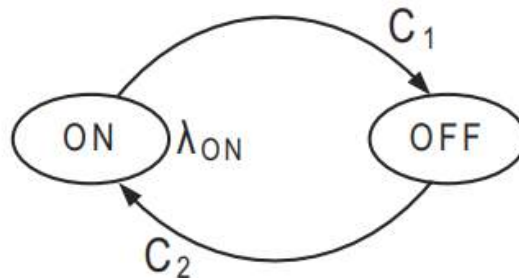
Οι διάρκειες των ON και OFF περιόδων είναι κατανεμημένες εκθετικά [32]. Μια σχηματική αναπαράσταση που απεικονίζει μια τέτοια χρονική περίοδο αφορά η εικόνα 4.3. Οι γκριζες περιοχές μπορούν να θεωρηθούν ως οι ενεργές χρονικές περίοδοι, κατά την διάρκεια των οποίων παράγεται διαδικτυακή κίνηση.



Εικόνα 4.3 Χρονική κατανομή ON και OFF περιόδων σε ένα διαδικτυακό session

Μπορεί εύκολα να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μέση διάρκεια των ON περιόδων είναι $1/C_1$, ενώ των OFF περιόδων είναι $1/C_2$, όπως διαφαίνεται και στην εικόνα 4.4. Οι τιμές των C_1 και C_2 είναι οι αντίστοιχες πιθανότητες μετάβασης από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF και αντίστροφα. Αντίστοιχα η πιθανότητα του να βρίσκεται το μοντέλο σε ενεργά κατάσταση OFF, υπολογίζεται όπως στην εξίσωση (1):

$$P_{OFF} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} (1)$$



Εικόνα 4.4 Τυπικό ON OFF μοντέλο

Το IPP μοντέλο ονομάζεται επίσης και ON-OFF traffic model [35], το οποίο είναι μια αλυσίδα Markov με δύο καταστάσεις, όπως στην εικόνα 4.4. Η συμπεριφορά της συγκεκριμένης αλυσίδας Markov περιγράφεται πλήρως από 3 παραμέτρους: την πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON, την πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση ON στην κατάσταση OFF και τον ρυθμό άφιξης πακέτων λ_{ON} , κατά την διάρκεια της κατάστασης ON. Οι πιθανότητες μετάβασης ορίζονται ως ο αριθμός των πιθανών μεταβάσεων ανά μια συγκεκριμένη μονάδα χρόνου.

Κατά την διάρκεια της κατάστασης ON, ο μηχανισμός παράγει πακέτα δεδομένων σύμφωνα με την κατανομή Poisson, με ρυθμό άφιξης λ_{ON} . Σαν αποτέλεσμα, ο ενδιάμεσος χρόνος άφιξης πακέτων είναι κατανομημένος εκθετικά σύμφωνα με την εξίσωση (2):

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda_{ON} * t} \quad (2)$$

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επεκτείνουμε το παραπάνω σχήμα, επιλέγοντας να χρησιμοποιήσουμε τον συνδυασμό παραπάνω διαδικασιών Poisson, όπου και η κάθε μια έχει διαφορετικές παραμέτρους. Με αυτό τον τρόπο παράγεται ένα πιο αληθοφανές αποτέλεσμα, αφού η παραπάνω επιλογή είναι πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες χρήσης.

Ο τυπικός συμβολισμός ορίζει ότι ο αριθμός των διαδικασιών που συμπεριλαμβάνονται σε έναν τέτοιο μηχανισμό τοποθετείται μπροστά από το όνομα του μοντέλου. Επιλέξαμε να συμπεριλάβουμε 4 διαδικασίες IPP, συνεπώς ονομάσαμε το παραγόμενο μοντέλο κίνησης 4IPP traffic model.

Το ενδιάμεσο στάδιο από το IPP traffic model στο κατασκευασμένο είναι η εφαρμογή των μηχανισμών ενός DBMAP, το οποίο ουσιαστικά αποτελεί μια διακριτή εκδοχή ενός IPP traffic model. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιεί τις ακριβώς ίδιες παραμέτρους και αυτό πραγματοποιήσαμε και εμείς κατά την διαδικασία των προσομοιώσεων.

Το DBMAP έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την μοντελοποίηση διαδικτυακής κίνησης [32], ενώ έχει αποδειχτεί ότι πολλές γνωστές διαδικασίες αφίξεων, όπως η διαδικασία Bernoulli, η Markov Modulated Bernoulli Process (MMBP) διαδικασία και η Switched Batch Bernoulli Process (SBBP) μπορούν να αναχθούν σε ειδικές περιπτώσεις του DBMAP.

Στα πλαίσια της παρουσίασης των μηχανισμών του DBMAP, χωρίζουμε τον χρονικό άξονα σε ίσα χρονικά διαστήματα, τα οποία ονομάζουμε χρονικές σχισμές (slots) [36]. Στην συνέχεια αναθέτουμε σε κάθε σχισμή έναν αύξων αριθμό, έτσι ώστε να αναφερόμαστε στο χρονικό διάστημα $[t-1, t)$ με τον αριθμό σχισμής t .

Θεωρούμε μια στοχαστική διαδικασία που ονομάζουμε S και αντιστοιχεί σε έναν διακριτό σύνολο t . Αντίστοιχα, θεωρούμε ότι κάθε σχισμή αντιστοιχίζεται ένα προς ένα με μια κατάσταση από τον αναφερόμενο χώρο, έτσι ώστε: $S^t \in S$. Επίσης, κάθε σχισμή αντιστοιχίζεται με μια σχέση 1 προς 1 με έναν ακέραιο θετικό αριθμό X^t , ο οποίος είναι ο αριθμός των νέων αφίξεων πακέτων κατά την χρονική σχισμή t που περιγράψαμε παραπάνω. Σημειώνουμε ότι στην γενική περίπτωση όπου θέλουμε να μιμηθούμε ένα γενικό μοντέλο διαδικτυακής κίνησης, ο αριθμός των νέων αφίξεων κατά την διάρκεια μιας σχισμής είναι απρόβλεπτος και τυχαίος.

Η πιθανότητα n νέων αφίξεων κατά την διάρκεια της σχισμής t και της μετάβασης της συγκεκριμένης στοχαστικής διαδικασίας από την κατάσταση I στην κατάσταση j κατά το πέρας της χρονικής σχισμής t είναι:

$$Pr\{X^t = n, S^{(t+1)} = j \vee S^t = i\} = b_{ij}(n) \quad (3)$$

Με στοιχεία αυτές τις πιθανότητες μετάβασης, μπορούμε να κατασκευάσουμε μητρώα όπου κάθε στοιχείο $\alpha_{i,j}$ απεικονίζει την πιθανότητα της μετάβασης από την κατάσταση i στην κατάσταση j . Αυτά τα μητρώα είναι απεριοδικά, αφού δεν παρουσιάζουν επαναλαμβανόμενες διαδρομές, συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι περιοδικά.

Επίσης είναι και αμείωτα με το παρόμοιο σκεπτικό και συνεπώς μπορούμε να εξάγουμε στην στατική πιθανότητα p_i να βρεθεί η διαδικασία S^t στην κατάσταση i , με δεδομένο ότι έχει ξεκινήσει από την κατάσταση j , ως εξής:

$$p_i = \lim_{t \rightarrow \infty} Pr\{S^t = i \vee S^1 = j\} \quad (4)$$

Ο μέσος ρυθμός αφίξεων λ σε μια χρονική σχισμή είναι ένας σημαντικός δείκτης τον οποίον χρησιμοποιούμε στα πλαίσια των προσομοιώσεων:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i p_i \quad (5)$$

Συνοψίζοντας τις παραπάνω έννοιες σε ένα πιο πρακτικό επίπεδο, μπορούμε να υπολογίσουμε τον μέσο ρυθμό άφιξης κατά την διάρκεια μιας περιόδου ON, ως τον αριθμό των αφιχθέντων πακέτων κατά την διάρκεια ενός αριετά μεγάλου σε διάρκεια διαστήματος T , σχετίζοντας το με την διάρκεια του διαστήματος ως εξής:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_{t=0}^{T-1} X^t}{T} \right) = \lambda \quad (6)$$

Η κεντρική ιδέα της της ανάλυσης που έπεται, είναι ότι τελικά θα είμαστε σε θέση να εφαρμόσουμε ένα DBMAP-based traffic model στα πλαίσια των προσομοιώσεων του αλγόριθμου κατανομής χρηστών σε πυκνές διατάξεις ετερογενών δικτύων αποτελούμενων από femtocells, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους ενός 4IPP συνεχούς χρόνου traffic model. Η μετάβαση από το IPP στο DBMAP περιγράφεται στην συνέχεια και είναι μια απλή και κομψή διαδικασία, η οποία διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου που παρουσιάζεται.

4.2.2 Λογική Αλγόριθμου (User Allocation Mechanism)

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε το κεντρικό σκεπτικό στο οποίο βασιστήκαμε για να υλοποιήσουμε τις προσομοιώσεις του μηχανισμού κατανομής χρηστών. Τα κύρια συστατικά κομμάτια στα οποία και εστιάζουμε είναι οι τεχνικές με τις οποίες αποφασίζεται η κατανομή ενός χρήστη στον αντίστοιχο σταθμό βάσης και οι εγγυήσεις που παρέχει ο μηχανισμός στους χρήστες, προκειμένου να μοιραστούν τους πόρους των femtocells τους με εξωτερικούς χρήστες.

Η ιδιωτική φύση των femtocells ενδέχεται πολλές φορές να οδηγήσει σε μη ελεγχόμενη ανάπτυξη δικτυακών διατάξεων, η οποία μπορεί να προκαλέσει σοβαρή υποτίμηση στο επίπεδο των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Παρότι τα femtocells παραμένουν μια πολύ ευέλικτη λύση σε μια πληθώρα σεναρίων και περιπτώσεων, η απουσία κεντρικού συντονισμού, σχεδιασμού και μελέτης της πιθανής διάταξης των σταθμών βάσης ενδέχεται να αναδείξει μια σειρά από προβλήματα.

Υπενθυμίζουμε ότι στον αντίποδα, η κατανομή του επιπέδου σταθμών macrocell βασίζεται πάντα σε μελετημένη και προσχεδιασμένη διαδικασία. Κατά την διάρκεια μιας σχετικής μελέτης λαμβάνονται υπόψιν μια σειρά από παράγοντες, όπως η τοποθεσία, η χρησιμοποίηση φάσματος και η πυκνότητα των χρηστών της περιοχής, ώστε να επιτευχθεί το υψηλότερο δυνατό επίπεδο υπηρεσιών.

Παράλληλα, με την διεξαγωγή μιας τέτοιας προεργασίας αποφεύγονται σε σημαντικό βαθμό και τα ζητήματα παρεμβολών, τα οποία αποτελούν ίσως την πιο βασική αδυναμία των ετερογενών δικτυακών διατάξεων. Είναι πολύ λογικό να ισχυριστούμε ότι αν δεν υπήρχε αντίστοιχη μελέτη και οι σταθμοί βάσης τοποθετούνταν τυχαία, ίσως και σε πολύ κοντινές αποστάσεις και χρησιμοποιώντας παρόμοιες συχνότητες, οι παρεμβολές θα ήταν συντριπτικές και καταστροφικές για την απόδοση του δικτύου.

Όπως αναλύσαμε και σε προηγούμενα κεφάλαια, τα femtocells υιοθετούν συχνά την πολιτική κλειστής πρόσβασης, καθιστώντας την διαδικασία handover απίθανη. Αυτή η πολιτική ενδέχεται να οδηγήσει σε σενάρια πυκνών αστικών διατάξεων, σε ισχυρές παρεμβολές, από τα πολλά γειτονικά femtocells.

Συνυπολογίζοντας την συντριπτικά μειωμένη απόδοση των χρηστών οι οποίοι δεν συγκαταλέγονται στο σύνολο των χρηστών που έχουν στην κατοχή τους ένα femtocell, η απόλυτη πλειοψηφία των χρηστών σε ένα τέτοιο σενάριο υφίσταται αρνητικές συνέπειες λόγω της μη προμελετημένης κατανομής των σταθμών βάσης femtocell.

Σε αντιστοιχία, ένας χρήστης ο οποίος δεν κατέχει ένα femtocell και αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα απόδοσης, μπορεί να οδηγηθεί στην απόκτηση ενός femtocell, το οποίο θα επιβαρύνει ακόμα περισσότερο την κατάσταση, συμβάλλοντας σε επιπλέον παρεμβολές και μείωση της απόδοσης. Σε αυτό το σκεπτικό προστίθεται ακόμα και το γεγονός της αλόγιστης ενεργειακής κατανάλωσης, χωρίς ουσιαστικό ανταποδοτικό αντίκρουσμα.

Η αρχική πρόταση πάνω στην οποία βασίσαμε την κατασκευή του μηχανισμού της παρούσας εργασίας, κάνει χρήση δύο πολύ βασικών καταστάσεων λειτουργίας των femtocells [31]. Από την μια πλευρά γίνεται εφαρμογή της υβριδικής πολιτικής πρόσβασης, ενώ ένας αριθμός από σταθμούς βάσης femtocell μεταβαίνει σε sleep mode.

Όπως αναλύσαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η λειτουργία sleep mode είναι μια λειτουργία των femtocell, η οποία επιτρέπει σε ορισμένα στοιχεία τους να καθιστούν ανενεργά. Παράλληλα, εξασφαλίζεται ότι όποτε κριθεί αναγκαίο, το femtocell μπορεί να επανέλθει στην κατάσταση κανονικής λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο, μειώνονται σημαντικά οι παρεμβολές, ενώ οι χρήστες του σταθμού βάσης κατανέμονται σε γειτονικά femtocells.

Από την άλλη πλευρά, η πολιτική υβριδικής πρόσβασης συνδυάζει μια ιδανική και αποτελεσματική μίξη ανάμεσα στην πολιτική κλειστής και ανοικτής πρόσβασης. Ενώ η ανοιχτή πρόσβαση επιτρέπει σε κάθε χρήστη στην εμβέλεια του femtocell να συνδεθεί σε αυτό, η κλειστή επιτρέπει μόνο στους χρήστες που είναι καταχωρημένοι στην λίστα του GSG. Συνεπώς, εξωτερικοί χρήστες ενδέχεται να αποκτήσουν πρόσβαση κάτω από ορισμένους περιορισμούς, ενώ η πλειοψηφία των πόρων διατίθεται στους χρήστες της CSG.

Το δυσκολότερο εμπόδιο το οποίο έχουμε να υπερπηδήσουμε σχετικά με την υιοθέτηση του προτεινόμενου μηχανισμού αφορά την συγκατάθεση των χρηστών για την αποδοχή εξωτερικών χρηστών στα femtocells του. Ουσιαστικά μηχανισμοί κατανομής χρηστών τέτοιου είδους, προσφέρουν ιδιωτικούς πόρους σε εξωτερικούς χρήστες. Όμως από την στιγμή που με τους διαθέσιμους πόρους είναι δυνατή η ικανοποιητική ή και ακόμα βελτιωμένη εξυπηρέτηση όλων των χρηστών τα επιχειρήματα για την αποδοχή τέτοιων πολιτικών είναι πολύ ισχυρά. Βεβαιώνοντας τους ιδιοκτήτες femtocell ότι η εμπειρία τους θα βελτιωθεί, είναι λογικό να γίνει αποδεκτή η υιοθέτηση και εφαρμογή αυτού του μηχανισμού.

Επιπλέον, επιτρέπουμε ακόμα και σε σταθμούς βάσης οι οποίοι εξυπηρετούν ενεργούς χρήστες να μεταβούν σε sleep mode, αρκεί οι προϋποθέσεις του μηχανισμού να ικανοποιούνται.

Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει κατά την πραγματοποίηση κάθε προσομοίωσης το αν ο κάθε καταγεγραμμένος χρήστης θα θεωρηθεί ενεργός ή ανενεργός. Αυτό το βήμα υλοποιείται εξετάζοντας για κάθε έναν από τους χρήστες, την πιθανότητα κάποια από τις 4 IPP διαδικασίες που τον αφορούν να είναι ενεργή. Αν είναι έστω και μια, θεωρούμε ότι μια ροή πακέτων προς αυτόν τον χρήστη είναι ενεργή και άρα τον συγκαταλέγουμε στους υπολογισμούς.

Μετά από αυτό το βήμα, ο αλγόριθμος εξετάζει το εάν ένας σταθμός βάσης femtocell μπορεί να μεταβεί σε sleep mode. Η επιλογή πραγματοποιείται εξετάζοντας clusters από femtocells και κατά πόσο είναι δυνατή η ανακατανομή ενός χρήστη σε ένα γειτονικό femtocell. Θέτουμε την αυστηρή προϋπόθεση ότι κάθε χρήστης ενός υποψήφιου για sleep mode femtocell, θα πρέπει τουλάχιστον να διατηρήσει την απόδοσή του στα ίδια επίπεδα. Αυτή η μετρική καθορίζεται θέτοντας ότι το καινούριο throughput θα είναι υψηλότερο του προηγούμενου:

$$THR_{NEW} \geq THR_{OLD} \quad (7)$$

Όπως αναλύσαμε, ένα ενεργό femtocell θα υποδεχτεί τους χρήστες ενός γειτονικού femtocell το οποίο θα τεθεί σε κατάσταση sleep mode. Η μείωση του φάσματος που θα διαπίστωνε ένας χρήστης όπου μετατίθεται από το femtocell του, ανταποδίδεται από την αντίστοιχη μείωση του επιπέδου των παρεμβολών στην αντίστοιχη διάταξη. Από την άλλη πλευρά, ο σταθμός βάσης που θα τον υποδεχτεί ενδέχεται να αυξήσει τα επίπεδα της ισχύος μετάδοσης του, ώστε να διατηρήσει την απόδοση του στα ίδια τουλάχιστον επίπεδα. Η αναφερόμενη αύξηση ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{INC} \geq \frac{R * \left(+ \sum_{B'} P_{B'} * G_{u,B'} \right) - P_{OLD} * G_{u,N}}{G_{u,N}} \quad (8)$$

όπου ο όρος $\Delta f + \sum_{B'} P_{B'} * G_{u,B'}$ υποδηλώνει το επίπεδο παρεμβολών στον χρήστη όταν συνδέεται στο νέο femtocell, ο όρος $G_{u,N}$ την αύξηση της ισχύος του σε σχέση με τον σταθμό από τον οποίο φεύγει και ο όρος P_{OLD} το επίπεδο ισχύος σε αυτό τον σταθμό.

Το R υπολογίζεται ως εξής:

$$R = \frac{(1 + SINR_{OLD})^{\left(\frac{N_2+1}{N_1}\right)}}{\alpha} \quad (9)$$

όπου το $SINR_{OLD}$ είναι ο λόγος SINR στον οποίο θα υπόκεινται ο χρήστης εάν παρέμενε στο femtocell που τον εξυπηρετούσε αρχικά.

Ο αριθμός N_2 υποδηλώνει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από το γειτονικό femtocell, ενώ ο αριθμός N_1 υποδηλώνει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από τον αρχικό σταθμό βάσης. Η αύξηση της ισχύος του σταθμού προορισμού προφανώς περιορίζεται από τα αντίστοιχα επιτρεπτά επίπεδα του σταθμού προορισμού.

Η πολιτική υβριδικής πρόσβασης υιοθετείται από τα γειτονικά femtocell, προσφέροντας παρόμοια κίνητρα ώστε να δεχθούν τους χρήστες των οποίων οι σταθμοί βάσης μεταβαίνουν σε sleep mode. Θέτοντας σταθμούς femtocells σε sleep mode πετυχαίνουμε μειωμένα επίπεδα παρεμβολών και με αυτό τον τρόπο εξισορροπούμε το μειωμένο διαθέσιμο φάσμα λόγω της υβριδικής πρόσβασης. Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενες έρευνες [32], η προσαρμογή της ισχύος αρκεί να καλύψει την συγκεκριμένη μείωση του φάσματος.

Τέλος, ο μηχανισμός πραγματοποιεί έλεγχο για όλα τα femtocells του ίδιου cluster, τα οποία δεν παίρνουν μέρος στην ανακατανομή των χρηστών. Εξετάζει το απαιτούμενο επίπεδο ισχύος και με αυτό τον τρόπο διασφαλίζει ότι και αυτό το σύνολο χρηστών δεν θα διαπιστώσει μείωση στην απόδοσή του.

Αυτό το σχήμα ανταλλαγών ουσιαστικά μπορεί να ιδωθεί σαν ένα ευεργετικό αποτέλεσμα της απενεργοποίησης των femtocells. Με αυτό τον τρόπο εξισορροπούνται και όποιες συνέπειες από την αύξηση ισχύος των γειτονικών femtocells. Οι ανταλλαγές των χρηστών πραγματοποιούνται εάν οι παραπάνω έλεγχοι αποδειχθούν έγκυροι.

4.2.3 4IPP DBMAP Traffic Model

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε μερικά πιο λεπτομερή στοιχεία για το παραγόμενο traffic model. Η προσθήκη που πραγματοποιήσαμε στο DBMAP το οποίο παρουσιάζεται στην αρχική σχετική εργασία [32], σχετίζεται με το ότι χρησιμοποιούμε τον συνδυασμό 4IPP διαδικασιών.

Κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες έχει τις δικές της παραμέτρους και αντιστοιχίζεται σε μια ροή πακέτων προς τον χρήστη. Αντίστοιχα θεωρείται σαν μια ροή πληροφορίας η οποία μπορεί να αφορά οποιαδήποτε συμπεριφορά του χρήστη.

Η διακριτή φύση του DBMAP είναι ένα στοιχείο το οποίο αποδεικνύεται κεντρικό στην ανάλυσή μας. Αυτό το γεγονός μας επιτρέπει να εφαρμόσουμε το αναφερόμενο traffic model στις μετρήσεις μας προσαρμόζοντας τις παραμέτρους του στις ανάγκες μας. Τα παρακάτω αφορούν κάθε μια από τις 4 IPP διαδικασίες που χρησιμοποιούμε.

Για κάθε μια από τις 4 IPP διαδικασίες που εξετάζουμε, η πιθανότητα η ενεργή περίοδος (ON), να υπερβεί μια καθορισμένη τιμή του t ορίζεται ως εξής:

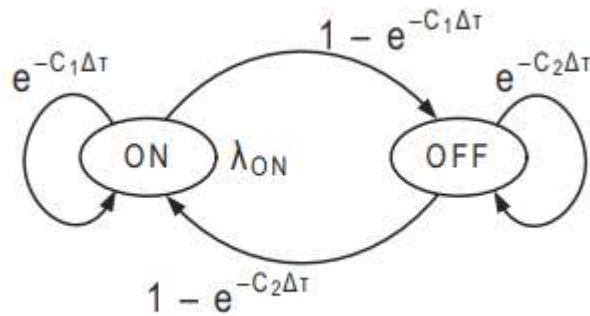
$$Pr_{T_{ON} > t} = e^{-C_1 * t} \quad (10)$$

με την αντίστοιχη πιθανότητα για μια ανενεργή περίοδο να είναι:

$$Pr_{T_{OFF} > t} = e^{-C_2 * t} \quad (11)$$

Σημειώνουμε ότι οι μέσες διάρκειες των ON και OFF περιόδων είναι ίσες με και αντίστοιχα $E_{T_{OFF}} = 1/C_2$. Η διακριτοποίηση των IPP διαδικασιών προκύπτει χωρίζοντας τον άξονα του χρόνου σε σχισμές, κατά την διάρκεια των οποίων η IPP παραμένει σε μία από τις 2 καταστάσεις. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο ότι οι 4 διαφορετικές διαδικασίες που θα χρησιμοποιήσουμε έχουν διαφορετικές πιθανότητες μετάβασης και αντιστοιχούν ουσιαστικά σε διαφορετικές ροές πληροφορίας. Κάθε μία από τις 4 IPP διαδικασίες απεικονίζεται ως εξής:

Εικόνα 4.5 Αλυσίδα Markov IPP διαδικασιών



Όπου το Δt υποδηλώνει τις χρονικές σχισμές και αντίστοιχα τα C_1 και C_2 τις πιθανότητες μετάβασης για κάθε μια από τις 4 IPP διαδικασίες.

Τις πιθανότητες μετάβασης τις προσαρμόζουμε στους ρυθμούς πληροφορίας που αντιστοιχεί στα επίπεδα του 5G, και τις δανειζόμαστε από τον παρακάτω πίνακα [35]:

source i	λ_i IPP in ON state (pkts/unit-of-time)	$c1_i$ (transition probability rate from ON to OFF) transitions/ unit-of-time	$c2_i$ (transition probability rate from OFF to ON) transitions/ unit-of-time	Averaged over both ON and OFF states (pkts/unit-of-time)
IPP#1	2.679	4.571E-01	3.429E-01	1.1480
IPP#2	1.698	1.445E-02	1.084E-02	.7278
IPP#3	1.388	4.571E-04	3.429E-04	.5949
IPP#4	1.234	4.571E-06	3.429E-06	.5289
<i>4IPP Average Rate</i> (pkts/unit-of-time) =				3.00

Πίνακας 4.1 Πιθανότητες μεταβάσεων 4IPP ανά μονάδα χρόνου

Με την παραπάνω μέθοδο, οι προσομοιώσεις μας συμπεριλαμβάνουν ένα κομψό αλλά ταυτόχρονα αποτελεσματικό και ρεαλιστικό μαθηματικό μοντέλο ενός DBMAP-based traffic model, ενσωματώνοντας τις παραμέτρους 4IPP διαδικασιών.

5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

5.1 Περιβάλλον και Παράμετροι Προσομοίωσης

Οι προσομοιώσεις του μοντέλου που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Το μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και στην αντιστοίχιση της θεωρητικής προσέγγισης με την ακριβή μοντελοποίησή τους.

Πρωταρχικός στόχος ήταν η αξιολόγηση της απόδοσης των χρηστών του ετερογενούς δικτύου. Όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, στο μοντέλο μας χρησιμοποιήσαμε την αρχιτεκτονική

Long Term Evolution Advances (LTE-A) και την τεχνολογία OFDMA. Οι πυκνές διατάξεις σταθμών βάσεις femtocells που προσομοιώσαμε εκμεταλλεύονται την ευέλικτη κατανομή των διαθέσιμων πόρων φάσματος που υποστηρίζει η τεχνολογία OFDMA.

Στις προσομοιώσεις μας θεωρήσαμε ένα ετερογενές δίκτυο αποτελούμενο από 9 macrocells. Τοποθετήσαμε τους σταθμούς βάσης στο κέντρο κάθε κελιού της κυψέλης και θέσαμε την εκπομπή του στα 46dBm και την εμβέλειά του στα 250m.

Η κατανομή των femtocells πραγματοποιήθηκε τυχαία, όπως και των χρηστών τους. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις για αριθμό 250, 350, 450, 550 και 650 χρηστών. Επίσης, στα πλαίσια της υπόθεσης ότι το περιβάλλον μας είναι αστικό, θεωρήσαμε ότι κάθε σταθμός βάσης θα μπορεί να εξυπηρετεί μέχρι 3 συνδρομητές.

Οι παράμετροι των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1:

Παράμετρος	Τιμή
Macrocells	9
Εμβέλεια Macrocell	250m
Femtocells	250 350 450 550 650
Συνδρομητές Femtocells	1-3 (ανά femtocell)
Αρχικοποίηση Χρηστών	0% 20% 40% 60%
Bandwidth	20MHz
Carrier frequency	2GHz
Ισχύς εκπομπής σταθμών βάσης	46dBm
Μέγιστη ισχύς εκπομπής FBS	21dBm

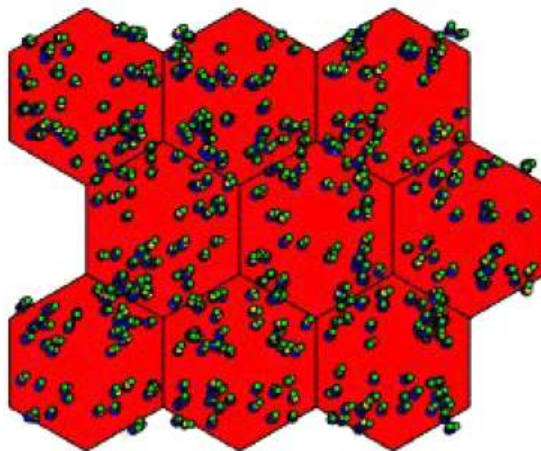
Πίνακας 5.1 Παράμετροι Προσομοιώσεων

Επιπλέον, στα πλαίσια των μετρήσεών μας θεωρήσαμε ότι κατά την εκκίνηση των προσομοιώσεων, το ποσοστό των χρηστών το οποίο ήταν ενεργό λάμβανε διάφορες τιμές, προκειμένου να λάβουμε και πιο ασφαλή συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού που υλοποιήθηκε. Τα ποσοστά αρχικοποίησης των χρηστών αφορούσαν το 0, 20, 40 και 60% του συνόλου των χρηστών του ετερογενούς δικτύου.

Παρατηρήσαμε ότι ανεξαρτήτως του ποσοστού των χρηστών που θεωρήθηκαν ενεργοί, τα ευεργετικά αποτελέσματα του αλγόριθμου παρέμειναν. Σε αντιστοιχία με πραγματικά σενάρια μπορεί να θεωρηθεί ότι κάθε ποσοστό αντιστοιχεί και σε αντίστοιχη ώρα λειτουργίας του δικτύου. Για παράδειγμα ένα σενάριο όπου η πλειοψηφία των χρηστών είναι ενεργή ενδέχεται να αφορά μια ώρα αιχμής στο δίκτυο κτλ.

Επίσης, σημειώνουμε ότι οι μετρήσεις και οι συγκρίσεις απόδοσης των χρηστών συνολικά ανά cluster, πραγματοποιήθηκαν με σημείο αναφοράς το σύνολο των ενεργών χρηστών εκείνη τη στιγμή.

Σε αυτό το σημείο σημειώνουμε ότι ο αριθμός των χρηστών σε κάθε προσομοίωση ήταν εντελώς τυχαίος και υπολογιζόταν από τις 4IPP διαδικασίες του κάθε χρήστη. Έχοντας ορίσει τις παραπάνω μετρικές, εφαρμόσαμε το traffic model που περιγράψαμε ανάμεσα από κάθε προσομοίωση. Με αυτή την αντιστοιχία κάθε προσομοίωση απεικόνιζε μια χρονική στιγμή (time slot) κατά την οποία η κατάσταση του κάθε χρήστη παρέμενε σταθερή. Αρχούσε μια διαδικασία ενός χρήστη να συνεχίζει να αποστέλλει πακέτα δεδομένων, ώστε να θεωρήσουμε ότι ο αντίστοιχος χρήστης παρέμενε ενεργός και στην επόμενη προσομοίωση.



Εικόνα 5.1 Στιγμιότυπο του δικτύου

Στην εικόνα 5.1 παραθέτουμε ένα τυχαίο στιγμιότυπο του προσομοιωμένου δικτύου. Τα κόκκινα εξάγωνα αντιστοιχούν στην εμβέλεια των σταθμών macrocell, ενώ τα σημάδια απεικονίζουν την θέση των σταθμών βάσης femtocell κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης.

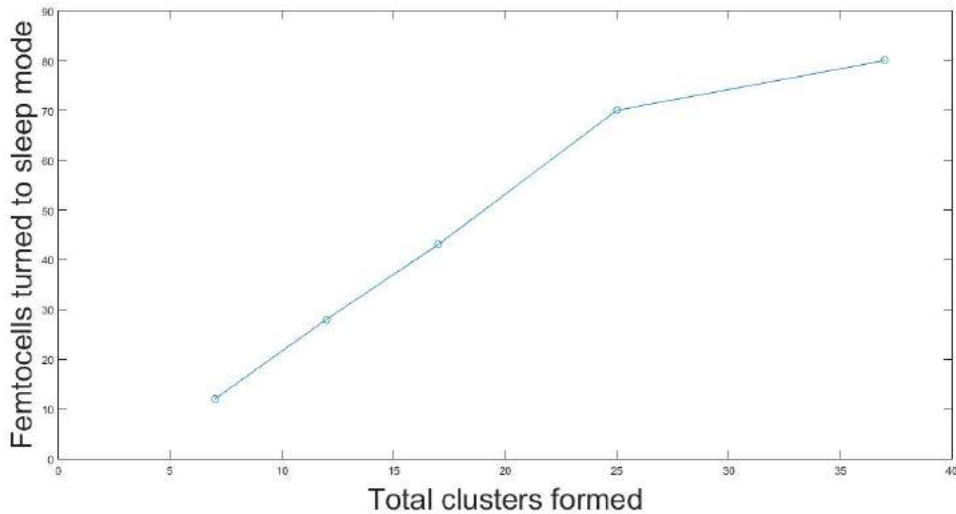
Επίσης σε κάθε προσομοίωση, μετρήσαμε τον αριθμό των femtocells που τέθηκαν σε sleep mode. Η υιοθέτηση του περιγραφόμενου μοντέλου παρείχε την δυνατότητα της απενεργοποίησης ενός σημαντικού αριθμού σταθμών βάσης, όπως θα παρουσιάσουμε και στην συνέχεια. Οι υπόλοιπες παράμετροι οι οποίες σχετίζονται με υπολογισμούς μια σειράς μεγεθών, όπως τα επίπεδα ισχύος, απόδοσης και πτώσης της ισχύος για πρόσβαση μέσα από τοίχους, βασίστηκαν στις ντιρεκτίβες της 3GPP για το LTE-A. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια εξήχθησαν μετά από την διενέργεια 25 συνεχόμενων προσομοιώσεων.

5.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Μπορούμε να ισχυριστούμε σε αυτό το σημείο, ότι ο μηχανισμός οποίος προτάθηκε αρχικά στο [31] και εμπλουτίστηκε στην παρούσα εργασία με την χρήση ενός 4IPP traffic model, διατήρησε τα θετικότερα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του σε πυκνές διατάξεις σταθμών βάσης femtocells. Τα αναφερόμενα αποτελέσματα αφορούν την βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους χρήστες. Πιο συγκεκριμένα την βελτιωμένη απόδοση και τα μειωμένα επίπεδα παρεμβολών. Ειδικά για την περίπτωση της απόδοσης, υπολογίσαμε την βελτίωση όχι μόνο για τους κατόχους femtocell, αλλά και για τους χρήστες macrocell οι οποίοι ήταν εντός εμβέλειας της υπό εξέταση διάταξης. Όσον αφορά τα επίπεδα παρεμβολών, ο σημαντικός αριθμός σταθμών βάσης που τίθενται σε λειτουργία sleep mode συνεισφέρει στην πτώση του επιπέδου των παρεμβολών.

Τα παραπάνω οφέλη οφείλονται στους μηχανισμούς που αξιοποιήθηκαν. Οι δύο λειτουργίες οι οποίες διαδραμάτισαν κεντρικό ρόλο στα αποτελέσματα που παρουσιάζουμε είναι η εφαρμογή της πολιτικής hybrid access και η λειτουργία sleep mode. Με την εφαρμογή της υβριδικής πρόσβασης, εκμεταλλευτήκαμε την δυνατότητα να μπορούμε να κατανείμουμε χρήστες σε γειτονικά femtocell. Το σημαντικότερο εμπόδιο για αυτόν τον σχεδιασμό είναι ο δισταγμός ενός κατόχου ενός femtocell να μοιραστεί τους πόρους του ιδιοκτήτου σταθμού βάσης. Με την εγγύηση βέβαια ότι ο αλγόριθμος βελτιώνει την απόδοση όλων των χρηστών είναι δυνατό και εφικτό να υιοθετηθούν μηχανισμοί σαν τον προτεινόμενο, οι οποίοι βελτιώνουν το επίπεδο των υπηρεσιών για όλους τους χρήστες, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν όσους πόρους χρειάζονται. Παράλληλα, οι χρήστες οι οποίοι εξυπηρετούνται από το επίπεδο macrocell βλέπουν βελτίωση στην απόδοσή τους λόγω των femtocells που τίθενται σε sleep mode, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι παρεμβολές σε όλη την ετερογενή διάταξη.

Στην εικόνα 5.2, φαίνεται ο αριθμός των femtocell που τέθηκαν σε sleep mode για διάφορους αριθμούς σταθμών βάσης femtocells, όταν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός. Εκτός από τα οφέλη της βελτίωσης της απόδοσης των χρηστών, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το σημαντικό ποσοστό των femtocells που τίθενται σε sleep mode οδηγεί σε σημαντικά ενεργειακά οφέλη.

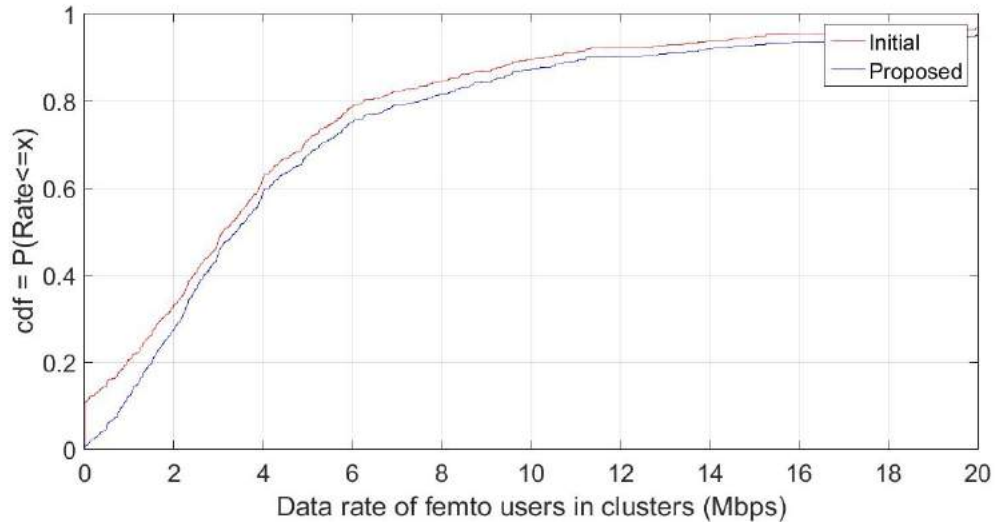


Εικόνα 5.2 Αριθμός σταθμών βάσης που τέθηκαν σε sleep mode ανά πυκνότητα κατανομής

Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι οι σταθμοί βάσης οι οποίοι τίθενται σε sleep mode αντιστοιχούν κατά αναλογία με τον αριθμό των clusters που σχηματίζονται. Συνεπώς για οποιοδήποτε μέγεθος διάταξης ο αλγόριθμος καταφέρνει να καταλείψει τους χρήστες και αποδοτικά αλλά και καταφέροντας να θέσει έναν σημαντικό αριθμό σταθμών βάσεων σε λειτουργία sleep mode. Τα συγκεκριμένα οφέλη βέβαια έχουν σαν προϋπόθεση την αποδοχή της πολιτικής υβριδικής πρόσβασης από το σύνολο των χρηστών του δικτύου. Σε περίπτωση βέβαια όπου ένα κομμάτι των χρηστών του δικτύου αποδέχεται την πολιτική υβριδικής πρόσβασης, τα οφέλη θα παραμείνουν, αλλά όχι στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση όπου το σύνολο των χρηστών υιοθετεί τις οδηγίες του μηχανισμού.

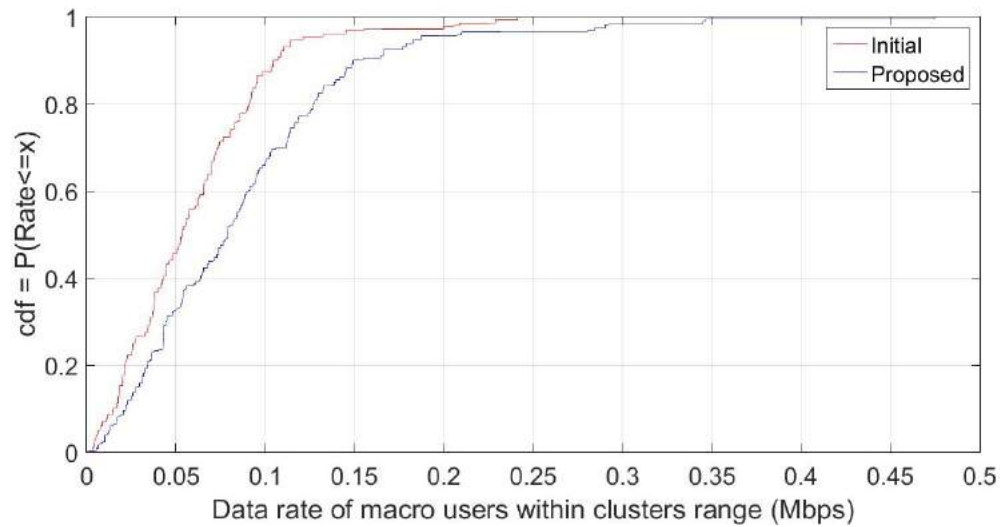
Στην εικόνα 5.3 απεικονίζουμε την αθροιστική συνάρτηση του throughput των χρηστών Cumulative Distribution Function (CDF) που είναι εγγεγραμμένοι σε ένα femtocell cluster.

Οι παράγοντες που οδηγούν στην βελτιωμένη απόδοση είναι το γεγονός ότι αρκετά femtocells μεταβαίνουν σε sleep mode, με αποτέλεσμα της μείωσης του επιπέδου των παρεμβολών, σε συνδυασμό με την προϋπόθεση της κατανομής του χρήστη σε έναν σταθμό βάσης μόνο αν η απόδοσή του βελτιώνεται ή τουλάχιστον παραμένει στα ίδια επίπεδα.



Εικόνα 5.3 CDF εγγεγραμμένων χρηστών σε femtocell clusters

Αντίστοιχα, στην εικόνα 5.4 απεικονίζουμε την βελτίωση του data rate των χρηστών οι οποίοι εξυπηρετούνται από το επίπεδο macrocell, όταν ορισμένα femtocells τίθενται σε sleep mode.



Εικόνα 5.4 Data rate χρηστών macrocell σε εμβέλεια

Παρόλο που όπως αναλύσαμε προηγουμένως, στα ετερογενή δίκτυα τέτοιου τύπου χρήστες συνηθίζεται να αντιμετωπίζουν σοβαρή υποβάθμιση στις υπηρεσίες τους, στην παρούσα έρευνα ισχύει το αντίθετο με την εφαρμογή του αλγόριθμου κατανομής. Με την καταπολέμηση και τον περιορισμό των παρεμβολών, οι χρήστες οι οποίοι δεν ανήκουν στο CSG κανενός σταθμού βάσης παρατηρούν την απόδοσή τους να βελτιώνεται, χάρη στην εφαρμογή του αναφερόμενου μηχανισμού.

Η εφαρμογή του αλγόριθμου οδηγεί σε ίδια επίπεδα απόδοσης με ενεργοποιημένο έναν μικρότερο αριθμό από σταθμούς βάσης. Αυτό είναι και το χαρακτηριστικό που οδηγεί στην βελτίωση της απόδοσης όλων των χρηστών σε παρόμοια σενάρια.

6. Μελλοντική εργασία

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προσθέσαμε σε έναν υπάρχων μηχανισμό κατανομής χρηστών σε ετερογενή δίκτυα, τον παράγοντα ενός ρεαλιστικού μοντέλου κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο προσδώσαμε μια μεγαλύτερη αξιοπιστία στα θετικά αποτελέσματα του συγκεκριμένου μηχανισμού, καθώς η κίνηση των χρηστών διαμορφώθηκε από ένα συγκεκριμένο traffic model και δεν θεωρήθηκε εξ αρχής στατική ή δεδομένη.

Οι πιθανές επεκτάσεις ή προσθήκες στη συγκεκριμένη προσέγγιση ενδέχεται να υιοθετούν ένα διαφορετικό μοντέλο κίνησης, ή ακόμα και διαφοροποιήσεις στην κατασκευή του αλγορίθμου υπολογισμού και κατανομής.

Επίσης, ενδιαφέρουσα θα ήταν μια προσέγγιση η οποία θα υπολόγιζε με ακρίβεια τα ενεργειακά οφέλη του κάθε χρήστη ξεχωριστά ή ακόμα και ολόκληρης της δικτυακής διάταξης. Το γεγονός ότι ένας αριθμός από σταθμούς βάσης femtocells μπαίνει σε λειτουργία sleep mode αποτελεί ένα πολύ δελεαστικό χαρακτηριστικό της συνολικής προσέγγισης.

Τέλος, ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος θα μπορούσε να προστεθεί θα μπορούσε να ήταν η κινητικότητα των χρηστών. Για παράδειγμα, η εφαρμογή του μηχανισμού που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων σε σενάρια όπου ένα ποσοστό των χρηστών ή ακόμη και το σύνολό τους είναι σε κίνηση.

Αιχωνύμια

1G First Generation

2G Second Generation

3G Third Generation

3GPP 3rd Generation Partnership Project

4G Fourth Generation

5G Fifth Generation

AAA Authentication Authorization Accounting

AMPS Analogue Mobile Phone System
 AP Access Point
 ARQ Automatic Repeat reQuest
 BS Base Station
 CDF Cumulative Distribution Function
 CDMA Code-Division Multiple Access
 CSG Closed Subscriber Group
 DBMAP.....Discrete-time Batch Markovian Arrival Process
 DHCP Dynamic Host Conguration Protocol
 DSCH Downlink Shared Channel
 EAP-AKA..... Extensible Authentication Protocol Authentication and Key Agreement
 EAP-SIM Extensible Authentication Protocol SIM
 EDGE Enhanced Data rates for GSM Evolution
 eNB Evolved Node B
 EMM EPS Mobility Management
 EPC Evolved Packet Core
 ESM EPS Session Management
 ETSI European Telecommunications Standards Institute
 E-UTRA Evolved Universal Terrestrial Radio Access
 E-UTRAN Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
 FaaS Fiber as a Service
 FBS.....Femtocell Base Stations

FDD Frequency Division Duplex

FTTX Fiber To The x

GPRS General Packet Radio Service

GRE Generic Routing Encapsulation

GSM Global System for Mobile Communications

GTP GPRS Tunnelling Protocol

GUTI Globally Unique Temporary Identity

HARQ Hybrid Automatic Repeat reQuest

HeMS HeNodeB Management System

HeNB Home eNB

HetNet Heterogenous Network

HSDPA High Speed Downlink Packet Access

HS-DSCH High Speed Downlink Shared Channels

HSPA+ Evolved High Speed Packet Access

HSS Home Subscription Server

ICIC Inter-Cell Interference Coordination

IMS IP Multimedia Subsystem

IMT International Mobile Telecommunications

IMT-Advanced International Mobile Telecommunications-Advanced

IMT-MC IMT Multi-Carrier

IPP Interaptive Poisson Process

IPSec Internet Protocol Security

IPv4 Internet Protocol version 4

IPv6 Internet Protocol version 6

IS-95 Interim Standard 95

ITU International Telecommunication Union

J-TACS Japanese Total Access Communication System

LTE Long Term Evolution

LTE-A Long Term Evolution Advanced

MAC Medium Access Control

MBMS Multimedia Broadcast Multicast Services

MBSFN MBMS Single-Frequency Network

MGW Media GateWay

MMBP.....Markov Modulated Bernoulli Process

MIMO Multiple Input Multiple Output

MME Mobility Management Entity

MNO Mobile Network Operator

MVNO Mobile Virtual Network Operator

NMT Nordic Mobile Telephone

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDMA Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

PAPR Peak to Average Power Ratio

PCC Policy and Charging Control

PCEF Policy and Charging Enforcement Function

PCI Physical Cellular Identity
 PDC Personal Digital Cellular
 PDCP Packet Data Convergence Protocol
 PDN Packet Data Network
 PDN-GW Packet Data Network Gateway
 PHY Physical Layer
 QoE Quality of Experience
 QoS Quality of Service
 RB Resource Block
 RF Radio Frequency
 RLC Radio link control
 RNC Radio Network Controller
 RRC Radio Resource Control
 RRM Radio Resource Management
 SAE System Architecture Evolution
 SBBP Switched Batch Bernoulli Process
 SCaaS Small Cell as a Service
 SC-FDMA Single Carrier Frequency Division Multiple Access
 SCTP Stream Control Transmission Protocol
 SDO Standards Development Organization
 SDU Session Data Unit
 S-GW Serving Gateway

SINR Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SMS Short Message Service
TACS Total Access Communication System
TCO Total Cost of Ownership
TDD Time Division Duplex
TSG Technical Specification Group
UE User Equipment
UMB Ultra Mobile Broadband
UMTS Universal Mobile Telecommunications System
USIM Universal Subscriber Identity Module
UTRAN UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP Voice over Internet Protocol
W-CDMA Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN Wireless Local Area Network

Βιβλιογραφία

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Mobile_Phone_System

[2] Toh, Chai K. Ad hoc mobile wireless networks: protocols and systems. Pearson Education, 2001.

[3] Vora, Lopa J. "Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G." (2015).

[4] GSM Global system for Mobile Communications". 4G Americas. Archived from the original on 8 February 2014. Retrieved 2014-03-22.

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/General_Packet_Radio_Service

[6] Vora, Lopa J. "Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G." (2015).

- [7] Adnan, Mahmood, Shadi MS Hilles, and Wael MS Yafooz. "An Evolution to Next Generation Heterogeneous Cellular Networks." *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)* 17.4 (2017): 251.
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/CDMA2000>
- [9] <https://www.androidauthority.com/4g-lte-speeds-brick-wall-811243/>
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16
- [11] Andrews, Jeffrey G., Arunabha Ghosh, and Rias Muhamed. "Fundamentals of WIMAX." (2007).
- [12] Parkvall, Stefan, et al. "LTE-advanced-evolving LTE towards IMTadvanced." *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th. IEEE, 2008.*
- [13] https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/business-insights/docs/ioe-value-at-take-public-sector-analysis-faq.pdf
- [14] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/requirements.php>
- [15] <https://magazine.startus.cc/advantages-and-challenges-of-5g-network/>
- [16] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/1576-hetnet>
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell
- [18] <https://networks.nokia.com/products/small-cells>
- [19] Andrews, Jeffrey G., et al. "Femtocells: Past, present, and future." *IEEE Journal on Selected Areas in communications* 30.3 (2012): 497-508.
- [20] Quek, Tony QS, et al., eds. *Small cell networks: Deployment, PHYtechniques, and resource management.* Cambridge University Press, 2013.(Backhauling)
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Self-organizing_network
- [22] Lopez-Perez, David, et al. "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks." *IEEE Wireless communications* 18.3 (2011).

[23] [https://www.researchgate.net/publication/](https://www.researchgate.net/publication/228517881)

[228517881 Femtocells Past Present and Future](https://www.researchgate.net/publication/228517881)

[24] Jen Chen, Pete Rauber, Damanjit Singh, Chandru Sundarraman, Peerapol Tinnakornsrisuphap, Mehmet Yavuz Femtocells – Architecture & Network Aspects, Qualcomm, Jan 28. 2010.

[25] H.-S. Jo, P. Xia, and J. G. Andrews, Open, closed, and shared access femtocells in the downlink, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2012, no. 1, p. 363, Dec 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-363>

[26] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, and D. I. Kim, Interference management in ofdma femtocell networks: issues and approaches, IEEE Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 8695, June 2012.

[27] Femtocells: Past, Present, and Future. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Volume: 30 , Issue: 3 , April 2012)

[28] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, "Sleep mode techniques for small cell deployments" IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 8, pp. 72-79, August 2011.

[29] S. Smarakoon, 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.

[30] W. Li, W. Zheng, Y. Xie, and X. Wen, "Clustering based power saving algorithm for self-organised sleep mode in femtocell networks" in Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2012 15th International Symposium on Sept 2012, pp. 179-383.

[31] Christos Bouras, Georgios Diles "Distributed Sleep Mode Power Control in 5G Ultra Dense Networks" Wired/Wireless Internet Communications: 15th IFIP WG 6.2 International Conference, WWIC 2017, St. Petersburg, Russia, June 21-23, 2017, Proceedings (pp.65-76)

- [32] Practical Traffic Generation Model for Wireless Networks, Alexey Anisimov, Yevgeni Koucheryavy, and Andrey Turlikov. In the Proc. Of the 4th ERCIM eMobility Workshop, 2010.
- [33] 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. Rept., 2010.
- [34]C. Baugh, 4IPP Traffic Model for IEEE 802.16.3. IEEE 802.16 Contribution 802.16.3c-00/51, October 2000.
- [35] C. Baugh and J. Huang, Traffic model for 802.16 TG3 MAC/PHY simulations. IEEE 802.16 Contribution 802.16.3c-01/30r1, March 2001.
- [36] C. Baugh, 4IPP Trac Model for IEEE 802.16.3. IEEE 802.16 Contribution 802.16.3c-00/51, October 2000.