

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Δημήτριος Ντούτσος ΑΜ: 5383

Στρατηγικές Ενεργειακής Απόδοσης
σε Πυκνές Δομές Small Cells

Υπεύθυνος Καθηγητής : Μπούρας Ι Χρήστος

Επιβλέπων : Δηλές Γεώργιος

Πάτρα 2017

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Χρήστο Ι Μπούρα, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, επιτρέποντας μου να ασχοληθώ με ένα τόσο σημαντικό και ενδιαφέρον θέμα, όσο και για τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων κ. Δηλέ Γεώργιο για την προθυμία με την οποία ανταποκρίθηκε σε όλες μου τις απορίες αλλά και την συνολική συμβολή του στην εργασία μέσα από τις συμβουλές και τις παροτρύνσεις του.

Ημερομηνία :

Υπογραφή :

Τίτλος : Στρατηγικές Ενεργειακής Απόδοσης σε Πυκνές Δομές Small Cells

Συγγραφέας : Ντούτσος Δημήτριος, ΑΜ: 5383

Τμήμα : Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής

Υπεύθυνος Καθηγητής : Μπούρας Ι Χρήστος

Επιβλέπων : Δηλές Γεώργιος

Λέξεις Κλειδιά: Femtocell , small cell , hybrid access , heterogenous network , sleep mode , power control , cluster

Περίληψη :

Η ασύρματη επικοινωνία και η δικτύωση των ασύρματων συσκευών σε υψηλές ταχύτητες επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας LTE , ενώ στο μέλλον τον ρόλο αυτό αναμένεται να παίξει το 5G και οι πρόσθετες λειτουργίες που αυτό θα προσφέρει. Παράλληλα με την αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερες ταχύτητες όσον αφορά την κίνηση δεδομένων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, παρατηρείται αύξηση στην κατανάλωση υπηρεσιών μέσω συσκευών smartphone, γεγονός που σημαίνει ότι θα πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπόψιν μας τις προκλήσεις που προκύπτουν λόγω υψηλής κινητικότητας των χρηστών και υποβαθμισμένης ποιότητας σήματος σε εσωτερικούς ή δυσπρόσιτους χώρους. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις, αποτελεί η αύξηση της κάλυψης του δικτύου, και ένας αποτελεσματικός τρόπος για να υπερβούμε αυτό το εμπόδιο είναι η υιοθέτηση της έννοιας των small cells και η εγκατάστασή τους στα δίκτυα μας. Τα small cells προσφέρουν αυξημένη κάλυψη και χωρητικότητα, αναβαθμίζοντας με αυτό τον τρόπο την ποιότητα των υπηρεσιών που απολαμβάνουν οι χρήστες του δικτύου, δίνοντας παράλληλα την δυνατότητα για επιλογή της ιδανικής πολιτικής πρόσβασης σε κάθε ξεχωριστό small cell . Όμως, με την δημιουργία ετερογενών δικτύων αποτελούμενα από small cells και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πυκνής ανάπτυξης τους, προκύπτουν θέματα παρεμβολών καθώς και κατανάλωσης ενέργειας τα οποία θα πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα αναλύσουμε τα ετερογενή κυτταρικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις femtocell , την τεχνολογία LTE και LTE-Advanced, και τέλος θα προτείνουμε στρατηγικές με σκοπό να μετριάσουμε την ενεργειακή κατανάλωση καθώς και τις παρεμβολές που εμφανίζονται στο δίκτυο. Οι προτάσεις μας βασιζόμενες στην υβριδική πολιτική πρόσβασης καθώς και στην λειτουργία sleep mode , καταφέρνουν κέρδη ενεργειακής απόδοσης καθώς και σημαντικό μετριασμό των παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης. Ένας μέρος αυτής της αύξησης οφείλεται βέβαια και στον μηχανισμό ελέγχου ισχύος που αναπτύξαμε και μας βοήθησε να αυξήσουμε τον αριθμό των femtocell που μεταβαίνουν σε κατάσταση "αδράνειας". Τέλος, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα που ακολούθησαν αποδεικνύουμε και υπολογίζουμε την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών μας.

Abstract :

Most of wireless communications and high speed networks are currently based in LTE technology which is expected to be replaced by 5G and its additional features in the near future. Along with the growing demand for higher data rates in cellular networks, an increase in consumption of smartphone based services is observed, which means that we should seriously consider the challenges arising from high mobility of network users and degraded signal quality in internal or inaccessible locations. Such a challenge could be considered the increase of network's coverage area and an effective way to address that could be the adoption of small cells concept and their deployment in our network. Small cells offer increased coverage and capacity, thus upgrading the quality of service enjoyed by network users and also allow each femtocell to choose a suitable access scenario from the available access policies. However, heterogeneous networks consisting by dense deployment of small cells and especially femtocells, cause interference as well as energy consumption issues, that we have to deal with. By this thesis, we will analyze heterogeneous cellular networks and more specifically networks that include femtocells, LTE and LTE-Advanced technology and finally we will propose strategies to mitigate energy consumption as well as network interference. Our suggestions, based on hybrid access policy and sleep mode, result in energy efficiency gains as significantly mitigating interference between different base stations. A part of this increase is, of course, due to the power control mechanism we developed in order to increase the number of femtocell that adopt sleep mode. Finally, according to the simulations and their results, we prove and measure our strategies' effectiveness.

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 5 |
| 1.1 | Εισαγωγή | 5 |
| 2 | LTE και LTE-Advanced | 8 |
| 2.1 | Εισαγωγή - Ιστορική Ανασκόπηση | 8 |
| 2.2 | Εξέλιξη Κυβελωτών Δικτύων | 9 |
| 2.2.1 | Από 1G έως 3G | 9 |
| 2.2.2 | 3G | 11 |
| 2.2.3 | Η ανάγκη για LTE | 13 |
| 2.2.4 | Χωρητικότητα συστήματος κινητής τηλεπικοινωνίας | 14 |
| 2.2.5 | Αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος | 14 |
| 2.2.6 | Πρόσθετα κίνητρα | 16 |
| 2.3 | LTE , LTE-Advanced | 16 |
| 2.3.1 | Από UMTS σε LTE | 16 |
| 2.3.2 | Προδιαγραφές LTE | 17 |
| 2.3.3 | Από LTE σε LTE-Advanced | 18 |
| 2.3.4 | Αρχιτεκτονική Συστήματος | 21 |
| 2.3.5 | Τεχνολογίες | 37 |
| 2.4 | Διαδικασία Προτυποποίησης LTE-Advanced | 40 |
| 2.5 | Δίκτυα Επόμενης Γενιάς - 5G | 41 |
| 2.5.1 | Εισαγωγή | 41 |
| 2.5.2 | Τεχνολογικές απαιτήσεις 5G | 42 |
| 2.5.3 | Προκλήσεις 5G | 44 |
| 3 | Small Cells | 47 |
| 3.1 | Εισαγωγή | 47 |
| 3.2 | Η ανάγκη για Small Cells | 48 |
| 3.2.1 | Εκθετική αύξηση της κυκλοφορίας | 48 |
| 3.2.2 | Η εξέλιξη του δικτύου προς το HetNet | 49 |
| 3.3 | Στρατηγική | 50 |
| 3.3.1 | Βελτίωση κάλυψης και χωρητικότητας | 50 |
| 3.4 | Τύποι Small Cell | 51 |
| 3.5 | Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Small Cells | 52 |
| 4 | Femtocells | 55 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 55 |
| 4.2 | Αρχιτεκτονική Femtocell | 56 |
| 4.2.1 | Femtocell access point/Home eNodeB | 57 |
| 4.2.2 | Home eNodeB Gateway (HeNodeB) | 58 |
| 4.2.3 | Security Gateway (SeGW) | 58 |
| 4.2.4 | HeNodeB Management System (HeMS) | 59 |
| 4.2.5 | S1 Interface | 59 |
| 4.3 | Πεδία Εφαρμογής | 59 |
| 4.4 | Πολιτικές Πρόσβασης | 61 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.1 | Κλειστή Πρόσβαση μέσω Closed Subscriber Group CSG Closed Access | 62 |
| 4.4.2 | Ανοιχτή Πρόσβαση Open Access | 63 |
| 4.4.3 | Υβριδική Πρόσβαση Hybrid Access | 63 |
| 4.5 | Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις | 64 |
| 4.6 | Παρεμβολές | 66 |
| 4.7 | Άλλα θέματα Femtocell | 68 |
| 5 | Στρατηγικές Ενεργειακής Απόδοσης Σε Πυκνές Δομές Small Cells | 70 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 70 |
| 5.2 | Περιβάλλον Προσομοίωσης και Μεθοδολογία | 72 |
| 5.2.1 | Προτεινόμενη Μεθοδολογία | 74 |
| 5.3 | Πειραματικά Αποτελέσματα | 77 |
| 5.4 | Συμπεράσματα | 81 |
| 5.5 | Μελλοντική Εξέλιξη | 83 |
| | Ακρωνύμια | 84 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | | |
|------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Παγκόσμια κίνηση δεδομένων (Exabytes / Μήνα) | 6 |
| 2.1 | Η πορεία προς το 3G | 11 |
| 2.2 | Από 1G έως 4G | 14 |
| 2.3 | Εξέλιξη του LTE Carrier Aggregation in 3GPP | 19 |
| 2.4 | Εκδόσεις LTE | 21 |
| 2.5 | Επισκόπηση E-UTRAN | 23 |
| 2.6 | Στοιβά πρωτοκόλλων LTE | 24 |
| 2.7 | Evolved Packet Core - LTE | 28 |
| 2.8 | LTE Gateways | 31 |
| 2.9 | Διάγραμμα Δικτύου | 33 |
| 2.10 | LTE Advanced eNodeB | 35 |
| 2.11 | Εξοπλισμός Χρήστη | 36 |
| 2.12 | OFDM - OFDMA | 37 |
| 2.13 | Παράδειγμα MIMO 4x2 | 39 |
| 2.14 | Σύγκριση Ταχυτήτων 3G - 4G - 5G | 43 |
| 3.1 | Μηνιαία κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά smart- phone | 49 |
| 3.2 | Δίκτυα Small cells και Macro cell | 52 |
| 4.1 | Σημεία αναφοράς ενός Femtocell όπως ορίζεται από το Femto Forum | 56 |
| 4.2 | Λογική Αρχιτεκτονική Femtocell | 57 |
| 4.3 | Femtocell | 60 |
| 4.4 | Fixed Relay Femtocell | 60 |
| 4.5 | Κινητά Femtocell | 61 |
| 4.6 | Πολιτικές πρόσβασης Femtocell | 62 |
| 4.7 | Τύποι Παρεμβολών σε δίκτυο Femtocell | 67 |
| 5.1 | Στιγμιότυπο δικτύου | 78 |
| 5.2 | Number of femtocells turned to sleep mode | 79 |
| 5.3 | Data rate of femto users in clusters (Mbps) | 80 |
| 5.4 | Data rate of macro users in clusters (Mbps) | 81 |

Κατάλογος Πινάκων

| | | |
|-----|-----------------------------------|----|
| 2.1 | Μειονεκτήματα 1G | 9 |
| 2.2 | Εκδόσεις LTE | 21 |
| 3.1 | Τύποι Small Cells | 51 |
| 5.1 | Παράμετροι Προσομοίωσης | 72 |

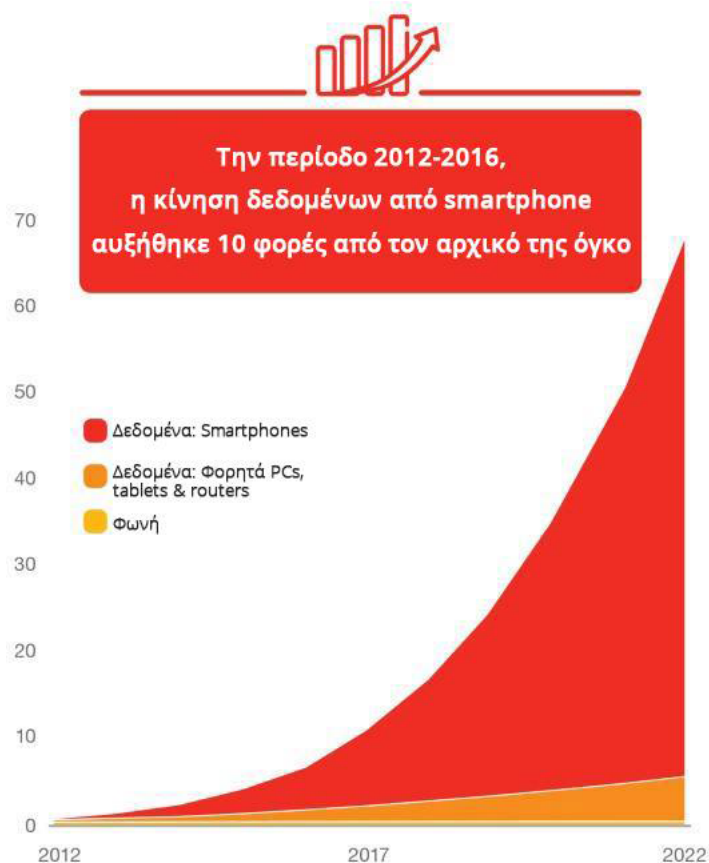
1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 80' όπου παρουσιάστηκε η πρώτη γενιά ασύρματων δικτύων γνωστή και ως 1G. Τα δίκτυα αυτά πρόσφεραν κυρίως υπηρεσίες φωνής χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αναλογικής μετάδοσης σήματος. Στα τέλη της ίδιας δεκαετίας, έκανε την εμφάνιση της και η δεύτερη γενιά δικτύων (2G) η οποία παρουσίασε για πρώτη φορά την ψηφιακή μετάδοση και ασχολήθηκε εκτός από την μετάδοση φωνής και με την μετάδοση δεδομένων, σε χαμηλές βέβαια ταχύτητες. Βέβαια, η κινητικότητα των χρηστών θα πρέπει να είναι ελάχιστη, ώστε να έχουν την δυνατότητα να απολαμβάνουν οι χρήστες αυτά τα προνόμια. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε μια ενδιάμεση γενιά που κατάφερε υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων, το 2.5G. Σε συνέχεια αυτής της εξέλιξης, το 3G προσέφερε στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας υψηλότερες ταχύτητες καθώς και ελευθερία στον χρήστη για μεγαλύτερη κινητικότητα κατά την διάρκεια που βρίσκεται συνδεδεμένος στο δίκτυο. Στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας, το LTE ή 4G εμφανίστηκε για να προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης καθώς και ευρύτερη γκάμα υπηρεσιών προς τους χρήστες. Το LTE με διάφορες νέες τεχνικές διαμόρφωσης, που θα αναπτυχθούν αργότερα, κατάφερε να αυξήσει την χωρητικότητα καθώς και την ταχύτητα του δικτύου εξυπηρετώντας και ικανοποιώντας και τους πλέον απαιτητικούς χρήστες. Τα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G στοχεύουν σε ακόμα υψηλότερη χωρητικότητα από την τρέχουσα τεχνολογία 4G, επιτρέποντας μεγαλύτερη πυκνότητα χρηστών και υποστηρίζοντας πιο αξιόπιστες και μαζικές επικοινωνίες μεταξύ συσκευών. Η έρευνα και ανάπτυξη όσον αφορά το 5G στοχεύει επίσης σε χαμηλότερη καθυστέρηση από τον εξοπλισμό 4G και χαμηλότερη κατανάλωση μπαταρίας.

Καθώς η κίνηση στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται με ραγδαίο ρυθμό, αναμένεται να προκύπτουν συνεχώς νέες και προηγμένες τεχνολογίες με σκοπό να αναβαθμίσουν την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχεται από κάθε δίκτυο. Ιδιαίτερα, όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.1 η αύξηση αυτή επιδεινώνεται την τελευταία πενταετία και αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται με ραγδαίο ρυθμό μέχρι το 2022 όπως δείχνει η έρευνα [1]. Επίσης παρατηρούμε πως η αύξηση παρατηρείται κυρίως από την μεριά των κινητών τηλεφώνων smartphone, γεγονός που δείχνει ότι θα πρέπει να υπάρξει μέριμνα όσον αφορά την μεγάλη κινητικότητα των χρηστών.

Παγκόσμια Κίνηση Δεδομένων (Exabytes/ Μήνα)



Σχήμα 1.1: Παγκόσμια κίνηση δεδομένων (Exabytes / Μήνα)

Καθώς αναζητούσαμε έναν τρόπο να αυξηθεί η κάλυψη των δικτύων ώστε να μπορούν να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες, ακόμα και αν αυτοί βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους ή σε επαρχιακές περιοχές όπου η κάλυψη είναι ελάχιστη ή μηδαμινή, εμφανίστηκε η περίπτωση των κυψελωτών δικτύων small cells. Τα small cells αποτελούν μονάδες κυψελοειδούς ασύρματης πρόσβασης οι οποίες λειτουργούν σε αδειοδοτημένο ή μη-αδειοδοτημένο φάσμα και έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αποκαλούνται "μικρά κελιά", πρώτον λόγω της μικρότερης περιοχής κάλυψης σε σχέση με τα macro cells που ανήκουν στο υψηλότερο επίπεδο κυτταρικής πρόσβασης, και δεύτερον λόγω του μικρότερου αριθμού των ταυτόχρονων συνδέσεων που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Ο όρος small cells αποτελεί ένα πρότυπο για συσκευές που παρέχουν τις συγκεκριμένες λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής. Τα picocells και microcells / metrocell αποτελούν δυο κατηγορίες small cells που μπορούν να ικανοποιήσουν από 32 έως 200 χρήστες με περιοχή κάλυψης από 200m έως τα 2km.

Θέλοντας να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι όσον αφορά στα small cells στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, αναφερόμαστε σε μια άλλη κατηγορία small cells που θα μας απασχολήσει, τα Femtocells. Τα femtocell, τα οποία είναι το πιο συνηθισμένο είδος small cell σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους, αποτελούν συσκευές μικρότερες σε εμβέλεια, οι οποίες επιτυγχάνουν

χαμηλότερη κατανάλωση. Εγκαθίστανται κυρίως από τον χρήστη, η περιοχή κάλυψής τους κυμαίνεται στα 20-50m ενώ μπορούν να εξυπηρετούν ταυτόχρονα από 4 μέχρι 16 περίπου χρήστες. Το γεγονός που τα διαφοροποιεί κυρίως από τα υπόλοιπα small cells είναι η ικανότητα να προσαρμόζονται στις παραμέτρους του δικτύου. Τα femtocells και οι λειτουργίες τους θα αναπτυχθούν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.

Σε μια προσπάθεια να δημιουργήσουμε ένα σύστημα το οποίο θα παρουσιάζει οφέλη ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και βελτιώσεις όσον αφορά την απόδοση του δικτύου, αξιοποιήσαμε την ευρύτατη πλέον υποδομή femtocell καθώς και τις πρόσθετες λειτουργίες που παρέχονται για τον σκοπό μας. Έχουμε αξιοποιήσει λειτουργίες όπως η λειτουργία sleep mode (κατάσταση ύπνου) κατά την οποία ένα femtocell των οποίων οι υπηρεσίες δεν κρίνονται αναγκαίες την συγκεκριμένη χρονική στιγμή, μεταβαίνει σε sleep mode. Δηλαδή, παραμένουν ενεργά μόνο κομμάτια του femtocell που είναι αναγκαία για να επιστρέψει σε λειτουργική κατάσταση όταν ένας χρήστης ζητήσει να εξυπηρετηθεί από αυτό. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να επιτύχουμε μείωση της κατανάλωσης του συνολικού δικτύου, επιλέγοντας όσο των δυνατών περισσότερους σταθμούς βάσης να λειτουργούν σε αυτή την κατάσταση, με την προϋπόθεση ότι δεν επηρεάζεται βέβαια η απόδοση του δικτύου. Επιπλέον, αξιοποιούμε την λειτουργία υβριδικής πρόσβασης που αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση πρόσβασης ανάμεσα στα σενάρια κλειστής και ανοιχτής πρόσβασης. Με αυτόν τον τρόπο ένα femtocell μπορεί, εξασφαλίζοντας αρχικά την ικανοποίηση των συνδρομητών του, να εξυπηρετεί και εξωτερικούς χρήστες συμβάλλοντας στην συνολική απόδοση του δικτύου. Στο κεφάλαιο 5 αναλύεται η έρευνα που έχουμε πραγματοποιήσει σε αυτό τον τομέα. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία, ο κώδικας υλοποίησης καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του δικτύου.

2. LTE και LTE-Advanced

2.1 Εισαγωγή - Ιστορική Ανασκόπηση

Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη του UMTS αποτελεί ένα από τα τελευταία βήματα κατά την ανάπτυξη των κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Αναμφισβήτητα, τουλάχιστον για τα επίγεια συστήματα, η ανάπτυξη ξεκίνησε το 1947 με την ανάπτυξη της έννοιας των cells από την Bell Labs (ΗΠΑ). Η χρήση των cells επέτρεψε την ουσιαστική αύξηση της δυναμικότητας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, διαιρώντας την περιοχή κάλυψης σε μικρά κελιά, κάθε ένα με το δικό του σταθμό βάσης με την προϋπόθεση ότι κάθε σταθμός θα λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες.

Τα πρώτα συστήματα περιορίστηκαν στα εθνικά σύνορα ενώ προσέλκυσαν μόνο ένα μικρό αριθμό χρηστών, καθώς ο εξοπλισμός στον οποίο βασίστηκαν ήταν δαπανηρός, δυσκίνητος και καταναλώνει πολύ ενέργεια. Τα πρώτα συστήματα κινητής επικοινωνίας που πέτυχαν μεγάλη εμπορική ανάπτυξη εμφανίστηκαν κατά την δεκαετία του '80 και έγιναν γνωστά ως συστήματα πρώτης γενιάς. Η Πρώτη Γενιά χρησιμοποιούσε αναλογική τεχνολογία και περιλάμβανε ένα σύνολο ανεξάρτητα ανεπτυγμένων συστημάτων παγκοσμίως (π.χ. AMPS (Analogue Mobile Phone System, που χρησιμοποιείται στην Αμερική), TACS (Total Access Communication System, που χρησιμοποιείται σε μέρος της Ευρώπης), NMT (Nordic Mobile Telephone, που χρησιμοποιείται σε τμήματα της Ευρώπης) και το J-TACS (Japanese Total Access Communication System, που χρησιμοποιείται στην Ιαπωνία και στο Χονγκ Κονγκ).

Η παγκόσμια περιαγωγή έγινε αρχικά μια πιθανότητα με την ανάπτυξη της "Δεύτερης Γενιάς", ενός συστήματος γνωστό και ως GSM (Global System for Mobile Communications), το οποίο βασίστηκε στην ψηφιακή τεχνολογία. Η επιτυχία του GSM οφειλόταν εν μέρει στο συνεργατικό πνεύμα με το οποίο αναπτύχθηκε καθώς αξιοποιώντας την δημιουργική εμπειρία πολλών εταιρειών που εργάζονται υπό την αιγίδα του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI), το GSM έγινε ένα ισχυρό, διαλειτουργικό και ευρέως αποδεκτό πρότυπο.

Μέσω των τεχνολογικών εξελίξεων στην κινητή τηλεφωνία, οι οποίες οδήγησαν σε μικρά, μοντέρνα τερματικά με μεγάλης διάρκειας μπαταρία, η αποδοχή τους υπερέβη τις αρχικές προσδοκίες και βοήθησε στη δημιουργία μιας τεράστιας νέας αγοράς. Η σχεδόν καθολική διείσδυση των τηλεφώνων GSM στον ανεπτυγμένο κόσμο παρέχει μια ευκολία επικοινωνίας η οποία δεν ήταν προηγουμένως δυνατή, αρχικά μέσω της φωνής και του άμεσου μηνύματος κειμένου, ενώ αργότερα και με πιο προηγμένες υπηρεσίες δεδομένων. Εν τω μεταξύ, στον αναπτυσσόμενο κόσμο, η τεχνολογία GSM είχε αρχίσει να συνδέει κοινότητες και άτομα σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση σταθερής γραμμής ήταν ανύπαρκτη ή θα ήταν απαγορευτικά δαπανηρό να αναπτυχθεί. Η ευρεία διαθεσιμότητα φιλικών προς το χρήστη κινητών επικοινωνιών, μαζί με την εξοικείωση των

καταναλωτών με αυτή την τεχνολογία, παρέχει το πλαίσιο για νέα συστήματα με πιο προηγμένες δυνατότητες. Στα ακόλουθα κεφάλαια, περιγράφεται η σειρά των προόδων που έχει επιτευχθεί μέσω του GSM, με αποκορύφωμα την ανάπτυξη του συστήματος γνωστού ως LTE – Long Term Evolution of UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

2.2 Εξέλιξη Κυψελωτών Δικτύων

2.2.1 Από 1G έως 3G

Τα κινητά συστήματα τηλεπικοινωνιακών δικτύων εισήχθησαν για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Η πρώτη γενιά 1G χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικών επικοινωνιών, οι οποίες ήταν παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται από ένα παραδοσιακό αναλογικό ραδιόφωνο. Τα μεμονωμένα κύτταρα ήταν μεγάλα και τα συστήματα δεν μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, οπότε η χωρητικότητά τους ήταν πολύ μικρή σε σχέση με τα σημερινά πρότυπα. Οι κινητές συσκευές ήταν μεγάλες και ακριβές και κυκλοφορούσαν σχεδόν αποκλειστικά στο εμπόριο για επαγγελματίες. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρουμε κάποια από τα μειονεκτήματα της πρώτης γενιάς.

Πίνακας 2.1: Μειονεκτήματα 1G

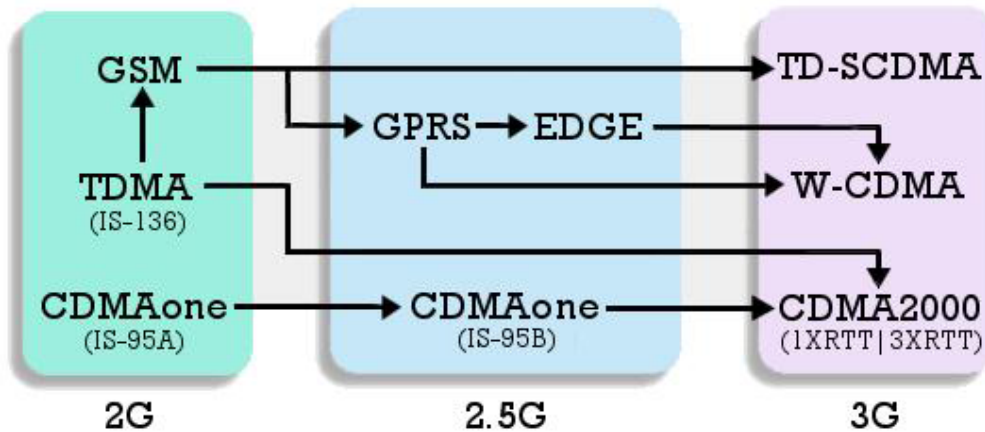
| Μειονεκτήματα 1G |
|------------------------------|
| Ανεπαρκής ποιότητα κλήσης |
| Ανεπαρκής διάρκεια μπαταρίας |
| Μεγάλο μέγεθος συσκευών |
| Καμία ασφάλεια |
| Ελάχιστη Χωρητικότητα |
| Μη αξιόπιστη μετάδοση |

Οι κινητές τηλεπικοινωνίες ξεκίνησαν ως καταναλωτικό προϊόν με την εισαγωγή των συστημάτων δεύτερης γενιάς (2G) στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τα συστήματα αυτά ήταν τα πρώτα που επωφελήθηκαν από την ψηφιακή τεχνολογία, η οποία επέτρεπε την αποτελεσματικότερη χρήση του ραδιοφάσματος και την εισαγωγή μικρότερων, φθηνότερων συσκευών. Αρχικά σχεδιάστηκαν μόνο για φωνή, αλλά στη συνέχεια ενισχύθηκαν για να υποστηρίξουν αποστολή άμεσων μηνυμάτων μέσω της υπηρεσίας (SMS). Το πιο δημοφιλές σύστημα 2G ήταν το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM), το οποίο σχεδιάστηκε αρχικά ως πανευρωπαϊκή τεχνολογία, αλλά αργότερα έγινε δημοφιλής σε όλο τον κόσμο. Επίσης αξιοσημείωτη ήταν η IS-95, γνωστή και ως cdmaOne. Αποτέλεσε την πρώτη ψηφιακή κυτταρική τεχνολογία με βάση την τεχνολογία CDMA. Αναπτύχθηκε από την Qualcomm και αργότερα υιοθετήθηκε ως πρότυπο από τον Σύνδεσμο Τηλεπικοινωνιακών Βιομηχανιών

στην έκδοση TIA / EIA / IS-95 που δημοσιεύθηκε το 1995. Πρόκειται για ένα πρότυπο κινητών τηλεπικοινωνιών 2G που χρησιμοποιεί CDMA, ένα σύστημα πολλαπλών προσβάσεων για ψηφιακό ραδιόφωνο, δεδομένα φωνής, δεδομένα κινητής και σηματοδοσίας (όπως ένας τηλεφωνικός αριθμός κλήσης) μεταξύ κινητών τηλεφώνων και τοποθεσιών κυψέλης.

Το CDMA (Code Division Multiple Access) ή η "πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα" είναι ένα ψηφιακό σύστημα που μεταδίδει ροές ψηφίων (κωδικό PN). Σε αντίθεση με την «πολλαπλή πρόσβαση TDMA», ένα ανταγωνιστικό σύστημα που χρησιμοποιείται στο 2G GSM, όλα τα συστήματα μπορούν να είναι ενεργά όλη την ώρα, επειδή η χωρητικότητα του δικτύου δεν περιορίζει άμεσα τον αριθμό των ενεργών σταθμών. Δεδομένου ότι περισσότερες συσκευές μπορούν να εξυπηρετηθούν από μικρότερο αριθμό κυψελών, τα πρότυπα που βασίζονται στο CDMA έχουν σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα έναντι των προτύπων που βασίζονται στο TDMA ή των παλαιότερων κυτταρικών προτύπων που χρησιμοποιούν πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας.

Η επιτυχία των συστημάτων επικοινωνίας 2G ήρθε παράλληλα με την πρόωμη ανάπτυξη του Διαδικτύου. Ήταν φυσιολογικό για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να συγχέουν τις δύο έννοιες, επιτρέποντας στους χρήστες να κάνουν λήψη δεδομένων σε κινητές συσκευές. Για να γίνει αυτό, τα αποκαλούμενα συστήματα 2.5G που βασίζονται στις αρχικές ιδέες του 2G, εισάγοντας τον τομέα μεταγωγής πακέτων του κεντρικού δικτύου και τροποποιώντας τη ασύρματη διεπαφή έτσι ώστε να μπορεί να μεταχειρίζεται ταυτόχρονα δεδομένα καθώς και φωνή. Το GPRS ενσωμάτωσε αυτές τις τεχνικές στο GSM, ενώ το IS-95 εξελίχθηκε σε ένα σύστημα γνωστό ως IS-95B. Ταυτόχρονα, τα ποσοστά δεδομένων που είναι διαθέσιμα μέσω του Διαδικτύου αυξάνονταν προοδευτικά. Την ίδια στιγμή, οι σχεδιαστές έδωσαν βάση αρχικά στην βελτίωση της απόδοσης στα συστήματα 2G εισάγοντας τεχνικές όπως το EDGE, ενώ στη συνέχεια τα συστήματα 3G εμφανίστηκαν μετά το 2000. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές όσον αφορά την ασύρματη μετάδοση και λήψη από την προηγούμενη γενιά 2G, γεγονός που αυξάνει τη μέγιστη ροή δεδομένων που μπορούν να διαχειριστούν και κάνει ακόμη πιο αποτελεσματική τη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.



Σχήμα 2.1: Η πορεία προς το 3G

Δυστυχώς, τα αρχικά συστήματα 3G δεν ανταποκρίθηκαν στις πρώιμες προσδοκίες καθώς ήταν υπερβολικά προωθημένα. Εξαιτίας αυτού, το 3G καθιερώθηκε έπειτα από την εισαγωγή των συστημάτων 3.5G το 2005. Μέσω αυτής της γενιάς (3.5G), προστέθηκαν βελτιστοποιήσεις όσον αφορά την ασύρματη διεπαφή που στοχεύουν σε εφαρμογές δεδομένων, με αποτέλεσμα να αυξάνουν το μέσο ρυθμό με τον οποίο ένας χρήστης μπορεί να μεταφορτώσει ή λάβει πληροφορίες. Αντιθέτως το σύστημα επιβαρύνθηκε μέσω της εισαγωγής μεγαλύτερης μεταβλητότητας όσον αφορά το ρυθμό δεδομένων και την ώρα άφιξης.

2.2.2 3G

Η εισαγωγή των δικτύων 3ης γενιάς, άνοιξε το δρόμο για την εμφάνιση ακόμα περισσότερων υπηρεσιών, που μέχρι πρότινος, κανένα από τα προηγούμενα πρότυπα δε μπορούσε να προσφέρει. Αξιοποιώντας ταχύτητες επιπέδου Megabit, ένας χρήστης που αποκτά πρόσβαση σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να πλοηγηθεί στο Internet, να επικοινωνεί χρησιμοποιώντας την υπηρεσία Voice over Internet Protocol (VoIP), να κάνει download και να χρησιμοποιήσει διάφορες υπηρεσίες με τη βοήθεια του κινητού του τηλεφώνου.

Στα πλαίσια της εξέλιξης των ήδη υπάρχοντων δικτύων 2ης γενιάς, προέκυψαν το πρότυπο CDMA2000 σαν συνέχεια του CDMA και το Wideband-CDMA (W-CDMA) ή αλλιώς Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) σαν συνέχεια των GSM, IS-136 και GPRS. Το W-CDMA είναι ένα πρότυπο το οποίο έχει επηρεαστεί από τη φιλοσοφία και τον τρόπο λειτουργίας του GSM. Βασικός στόχος της ανάπτυξης των κινητών δικτύων 3ης γενιάς είναι η καθολική και ολοκληρωτική παροχή υπηρεσιών. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης, ο οποίος βρίσκεται εν κινήσει, θα έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετείται σε οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκεται, ακόμα και σε γεωγραφικές περιοχές όπου η κάλυψη δεν περιλαμβάνεται μέσω δικτύου 3ης γενιάς. Οι υπηρεσίες που προσφέρονται επεκτείνονται σε υπηρεσίες Internet και σε υπηρεσίες

που συνδυάζουν εικόνα και ήχο (multimedia) με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Θα πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι τα συστήματα 3ης γενιάς, τα οποία έχουν επικρατήσει μέχρι τώρα είναι (α) το UMTS στην Ευρώπη, (β) το CDMA2000 στην Βόρεια Αμερική και (γ) το NTT Docomo στην Ιαπωνία. Αντιλαμβανόμαστε ότι η τρίτη γενιά δικτύων αποτέλεσε μία πραγματική επανάσταση σε σύγκριση πάντα με την προηγούμενη γενιά. Παρ' όλα αυτά όμως, οι χρήστες καθώς και οι ειδικοί δεν έμειναν πλήρως ικανοποιημένοι. Ίσως οι υψηλές προσδοκίες σε συνάρτηση με το τελικό αποτέλεσμα να δημιούργησαν μία απογοητευτική εντύπωση, με το πιο απογοητευτικό σημείο των 3G δικτύων να είναι ότι τελικά αντί ενός παγκόσμιου προτύπου, μόνο στην Αμερική, αναπτύχθηκαν τρία ασύμβατα συστήματα.

Πριν περιγράψουμε την τέταρτη γενιά δικτύων (4G), θα πρέπει να αναφερθούμε στην ενδιάμεση γενιά και ορισμένα χαρακτηριστικά της, η οποία ουσιαστικά αποτελεί μεσολάβηση μεταξύ της τρίτης και τέταρτης γενιάς, το 3.5G. Η γενιά αυτή περιλαμβάνει δίκτυα τα οποία εκτός από την τεχνολογία WCDMA, ενσωματώνουν και την τεχνολογία High Speed Downlink Packet Access (HSDPA). Το πρότυπο αυτό, καταφέρει μετάδοση πακέτων από το σταθμό βάσης προς το χρήστη (downlink) με ρυθμό 5 φορές μεγαλύτερο από αυτόν του UMTS και 15 φορές μεγαλύτερο από αυτόν του GPRS. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι σε σύγκριση με τα 2 Mbps που μπορεί να προσφέρει το UMTS, ο ρυθμός μπορεί να αυξηθεί θεωρητικά μέχρι και τα 14.4 Mbps. Το HSDPA θεωρείται ως μια εξέλιξη του UMTS, παρέχοντας στους χρήστες υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα, με ένα τρόπο ανάλογο με αυτό που προσφέρει το EDGE. Παρόλο που κάποιες συνιστώσες του προτύπου αυτού θεωρούνται απλές στο να υλοποιηθούν με το υπάρχον hardware, το HSDPA σαν έννοια απαιτεί επανασχεδιασμό στην αρχιτεκτονική του δικτύου και αναβάθμιση του υλικού, όπως αυτό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στους σταθμούς βάσης. Οι σταθμοί βάσης από την μεριά τους, θα πρέπει όχι μόνο να είναι ικανοί να λειτουργούν αποδοτικά με τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, αλλά και να υποστηρίζουν λειτουργίες πολυπλοκότερων πρωτοκόλλων. Η λειτουργία του HSDPA στηρίζεται στο γεγονός ότι αντί να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά κανάλια για την αποστολή δεδομένων, θα χρησιμοποιείται ένα Downlink Shared Channel (DSCH) κανάλι το οποίο θα το μοιράζονται οι χρήστες μεταξύ τους για την μεταφορά των πακέτων. Το κανάλι αυτό έχει πολύ μεγαλύτερο bandwidth και για το λόγο αυτό καλείται high-speed DSCH (HS-DSCH).

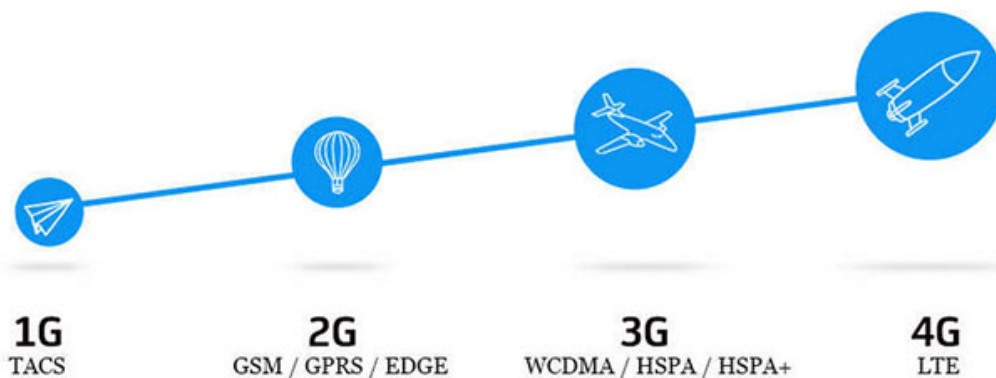
Χαρακτηριστικό γνώρισμα της τρίτης γενιάς όσον αφορά την εξέλιξη των δικτύων ασύρματης επικοινωνίας αποτελεί η τεχνολογία UMTS, η οποία μέχρι και σήμερα είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία σε χρήση μέσω ασύρματων δικτύων κινητών επικοινωνιών. Η τεχνολογία αυτή παρέχει ευρυζωνικές δυνατότητες μετάδοσης πακέτων δεδομένων με ρυθμούς της τάξης των 2 Mbps προσφέροντας στους χρήστες των κινητών τηλεφώνων ή σε υπολογιστές συνδεδεμένους στο κινητό διαδίκτυο ψηφιακές υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Το UMTS προσφέρει πολύ πιο γρήγορη πρόσβαση στο κινητό διαδίκτυο από οτιδήποτε γνωρίζαμε ως σήμερα και συγκεντρώνει τις τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων και κυκλώματος στη μετάδοση δεδομένων και επομένως προσφέρει προηγμένη και ευέλικτη ποιότητα υπηρεσιών QoS (quality of service). Αυτή η τεχνολογία πρόκειται να οδηγήσει τις επικοινωνίες κατά τον 21ο αιώνα, δίνοντας την δυνατότητα για καθολική πρόσβαση σε υπηρεσίες πολυμέσων ανεξάρτητα τοποθεσίας, δικτύου και

τερματικού που χρησιμοποιείται. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως δυνατότητα τηλε-συνδιάσκεψης και υπηρεσίες ελεγχόμενης μεταβλητότητας στην καθυστέρηση (streaming). Βέβαια, για τη βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που υπόσχεται η τεχνολογία UMTS έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα πρότυπα όπως το HSPA(High Speed Packet Access) το οποίο στηρίζει τις βάσεις της δημιουργίας του στη βελτίωση του W-CDMA(Wideband Code Division Multiple Access) και έχει ως αποτέλεσμα ποιοτικότερη απόδοση.

2.2.3 Η ανάγκη για LTE

Για πολλά χρόνια, το μεγαλύτερο ποσοστό της κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεπικοινωνίας αποτελούσαν οι υπηρεσίες φωνής. Η ανάπτυξη των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ήταν αρχικά αργή, αλλά πριν από το 2010 ξεκίνησε η χρήση της να αυξάνεται δραματικά. Για να το παρουσιάσουμε αυτό, μετρήσεις της Ericsson [2] έδειξαν ότι η συνολική κίνηση που διακινείται από δίκτυα σε όλο τον κόσμο, αυξάνεται με ρυθμό petabytes ανά μήνα. Όπως επισημαίνεται για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του πρώτου τετραμήνου του 2017 υπήρξαν περισσότεροι από 107 εκατομμύρια νέες εγγραφές σε υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η τάση πρόκειται να συνεχιστεί, καθώς προβλέπεται ότι μέχρι το τέλος του 2022, θα υπάρχουν 1 εκατομμύριο νέες εγγραφές κάθε μέρα σε υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και δεδομένων.

Εν μέρει, η αύξηση αυτή έχει ξεκινήσει από το δεύτερο μισό της προηγούμενης δεκαετίας λόγω της αυξημένης διαθεσιμότητας τεχνολογιών επικοινωνίας. Πιο σημαντικό ρόλο όμως έπαιξε η εισαγωγή του iPhone της Apple το 2007, με συσκευές βασιζόμενες στο λειτουργικό σύστημα Android της Google να ακολουθούν από το 2008. Τα smartphones ήταν πιο ελκυστικά και φιλικά προς το χρήστη από τους προκατόχους τους και είχαν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν τη δημιουργία εφαρμογών από τρίτους προγραμματιστές. Το αποτέλεσμα ήταν μια έκρηξη του αριθμού και της χρήσης των κινητών εφαρμογών, η οποία αντικατοπτρίζεται στα διαγράμματα. Επιπλέον, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων είχαν προσπαθήσει στο παρελθόν να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας με την εισαγωγή των flat rate charging schemes που επιτρέπουν απεριόριστη λήψη δεδομένων. Αυτό οδήγησε σε μια κατάσταση όπου ούτε οι προγραμματιστές ούτε οι χρήστες παρακινούνταν να περιορίσουν την κατανάλωσή τους.



Σχήμα 2.2: Από 1G έως 4G

Ως αποτέλεσμα, τα δίκτυα 2G και 3G άρχισαν να παρουσιάζουν συμφόρηση τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα την ανάγκη αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου. Στην επόμενη ενότητα, επανεξετάζουμε τα όρια της χωρητικότητας ενός συστήματος κινητής επικοινωνίας για να δείξουμε πώς αυτή η χωρητικότητα μπορεί να επιτευχθεί.

2.2.4 Χωρητικότητα συστήματος κινητής τηλεπικοινωνίας

Το 1948, ο Claude Shannon ανακάλυψε ένα θεωρητικό όριο στον ρυθμό δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί από οποιοδήποτε σύστημα επικοινωνίας. Θα το γράψουμε στην απλούστερη μορφή του, ως εξής:

$$C = B \log_2 (1 + SINR) \quad (2.1)$$

Εδώ, το $SINR$ είναι ο λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο, δηλαδή η ισχύς στο δέκτη λόγω του απαιτούμενου σήματος, διαιρούμενο με την ισχύ εξαιτίας του θορύβου και των παρεμβολών. B είναι το εύρος ζώνης του συστήματος επικοινωνίας σε Hz και C είναι η χωρητικότητα καναλιού σε $bits/s$.

Είναι θεωρητικά δυνατό για ένα σύστημα επικοινωνίας να αποστέλλει δεδομένα από πομπό σε ένα δέκτη χωρίς σφάλματα, υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμός δεδομένων να είναι μικρότερος από την χωρητικότητα του καναλιού. Σε ένα σύστημα κινητής επικοινωνίας, το C είναι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να χειριστεί ένα κύτταρο και ισούται με το συνδυασμένο ρυθμό δεδομένων όλων των κινητών τηλεφώνων στο κελί.

2.2.5 Αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για την αύξηση της χωρητικότητας ενός συστήματος κινητής επικοινωνίας. Πρώτος και πιο σημαντικός, είναι η χρήση μι-

κρότερων cell . Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, η χωρητικότητα του καναλιού είναι η μέγιστη ταχύτητα δεδομένων που μπορεί να χειριστεί ένα μεμονωμένο κελί. Δημιουργώντας επιπλέον σταθμούς βάσης και μειώνοντας το μέγεθος κάθε cell , μπορούμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα ενός δικτύου.

Η δεύτερη τεχνική είναι η αύξηση του εύρους ζώνης. Το φάσμα διαχειρίζεται από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) και τις περιφερειακές και εθνικές ρυθμιστικές αρχές και η αυξανόμενη χρήση κινητών τηλεπικοινωνιών οδήγησε στην αύξηση της κατανομής του φάσματος σε συστήματα 2G και 3G . Ωστόσο, υπάρχει μόνο ένα πεπερασμένο μέρος του ραδιοφάσματος διαθέσιμο και απαιτείται επίσης από ποικίλες εφαρμογές όπως οι στρατιωτικές επικοινωνίες και η αστρονομία. Επομένως υπάρχουν όρια ως προς το βαθμό στον οποίο μπορεί να προχωρήσει αυτή η διαδικασία.

Η τρίτη τεχνική είναι η βελτίωση της τεχνολογίας επικοινωνιών που χρησιμοποιούμε. Αυτό φέρνει πολλά οφέλη: μας επιτρέπει να προσεγγίσουμε όλο και περισσότερο τη θεωρητική χωρητικότητα του καναλιού και μας επιτρέπει να εκμεταλλευτούμε το υψηλότερο SINR και το μεγαλύτερο εύρος ζώνης που διατίθενται από άλλες αλλαγές παραπάνω. Αυτή η προοδευτική βελτίωση στην τεχνολογία των επικοινωνιών υπήρξε ένα συνεχές θέμα στην ανάπτυξη των κινητών τηλεπικοινωνιών και είναι ο κύριος λόγος για την εισαγωγή του LTE

2.2.6 Πρόσθετα κίνητρα

Υπήρξαν άλλα τρία ζητήματα τα οποία οδήγησαν τη μετάβαση στο LTE .

Πρώτον, ένας χειριστής 2G ή 3G πρέπει να διατηρεί δύο δίκτυα πυρήνα: τον τομέα μεταγωγής κυκλώματος για φωνή και τον τομέα μεταγωγής πακέτων για δεδομένα. Με την προϋπόθεση όμως ότι το δίκτυο δεν είναι υπερφορτωμένο, είναι επίσης δυνατή η μεταφορά των φωνητικών κλήσεων μέσω δικτύων μεταγωγής πακέτων χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως Voice over IP (VoIP) . Συνεπώς, οι χειριστές μπορούν να μεταφέρουν τα πάντα στον τομέα μεταγωγής πακέτων και επίσης μπορούν να μειώσουν τα κεφάλαια των επιχειρησιακών δαπανών τους.

Σε ένα σχετικό ζήτημα, τα δίκτυα 3G εισάγουν καθυστερήσεις της τάξης των 100 ms για εφαρμογές δεδομένων, κατά τη μεταφορά πακέτων δεδομένων μεταξύ στοιχείων δικτύου και διασύνδεσης. Τέτοιες καθυστερήσεις είναι απαγορευτικές και προκαλούν δυσκολίες για απαιτητικές εφαρμογές όπως διαδραστικά παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, ένας δεύτερος οδηγός είναι η επιθυμία να μειωθεί η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο στο δίκτυο.

Τρίτον, οι προδιαγραφές για το UMTS και το GSM καθίστανται όλο και πιο πολύπλοκες με τα χρόνια, λόγω της ανάγκης να προστεθούν νέα χαρακτηριστικά στο σύστημα διατηρώντας παράλληλα προς τα πίσω συμβατότητα με προηγούμενες συσκευές. Μια νέα αρχή θα βοηθήσει το έργο των σχεδιαστών, αφήνοντάς τους να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος χωρίς να χρειάζεται να υποστηρίζεται συμβατότητα με συσκευές παλαιού τύπου.

2.3 LTE , LTE-Advanced

2.3.1 Από UMTS σε LTE

Το 2004, το 3GPP ξεκίνησε μια μελέτη με θέμα τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του UMTS . Στόχος ήταν να διατηρηθούν τα συστήματα κινητής επικοινωνίας της 3GPP ανταγωνιστικά σε χρονικά διαστήματα 10 ετών και άνω, παρέχοντας υψηλά ποσοστά δεδομένων και μικρές καθυστερήσεις, προϋποθέσεις απαραίτητες για τους μελλοντικούς χρήστες.

Στη αρχιτεκτονική Long Term Evolution, το Evolved Packet Core (EPC) είναι άμεσος αντικαταστάτης του τομέα πακέτων του UMTS και GSM. Δεν υπάρχει ισοδύναμο με τον τομέα μεταγωγής κυκλώματος, το οποίο να επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του LTE για την παράδοση της κίνησης δεδομένων, αλλά συνεπάγεται ότι οι κλήσεις φωνής θα πρέπει να αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας άλλες τεχνικές όπως αυτές που αναφέρονται παρακάτω. Το Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) χειρίζεται την ασύρματη επικοινωνία του EPC με το κινητό, οπότε είναι μια άμεση αντικατάσταση του UTRAN. Η κινητή συσκευή είναι γνωστή ως εξοπλισμός χρήστη, αν και η εσωτερική λειτουργία του είναι πολύ διαφορετική από πριν. Η νέα αρχιτεκτονική σχεδιάστηκε ως μέρος δύο έργων 3GPP, της αρχιτεκτονικής (System Architecture Evolution SAE), η οποία κάλυψε το κεντρικό δίκτυο, και της αρ-

χιττονικής Long Term Evolution (LTE), η οποία κάλυψε το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, την ασύρματη διεπαφή και τον εξοπλισμό χρήστη. Επίσημα, το ολικό σύστημα είναι γνωστό ως Evolved Packet System (EPS), ενώ το ακρωνύμιο LTE αναφέρεται μόνο στην εξέλιξη της ασύρματης διεπαφής. Παρά την επίσημη ορολογία, ο όρος LTE έχει επικρατήσει ως το όνομα για ολόκληρο το σύστημα και χρησιμοποιείται τακτικά από το 3GPP.

2.3.2 Προδιαγραφές LTE

Το κύριο αποτέλεσμα της μελέτης ήταν η συγκέντρωση των προδιαγραφών και απαιτήσεων για την ασύρματη διεπαφή, από τις οποίες οι πιο σημαντικές ήταν οι ακόλουθες. Η LTE έπρεπε να καταφέρει ένα μέγιστο ρυθμό δεδομένων 100 *Mbps* για downlink και 50 *Mbps* για uplink. Αυτή η απαίτηση ξεπεράστηκε στο τελικό σύστημα, το οποίο παρέχει μέγιστη ροή δεδομένων 300 *Mbps* και 75 *Mbps* αντίστοιχα. Για λόγους σύγκρισης, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων WCDMA, στην έκδοση 6 των προδιαγραφών 3GPP είναι 14 *Mbps* για downlink και 5,7 *Mbps* για uplink.

Ωστόσο, θα πρέπει να τονίσουμε ότι αυτές οι μέγιστες ταχύτητες δεδομένων μπορούν να επιτευχθούν μόνο σε ιδανικές συνθήκες και είναι εντελώς ανέφικτες σε οποιοδήποτε ρεαλιστικό σενάριο. Ένα καλύτερο μέτρο είναι η φασματική απόδοση, η οποία εκφράζει την τυπική χωρητικότητα ενός cell ανά μονάδα εύρους ζώνης. Το LTE ήταν απαραίτητο για να υποστηρίξει μια φασματική απόδοση τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της έκδοσης 6 WCDMA για downlink και δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη για uplink.

Η καθυστέρηση είναι ένα άλλο σημαντικό ζήτημα, ιδιαίτερα για εφαρμογές κρίσιμου χρόνου, όπως υπηρεσίες φωνής και διαδραστικά παιχνίδια. Υπάρχουν δύο πτυχές σε αυτό. Πρώτον, οι απαιτήσεις αναφέρουν ότι ο χρόνος που απαιτείται για την μεταφορά δεδομένων μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και του σταθερού δικτύου θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5 *ms*, υπό την προϋπόθεση ότι η ασύρματη διεπαφή δεν είναι κορεσμένη. Δεύτερον, τα κινητά τηλέφωνα μπορούν να λειτουργούν σε δύο καταστάσεις: μια ενεργή κατά την οποία επικοινωνούν με το δίκτυο και μια αναμονής με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι απαιτήσεις αναφέρουν ότι η μεταπήδηση ενός τηλεφώνου από την κατάσταση αναμονής στην ενεργή κατάσταση, μετά από παρέμβαση του χρήστη, πρέπει να διαρκεί λιγότερο από 100 *ms*.

Υπάρχουν επίσης απαιτήσεις σχετικά με την κάλυψη και την κινητικότητα. Το LTE έχει προτείνει βελτιστοποιήσεις για μεγέθη κυψελών μέχρι 5 χιλιόμετρα, λειτουργία με υποβαθμισμένη απόδοση έως και 30 χιλιόμετρα και υποστήριξη κυψελίδων μεγέθους έως και 100 χιλιόμετρα.

Παρέχει επίσης βελτιστοποιήσεις για ταχύτητες εν κινήσει μέχρι 15 *km/h*, λειτουργεί με υψηλή απόδοση έως και 120 *km/h* και υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 350 *km/h*. Τέλος, το LTE έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με διαφορετικά εύρη ζώνης, τα οποία κυμαίνονται από 1,4 *MHz* μέχρι ένα μέγιστο των 20 *MHz*.

2.3.3 Από LTE σε LTE-Advanced

Ο σχεδιασμός του LTE πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με πρωτοβουλία της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ITU συνέβαλε στην προώθηση της ανάπτυξης των 3G τεχνολογιών δημοσιεύοντας ένα σύνολο απαιτήσεων για ένα σύστημα κινητής επικοινωνίας τρίτης γενιάς, υπό το όνομα International Mobile Telecommunications (IMT) 2000 [3]. Τα συστήματα 3G είναι τα κυριότερα αποδεκτά συστήματα από την ITU που πληρούν τις απαιτήσεις για το IMT-2000.

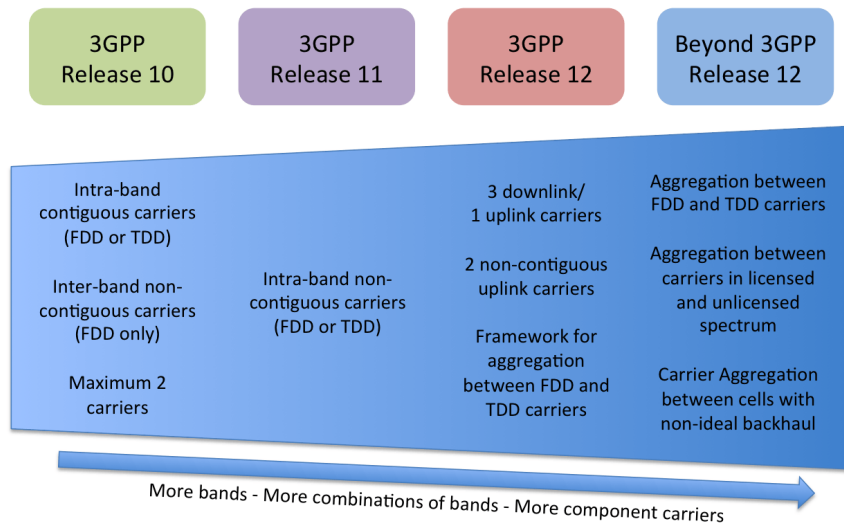
Η ITU ξεκίνησε μια παρόμοια διαδικασία το 2008, δημοσιεύοντας ένα σύνολο απαιτήσεων για μια τέταρτη γενιά συστημάτων τηλεπικοινωνιών (4G) με την ονομασία IMT-Advanced [4]. Σύμφωνα με αυτές τις απαιτήσεις, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων ενός συμβατού συστήματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 600 *Mbps* όσον αφορά το downlink και 270 *Mbps* για uplink, σε εύρος ζώνης 40 *MHz*. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα στοιχεία αυτά υπερβαίνουν τις δυνατότητες του LTE.

Προωθούμενη από τις απαιτήσεις της ITU για το IMT-Advanced, το 3GPP άρχισε να μελετά τον τρόπο βελτίωσης των δυνατοτήτων του LTE. Το κύριο αποτέλεσμα της μελέτης ήταν οι προδιαγραφές για ένα σύστημα γνωστό ως LTE-Advanced, όπου οι βασικές απαιτήσεις ήταν οι ακόλουθες.

Το LTE-Advanced ήταν απαραίτητο για την επίτευξη μέγιστου ρυθμού δεδομένων 1000 *Mbps* για downlink, και 500 *Mbps* για uplink. Στην πράξη, το σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει μέγιστες ταχύτητες δεδομένων 3000 και 1500 *Mbps* αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ένα συνολικό εύρος ζώνης 100 *MHz* που είναι κατασκευασμένο από πέντε ξεχωριστά εξαρτήματα των 20 *MHz* έκαστο. Σημειώστε, όπως και προηγουμένως, ότι οι ταχύτητες αυτές είναι ανέφικτες σε οποιοδήποτε ρεαλιστικό σενάριο.

Οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν επίσης στόχους για την αποδοτικότητα φάσματος σε ορισμένα σενάρια δοκιμών. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για το WCDMA συνεπάγεται μια φασματική απόδοση 4.5 - 7 φορές μεγαλύτερη από αυτή της έκδοσης 6 WCDMA για το downlink και 3.5 - 6 φορές μεγαλύτερη για το uplink. Τέλος, το LTE-Advanced έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι συμβατό με LTE, δηλαδή ένα κινητό LTE μπορεί να επικοινωνεί με έναν σταθμό βάσης ο οποίος λειτουργεί LTE-Advanced και αντίστροφα.

Evolution of LTE Carrier Aggregation in 3GPP



Σχήμα 2.3: Εξέλιξη του LTE Carrier Aggregation in 3GPP

Μετά την υποβολή και αξιολόγηση των προτάσεων, η ITU ανακοίνωσε τον Οκτώβριο του 2010 ότι δύο συστήματα πληρούσαν τις απαιτήσεις του IMT-Advanced. Το ένα σύστημα ήταν το LTE-Advanced, ενώ το άλλο ήταν μια βελτιωμένη έκδοση του WiMAX σύμφωνα με την προδιαγραφή IEEE 802.16m, γνωστό και ως mobile WiMAX 2.0.

Η Qualcomm είχε αρχικά την πρόθεση να αναπτύξει έναν 4G διάδοχο στο cdma2000 με το όνομα Ultra Mobile Broadband (UMB). Ωστόσο, το σύστημα αυτό δεν είχε δύο από τα πλεονεκτήματα που είχε ο προκάτοχός του. Πρώτον, δεν ήταν συμβατό με το cdma2000, όπως ο cdma2000 ήταν με IS-95. Δεύτερον, δεν ήταν πλέον το μοναδικό σύστημα που θα μπορούσε να λειτουργήσει στα στενά εύρη ζώνης που κυριαρχούσαν στη Βόρεια Αμερική, λόγω της υποστήριξης του ευέλικτου εύρους ζώνης από το LTE. Κανένας φορέας εκμετάλλευσης δικτύου δεν ανακοίνωσε ποτέ ότι σχεδιάζει να υιοθετήσει την τεχνολογία και το έργο σταμάτησε το 2008. Αντ' αυτού, οι περισσότεροι φορείς cdma2000 αποφάσισαν να στραφούν στο LTE.

Αυτό άφησε μια κατάσταση όπου υπήρχαν δύο εναπομείνουσες διαδρομές στις 4G κινητές επικοινωνίες: LTE και WiMAX. Από αυτές, η LTE έχει μακράν τη μεγαλύτερη υποστήριξη μέσω των φορέων εκμετάλλευσης δικτύου και κατασκευαστών εξοπλισμού, στο βαθμό που αρκετοί φορείς εκμετάλλευσης WiMAX επέλεξαν να αλλάξουν δίκτυα τους σε LTE. Λόγω αυτής της στήριξης, το LTE είναι πιθανό να είναι η κυρίαρχη τεχνολογία κινητών επικοινωνιών για μερικά χρόνια.

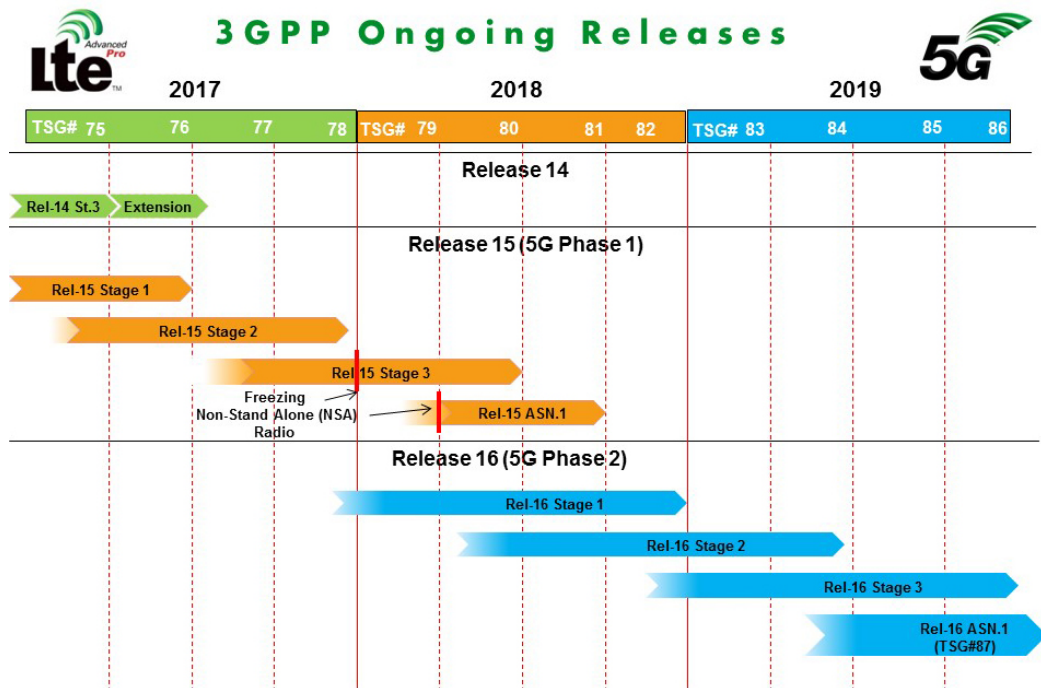
Αρχικά, η ITU θεώρησε ότι ο όρος 4G θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για συστήματα που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του IMT-Advanced, το οποίο δεν εισαχόστηκε από το LTE ούτε από το mobile WiMAX 1.0 (IEEE802.16e). Εξαιτίας αυτού, η κοινότητα μηχανικών ήρθε να περιγράψει αυτά τα συστήματα ως 3.9G. Αυτές οι σχέψεις δεν εμπόδιζαν την κοινότητα μάρκετινγκ να περιγράψει το LTE και το mobile WiMAX 1.0 ως τεχνολογίες 4G. Αν και η περιγραφή αυτή ήταν αδικαιολόγητη από άποψη απόδοσης, υπήρχε στην πραγματικότητα

κάποια λογική: υπάρχει μια σαφής τεχνολογική μετάβαση από UMTS σε LTE, η οποία δεν υπάρχει στη μετάβαση από LTE σε LTE-Advanced. Δεν πήρε πολύ καιρό για να γίνει αποδεκτή η ήττα από την ITU . Τον Δεκέμβριο του 2010, η ITT έδωσε την ευλογία της στη χρήση του 4G για να περιγράψει όχι μόνο τα LTE και τα mobile WiMAX 1.0, αλλά και οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία με ουσιαστικά καλύτερη απόδοση από τα πρώτα συστήματα 3G.

Οι προδιαγραφές για το LTE παράγονται από το 3GPP , όπως και οι προδιαγραφές για UMTS και GSM . Οργανώνονται σε εκδόσεις, καθεμία από τις οποίες περιέχει ένα σταθερό και σαφώς καθορισμένο σύνολο χαρακτηριστικών. Η χρήση των εκδόσεων επιτρέπει σε κατασκευαστές εξοπλισμού την κατασκευή συσκευών που χρησιμοποιούν ορισμένα ή όλα τα χαρακτηριστικά προηγούμενων κυκλοφοριών, ενώ το 3GPP συνεχίζει να προσθέτει νέα χαρακτηριστικά στο σύστημα σε μεταγενέστερη έκδοση. Σε κάθε έκδοση, οι προδιαγραφές προχωρούν μέσω διαφόρων εκδόσεων. Νέες λειτουργίες μπορεί να προστίθεται σε διαδοχικές εκδόσεις έως την ημερομηνία κατά την οποία η έκδοση έχει σταματήσει, μετά την οποία οι μόνες αλλαγές που μπορούν να γίνουν περιλαμβάνουν την τελειοποίηση των τεχνικών λεπτομερειών, των διορθώσεων και των διευκρινίσεων. Ο πίνακας 2.2 παραθέτει τις κυκλοφορίες που χρησιμοποίησε το 3GPP από την εισαγωγή του UMTS μαζί με τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά κάθε έκδοσης. Σημειώστε ότι το σχήμα αρίθμησης άλλαξε μετά την έκδοση 99, έτσι ώστε οι μεταγενέστερες εκδόσεις να είναι αριθμημένες από 4 έως 12. Το LTE εισήχθη για πρώτη φορά στην έκδοση 8, η οποία είχε σταματήσει τον Δεκέμβριο του 2008. Αυτή η έκδοση περιέχει τα περισσότερα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά του LTE. Ωστόσο, στον προσδιορισμό της έκδοσης 8, το 3GPP παρέλειψε μερικά από τα λιγότερο σημαντικά χαρακτηριστικά του συστήματος, τα οποία συμπεριλήφθηκαν τελικά στην Έκδοση 9, την οποία θα καλύψουμε παρακάτω. Η έκδοση 10 περιλαμβάνει τις πρόσθετες δυνατότητες που απαιτούνται για το LTE-Advanced, ενώ οι επόμενες βελτιώσεις περιέχονται στις Εκδόσεις 11 και 12. Το 3GPP συνέχισε επίσης να προσθέτει νέα χαρακτηριστικά στο UMTS κατά τις εκδόσεις 8 έως 12. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου που παραμένουν με UMTS να παραμείνουν ακόμη και ενώ άλλοι φορείς μετακινούνται προς το LTE. Στον πίνακα 2.2 και στην εικόνα 2.4 φαίνονται οι 3GPP Releases όπως συνεχίζουν μέχρι και σήμερα σύμφωνα με το [5].

Πίνακας 2.2: Εκδόσεις LTE

| Όνομα | Σταυός | Σταρτ Δατε | Όλοσυρε Δατε |
|-----------------------|--------|--------------------|-------------------|
| Ρελεασε 16 | Οπεν | 2017-03-22 | |
| Ρελεασε 15 | Οπεν | 2016-06-01 | |
| Ρελεασε 14 | Φροζεν | 2014-09-17 | |
| Ρελεασε 13 | Φροζεν | 2012-09-30 | |
| Ρελεασε 12 | Φροζεν | 2011-06-26 | |
| Ρελεασε 11 | Φροζεν | 2010-01-22 | |
| Ρελεασε 10 | Φροζεν | 2009-01-20 | |
| Ρελεασε 9 | Φροζεν | 2008-03-06 | |
| Ρελεασε 8 | Φροζεν | 2006-01-23 | |
| Ρελεασε 7 | Όλοσεδ | 2003-10-06 | 2014-09-17(ΣΠ-65) |
| Ρελεασε 6 | Όλοσεδ | 2000-03-28 | 2014-09-17(ΣΠ-65) |
| Ρελεασε 5 | Όλοσεδ | 2000-05-01[Νοτε2α] | 2014-09-17(ΣΠ-65) |
| Ρελεασε 4 | Όλοσεδ | 1998-08-01 | 2014-09-17(ΣΠ-65) |
| Ρελεασε 2000 [Νοτε 1] | Όλοσεδ | 1999-03-30 | 1999-12-17 |
| Ρελεασε 1999 | Όλοσεδ | 1996-11-01 | 2008-06-05 |



Σχήμα 2.4: Εκδόσεις LTE

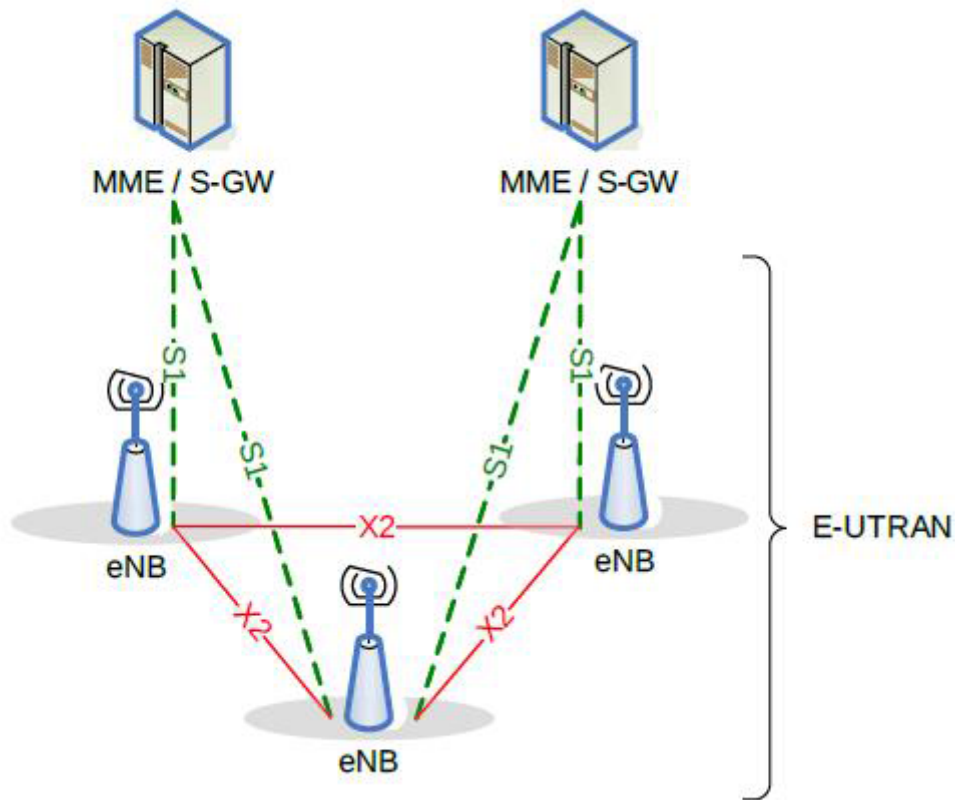
2.3.4 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Το 3GPP καθορίζει στην έκδοση 8 τα στοιχεία και τις απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής EPS που αποτελεί τον κορμό για τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Οι

προδιαγραφές περιέχουν δύο σημαντικά αντικείμενα εργασίας, συγκεκριμένα το LTE και το SAE, που οδήγησαν στην εξειδίκευση του Evolved Packet Core (EPC), Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) και την Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), το καθένα από τα οποία αντιστοιχεί στο κεντρικό δίκτυο, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης και την ασύρματη διεπαφή ολόκληρου του συστήματος, αντίστοιχα. Το EPS παρέχει συνδεσιμότητα IP μεταξύ ενός τερματικού χρήστη (UE) και ένα εξωτερικό δίκτυο πακέτων δεδομένων χρησιμοποιώντας το E-UTRAN.

Στο πλαίσιο των συστημάτων 4G, τόσο η ασύρματη διεπαφή όσο και το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης βελτιώνεται ή επαναπροσδιορίζεται. Σε αντίθεση όμως, μέχρι τώρα η αρχιτεκτονική του κεντρικού δικτύου, δηλαδή το EPC, δεν υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές από την ήδη τυποποιημένη αρχιτεκτονική του SAE. Επομένως, σε αυτή την ενότητα δίνουμε μια επισκόπηση της αρχιτεκτονικής και των λειτουργιών του E-UTRAN που καθορίζονται για τα συστήματα LTE-Advanced και τις κύριες λειτουργίες κόμβου EPC, που μοιράζονται οι εκδόσεις 8, 9 και 10.

LTE-Advanced Επισκόπηση E-UTRAN



Σχήμα 2.5: Επισκόπηση E-UTRAN

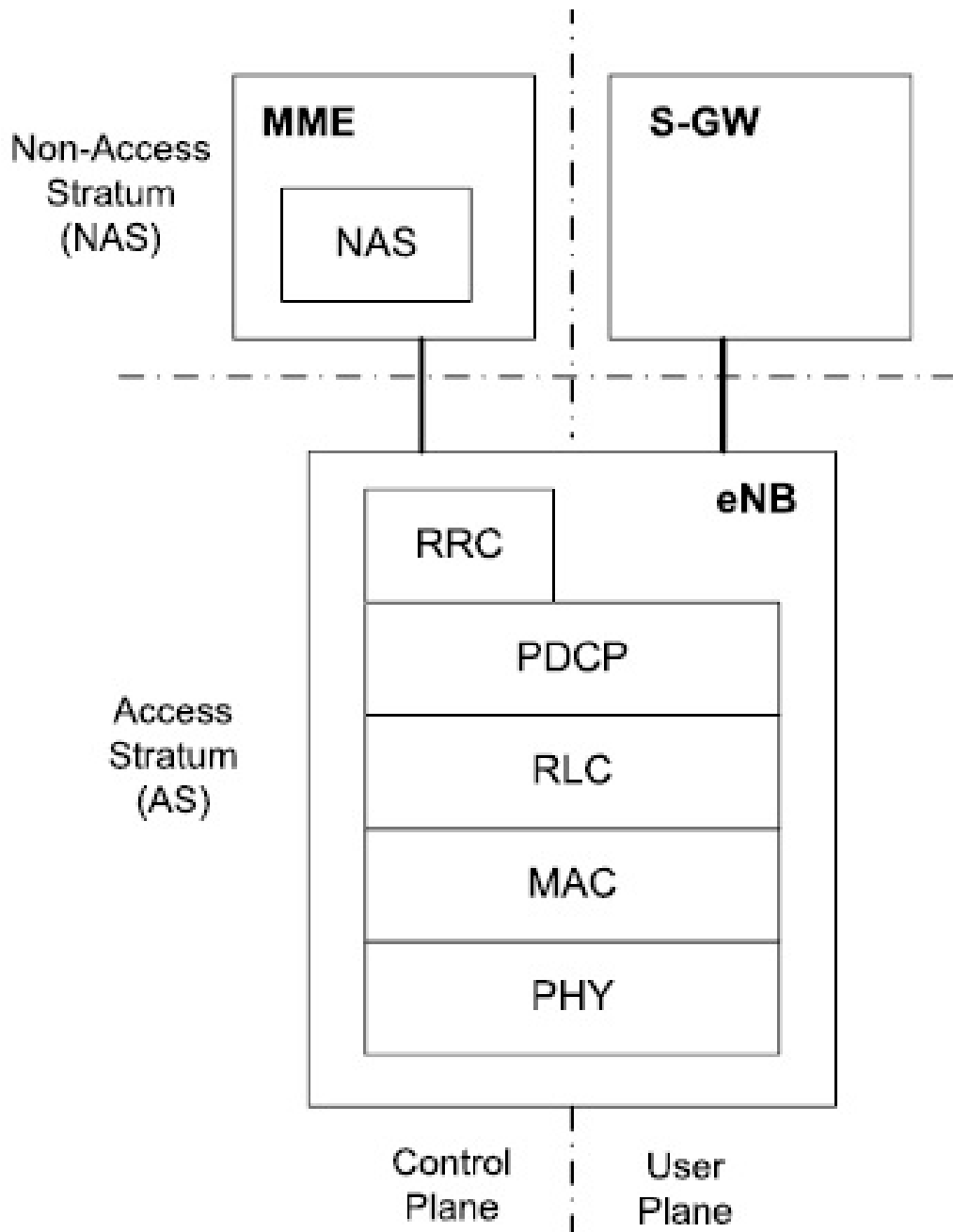
Το βασικό τμήμα της αρχιτεκτονικής E-UTRAN είναι ο 'εξελεγμένος' κόμβος B (eNodeB ή eNB), ο οποίος παρέχει την ασύρματη διασύνδεση με το επίπεδο χρήστη και το πρωτόκολλο ελέγχου του UE. Κάθε ένα από τα eNBs εξυπηρετεί ένα ή περισσότερα E-UTRAN , ενώ η διεπαφή που διασυνδέει τα eNB καλείται X2 interface. Επιπλέον, τα Home eNB (HeNBs, γνωστά ως femtocells), τα οποία είναι χαμηλότερου κόστους από το eNB και χρησιμοποιούνται για βελτίωση της εσωτερικής κάλυψης, μπορούν να συνδεθούν με το EPC απευθείας ή μέσω πύλης που παρέχει επιπλέον υποστήριξη για μεγάλο αριθμό HeNBs . Επιπλέον, το 3GPP εξετάζει τους κόμβους αναμετάδοσης και τις στρατηγικές αναμετάδοσης για τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Κυρίαρχοι στόχοι της νέας αυτής τεχνολογίας αποτελούν η αυξημένη κάλυψη, τα υψηλότερα ποσοστά ρυθμού δεδομένων, η καλύτερη απόδοση και η δίκαιη ποιότητα υπηρεσιών QoS όσον αφορά σε διαφορετικούς χρήστες.

Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

Όπως αναφέρθηκε, τα eNBs παρέχουν τα απαραίτητα πρωτόκολλα τεματισμού χρήστη και ελέγχου τεματιστικού στο E-UTRAN. Το σχήμα 2.6 δίνει μια γραφική επισκόπηση και των δύο επιπέδων πρωτοκόλλων, τόσο για το επίπεδο χρήστη

όσο και για το επίπεδο ελέγχου. Σε επίπεδο χρήστη, τα πρωτόκολλα που περιλαμβάνονται είναι το πρωτόκολλο σύγκλισης πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol PDCP), το πρωτόκολλο ελέγχου ασύρματης επικοινωνίας (Radio Link Control RLC), το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control MAC) και το πρωτόκολλο Physical Layer (PHY).

Οι κύριες λειτουργίες που εκτελούνται σε κάθε στρώμα συνοψίζονται στα ακόλουθα.



Σχήμα 2.6: Στοιβά πρωτοκόλλων LTE

NAS (Non Access Stratum)

Το NAS [6] είναι ένα σύνολο πρωτοκόλλων του EPS. Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ασύρματης σηματοδότησης μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και της MME για πρόσβαση μέσω LTE / E-UTRAN. Από οπτική στοίβας πρωτοκόλλων, το NAS είναι το υψηλότερο στρώμα του επιπέδου ελέγχου. Οι διαδικασίες NAS ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες: τη διαχείριση κινητικότητας EPS (EMM - EPS Mobility Management), και τη διαχείριση συνεδριών EPS (ESM - EPS Session Management). Η διαχείριση κινητικότητας EPS αναφέρεται σε διαδικασίες που σχετίζονται με την κινητικότητα μέσω πρόσβασης E-UTRAN, πιστοποίηση ταυτότητας και ασφάλειας. Πρόκειται για το ισοδύναμο των MM σε GSM και GMM στο GPRS. Το πρωτόκολλο διαχείρισης συνεδριών EPS προσφέρει υποστήριξη στη δημιουργία και διαχείριση δεδομένων χρήστη στο NAS.

Στο EPS, εισάγονται δύο έννοιες για τον καθορισμό της σύνδεσης IP μεταξύ ενός UE και ενός δικτύου πακέτων δεδομένων (PDN): Σύνδεση PDN και φορέας EPS. Ένας προεπιλεγμένος φορέας δημιουργείται κατά τη δημιουργία σύνδεσης PDN. Εάν μια υπηρεσία (π.χ. ροή βίντεο) απαιτεί συγκεκριμένο χειρισμό από άποψη ποιότητας υπηρεσίας (QoS), μπορούν να δημιουργηθούν αποκλειστικοί φορείς. Σε μια σύνδεση PDN, όλοι οι χρήστες φορέων EPS μοιράζονται την ίδια διεύθυνση IP. Το EPS υποστηρίζει πολλές ταυτόχρονες συνδέσεις PDN. Για παράδειγμα, ένα UE μπορεί να έχει μια σύνδεση PDN στο Internet (με απλώς έναν προεπιλεγμένο φορέα EPS) και μία στο IMS του φορέα εκμετάλλευσης (με πρόσθετους αποκλειστικούς φορείς, εφόσον το απαιτεί η υπηρεσία). Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά σημαντικές λειτουργίες του NAS.

- Διαχείριση σύνδεσης μεταξύ UE και βασικού δικτύου
- Authentication
- Εγγραφή
- Ενεργοποίηση / απενεργοποίηση πλαισίου του φορέα
- Διαχείριση καταχώρησης τοποθεσίας

RRC (Έλεγχος Πόρων Ραδιοσυχνοτήτων)

Το στρώμα πρωτοκόλλου RRC [7] περιέχεται στο UE & eNB, ενώ είναι μέρος του επιπέδου ελέγχου της ασύρματης διεπαφής LTE. Κύριες υπηρεσίες και λειτουργίες του υποστρώματος RRC αποτελούν οι παρακάτω:

- Πληροφορίες συστήματος εκπομπής που σχετίζονται με το Non Access Stratum (NAS) και το Access Stratum (AS).
- Εγκατάσταση, συντήρηση και απελευθέρωση της RRC σύνδεσης.
- Λειτουργίες ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης κλειδιών.

- Λειτουργίες κινητικότητας.
- Λειτουργίες διαχείρισης QoS (Quality Of Services) .
- Μετρήσεις στο UE και έλεγχος της αναφοράς.
- Μεταφορά άμεσων μηνυμάτων NAS μεταξύ UE και NAS .

PDCP (Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτου Δεδομένων)

Το πρωτόκολλο PDCP [8] εμφανίζεται στο UE & eNb, αποτελεί μέρος του ελέγχου ασύρματης διεπαφής LTE και του επιπέδου χρήστη. Οι κύριες υπηρεσίες και λειτουργίες του υποστρώματος PDCP για το επίπεδο χρήστη είναι:

- Συμπίεση και αποσυμπίεση κεφαλίδας.
- Παράδοση και αναμετάδοση της PDCP Session Data Unit (SDU) για λειτουργία αναγνώρισης φορέων κατά την παράδοση.
- Διπλή ανίχνευση.
- Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση.

Οι κύριες υπηρεσίες και λειτουργίες του PDCP για το επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνουν:

- Προστασία κρυπτογράφησης και ακεραιότητας.
- Μεταφορά δεδομένων επιπέδου ελέγχου.

RLC (Έλεγχος Ραδιοζεύξεων)

Το επίπεδο πρωτοκόλλου RLC [9] υπάρχει στο UE & eNb, αποτελεί μέρος του ελέγχου ασύρματης διεπαφής LTE και του επιπέδου χρήστη. Οι κύριες υπηρεσίες και λειτουργίες του RLC υποστρώματος περιλαμβάνουν:

- Διόρθωση σφαλμάτων μέσω αυτόματης επανάκλησης (Automatic Repeat reQuest ARQ).
- Τμηματοποίηση ανάλογα με το μέγεθος του μεταφερόμενου μπλοκ και ανακατανομή σε περίπτωση αναμετάδοσης όπου απαιτείται.
- Συνένωση SDU για τον ίδιο φορέα.
- Ανίχνευση και ανάκτηση σφαλμάτων πρωτοκόλλου.
- Παράδοση σε σειρά.

MAC (Medium Access Control)

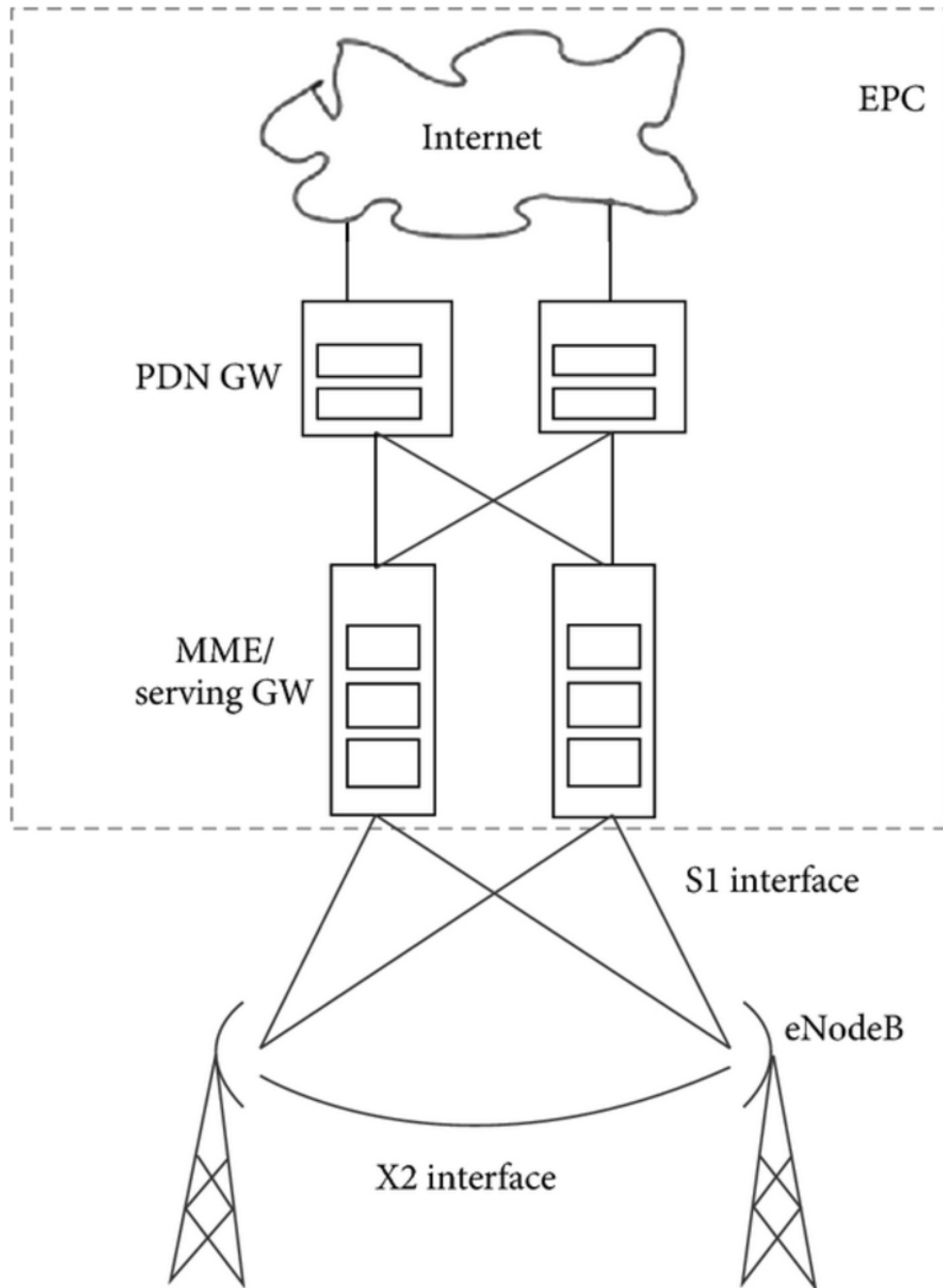
Το επίπεδο πρωτοκόλλου MAC [10] υπάρχει στο UE & eNB, ενώ αποτελεί μέρος του ελέγχου ασύρματης διεπαφής LTE και του επιπέδου χρήστη.

Οι κύριες υπηρεσίες και λειτουργίες του υποστρώματος MAC περιλαμβάνουν:

- Πολυπλεξία / αποπολυπλεξία RLC Packet Data Unit (PDU).
- Προγραμματισμό αναφοράς πληροφοριών.
- Διόρθωση σφαλμάτων μέσω του Hybrid ARQ (HARQ) .
- Προτεραιότητα τοπικού καναλιού.
- Padding.

Evolved Packet Core (EPC)

Το EPC είναι ένα βασικό all-IP-based δίκτυο που μπορεί να έχει πρόσβαση μέσω ασύρματης πρόσβασης 3GPP (UMTS, HSPA, HSPA +, LTE) και ασύρματη πρόσβαση εκτός του 3GPP (π.χ. WiMAX, WLAN), επιτρέποντας διαδικασίες παράδοσης εντός και μεταξύ των δύο τύπων πρόσβασης. Η ευελιξία πρόσβασης στο EPC είναι ελκυστική για τους φορείς εκμετάλλευσης δεδομένου ότι τους επιτρέπει να έχουν έναν ενιαίο πυρήνα μέσω του οποίου υποστηρίζονται διάφορες υπηρεσίες. Τα κύρια συστατικά στοιχεία του EPC και οι λειτουργίες τους ακολουθούν.



Σχήμα 2.7: Evolved Packet Core - LTE

Μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (MME)

Η Mobility Management Entity (MME) αποτελεί βασικό στοιχείο ελέγχου και συμπεριλαμβάνεται στο δίκτυο κορμού ενός συστήματος LTE. Μπορεί να αποτελείται από έναν server του παρόχου τοποθετημένο σε κάποιο ασφαλές σημείο. Οι κύριες διαδικασίες του MME είναι:

- Ασφάλεια και αυθεντικοποίηση. Κατά τη σύνδεση ενός συνδρομητή στο δίκτυο για πρώτη φορά η MME αναλαμβάνει την αυθεντικοποίηση του εκτελώντας βασικές λειτουργίες αυθεντικοποίησης. Βρίσκει την ταυτότητα της συσκευής του χρήστη είτε μέσω της USIM της συσκευής, είτε αναζητώντας από τον Home Subscription Server(HSS) τα διανύσματα αυθεντικοποίησης της συγκεκριμένης συσκευής στο δίκτυο. Μ'αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνει ότι ο χρήστης που ζητάει πρόσβαση στο δίκτυο είναι αυτός που έχει την εξουσιοδότηση να το χρησιμοποιεί. Η MME μπορεί να επαναλαμβάνει τις διαδικασίες αυθεντικοποίησης κατά περιόδους ή όποτε χρειαστεί αναγκαίο. Η MME ελέγχει επίσης τα κλειδιά κρυπτογράφησης και ακεραιότητας μέσω του κύριου κλειδιού κάθε χρήστη που έχει λάβει μέσω του διανύσματος αυθεντικοποίησης από τον HSS κατά την αρχικοποίηση του χρήστη στο δίκτυο. Για όση ώρα διεξάγεται η επικοινωνία του χρήστη με το συγκεκριμένο δίκτυο η MME διαβιβάζει στο χρήστη μια προσωρινή ταυτότητα που ονομάζεται Globally Unique Temporary Identity (GUTI) η οποία απαιτείται για κάθε είδους επικοινωνία σηματοδοσίας του συνδρομητή με το συγκεκριμένο δίκτυο. Η ταυτότητα αυτή διαβιβάζεται στο χρήστη με ασφαλή τρόπο αφού ξεκινήσει η κρυπτογράφηση της ζεύξης και έχει ως σκοπό την προστασία της επικοινωνίας από παθητικού τύπου επιθέσεις. Για κάθε νέα σύνδεση του χρήστη στο σύστημα αποστέλλεται νέα προσωρινή ταυτότητα καταργώντας την προηγούμενη.
- Διαχείριση κινητικότητας των χρηστών. Η MME γνωρίζει την θέση των συνδρομητών που βρίσκονται μέσα στην περιφέρεια ελέγχου της. Όταν κάποιος χρήστης συνδεθεί στο δίκτυο η MME δημιουργεί μια εγγραφή για αυτόν και σηματοδοτεί την τοποθεσία του στον HSS. Ανάλογα με την δραστηριότητα του χρήστη ρυθμίζει τις κατάλληλες λειτουργίες τόσο στον eNodeB όσο και στην S-GW(Serving Gateway). Για παράδειγμα, σε περίπτωση που ένας συνδεδεμένος χρήστης παραμένει ανενεργός, ο δίαυλος μεταφοράς δεδομένων προς τον χρήστη αυτόν μπορεί να δεσμευθεί από κάποιον άλλο. Η MME είναι επίσης υπεύθυνη για τον έλεγχο σηματοδοσίας ανάμεσα σε διαφορετικά eNodeBs, S-GWs ή MMEs. Η MME διαχειρίζεται κάθε αλλαγή στον eNodeB εφόσον δεν υπάρχει πλέον ξεχωριστός RNC να διαχειρίζεται την κινητικότητα του χρήστη. Ένας ανενεργός χρήστης ενημερώνει για τη θέση του καθώς κινείται ή σε τακτά χρονικά διαστήματα αν βρίσκεται σε ακινησία.
- Διαχείριση προφίλ χρήστη και διασύνδεση υπηρεσιών. Από τη στιγμή που ένας συνδρομητής συνδεθεί στο δίκτυο η MME ανακτά πληροφορίες για το προφίλ του από τον HSS και αποθηκεύει τα νέα δεδομένα κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης. Το προφίλ αυτό καθορίζει σε ποια διαφορετικά δίκτυα μπορεί να είναι συνδεδεμένος ο χρήστης. Η MME μπορεί αυτόματα να αποδώσει στον χρήστη το κατάλληλο κανάλι απ' όπου θα πάρει την αντίστοιχη IP για την χρήση της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την επικοινωνία ανάμεσα στον eNodeB και στην S-GW με τα κατάλληλα σήματα ελέγχου. Η MME σε κάθε περίπτωση μπορεί να επέμβει για τη δημιουργία νέων διαύλων υπηρεσιών που αφορούν το ίδιο το δίκτυο ή διαφορετικά σε περίπτωση αιτήματος από τον χρήστη.

Η MME συνδέεται με όλους σχεδόν τους κόμβους της αρχιτεκτονικής ενός δικτύου LTE και περιλαμβάνει τις κύριες διαδικασίες για τις διασυνδέσεις αυτές. Επίσης ανταλλάσσει δεδομένα και με άλλες MMEs σε περιπτώσεις απώλειας σήματος της συσκευής του χρήστη ή handover .

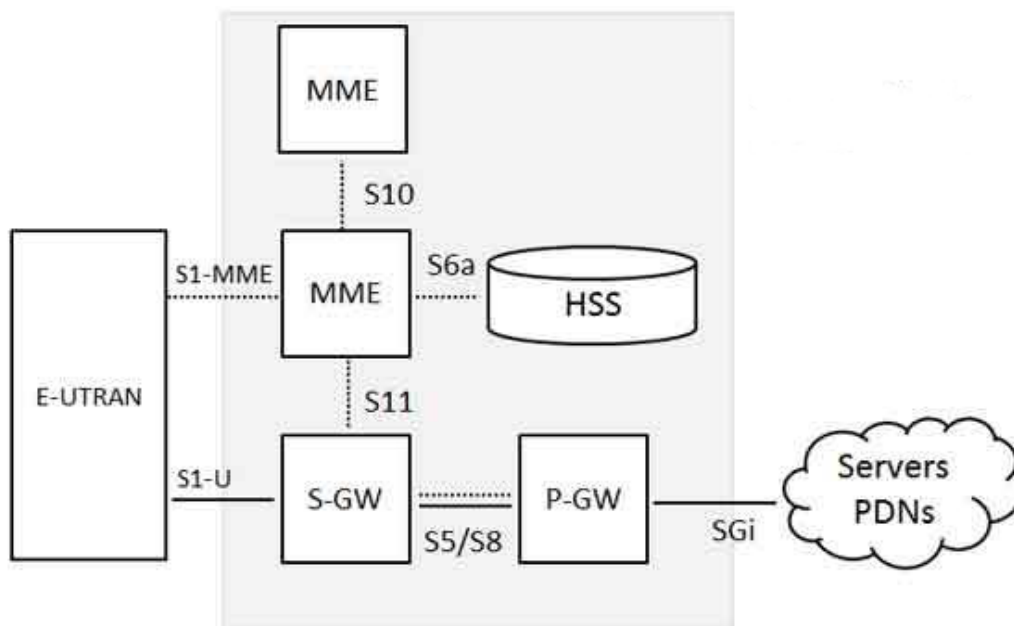
Πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway S-GW)

Στη βασική LTE αρχιτεκτονική, η κύρια λειτουργία της S-GW είναι η διαχείριση του επιπέδου (UP) και η μεταβίβαση δεδομένων και λειτουργιών ανάμεσα στις οντότητες του δικτύου. Για υπηρεσίες που βασίζονται στο GTP (GPRS Tunneling Protocol) η πύλη S-GW θα δημιουργήσει GTP κανάλια για όλες τις διασυνδέσεις στο επίπεδο χρηστών επιτρέποντας την επικοινωνία και με GSM δίκτυα. Η σχεδίαση για συμβατότητα ανάμεσα σε IP υπηρεσίες και GTP κανάλια γίνεται μέσω της πύλης P-GW αφού ο έλεγχος για τη διασύνδεση των GTP καναλιών διεξάγεται από την P-GW και την MME . Στην περίπτωση αυτή δεν είναι αναγκαία η σύνδεση της S-GW με την PCRF καθώς οι διαδικασίες στο επίπεδο ελέγχου δεν είναι δική της αρμοδιότητα. Σε περίπτωση που η διεπαφή ανάμεσα στην P-GW και S-GW χρησιμοποιεί IP υπηρεσίες τότε η S-GW είναι υπεύθυνη για τη συμβατότητα ανάμεσα σε υπηρεσίες IP και GTP κανάλια και μέσω της σύνδεσης με την PCRF λαμβάνει τις πληροφορίες για τη σχεδίαση συμβατότητας. Η S-GW έχει ελάχιστο ρόλο σε διαδικασίες ελέγχου. Είναι υπεύθυνη για τους δικούς της πόρους τους οποίους κατανέμει ανάλογα με τις απαιτήσεις των MME,P-GW και PCRF . Αν υπάρχει κάποια αίτηση από την P-GW ή την PCRF θα μεταδώσει την αίτηση στην MME ώστε να γίνει από κει ο έλεγχος του καναλιού προς τον eNodeB . Ομοίως όταν η MME στέλνει μια αίτηση, η S-GW ενημερώνει την P-GW ή την PCRF ανάλογα αν η διεπαφή S5/S8 βασίζεται σε GTP ή IP υπηρεσία αντίστοιχα. Αν η διεπαφή βασίζεται σε IP υπηρεσία τότε τα δεδομένα θα αποσταλούν μέσω IP καναλιών σε κάθε χρήστη. Αντίθετα αν βασίζεται σε GTP κάθε κομιστής θα έχει το δικό του GTP κανάλι για την αποστολή δεδομένων ή φωνής .

Κατά την διάρκεια κινητικότητας του χρήστη ανάμεσα στους eNodeBs η MME μπορεί να δώσει εντολή στην S-GW να αλλάξει κανάλι από έναν eNodeB σε κάποιον άλλο ή να δημιουργήσει νέο κανάλι για προώθηση δεδομένων όταν χρειαστεί να μεταφερθούν δεδομένα ανάμεσα σε δυο eNodeBs (περιπτώσεις handover). Επίσης, σε περιπτώσεις κινητικότητας του χρήστη μπορεί να χρειαστεί μετάβαση από μια S-GW σε κάποια άλλη. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της MME που ελέγχει τη διαδικασία της αλλαγής καταργώντας τα κανάλια της παλιάς S-GW και δημιουργώντας τα στην καινούργια.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με συγκεκριμένο αριθμό eNodeBs και ομοίως υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός από MMEs που ελέγχουν την περιοχή αυτή. Μια S-GW μπορεί επίσης να συνδεθεί με οποιαδήποτε P-GW πύλη στο δίκτυο καθώς η P-GW δεν επηρεάζεται από την κινητικότητα του χρήστη στο δίκτυο, κατά την πιθανή μετάβαση σε νέα S-GW καθώς ο χρήστης κινείται. Για συνδέσεις που αναφέρονται σε έναν μόνο συνδρομητή η S-GW επικοινωνεί με μία MME και η σύνδεση γίνεται μέσω ενός eNodeB κάθε φορά. Σε περίπτωση που κάποιος χρήστης είναι συνδεδεμένος σε

περισσότερα του ενός δίκτυα μέσω διαφορετικών P-GWs η S-GW συνδέεται με κάθε μια από αυτές ξεχωριστά. Αν η διεπαφή S5/S8 στηρίζεται σε IP υπηρεσίες τότε γίνεται σύνδεση και με την PCRF για κάθε P-GW που χρησιμοποιεί ο χρήστης.



Σχήμα 2.8: LTE Gateways

Πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων (Packet Data Network-Gateway PDN-GW)

Η Packet Data Network Gateway (P-GW , αναφερόμενη και ως PDN-GW) είναι ο τελευταίος δρομολογητής ανάμεσα στο τμήμα EPC (Evolved Packet Core) του δικτύου και στα εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Είναι το υψηλότερο επίπεδο συντονισμού του συστήματος και συνήθως λειτουργεί ως ένα σημείο IP σύνδεσης για τους συνδρομητές. Ελέγχει τη συμφόρηση του δικτύου και εκτελεί κυρίως λειτουργίες φιλτραρίσματος ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας που εκτελεί. Ουσιαστικά η P-GW κατανέμει τις IP διευθύνσεις σε κάθε χρήστη και μέσω αυτής ο κάθε συνδρομητής κάνει χρήση των υπηρεσιών (επικοινωνία με άλλους συνδρομητές, internet κλπ.) Η δρομολόγηση των πακέτων έπειτα για την επικοινωνία μεταξύ του συνδρομητή και του δικτύου που είναι συνδεδεμένος γίνεται μέσω της P-GW για κάθε χρήστη. Η διεύθυνση IP για κάθε χρήστη κατανέμεται κάθε φορά που επιθυμεί τη σύνδεση με κάποιο εξωτερικό δίκτυο, πράγμα το οποίο γίνεται τουλάχιστον μια φορά κατά τη σύνδεση του συνδρομητή στο δίκτυο και μπορεί να συμβεί διαδοχικά κάθε φορά που ζητάει σύνδεση για κάποιο νέο εξωτερικό δίκτυο. Η P-GW μέσω του Dynamic Host Configuration Protocol(DHCP) ανακτά τις IP διευθύνσεις

για κάθε συνδρομητή. Η P-GW περιλαμβάνει την PCEF(Policy and Charging Enforcement Function), μια λειτουργία που είναι υπεύθυνη για την επιβολή της πολιτικής των παρόχων στους συνδρομητές καθώς και την εξουσιοδότηση των συνδρομητών στις υπηρεσίες του συγκεκριμένου παρόχου. Έχει επίσης την αρμοδιότητα για την καταγραφή στοιχείων και αναφορών που σχετίζονται με τη χρέωση των χρηστών του δικτύου.

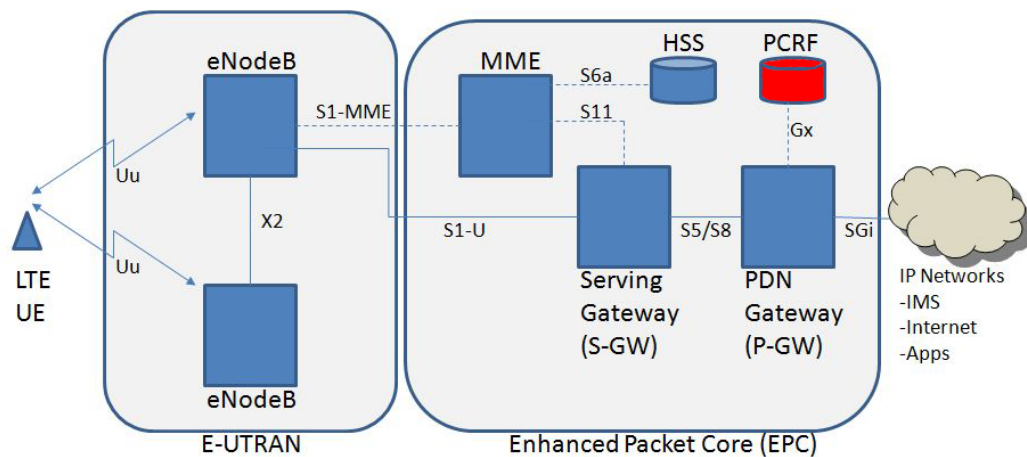
Η κίνηση στο επίπεδο χρηστών ανάμεσα στην P-GW και στα εξωτερικά δίκτυα γίνεται με τη μορφή IP πακέτων για κάθε IP υπηρεσία που εξυπηρετεί. Αν η διεπαφή S5/S8 ανάμεσα στη S-GW στηρίζεται σε GTP κανάλια, η P-GW δημιουργεί την συμβατότητα για την αποστολή IP δεδομένων μέσω των καναλιών αυτών προς τους χρήστες. Η P-GW δημιουργεί τα κανάλια αυτά είτε μέσω της PCRF είτε από την S-GW που μεταφέρει τα δεδομένα της MME. Στην δεύτερη περίπτωση η P-GW αλληλεπιδρά με την PCRF προκειμένου να λάβει τις απαραίτητες πληροφορίες πολιτικής, αν δεν υπάρχουν στην PCEF για την δημιουργία των καναλιών. Αν η διεπαφή S5/S8 στηρίζεται σε IP υπηρεσίες, η P-GW σχεδιάζει τη ροή των δεδομένων από τα εξωτερικά δίκτυα προς κάθε χρήστη μέσα από ένα κανάλι χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο δρομολόγησης GRE (Generic Routing Encapsulation) ενθυλακώνοντας το πλήθος των διαφορετικών πακέτων κάθε εξωτερικού δικτύου και δρομολογώντας τα μέσα από ένα IP κανάλι. Κατά τη διαδικασία αυτή όλες οι πληροφορίες ελέγχου ανταλλάσσονται μέσω της PCRF. Η P-GW επίσης παρακολουθεί και καταγράφει τα μεταδιδόμενα δεδομένα για στατιστικούς αλλά και νομικούς σκοπούς.

Η P-GW είναι το τελευταίο επίπεδο συντονισμού στο σύστημα. Καθώς ένας χρήστης κινείται μπορεί να περάσει από τον έλεγχο μιας S-GW σε μια άλλη. Στην περίπτωση αυτή, τα κανάλια μετάδοσης δεδομένων μεταφέρονται στην νέα S-GW μέσω της P-GW . Κάθε P-GW μπορεί να συνδέεται με περισσότερες από μια S-GW και PCRF. Κάθε χρήστης που σχετίζεται με μια P-GW, είναι συνδεδεμένος με μια μόνο S-GW κάθε φορά, αλλά μπορεί να υπάρχουν συνδέσεις σε διαφορετικά εξωτερικά δίκτυα και διαφορετικές PCRF .

Μονάδα Πολιτικής και Χρεώσεων (Policy and Charging Resource Function PCRF)

Η PCRF είναι η μονάδα του δικτύου που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της πολιτικής των παρόχων και των χρεώσεων των συνδρομητών (Policy and Charging Control, PCC) . Ελέγχει τις παρεχόμενες υπηρεσίες και εξασφαλίζει την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου, παρέχει πληροφορίες στη μονάδα ΠΕΦ που βρίσκεται εντός της P-GW και διαμορφώνει τα κανάλια μεταφοράς δεδομένων σύμφωνα με την πολιτική που υποστηρίζει. Η PCRF είναι συνήθως κάποιος server τοποθετημένος κοντά στις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου. Οι πληροφορίες που παρέχει στην μονάδα PCEF ονομάζονται κανόνες χρέωσης και πολιτικής (PCC rules) και αποστέλλονται κάθε φορά που δημιουργείται κάποιο κανάλι για μεταφορά δεδομένων. Η δημιουργία ενός τέτοιου καναλιού, για παράδειγμα, απαιτείται κατά τη σύνδεση κάποιου χρήστη αρχικά στο δίκτυο και τη δημιουργία του καναλιού επικοινωνίας προς αυτόν, αλλά και στα επόμενα κανάλια που θα δημιουργηθούν στην συνέχεια. Η PCRF μπορεί να παρέχει PCC

κανόνες ανάλογα με αιτήματα που λαμβάνει είτε από την P-GW είτε από την S-GW σε περιπτώσεις IP υπηρεσιών, καθώς και από τα εξωτερικά δίκτυα που εξυπηρετεί. Στην περίπτωση αυτή αφού ο χρήστης θελήσει να έχει πρόσβαση σε κάποιο εξωτερικό δίκτυο, πχ κάποια IMS υπηρεσία, οι κατάλληλες διαδικασίες του δικτύου αυτού θα μεταδώσουν στην PCRF τις απαραίτητες πληροφορίες, με τις οποίες θα δημιουργήσει τους κατάλληλους PCC κανόνες που θα μεταδώσει στην P-GW και βάσει αυτών θα σχεδιαστεί η ζεύξη από την S-GW προς τον χρήστη. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να αναφέρονται στον τρόπο διεξαγωγής της επικοινωνίας, στην επιβολή πολιτικής και στην ποιότητα υπηρεσιών του εξωτερικού δικτύου. Η σύνδεση της PCRF με τις υπόλοιπες μονάδες του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 2.9. Κάθε PCRF μπορεί να συνδέεται με περισσότερα από ένα εξωτερικά δίκτυα, P-GW και S-GW αλλά κάθε χρήστης σχετίζεται με μία μόνο PCRF για κάθε δίκτυο που είναι συνδεδεμένος.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα Δικτύου

Τοπικός Server συνδρομητών (Home Subscription Server HSS)

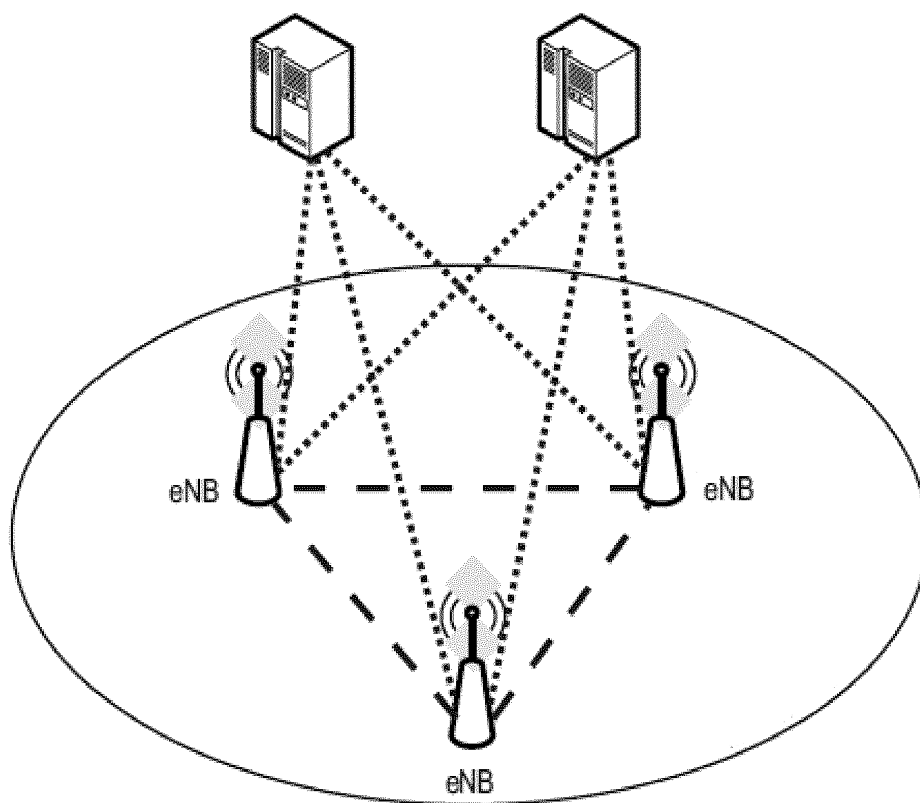
Στην LTE αρχιτεκτονική ο Home Location Register αναφέρεται ως HSS (σχήμα 2.8). Αποτελεί την αποθήκη δεδομένων των συνδρομητών και περιέχει πληροφορίες για κάθε χρήστη που είναι εγγεγραμμένος στο δίκτυο. Επίσης καταγράφει ανά τακτά χρονικά διαστήματα την τοποθεσία του που βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης του δικτύου μέσω επικοινωνίας με την MME. Ο HSS είναι μια βάση δεδομένων που βρίσκεται σε χώρο ελέγχου των παρόχων. Αποθηκεύει το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας που αφορά το προφίλ των χρηστών, το οποίο περιέχει πληροφορίες για τις υπηρεσίες που έχει πρόσβαση ο κάθε χρήστης, συμπεριλαμβάνοντας και τα διαφορετικά δίκτυα που μπορεί να συνδεθεί, τα στοιχεία του, καθώς πληροφορίες για την θέση στην οποία βρισκόταν κατά την τελευταία σύνδεσή του στο δίκτυο. Για την διατήρηση συμβατότητας με τα υπόλοιπα δίκτυα, ο HSS καταγράφει κάθε φορά την ταυτότητα των P-GWs που χρησιμοποιούνται. Το κύριο κλειδί, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των διανυσμάτων αυθεντικοποίησης κατά τη σύνδεση των χρηστών

στο δίκτυο, καθώς και για την παραγωγή των κλειδιών κρυπτογράφησης και ακεραιότητας της επικοινωνίας, είναι αποθηκευμένο στο κέντρο αυθεντικοποίησης (AuC) που αποτελεί μέρος του HSS. Για κάθε σηματοδότηση που σχετίζεται με αυτές τις λειτουργίες, ο HSS αλληλεπιδρά με την MME ανταλλάσσοντας δεδομένα. Ο HSS πρέπει να μπορεί να συνδεθεί με κάθε MME του δικτύου στα πλαίσια του οποίου οι χρήστες μπορούν να κινηθούν. Για κάθε χρήστη ο HSS θα καταγράψει τη θέση του μέσω της MME που τον εξυπηρετεί. Σε περίπτωση που ο χρήστης περάσει στην υπηρεσία μιας νέας MME, ο HSS θα διαγράψει την θέση του από την παλιά και θα αρχίσει να καταγράφει μέσω της νέας MME.

Σταθμός Βάσης (eNodeB)

Ο μοναδικός κόμβος στο τμήμα E-UTRAN του δικτύου είναι ο eNodeB. Αποτελεί ένας σταθμός βάσης ασύρματης αποστολής και λήψης δεδομένων που έχει τον έλεγχο όλης της ασύρματης επικοινωνίας για την κυψέλη που εξυπηρετεί σε συνεργασία με το σταθερό τμήμα του δικτύου. Οι σταθμοί αυτοί είναι κατανομημένοι σ'όλη την περιοχή κάλυψης του δικτύου και κάθε ένας βρίσκεται δίπλα σε μια κεραία ασύρματης επικοινωνίας. Λειτουργικά ο eNodeB αποτελεί μια γέφυρα ανάμεσα στο EPC τμήμα του δικτύου και στον χρήστη, αποτελώντας τον τερματικό σταθμό όλων των ασύρματων πρωτοκόλλων προς τον χρήστη και αναμεταδίδοντας δεδομένα μέσω της ασύρματης ζεύξης προς τον χρήστη και μέσω ΙΠ συνδεσιμότητας προς το EPC. Σ'αυτήν τη διαδικασία ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων του χρήστη κατά την επικοινωνία, συμπίεση και αποσυμπίεση καθώς και απόδοση IP κεφαλίδων στα πλαίσια δεδομένων αποφεύγοντας έτσι την επαναποστολή ίδιων ή διαδοχικών δεδομένων. Ο eNodeB είναι υπεύθυνος και για πολλές διαδικασίες ελέγχου. Είναι υπεύθυνος για την διαχείριση της ζεύξης, τον έλεγχο δηλαδή της ασύρματης σύνδεσης με τους χρήστες. Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει την κατανομή καναλιών ανάλογα με τις αιτήσεις, την προτεραιότητα εξυπηρέτησης και την διαχείριση συμφόρησης σύμφωνα με την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών του δικτύου και την καταγραφή των χρησιμοποιούμενων ζεύξεων για κάθε στιγμή. Επίσης ο eNodeB έχει σημαντικό ρόλο και στην διαχείριση κινητικότητας. Ελέγχει και αναλύει τις μετρήσεις για την ποιότητα του ασύρματου σήματος που καταγράφεται από τη συσκευή του χρήστη, εκτελεί και ο ίδιος τις αντίστοιχες μετρήσεις, και βάσει αυτών αποφασίζει για την μεταπομπή των χρηστών στο κατάλληλο γειτονικό cell (handover). Στην περίπτωση αυτή ο eNodeB αλληλεπιδρά με τους γειτονικούς eNodeBs και με την MME με σκοπό να διαπιστωθεί από ποιον eNodeB δέχεται καλύτερο σήμα ώστε να περάσει στον έλεγχο του. Όταν ένας χρήστης επιχειρεί μέσω ενός νέου eNodeB να συνδεθεί στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για την μετάδοση του αιτήματός του στην MME που εξυπηρετούσε τον συγκεκριμένο χρήστη ή να επιλέξει μια νέα MME ώστε να αυθεντικοποιήσει το χρήστη αν η σύνδεση στην προηγούμενη δεν είναι εφικτή. Τα δίκτυα 3ης γενιάς στις περιπτώσεις handover χρησιμοποιούν soft και softer αλγόριθμους μεταπομπής, σε αντίθεση με τους hard αλγόριθμους των GSM δικτύων, ώστε να γίνεται ομαλά η μετάβαση στον νέο eNodeB διατηρώντας συνήθως για κάποιο χρονικό διάστημα και τις 2 ζεύξεις (παλιού και νέου eNodeB) μέχρι να αποφασιστεί σε ποιον θα συνδεθεί. Με τον τρόπο αυτό

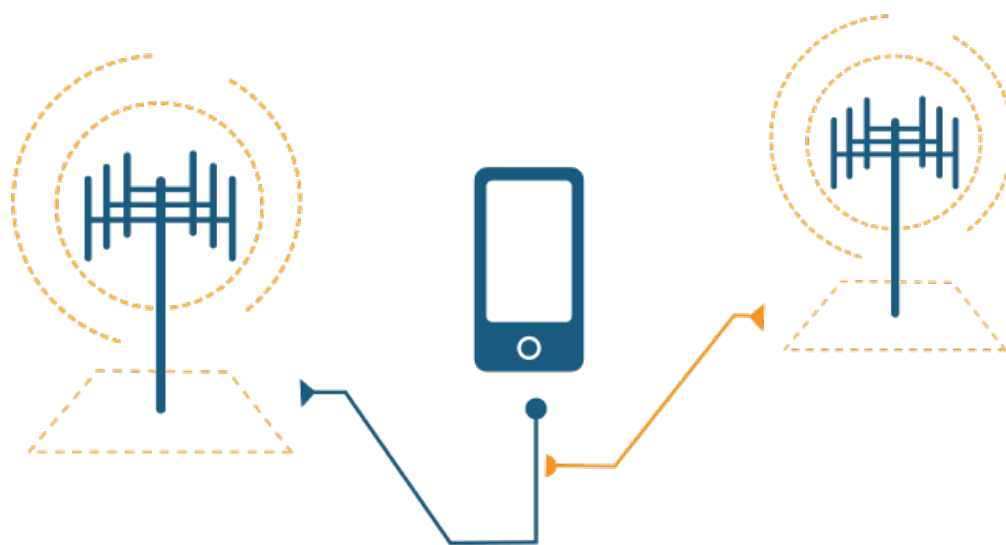
διατηρούνται οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούσε ο χρήστης χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα λόγω της μεταπομπής (διακοπή κλήσεων ή αποσύνδεση σε υπηρεσίες Internet) . Κάθε eNodeB μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες στην περιοχή κάλυψής του όμως κάθε χρήστης εξυπηρετείται από ένα μόνο eNodeB κάθε φορά. Για καλύτερη υποστήριξη handover από το δίκτυο θα πρέπει να διευκολύνεται η επικοινωνία ανάμεσα σε γειτονικούς eNodeBs ώστε να είναι εφικτή ή διαδικασία μεταπομπής των χρηστών όταν κρίνεται αναγκαίο. Τόσο οι MMEs όσο και οι S-GWs μπορεί να είναι ομαδοποιημένες σε τμήματα, δηλαδή ένα σύνολο τέτοιων κόμβων να είναι σχεδιασμένο ώστε να εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο τμήμα από eNodeBs. Από την πλευρά του eNodeB αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να μπορεί να συνδεθεί με πολλές MMEs και S-GWs όμως κάθε eNodeB εξυπηρετείται από μία μόνο MME και S-GW κάθε φορά. Ο eNodeB θα πρέπει να διατηρεί τις συσχετίσεις αυτές καθώς δεν μπορούν να αλλάξουν από την πλευρά του σταθμού βάσης αλλά μόνο οι MME και S-GW έχουν το δικαίωμα να τις αλλάξουν, πχ σε περιπτώσεις handover.



Σχήμα 2.10: LTE Advanced eNodeB

Τερματικό Χρήστη (UE)

Το τερματικό χρήστη αποτελεί την συσκευή μέσω της οποίας ο συνδρομητής χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες του δικτύου. Είναι όμοιο με το τερματικό χρήστη των 2G και 3G δικτύων με μόνη διαφορά την ικανότητα του για χρήση των υπηρεσιών του LTE δικτύου (υποστήριξη τεχνολογιών OFDMA και SC-FDMA). Όπως στο 3G, έτσι και στο LTE η συσκευή αυτή περιέχει την USIM, μια εφαρμογή τοποθετημένη σε μια αποσπώμενη έξυπνη κάρτα, την UICC η οποία βρίσκεται στον εξοπλισμό του χρήστη με παρόμοια εφαρμογή.



Σχήμα 2.11: Εξοπλισμός Χρήστη

Μέσω του UE διεξάγεται η σηματοδότηση για την σύνδεση του χρήστη στο δίκτυο, την διατήρηση των ασύρματων ζεύξεων κατά την διάρκεια της επικοινωνίας και την κατάργηση τους μετά το τέλος αυτής. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει διάφορες λειτουργίες, όπως διαχείριση της κινητικότητας του χρήστη, μεταπομπές ανάμεσα σε γειτονικούς σταθμούς βάσης και καταγραφή της θέσης της συσκευής, τις οποίες εκτελεί η συσκευή σύμφωνα με την πολιτική δικτύου που είναι συνδεδεμένη. Γενικά μέσω του UE ο χρήστης μπορεί να διατηρήσει τη σύνδεση με το δίκτυο και να ανταλλάσσει δεδομένα χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του δικτύου. Μια τέτοια συσκευή μπορεί να είναι για παράδειγμα ένα κινητό τηλέφωνο smartphone, ένας φορητός υπολογιστής ή οποιαδήποτε συσκευή υποστηρίζει σύνδεση με δίκτυα LTE.

Από την οπτική γωνία του χρήστη, υπάρχουν μόνο τα eNBs και οι πύλες, γι αυτό το λόγο το σύστημα θεωρείται "επίπεδο". Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μειωμένη πολυπλοκότητα σε σύγκριση με προηγούμενες αρχιτεκτονικές.

2.3.5 Τεχνολογίες

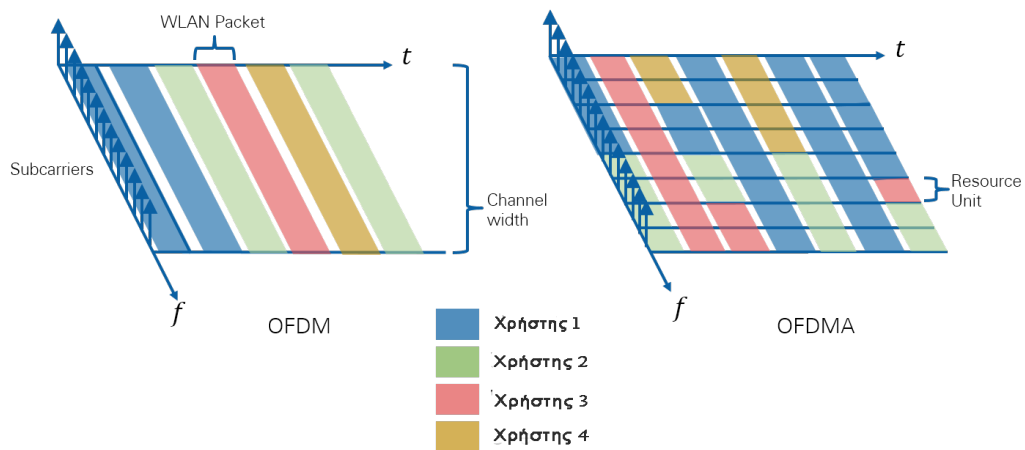
Με σκοπό την επίτευξη των επιδόσεων τις οποίες στοχεύει, το LTE έχει υιοθετήσει μερικές νέες τεχνολογίες οι οποίες θα αναπτυχθούν παρακάτω :

Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία OFDM για το downlink. Αντίθετα με την μετάδοση δεδομένων μέσω ενός μοναδικού wideband σήματος, το OFDM, ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα μέσω πολλαπλών φορέων μικρού εύρους. Οι συγκεκριμένοι φορείς ονομάζονται subcarriers και είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, ούτως ώστε είτε ατομικά είτε ως ομάδες να μεταφέρουν ανεξάρτητες ροές δεδομένων. Την ίδια σχεδόν χρονική στιγμή με την OFDM αναπτύχθηκε και η τεχνολογία Orthogonal Frequency-Division Multiple Access OFDMA η οποία επεκτείνει την τεχνολογία της OFDM ώστε να παράγει στο downlink ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με μεγάλο βαθμό ελευθερίας. Οι φορείς ομαδοποιούνται σε resource blocks (12 subcarriers). Τα resource blocks (RB) έχουν διάρκεια 180 kHz στο πεδίο της συχνότητας και 0.5 ms στο πεδίο του χρόνου.

Ο αριθμός των resource blocks (RB) εξαρτάται από το διαθέσιμο φάσμα. Για την ανάθεση των RB στους χρήστες είναι υπεύθυνο ένα σύνολο μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού το οποίο διαμοιράζει σε κάθε χρήση έναν αριθμό από RB. Όσα περισσότερα RB / χρήστη και όσο ανώτερος ο τύπος διαμόρφωσης, τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης.

Το πεδίο του χρόνου στο LTE χωρίζεται σε frames. Κάθε frame έχει διάρκεια 10 ms και χωρίζεται σε 10 subframes των 1 ms. Το μισό subframe (0.5 ms) ονομάζεται slot και στο FDD (Frequency Division Duplex) αποτελείται από σύμβολα. Κάθε slot μπορεί να περιέχει 7 σύμβολα (normal cyclic prefix) ή 6 σύμβολα (Extended Cyclic Prefix). Στο TDD (Time Division Duplex) κάθε subframe ανατίθεται για uplink, downlink ή απαραίτητη σηματοδότηση ελέγχου.



Σχήμα 2.12: OFDM - OFDMA

Μπορούμε να απαριθμήσουμε κάποια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας OFDMA όπως

- Παροχή μεγάλης ευρωστίας σε φαινόμενα channel selectivity με μικρό βαθμό πολυπλοκότητας.
- Πρόσβαση στο πεδίο συχνότητας, μέσω μεγαλύτερης ευελιξίας στους χρονοπρογραμματιστές.
- Επιτρέπει τη χρήση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων για την αποφυγή παρεμβολών.
- Διευκολύνεται η λειτουργία σε διαφορετικά εύρη φάσματος, απλοποιώντας την ανάπτυξη και υλοποίηση των τερματικών.

Αντιθέτως, μπορούμε να αναφέρουμε και κάποια μειονέκτημα της OFDMA, όπως το υψηλό Peak to Average Power Ratio (PAPR). Το υψηλό PAPR απαιτεί ακριβούς και μη αποδοτικούς ενισχυτές ισχύος, που στην ανερχόμενη ζεύξη σημαίνει τερματικά υψηλού κόστους με χαμηλή διάρκεια μπαταρίας. Την λύση αποτέλεσε η τεχνολογία Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), που έχει πολλά κοινά με την OFDMA. Παρέχει υποδεέστερες επιδόσεις σε σχέση με αυτές του downlink αλλά πετυχαίνει χαμηλότερο PAPR. Παράλληλα διατηρείται ένας βαθμός ομοιότητας μεταξύ των τεχνολογιών του uplink και του downlink.

Channel-Dependent Scheduling and Rate Adaptation

Το LTE διαμοιράζει το κανάλι μέσω δυναμικής ανάθεσης πόρων στα πεδία χρόνου και συχνότητας. Αυτό ταιριάζει στην συχνή μεταβολή των απαιτήσεων πόρων από τους χρήστες. Ο χρονοπρογραμματιστής ελέγχει σε κάθε χρονική στιγμή σε ποιους χρήστες θα αναθέσει πόρους αποφασίζοντας το ρυθμό δεδομένων. Για μέγιστη απόδοση, ο μηχανισμός λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού αναθέτοντας περισσότερους πόρους στους χρήστες με καλύτερη κατάσταση καναλιού.

Inter-Cell Interference Coordination - ICIC

Το LTE σχεδιάστηκε να λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας ανά κελί. Αυτό σημαίνει πως οι ίδιοι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε γειτονικά κελιά. Η πρόσβαση σε ολόκληρο το φάσμα προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση συνολικά αλλά οδηγεί σε παρεμβολές σε χρήστες στα όρια της κυψέλης. Για τη μείωση των παρεμβολών, μπορεί να υπάρξει συντονισμός μεταξύ των κελιών (ICIC), αποφεύγοντας τη ταυτόχρονη χρήση φάσματος από τερματικά στα άκρα γειτονικών κυψελών.

Οι προδιαγραφές του LTE-A επιτρέπουν τρεις τύπους συντονισμού:

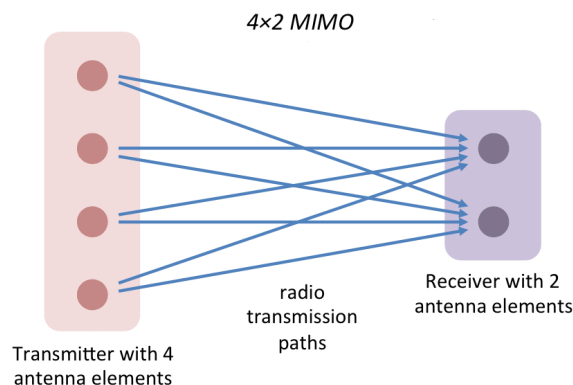
- Ο στατικός συντονισμός κατανέμει τους πόρους μία φορά βάση παρελθόντων παρατηρήσεων, και δεν υφίσταται ανακατανομή.

- Ο ήμι-στατικός εξετάζει περιοδικά για μεγάλες αλλαγές στις συνθήκες φόρτου, ώστε να αλλάξει, αν θεωρηθεί ωφέλιμο, τον υφιστάμενο καταμερισμό. Η περίοδος είναι της τάξης των ωρών.
- Στον δυναμικό συντονισμό, οι eNodeBs επικοινωνούν συνεχώς προκειμένου να προσαρμόζονται σε νέες συνθήκες.

Hybrid ARQ with Soft Combining

Δίνει την δυνατότητα στο τερματικό χρήστη για την άμεση αίτηση αναμετάδοσης λανθασμένα λαμβανόμενων blocks. Οι αναμεταδόσεις μπορεί να αιτηθούν αμέσως μετά από κάθε μετάδοση πακέτου, ελαχιστοποιώντας έτσι την επίδραση στην επίδοση του χρήστη. Χρησιμοποιείται αυξανόμενος πλεονασμός, και ο δέκτης αποθηκεύει προσωρινά τα "soft" bits ώστε να εκτελέσει soft combining μεταξύ των αποπειρών μετάδοσης.

Τεχνολογία Πολλαπλών Κεραιών (MIMO)



Σχήμα 2.13: Παράδειγμα MIMO 4x2

Η χρήση τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών (MIMO) επιτρέπει την εκμετάλλευση της διάστασης χώρου σαν μία άλλη νέα διάσταση. Αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην αναζήτηση για υψηλότερες φασματικές αποδόσεις. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών η θεωρητικά επιτεύξιμη φασματική απόδοση κλιμακώνεται γραμμικά με το πλήθος των κεραιών.

Οι πολλαπλές κεραιές εισάγουν μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους, βάσει τριών θεμελιωδών αρχών:

– Κέρδος ποικιλομορφίας αποτελεί η χρήση της χωρικής ποικιλομορφίας για να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα της εκπομπής ως προς την εξασθένιση λόγω πολυδιάδοσης .

- Κέρδος διάταξης είναι η συγκέντρωση της ενέργειας σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπουμε την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών (multi-user MIMO) .
- Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας αποτελεί η μετάδοση πολλαπλών ροών σήματος σε ένα χρήστη σε πολλαπλά χωρικά επίπεδα μέσω συνδυασμού των διαθέσιμων κεραιών.

Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS)

Στις υπηρεσίες MBMS τα ίδια δεδομένα μεταδίδονται σε πολλαπλούς χρήστες από πολλά διαφορετικά κελιά και όλοι οι χρήστες της συγκεκριμένης MBMS υπηρεσίας λαμβάνουν το ίδιο σήμα. Στο LTE η υλοποίηση ονομάζεται eMBMS. Προϋποθέτει ισχυρή κάλυψη και μικρή κατανάλωση ισχύος στα τερματικά. Το πρώτο είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί στο MBMS δεν μπορεί να γίνει προσαρμογή σύνδεσης σε ξεχωριστούς χρήστες, που σημαίνει ότι ο ρυθμός μετάδοσης εξαρτάται από την δυνατότητα λήψης του χειρότερου χρήστη.

Όταν οι μεταδόσεις από διαφορετικά κελιά είναι συγχρονισμένες, το τερματικό μπορεί να θεωρήσει ότι η πηγή του σήματος είναι μοναδική. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται MBMS Single-Frequency Network (MBSFN). Προσφέρει αυξημένη ποιότητα σήματος, ειδικά στα όρια των κελιών που συμμετέχουν στο σχήμα. Οδηγεί σε μειωμένες παρεμβολές σε ευάλωτες περιοχές και προσφέρει αυξημένο diversity, αφού η ίδια πληροφορία προέρχεται από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

Positioning

Το positioning αναφέρεται στη δυνατότητα του RAN να εκτιμήσει την τοποθεσία των τερματικών. Όταν τα τερματικά δεν έχουν δέκτη σήματος GPS η εύρεση τοποθεσίας γίνεται μέσω του RAN. Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση σημάτων αναφοράς που μεταδίδονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και από διαφορετικές κυψέλες.

2.4 Διαδικασία Προτυποποίησης LTE-Advanced

Ο οργανισμός 3GPP (3rd Generation Partnership Project) είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των προδιαγραφών του LTE-A. Ιδρύθηκε το 1998 από πέντε υπάρχοντες οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων (SDOs, Standards Development Organizations) με σκοπό να εξασφαλιστεί η δημιουργία ενός προτύπου, εφαρμόσιμου από τα δίκτυα 3G, το οποίο θα υιοθετηθεί από όλους τους οργανισμούς. Ο οργανισμός αυτός παράγει προδιαγραφές όχι μόνο για το LTE αλλά και για κινητά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς. Για το λόγο αυτό έχει θεσπίσει κανονισμούς για τη διαδικασία της προτυποποίησης όπως και αυστηρή

δομή στην ανάθεση των αρμοδιοτήτων. Τα μέρη της διαδικασίας που ακολουθούνται για την διαδικασία της προτυποποίησης αποτελούνται από:

- τον αρχικό καθορισμό των απαιτήσεων
- την αρχιτεκτονική, όπου αποφασίζονται οι δομικές μονάδες και οι διασυνδέσεις
- τον λεπτομερή καθορισμό όλων των στοιχείων
- τη δοκιμαστική περίοδο και επαλήθευση

Τα στάδια αυτά μπορεί να είναι διαδοχικά αλλά κάποιες φορές υπάρχει πιθανότητα να εμφανίζεται και επικάλυψη. Ο χρόνος που απαιτείται από την ολοκλήρωση του προτύπου μέχρι την εμπορική εκμετάλλευσή του είναι περίπου ένα με δύο χρόνια, ανάλογα με το αν είναι νέο πρότυπο ή αποτελεί επέκταση προϋπάρχοντος.

Το 3GPP αποτελείται από τέσσερις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification Groups-TSGs). Κάθε μια από αυτές, έχει διαφορετικές αρμοδιότητες πάνω σε διαφορετικά στοιχεία του δικτύου. Το TSG RAN είναι υπεύθυνο για το LTE/LTE-A και χωρίζεται σε πέντε ομάδες εργασίας (Working Groups - WGs) :

- RAN WG1 , υπεύθυνο για τις προδιαγραφές του φυσικού στρώματος
- RAN WG2 , υπεύθυνο για την ανάπτυξη προδιαγραφών της ασύρματης διασύνδεσης των στρωμάτων 2 και 3
- RAN WG3 , υπεύθυνο για τις διασυνδέσεις μεταξύ σταθερών κόμβων στο PAN και μεταξύ του RAN και του CN
- RAN WG4 , υπεύθυνο για τις προδιαγραφές επίδοσης των ραδιοσυχνότητων (RF) και της διαχείρισης των πόρων (Radio Resource Management - RRM)
- RAN WG5 , υπεύθυνο για τη συμμόρφωση των τερματικών με τις προδιαγραφές.

2.5 Δίκτυα Επόμενης Γενιάς - 5G

2.5.1 Εισαγωγή

Η επόμενη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας ή απλά 5G είναι η επικείμενη επανάσταση της κινητής τεχνολογίας [11]. Τα χαρακτηριστικά και η χρηστικότητα της είναι πολύ πέρα από την προσδοκία και τις ανάγκες ενός κανονικού ανθρώπου. Με την εξαιρετικά υψηλή ταχύτητά που προσφέρει, το 5G είναι αρκετά πιθανό να αλλάξει τη σημασία της χρηστικότητας του κινητού τηλεφώνου.

Με μια τεράστια ποικιλία καινοτόμων χαρακτηριστικών, το έξυπνο τηλέφωνο μπορεί να χαρακτηριστεί πλέον πιο κοντά στο φορητό υπολογιστή. Σημαντικά χαρακτηριστικά που συναρπάζουν τους ανθρώπους είναι οι περισσότερες επιλογές παιχνιδιών, ευρύτερες επιλογές πολυμέσων, συνδεσιμότητα παντού, μηδενική καθυστέρηση, ταχύτερος χρόνος απόκρισης και υψηλής ποιότητας ήχος και βίντεο υψηλής ευκρίνειας τα οποία μπορούν να μεταφερθούν σε κάποιο άλλο κινητό τηλέφωνο χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα του ήχου και του βίντεο.

Επιπλέον, αναμένεται σε μεγάλο βαθμό ότι έννοιες επικοινωνίας όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και Machine to Machine (M2M) θα γίνουν πραγματικότητα [12], λόγω της σημαντικής αύξησης του αριθμού των συσκευών/μηχανών ικανών να επικοινωνούν μεταξύ τους. Αυτές οι έννοιες επικοινωνίας θα εισαγάγουν περισσότερες από 50 δισεκατομμύρια ηλεκτρονικές συσκευές έως το έτος 2020 και οι περισσότερες από αυτές θα χρησιμοποιούν ασύρματες συνδέσεις για να παρέχουν πρόσβαση και οικονομικά αποδοτικότερη ανάπτυξη.

Η τεχνολογία 5G αναμένεται να προσφέρει μια νέα (ευρύτερη από την προηγούμενη) ζώνη συχνοτήτων σε συνδιασμό με το ευρύτερο φασματικό εύρος ζώνης ανά κανάλι συχνότητας. Σε σύγκριση με το παρελθόν, οι προηγμένες κινητές τεχνολογίες (γενιές) έχουν καταδείξει σημαντική αύξηση στο bit rate αιχμής. Συνεπώς θα ήταν ασφαλές να συμπεράνουμε ότι παρατηρείται μια διακριτή αύξηση και στην σύγκριση 4G-5G bitrate, αλλά το 5G έχει προχωρήσει επίσης σε βελτιώσεις όπως:

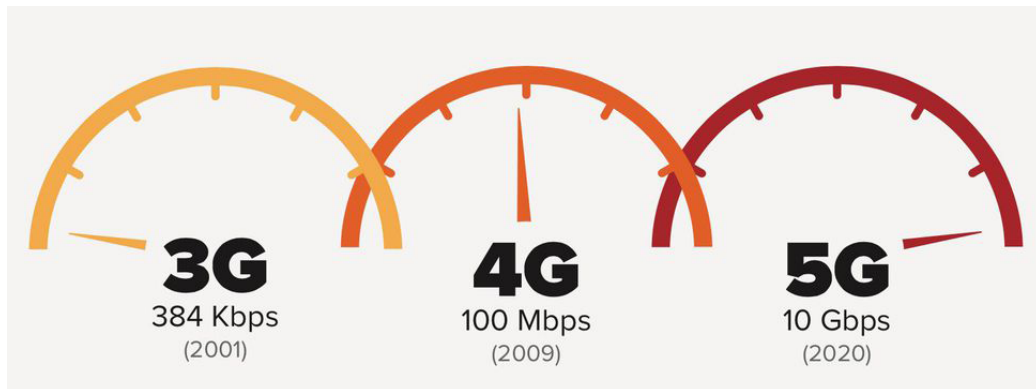
- High increased peak bit rate
- Μεγαλύτερος όγκος δεδομένων ανά μονάδα περιοχής (δηλ. αυξημένη φασματική απόδοση)
- Μεγάλη χωρητικότητα για να επιτρέπεται η ταυτόχρονη και άμεση σύνδεση περισσότερων συσκευών
- Χαμηλότερη κατανάλωση
- Καλύτερη σύνδεση ανεξάρτητα από τη γεωγραφική περιοχή
- Μεγαλύτερος αριθμό υποστηρικτικών συσκευών
- Χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης υποδομών
- Υψηλότερη αξιοπιστία επικοινωνιών

2.5.2 Τεχνολογικές απαιτήσεις 5G

Ως αποτέλεσμα των υψηλών ποιοτικά δυνατοτήτων που προσφέρει το 5G, προκύπτουν συγκεκριμένες τεχνολογικές ανάγκες που πρέπει να επιτυγχάνονται :

- Συνδέσεις 1-10 Gbps στα τελικά σημεία του δικτύου (Όχι θεωρητικό μέγιστο)
- 1 millisecond καθυστέρηση από άκρο σε άκρο

- Εύρος ζώνης 1000x ανά μονάδα επιφάνειας
- 10-100x αριθμός συνδεδεμένων συσκευών
- Διαθεσιμότητα : 99,999%
- Κάλυψη : 100%
- Μείωση ενέργειας δικτύου έως 90%
- Χρόνος ζωής μπαταρίας έως δέκα χρόνια για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης



Σχήμα 2.14: Σύγκριση Ταχυτήτων 3G - 4G - 5G

Επειδή αυτές οι απαιτήσεις καθορίζονται από διαφορετικές προοπτικές, δεν αποτελούν μια απολύτως συνεκτική λίστα και είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς μια νέα τεχνολογία που θα μπορούσε να ικανοποιήσει όλες αυτές τις συνθήκες ταυτόχρονα. Επίσης, έξι από αυτές τις απαιτήσεις ενώ είναι εξίσου σημαντικές, δεν αποτελούν γνωρίσματα της γενιάς, όπως εξετάζονται παρακάτω:

- **Αναγνωρισμένη διαθεσιμότητα 99,999% και γεωγραφική κάλυψη 100 %**
 Δεν πρόκειται για χρήση οδηγών περίπτωσης, ούτε για τεχνικά ζητήματα, αλλά οικονομικές και επιχειρηματικές αποφάσεις. Διαθεσιμότητα 99,999% και κάλυψη 100% είναι εφικτές χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε υπάρχουσα τεχνολογία και θα μπορούσε να επιτευχθεί από οποιονδήποτε φορέα εκμετάλλευσης δικτύου. Οι φορείς εκμετάλλευσης αποφασίζουν πού να τοποθετήσουν κύτταρα βάσει του κόστους για την προετοιμασία του χώρου για δημιουργία κελιού ισορροπημένο με το όφελος του κυττάρου που παρέχει κάλυψη για μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Αυτό με τη σειρά του κάνει ορισμένες περιοχές, όπως αγροτικές περιοχές και εσωτερικούς χώρους, το θέμα των δύσκολων επιχειρηματικών αποφάσεων. Ενώ μια νέα γενιά τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας μπορεί να αλλάξει τις τιμές που εισέρχονται το επιχειρηματικό μοντέλο που καθορίζει τη βιωσιμότητα των κυττάρων, η κάλυψη 100% και 99,999% διαθεσιμότητα θα παραμείνει

μια επιχειρηματική απόφαση παρά ένας τεχνικός στόχος. Αντίθετα, εάν η κάλυψη 100% και η διαθεσιμότητα 99,999% έπρεπε να είναι ένα κριτήριο ποιότητας 5G, κανένα δίκτυο δεν θα επιτύχει την κατάσταση 5G έως ότου οι συνθήκες κάλυψης και διαθεσιμότητας επιτευχθούν.

- **Πυκνότητα σύνδεσης (1000x εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας, αριθμός συνδέσεων 10-100x)**

Αυτά ουσιαστικά αντιστοιχούν σε «αθροιστικές» απαιτήσεις, δηλαδή απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται σε δίκτυα που περιλαμβάνουν το 5G ως τεχνολογία επιτάχυνσης, αλλά απαιτούν επίσης συνεχή υποστήριξη προϋπάρχουσων γενεών τεχνολογίας δικτύων. Η υποστήριξη 10-100 φορές του αριθμού των συνδέσεων εξαρτάται από μια σειρά τεχνολογιών που λειτουργούν από κοινού, μεταξύ των οποίων 2G, 3G, 4G, Wi-Fi, Bluetooth και άλλες συμπληρωματικές τεχνολογίες. Η προσθήκη 5G πάνω από αυτό το σύστημα δεν πρέπει να θεωρείται ως τελική λύση, αλλά μόνο ως ένα επιπλέον κομμάτι μιας ευρύτερης εξέλιξης για να καταστεί δυνατή η συνδεσιμότητα των μηχανών. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) έχει ήδη αρχίσει να αποκτά σημαντική δυναμική, ανεξάρτητα από την άφιξη του 5G. Ομοίως, η απαίτηση για 1,000 φορές περισσότερο εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας δεν εξαρτάται από το 5G, αλλά είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα περισσότερων συσκευών που συνδέονται με υψηλότερα εύρη ζώνης για μεγαλύτερη διάρκεια. Ενώ ένα δίκτυο 5G μπορεί να προσθέσει μια νέα ώθηση στην εξέλιξη σε αυτή η περιοχή, η ανάπτυξη του LTE έχει ήδη μετασχηματιστική επίδραση στο ποσό του εύρους ζώνης που καταναλώνεται σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη περιοχή, και αυτό θα αυξηθεί κατά τη διάρκεια μέχρι την εμφάνιση του 5G. Η επέκταση του Wi-Fi και η ενσωμάτωση των δικτύων Wi-Fi με τα κυβελοειδή δίκτυα θα είναι επίσης το κλειδί για την υποστήριξη μεγαλύτερων ποσοστών πυκνότητας δεδομένων. Η εκπλήρωση και των δύο αυτών απαιτήσεων θα έχει σημαντικές επιπτώσεις για το OPEX στο backhaul και την ισχύ, δεδομένου ότι κάθε κελί ή hotspot πρέπει να τροφοδοτηθεί και όλη η πρόσθετη κυκλοφορία που παράγεται πρέπει να αναδιανθρωθεί.

- **Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας δικτύου και βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας**

Η μείωση της ενέργειας κατανάλωσης από δίκτυα και συσκευές είναι θεμελιωδώς σημαντική στην οικονομική και οικολογική βιωσιμότητα της βιομηχανίας. Μια γενική αρχή της βιομηχανίας για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας στο δίκτυο και τον τερματικό εξοπλισμό θα πρέπει να διαδεχθεί όλες τις γενιές και αναγνωρίζεται ως οικολογικός στόχος, καθώς επίσης έχει σημαντική θετική επίπτωση στο OPEX που συνδέεται με τη λειτουργία ενός δικτύου.

2.5.3 Προκλήσεις 5G

Όπως σε όλες τις τεχνολογίες, στο 5G εμφανίζονται επίσης μεγάλες προκλήσεις που χρήζουν αντιμετώπισης. Παρατηρώντας την ανάπτυξη της ευρυζωνικής τεχνολογίας, το ταξίδι από 1G έως 5G, διαρκεί μόλις 40 έτη. Ωστόσο, σε αυτό το

ταξίδι, οι κοινές προκλήσεις που παρατηρήσαμε είναι η έλλειψη υποδομής, η μεθοδολογία της έρευνας και το κόστος. Επιπλέον, υπάρχουν δεκάδες χώρες που χρησιμοποιούν ακόμα τεχνολογίες 2G και 3G και δεν γνωρίζουν καν για το 4G, οπότε σε μια τέτοια κατάσταση, τα πιο σημαντικά ερωτήματα που προκύπτουν είναι :

Πόσο απέχει η βιωσιμότητα του 5G ;

Θα επωφεληθεί η τεχνολογία ορισμένων αναπτυγμένων χωρών ή αναπτυσσόμενων χωρών από το 5G ;

Για να κατανοήσουμε αυτές τις ερωτήσεις, οι προκλήσεις της 5G κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες.

- **Τεχνολογικές προκλήσεις**

Διακυτταρική παρεμβολή

Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα τεχνολογικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν. Υπάρχουν παραλλαγές στο μέγεθος των παραδοσιακών μακροκυττάρων και των small cells που θα οδηγήσουν σε παρεμβολές.

Αποτελεσματικός Έλεγχος Μεσαίας Πρόσβασης

Σε μια κατάσταση όπου απαιτείται πυκνή ανάπτυξη σημείων πρόσβασης και τερματικών, η απόδοση του χρήστη θα είναι χαμηλή, η καθυστέρηση θα είναι υψηλή και τα hotspots δεν θα έχουν την δυνατότητα να παρέχουν υψηλή απόδοση.

Διαχείριση κυκλοφορίας

Σε σύγκριση με την παραδοσιακή κυκλοφορία σε κυψελοειδή δίκτυα, ένας μεγάλος αριθμός συσκευών Μηχανής προς Μηχανή (M2M) σε ένα κελί μπορεί να προκαλέσει σοβαρές προκλήσεις στο σύστημα, δηλ. προκλήσεις Δικτύου Ασύρματης Πρόσβασης (RAN), οι οποίες θα προκαλέσουν υπερφόρτωση και συμφόρηση.

- **Κοινές προκλήσεις**

Πολλαπλές Υπηρεσίες

Σε αντίθεση με άλλες υπηρεσίες σημάτων, το 5G θα έχει την ευθύνη να προσφέρει υπηρεσίες σε ετερογενή δίκτυα, τεχνολογίες και συσκευές που λειτουργούν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Έτσι, η πρόκληση είναι η τυποποίηση για την παροχή δυναμικών, καθολικών, προσανατολισμένων προς τους χρήστες και πλούσιων σε δεδομένα ασύρματων υπηρεσιών για την εκπλήρωση των υψηλών προσδοκιών.

Υποδομή

Οι ερευνητές αντιμετωπίζουν προκλήσεις τυποποίησης και εφαρμογής υπηρεσιών 5G.

Επικοινωνία, Πλοήγηση & Αίσθηση

Αυτές οι υπηρεσίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα του φάσματος, μέσω του οποίου μεταδίδονται τα σήματα. Αν και η τεχνολογία 5G έχει ισχυρή υπολογιστική ισχύ για να επεξεργάζεται τον τεράστιο όγκο δεδομένων που προέρχονται από πολλές και διαφορετικές πηγές, χρειάζεται μεγαλύτερη υποστήριξη υποδομής.

Ασφάλεια και προστασία της ιδιωτικότητας

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που χρειάζεται να αντιμετωπίσει το 5G είναι η προστασία των προσωπικών δεδομένων. Το 5G θα πρέπει να καθορίσει προδιαγραφές που σχετίζονται με απειλές για την ασφάλεια, συμπεριλαμβανομένης της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο.

Cyberlaw

Η εγκληματικότητα στον κυβερνοχώρο όπως και άλλες κακόβουλες ενέργειες μπορεί να αυξηθούν με την τεχνολογία υψηλής ταχύτητας και την πανταχού παρούσα τεχνολογία 5G. Επομένως, η νομοθεσία Cyberlaw είναι επίσης ένα επιτακτικό ζήτημα, το οποίο σε μεγάλο βαθμό έχει κυβερνητικό και πολιτικό χαρακτήρα.

3. Small Cells

3.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας παρουσιάζει εκθετική αύξηση, η οποία καθοδηγείται από συσκευές με δυνατότητα κατανάλωσης δεδομένων καθώς και εφαρμογές μεγάλου εύρους ζώνης (APPs). Πολλοί φορείς εκμετάλλευσης αξιολογούν τις επιλογές τους και θέτουν την ανάπτυξη small cells σε πολύ υψηλή θέση ανάμεσα στις προτεραιότητές τους, με το 60% των φορέων εκμετάλλευσης να θεωρούν την ανάπτυξη small cells ως το σημαντικότερο μέρος της 4G υπηρεσίας τους.

Οι κορυφαίοι χειριστές όπως η AT & T, η Vodafone και η Softbank αξιοποίησαν τα δίκτυα τους και καινοτόμησαν μέσω small cell λύσεων. Μέχρι το 2016, τα small cells θα εξυπηρετούν έως και το 25% της συνολικής κίνησης κινητής τηλεφωνίας, και οι αποστολές ενδέχεται να φτάσουν τα 36,8 εκατομμύρια μονάδες αξίας 20,4 δισεκατομμυρίων δολαρίων [13].

Το αναγνωρισμένο από τη βιομηχανία Small Cell Forum ορίζει τα μικρά κελιά ως "...ασύρματα σημεία πρόσβασης χαμηλής ισχύος που λειτουργούν σε αδειοδοτημένο φάσμα, είναι διαχειριζόμενα από τον φορέα εκμετάλλευσης και βασίζονται στα όρια του κελιού. Παρέχουν βελτιωμένη κυτταρική κάλυψη, χωρητικότητα και εφαρμογές για κατοικίες και επιχειρήσεις καθώς και μητροπολιτικές και αγροτικές περιοχές. Περιλαμβάνουν τεχνολογίες που περιγράφονται ως femtocells, picocells και microcells. [14] Μια ολιστική στρατηγική των small cell αντιμετωπίζει τόσο τις βραχυπρόθεσμες προκλήσεις όπως η εξοικονόμηση κόστους στην παροχή υπηρεσιών όσο και μακροπρόθεσμες προκλήσεις όπως η βελτίωση της εμπιστοσύνης των πελατών και η διερεύνηση νέων ροών εσόδων. Οι περισσότερες στρατηγικές small cells ακολουθούν μια σταδιακή προσέγγιση

- Εξοικονόμηση σε TCO (Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας) ενώ βελτιώνεται η κάλυψη και η χωρητικότητα.
- Αύξηση των παραδοσιακών εσόδων μέσω προώθησης με προτεραιότητα.
- Βελτίωση της εμπειρίας των πελατών μέσω ολοκληρωμένης ευρυζωνικότητας.
- Διερεύνηση νέων ροών εσόδων μέσω καινοτόμων υπηρεσιών.

Ωστόσο, οι προκλήσεις για την τεχνολογία των small cells παραμένουν, όπως μπορούμε να αναφέρουμε τη διαθεσιμότητα κατάλληλου backhaul καθώς και την απόκτηση και λειτουργία θέσεων "μικρών κυττάρων".

3.2 Η ανάγκη για Small Cells

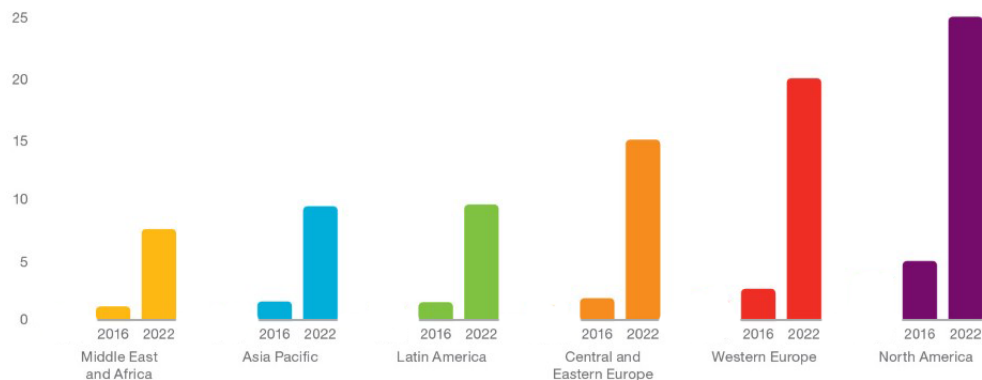
3.2.1 Εκθετική αύξηση της κυκλοφορίας

Μέχρι το 2020 θα υπάρχουν 50 δισεκατομμύρια συσκευές σε ολόκληρο τον κόσμο. Η ασύρματη κίνηση αναπτύσσεται παγκοσμίως και θα ξεπεράσει τη σταθερή κίνηση δεδομένων έως το 2019. Προβλέπεται ότι καθώς οι απαιτήσεις για το εύρος ζώνης από το τέλος του 2013 άρχισαν να ξεπερνούν την προσφορά, αυτό είχε ως αποτέλεσμα την κακή ποιότητα των υπηρεσιών για τους πελάτες.

Η υποβάθμιση της ποιότητας της υπηρεσίας είναι πιθανό να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος ικανοποίησης των πελατών. Η αντιμετώπιση των αναγκών σε χωρητικότητα είναι πολύπλοκη, καθώς η κίνηση δεδομένων ποικίλλει άμεσα σε διαφορετικές τοποθεσίες και χρονικές στιγμές:

- Τοποθεσίες: Το 80% της κυκλοφορίας δεδομένων παράγεται από εσωτερικές τοποθεσίες και το 90% της κυκλοφορίας αντιμετωπίζεται από μόνο 10% κύτταρα που εξυπηρετούν όλες τις «πυκνές» περιοχές.
- Χρονικές Στιγμές: Η κατανάλωση κυψελοειδών δεδομένων είναι υψηλότερη από αυτή μέσω WiFi κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας η κατανάλωση δεδομένων στο WiFi είναι υψηλότερη. Για παράδειγμα, στη Μεγάλη Βρετανία η κυτταρική κίνηση δεδομένων κατά τα μέσα της ημέρας μπορεί να είναι 6 φορές μεγαλύτερη από την κυκλοφορία εκτός περιόδου αιχμής.

Μετρήσεις της Ericsson [2] έδειξαν ότι υπήρξε αύξηση ανάλογη με 70% στο διάστημα από το πρώτο τρίμηνο του 2016 μέχρι το πρώτο τρίμηνο του 2017 όσον αφορά την συνολική παγκόσμια κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Από την ίδια αναφορά προκύπτει μια εκτίμηση για την κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας κατά μέσο όρο σε κάθε ενεργό συνδρομητή smartphone σε διάστημα ενός μήνα από το 2016 μέχρι το 2022. Προβλέπεται ότι το 2022 η μηνιαία κατανάλωση δεδομένων για κατοίκους της Βόρειας Αμερικής θα έχει φτάσει τα 25 Gb / μήνα αποτελώντας το υψηλότερο ποσοστό, ενώ αντιθέτως η ελάχιστη κατανάλωση αφορά τους κατοίκους της Μέσης Ανατολής και Αφρικής και θα φτάσει έως 8 Gb / μήνα. Αξίζει να σημειωθεί πως η αντίστοιχη χρήση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας για το 2016 στις συγκεκριμένες περιοχές ήταν 5.1 Gb / μήνα για την Βόρεια Αμερική και λιγότερο από 1 Gb / μήνα για την Μέση Ανατολή και Αφρική, όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο αντίστοιχο σχήμα.



Σχήμα 3.1: Μηνιαία κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά smartphone

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που οδηγούν σε αυτή την ραγδαία αύξηση είναι ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός συνδρομητών LTE, οι τρέχουσες και μελλοντικές δυνατότητες των σύγχρονων smartphone καθώς και η εξέλιξη του περιοχόμενου που έχει προσαρμοστεί στα σημερινά δεδομένα και απαιτεί την ζωντανή μετάδοση γεγονότων ή την αναπαραγωγή βίντεο. Επιπλέον, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων είχαν προσπαθήσει στο παρελθόν να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας με την εισαγωγή των flat rate charging schemes που επιτρέπουν απεριόριστη λήψη δεδομένων. Αυτό οδήγησε σε μια κατάσταση όπου ούτε οι προγραμματιστές ούτε οι χρήστες παρακινούνταν να περιορίσουν την κατανάλωσή τους.

3.2.2 Η εξέλιξη του δικτύου προς το HetNet

Οι φορείς εκμετάλλευσης έχουν πολλές επιλογές για να αντιμετωπίσουν θέματα κάλυψης και δυναμικότητας:

- Αγορά πρόσθετου φάσματος (έως 3 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα), το οποίο μπορεί να είναι δαπανηρό.
- Μετεγκατάσταση χρηστών 3G σε 4G έτσι ώστε να αξιοποιηθεί η φασματική 4G αποδοτικότητα (έως 6 φορές αύξηση της χωρητικότητας)
- Ανάπτυξη small cells για χωρική απόδοση (έως 56 φορές αύξηση της χωρητικότητας αντιστοίχως, κατά τα επόμενα 10 χρόνια)

Είναι οικονομικά απαγορευτικό να δημιουργηθούν αρκετά μακροσκοπικά κύτταρα προς εξυπηρέτηση όλης τη ζήτησης. Τα small cells είναι μια οικονομικά αποδοτική λύση για την διασύνδεση της ζήτησης δεδομένων και χωρητικότητας. Η επιχειρηματική περίπτωση για ένα δίκτυο με υψηλό δείκτη QoE

(Ποιότητα Εμπειρίας) που είναι «πάντα» και «παντού» διαθέσιμο, οδηγεί την εξέλιξη του δικτύου προς την κατεύθυνση του HetNet (Ετερογενές Δίκτυο) - ενός ολοκληρωμένου δικτύου που αποτελείται από macrocells, small cells και του WiFi AP (Access Points). Η αρχιτεκτονική HetNet επιτρέπει την επέκταση της παραγωγικής ικανότητας βάσει πραγματικών, αντί των προβλεπόμενων τιμών ζήτησης στην κίνηση δεδομένων.

3.3 Στρατηγική

Η βασική πρόκληση για έναν φορέα εκμετάλλευσης είναι να αξιοποιήσει τα πλεονεκτήματά των δικτύων macro cell και να επεκταθεί σε δίκτυα small cell. Τα δυνατά σημεία του φορέα στο subscriber mix (καταναλωτής έναντι επιχειρήσης, σταθερή έναντι κινητής τηλεφωνίας) και στη διάρθρωση του κόστους των στοιχείων του δικτύου (MNO / MVNO, RAN ή / και βασικό δίκτυο κοινής χρήσης, κλπ.) καθορίζουν συχνά την κατάλληλη στρατηγική για small cells.

Μια ολιστική στρατηγική μικρών κυττάρων αντιμετωπίζει τόσο τις βραχυπρόθεσμες προκλήσεις όπως η εξοικονόμηση TCO (Total Cost of Ownership) του δικτύου όσο και τις μακροπρόθεσμες προκλήσεις όπως η βελτίωση της εμπιστοσύνης των πελατών και η διερεύνηση νέων ροών εσόδων. Οι περισσότερες στρατηγικές μικρών κυττάρων ακολουθούν μια σταδιακή προσέγγιση

3.3.1 Βελτίωση κάλυψης και χωρητικότητας

Βασικός στόχος τον οποίο σκοπεύει να καλύψει η ανάπτυξη μικρών κελιών είναι η βελτίωση κάλυψης και χωρητικότητας. Τα μικρά κύτταρα αναπτύσσονται ευρέως για να παρέχουν

- Συμπληρωματική κάλυψη : Ένας ψηλός εταιρικός πύργος μπορεί να δημιουργήσει μεγάλη κάλυψη τυφλού σημείου σε τετράπλευρη περιοχή, η οποία μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα small cell εξωτερικού χώρου.
- Εκτεταμένη κάλυψη στις άκρες των κυψελών: Για την εξυπηρέτηση γραφείων MME (Μικρές Μεσαίες Επιχειρήσεις) ή πολυκατοικίες στην άκρη των κυψελών.
- Μια εναλλακτική λύση για τη διάσπαση των κυττάρων: Ανώμαλες απαιτήσεις σε χωρητικότητα αντιμετωπίζονται με οικονομικό τρόπο χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό small cells εξωτερικών και εσωτερικών χώρων.

Ωστόσο, οι βελτιώσεις QoE μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με την σωστή εμπειρία του πελάτη στη σωστή θέση τη σωστή στιγμή, παρόμοια με την αρχή διάθεσης στην αγορά του σωστού προϊόντος στον πελάτη στη σωστή τιμή. Βελτιωμένη QoE οδηγεί σε έσοδα που εστιάζουν στις επιχειρήσεις και τους καταναλωτές.

Η ανάγκη για σωστό QoE οδηγεί τις παγκόσμιες επενδύσεις σε small cells . Τα small cells είναι έτοιμα να μην συμπληρώνουν μόνο, αλλά επίσης να αντικαταστήσουν τα μακρο-κυτταρικά δίκτυα για να συνδέσουν το χάσμα μεταξύ

της χωρητικότητας και της ζήτησης δεδομένων. Για παράδειγμα, ένας πάροχος ευρυζωνικού δικτύου με ένα τεράστιο δίκτυο FTTH θα ενδιαφερθεί για στοιχεία ενεργητικού ραδιοφάσματος ανοίγοντας υπαίθριο WiFi σε τοποθεσίες hotspot. Αυτή η στρατηγική μπορεί να επεκταθεί για να παρέχει FaaS (Fiber ως υπηρεσία) ή SCaaS (Small Cell ως υπηρεσία) σε MNT σε αντάλλαγμα για μια συμφωνία MVNO να εισέλθει στην αγορά υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας (με εκφόρτωση μικρών κυττάρων σε FTTH). Πιστεύουμε ότι τα όρια μεταξύ κινητού και σταθερού χειριστή θα εξαφανιστούν σύντομα με την επικράτηση των ενσωματωμένων small cells.

3.4 Τύποι Small Cell

Τα Small Cells μπορούν να διαχωριστούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα την απόσταση την οποία καλύπτουν, την ενέργεια που καταναλώνουν και το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται κυρίως. Αναλυτικά μπορούμε να τα διακρίνουμε:

| Τύπος | Κατανάλωση | Ακτίνα Κάλυψης | Αριθμός Χρηστών |
|-----------------------|------------|----------------|-----------------|
| Microcell / Metrocell | 2-10Watt | 2km | 200 |
| Picocell | 250mW | 200m | 32-100 |
| Femtocell | 20-100mW | 10-50m | 4-16 |

Πίνακας 3.1: Τύποι Small Cells

Παρατηρούμε ότι με βάση την κάλυψη που προσφέρουν τα διάφορα small cells, τα microcell καθώς και τα metrocell προσφέρουν την μεγαλύτερη εμβέλεια καθώς και τον μεγαλύτερο αριθμό χρηστών που μπορούν να εξυπηρετήσουν. Αναφερόμαστε σε ένα μέγιστο αριθμό 200 χρηστών καθώς και μια μέγιστη απόσταση κάλυψης κοντά στα 2 χιλιόμετρα, σε αντιδιαστολή με την κατανάλωση τους που μπορεί να φτάσει έως τα 10 Watt. Σε μια προσπάθεια να ελαττωθεί η κατανάλωση, μειώνοντας όμως και την κάλυψη του δικτύου μπορούμε να αναφερθούμε στα picocell τα οποία επιτυγχάνουν κατανάλωση ισχύος στα 250 mW για ακτίνα κάλυψης έως τα 200m. Βεβαίως, παράλληλα με την μείωση της ακτίνας κάλυψης έχει μειωθεί και ο αριθμός των χρηστών οι οποίοι μπορούν να εξυπηρετηθούν από το συγκεκριμένο κύτταρο με τον αριθμό αυτό να φτάνει στην μέγιστη τιμή του στους 100 χρήστες. Οι δύο αυτοί τύποι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξωτερικούς χώρους με σκοπό την αύξηση της κάλυψης καθώς και την αύξηση της απόδοσης και της χωρητικότητας του δικτύου.

Τέλος αναφερόμαστε στα Femtocell τα οποία θα αποτελέσουν και τον κύριο κορμό της έρευνας και συνολικά της παρούσας εργασίας. Τα femtocell αποτελούν το μικρότερο cell με κάλυψη που φτάνει έως τα 50 m και εξυπηρέτηση χρηστών έως ένα μέγιστο αριθμό 16 χρηστών. Η ανάπτυξή τους έγινε με σκοπό την κάλυψη εσωτερικών χώρων, κυρίως κατοικιών και εταιρικών χώρων. Αξίζει να επισημάνουμε ότι τα femtocell προσελκύουν το ενδιαφέρον λόγω της πολύ χαμηλής κατανάλωσης τους καθώς και του πολύ μικρού κόστους τους.

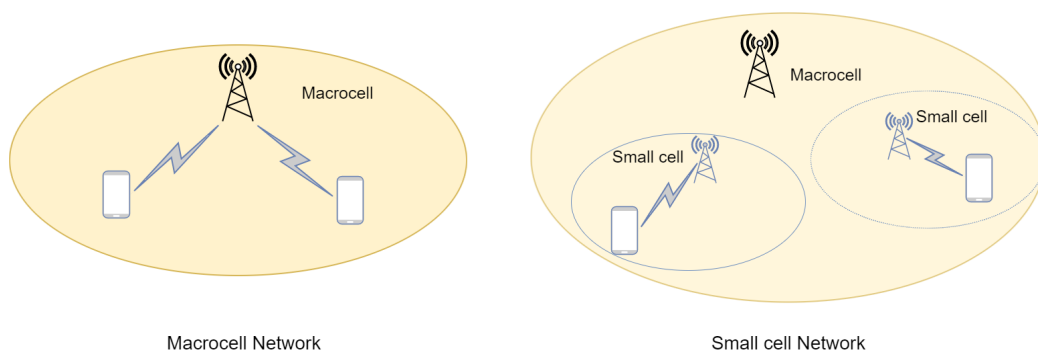
Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναπτύξουμε περισσότερα για τα femtocell και θα αναπτύξουμε το μοντέλο πάνω στο οποίο βασίζεται η εργασία.

3.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Small Cells

Με την κινητή τηλεφωνία να παρουσιάζει διπλάσια κίνηση ετησίως, οι σταθμοί βάσης small cell αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επέκταση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων όπως αναπτύξαμε νωρίτερα. Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας συνειδητοποιούν ότι για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις για πρόσβαση σε δεδομένα, βίντεο και εφαρμογές που προκαλούνται από smartphones και άλλες συσκευές, θα πρέπει να συμβαδίσουν με την εξέλιξη των small cells.

Τα small cells παρέχουν ευελιξία και αυξημένες δυνατότητες QoS σε ελκυστικό κόστος. Επίσης, η υλοποίηση μιας υποδομής small cells είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον, καθώς θα μειώσει τον αριθμό των πύργων κινητής τηλεφωνίας (ίσως ακόμη και να τους εξαλείψει) και παρέχει ένα καθαρότερο σήμα χρησιμοποιώντας λιγότερη ισχύ.

Άλλο ένα θετικό αντίκτυπο που έχει η στροφή προς τα small cells είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τα σημερινά μακροσκοπικά δίκτυα.



Σχήμα 3.2: Δίκτυα Small cells και Macro cell

Οι σταθμοί βάσης (C-BTS) έχουν διάφορες ονοματολογίες όπως σταθμοί βάσης micro και pico. Πρόκειται για σταθμούς βάσης μικρού μεγέθους, οι οποίοι περιλαμβάνουν επεξεργασία βασικής ζώνης και μονάδα ραδιοσυχνότητας σε μία φυσική μονάδα. Είναι σχετικά ελαφρύ σε βάρος (π.χ. λίγα κιλά) και είναι εύκολο να αναπτυχθούν και να διατηρηθούν. Έρχονται με ποικίλη ισχύ εξόδου που κυμαίνεται από μισό watt έως μερικά watt .

Προβλέπονται για να υποστηρίξουν έναν περιορισμένο αριθμό συνδρομητών που κυμαίνονται από τις δεκάδες συνδρομητές. Αυτά τα χαρακτηριστικά τους διαχωρίζουν από τους μεγαλύτερους σταθμούς βάσης «μακρο» που συνήθως διαθέτουν αρχιτεκτονική split ή all-in-house εκτός από τις μεγαλύτερες

δυνατότητες όσον αφορά την ισχύ εξόδου και τον αριθμό των υποστηριζόμενων συνδρομητών. Συνήθως, οι σταθμοί βάσης small cells σε σχετικά χαμηλό ύψος (π.χ. 10-15 μέτρα) για να καλύψει μια περιορισμένη περιοχή (π.χ. 100 μέτρα) για να παρέχει χωρητικότητα σε ένα "hot spot" ή κάλυψη σε μια νεκρή ζώνη. Οι σταθμοί βάσης macro τοποθετούνται υψηλότερα στα 30-45 μέτρα, για παράδειγμα, και χρησιμοποιούνται για την παροχή ευρύτερης κάλυψης (π.χ. 500 μέτρα ή περισσότερο).

Παρά τις διαφορές στην αρχιτεκτονική και τον παράγοντα μορφοποίησης, ο ρυθμός δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει ένας σταθμός βάσης είναι ο ίδιος. Αυτός είναι ο ρυθμός δεδομένων σε επίπεδο συνδέσμου που μετράται σε εργαστηριακό περιβάλλον, ελλείψει παρεμβολών. Ο ρυθμός του επιπέδου σύνδεσης καθορίζεται από την ικανότητα της τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης όπως WCDMA ή LTE.

Ωστόσο, αυτό που έχει σημασία τόσο για τους φορείς εκμετάλλευσης ασύρματων δικτύων όσο και για τους συνδρομητές είναι η πραγματική απόδοση ενός ασύρματου δικτύου. Ως εκ τούτου, η απόδοση σε επίπεδο δικτύου είναι το πραγματικό μέτρο με απόδοση επιπέδου σύνδεσης που είναι ανώτατο όριο που επιτυγχάνεται μόνο σε ιδανικά σενάρια που σπάνια υπάρχουν σε ένα πραγματικό δίκτυο.

Οι σταθμοί βάσης small cells παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα από τα macro cells λόγω της ανάπτυξής τους. Επειδή αυτοί οι σταθμοί βάσης είναι τοποθετημένοι χαμηλά πάνω από το έδαφος, είναι λιγότερο επιρρεπείς σε παρεμβολές. Αυτό μεταφράζεται άμεσα σε μεγαλύτερη χωρητικότητα.

Η υψηλότερη ποιότητα σήματος οδηγεί σε καλύτερη απόδοση επειδή επιτρέπει στο σύστημα να χρησιμοποιεί ένα φασματικά αποδοτικότερο σύστημα μετάδοσης, όπου μπορούν να μεταδοθούν περισσότερα δεδομένα ταυτόχρονα. Επομένως, οι περιοχές όπου οι χρήστες μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν με υψηλότερο ρυθμό δεδομένων είναι μεγαλύτερες σε ένα small cell από ένα macrocell. Αυτό είναι σημαντικό επειδή οδηγεί άμεσα σε μεγάλη αύξηση της συνολικής χωρητικότητας: η χωρητικότητα του σταθμού βάσης ενός small cell είναι περίπου 89% υψηλότερη από εκείνη ενός macrocell.

Κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα που θα πρέπει να αναφέρουμε είναι:

- Χαμηλότερη καθυστέρηση: οι χρήστες θα βιώσουν χαμηλότερη καθυστέρηση για υπηρεσίες δεδομένων και θα απολαύσουν ταχύτερο χρόνο download και upload .
- Κάλυψη εντός κτιρίου: Τα small cells παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη εσωτερικού χώρου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 40% της κινητής τηλεφωνίας προέρχεται από χρήστες εντός οικίας και το 25% από χώρους εργασίας, αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή εσόδων για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων.
- Καλύτερη κάλυψη στα όρια κυψέλης: Οι σταθμοί βάσης macro cells παρέχουν κακή υπηρεσία στα όρια κυψέλης, τα οποία περιλαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό της περιοχής των κυττάρων. Τα small cells παρέχουν καλύτερη απόδοση, ιδιαίτερα για την ανερχόμενη ζεύξη από τα macro cells .

Το γεγονός ότι τα small cells παρέχουν σχεδόν το διπλάσιο της χωρητικότητας σε σύγκριση με τα macro cells είναι ο λόγος για τον οποίο πρόκειται να αποτελέσουν σημαντικό μέρος στην αντιμετώπιση της κρίσης χωρητικότητας σε ασύρματα δίκτυα.

Ωστόσο, οι σταθμοί βάσης small cells έχουν αντιμετωπίσει προκλήσεις και από άποψη επιχειρηματικότητας. Το ζήτημα είναι το κόστος του backhaul. Δεδομένου ότι αυτοί οι σταθμοί βάσης είναι τοποθετημένοι χαμηλά πάνω από το έδαφος, τα τυπικά συστήματα μικροκυμάτων δεν είναι τεχνικά αποτελεσματικά επειδή απαιτούν μια καθαρή οπτική επαφή μεταξύ των δύο κόμβων της σύνδεσης μικροκυμάτων - η οποία είναι δύσκολο να παρασχεθεί σε αστικές περιοχές. Εναλλακτικά, οι ίνες κοστίζουν ακριβά, καθώς ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες στο σημείο όπου απαιτείται το small cell, πέρα από τις μεγάλες μηνιαίες χρεώσεις που το καθιστούν μη-ελκυστικό από οικονομική άποψη.

4. Femtocells

4.1 Εισαγωγή

Με την μαζική εισχώρηση των κινητών συσκευών που υποστηρίζουν την τεχνολογία LTE, προέκυψε η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας, παροχή υψηλότερης ποιότητας υπηρεσιών καθώς και αύξηση της κάλυψης του δικτύου ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους όπου η εξασθένιση του σήματος είναι ιδιαίτερα αισθητή.

Ο αποδοτικότερος τρόπος για να ικανοποιήσουμε αυτές τις ανάγκες είναι η μείωση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη το οποίο επιτυγχάνεται με εγκατάσταση σταθμών βάσης Femtocell, μιας οικονομικά συμφέρουσας λύσης. Τα Femtocell ή οικιακοί σταθμοί βάσης (home base stations) είναι μικρά κυψελωτά δίκτυα τα οποία εγκαθίστανται σε ιδιωτικούς χώρους όπως σπίτια ή μικρές επιχειρήσεις εξυπηρετώντας ένα πλήθος ασύρματων συσκευών επιτυγχάνοντας καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας σε υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Ο πομπός αποτελείται από έναν σταθμό βάσης χαμηλής ισχύος ο οποίος προσφέρει Internet μέσω μιας DSL γραμμής ή ενός καλωδίου ευρείας σύνδεσης.

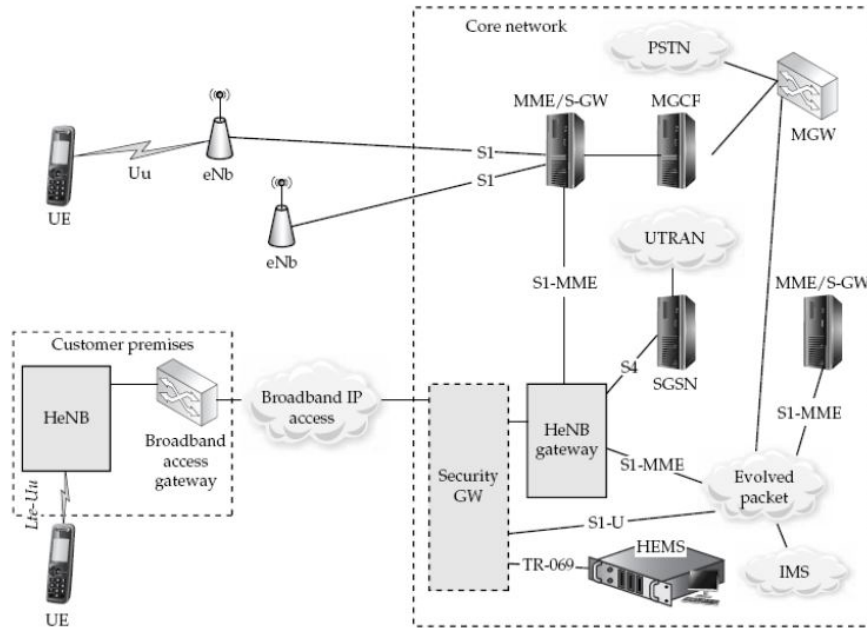
Η πρώτη ιδέα για την υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου ξεκίνησε το 2002 από ένα τμήμα μηχανικών της Motorola που ερευνούσαν την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και μεθόδων για χρήση στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες [15]. Μερικά χρόνια αργότερα, το 2004 η ιδέα των Femtocell άρχισε να κερδίζει έδαφος και στις πρώτες εταιρίες στην Αγγλία, στις Ubiquisys και 3WayNetworks ανατέθηκε η οριοθέτηση και η εύρεση φάσματος λειτουργίας των Femtocell. Η νέα αυτή τεχνολογία προκάλεσε το ενδιαφέρον αρκετών εταιριών και το 2007 δημιουργήθηκε ο πρώτος οργανισμός προτυποποίησης για τα Femtocell, το Femto Forum που σήμερα έχει μετονομαστεί σε Small Cell Forum. Αυτοσκοπό του αποτελούσε η προώθηση της δημιουργίας και η εξέλιξη των Femtocell σε ευρεία κλίμακα και γιαυτό το λόγο παρουσιάστηκε ως συντονιστής ανάμεσα σε εταιρίες τηλεπικοινωνιών ώστε να βεβαιώσει ότι η ανάπτυξη τους θα βασιστεί σε κοινά αποδεκτά και διεθνή πρότυπα λειτουργίας.

Οι τεχνολογίες μετάδοσης στα Femtocell βασίστηκαν κυρίως στα πρότυπα των δικτύων UMTS. Όμως οι νέες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν κατά την εξέλιξη των 3G δικτύων υιοθετήθηκαν από τα Femtocell. Όσο για το GSM, μπορούμε να πούμε ότι η τοποθέτηση GSM σταθμών βάσης σε αεροσκάφη και πλοία παραπέμπει περισσότερο σε Picocell παρά σε Femtocell λόγω του ότι η εγκατάσταση και η λειτουργία των δικτύων αυτών δεν εξαρτιόταν από τον συνδρομητή αλλά από την πάροχο εταιρεία.

Επί του παρόντος, τα femtocells αποτελούν ένα ολοκληρωμένο κομμάτι της εξέλιξης των κυψελωτών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Εκτός από τα πλεονεκτήματα ποιότητας υπηρεσιών και αυξημένης κάλυψης που προσφέρουν στους χρήστες, έχουν την δυνατότητα υποστήριξης επιπλέον λειτουργιών μέσα στο σπίτι ή την επιχείρηση με χαμηλότερη τιμή χρέωσης. Σύμφωνα με την εξάπλωση και την χρήση τους εκτιμάται ότι στο μέλλον τα Femtocells θα αποτελέσουν το βασικό στοιχείο στις ασύρματες επικοινωνίες.

4.2 Αρχιτεκτονική Femtocell

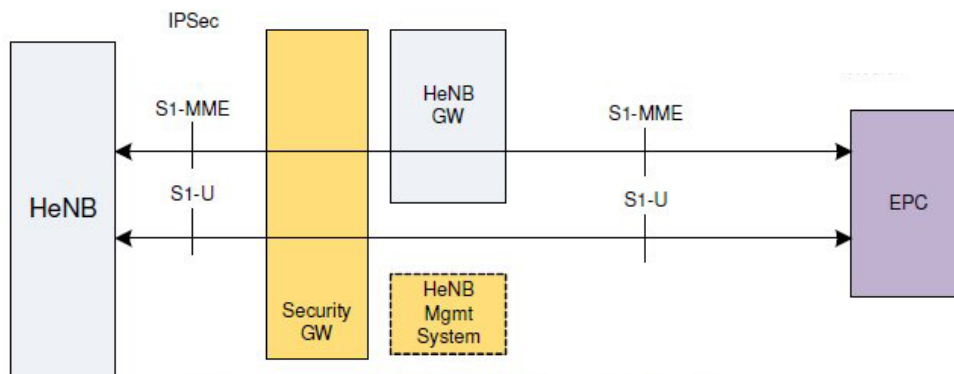
Στην παρούσα ενότητα περιγράφουμε την αρχιτεκτονική του δικτύου Femtocell για λειτουργία με ασύρματη τεχνολογία LTE . Για τον λόγο αυτό έχει ορισθεί ένα μοντέλο αναφοράς το οποίο εφαρμόζεται καθολικά.



Σχήμα 4.1: Σημεία αναφοράς ενός Femtocell όπως ορίζεται από το Femto Forum .

Τα femtocells επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε φωνητικές και ευρυζωνικές υπηρεσίες μέσω της τυπικής ευρυζωνικής σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Ένα ενιαίο femtocell υποστηρίζει συνήθως τέσσερις έως οκτώ ταυτόχρονες συνδέσεις σε οποιοδήποτε εσωτερικό περιβάλλον επιτρέποντας σε πολλούς εξουσιοδοτημένους χρήστες να συνδεθούν στο femtocell και να χρησιμοποιούν υπηρεσίες διαφορετικές από τη φωνή, όπως κειμένου ή streaming πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο κλπ. Το μοντέλο συνδρομής (υπηρεσία και χρέωση) για τις υπηρεσίες femtocell μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών και εξαρτάται από τους χειριστές. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την μέγιστη ροή δεδομένων, όπως η τεχνολογία ασύρματης διασύνδεσης που χρησιμοποιείται, η συνδρομή χρηστών και η ευρυζωνική σύνδεση. Με σκοπό την υποστήριξη των λειτουργιών femtocell, το Home eNodeB Gateway (HeNB GW) και το Home Management System eNodeB (HeMS) εισήχθησαν στο δίκτυο κατά την έκδοση 8. Το HeNB GW χρησιμοποιείται ως συγκεντρωτής για την κίνηση που λαμβάνεται από το HeNB. Στη λογική αρχιτεκτονική femtocell που σχεδιάστηκε από το 3GPP στην έκδοση 8, το HeNB GW τοποθετείται στις εγκαταστάσεις του χειριστή. Το HeMS, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι οι υπηρεσίες που βιώνει ο χρήστης

είναι υψηλής ποιότητας. Ως εκ τούτου, με την ανάλυση των λειτουργιών HeMS και HeNB GW, το HeNB θεωρείται αναπόσπαστο τμήμα του δικτύου χειρισμού. Για να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες φεμτοσελλ, ο χρήστης θα πρέπει να αποκτήσει ένα φεμτοσελλ και να συνδεθεί με αυτό μέσω της δικής του σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης. Αφού συνδεθεί, το HeNB θα συνδεθεί περαιτέρω με την πύλη του χειριστή και στη συνέχεια, θα πιστοποιηθεί και θα διαμορφωθεί σύμφωνα με την πολιτική συνδρομής του χρήστη. Η πρόσβαση στο Femtocell είναι συνήθως διαθέσιμη σε περιορισμένο αριθμό εξουσιοδοτημένων χρηστών. Αυτό εξασφαλίζει ότι η περιοχή κάλυψης που παρέχεται από το femtocell είναι προσβάσιμη μόνο από τον ιδιοκτήτη του ή από μια αξιόπιστη ομάδα ανθρώπων. Ένα δίκτυο LTE femtocell αποτελείται από ένα femtocell, διάφορα άλλα υποστηρικτικά στοιχεία του δικτύου και ένας συνδυασμός αυτών των στοιχείων παρέχει ασφάλεια επικοινωνίας, παροχή και διαχείριση του δικτύου. Τυπικά στοιχεία ενός τέτοιου δικτύου παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 4.2: Λογική Αρχιτεκτονική Femtocell

4.2.1 Femtocell access point/Home eNodeB

Το HeNB θεωρείται συσκευή plug-and-play. Πρόκειται για μη φορητό εξοπλισμό, ο οποίος εγκαθίσταται εύκολα από τους χρήστες σε περιβάλλον οικίας ή γραφείου. Το HeNB χρησιμοποιεί το ευρυζωνικό backhaul του συνδρομητή για να συνδεθεί στο κεντρικό δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης. Τυπικά, το HeNB παρέχει εξειδικευμένη κάλυψη σε εξουσιοδοτημένους χρήστες μέσω αδειοδοτημένου φάσματος, γεγονός που οδηγεί σε καλή ποιότητα υπηρεσιών QoS και εμπλουτίζει την εμπειρία εξυπηρέτησης τελικών χρηστών. Επιπλέον, το HeNB χρησιμοποιεί την διεπαφή 3GPP S1 over-the-air για επικοινωνία με τις κινητές συσκευές.

4.2.2 Home eNodeB Gateway (HeNodeB)

Όπως προκύπτει από την 3GPP release 9, οι λειτουργίες της μονάδας RAN κατανέμονται μεταξύ του HeNB και του HeNB GW. Το HeNB GW σε ένα δίκτυο femtocell χρησιμοποιείται για την παροχή διαφόρων λειτουργιών που σχετίζονται με την ασφάλεια σύνδεσης και τον έλεγχο. Στην αρχιτεκτονική δικτύου femtocell, το HeNB υποστηρίζει λειτουργίες διαχείρισης ραδιοσυχνοτήτων ενώ το HeNB GW διατηρεί τις λειτουργίες συνδεσιμότητας του κεντρικού δικτύου. Το HeNB και το HeNB GW συνεργάζονται ώστε να εκτελέσουν ορισμένες λειτουργίες που δεν θα μπορούσαν να εκπληρωθούν χωρίς την συνεισφορά και των δύο. Για παράδειγμα το paging είναι μια από τις λειτουργίες που χρειάζονται συνεργασία HeNB και HeNB GW. Το HeNB GW μπορεί προαιρετικά να εκτελεί λειτουργίες ελέγχου ταυτότητας (Authentication), εξουσιοδότησης (Authorization) και λογιστικής (Accounting) AAA. Οι λειτουργίες αυτές στο HeNB GW βελτιώνουν το επίπεδο ασφαλούς πρόσβασης που παρέχεται από το HeNB. Συνήθως ο διακομιστής βρίσκεται στο βασικό δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης μαζί με την Μονάδα Διαχείρισης Κινητικότητας MME. Στο HeNB GW, οι λειτουργίες AAA επιτρέπουν υπηρεσίες ελέγχου ταυτότητας όπως το EAP-SIM και το EAP-AKA μεταξύ του HeNB και του MME. Αυτές οι υπηρεσίες ελέγχου ταυτότητας είναι γνωστές ως Extensible Authentication Protocol-Subscriber Identity Module και Extensible Authentication Protocol-Authentication και Key Agreement και καθορίζονται στην έκδοση 3GPP 9. Το HeNB GW μπορεί επίσης να διαθέτει λειτουργία πύλης πολυμέσων (MGW). Οι λειτουργίες MGW τυπικά καταλήγουν στο MME στο βασικό δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης. Το HeNB GW διευκολύνει τις λειτουργίες ελέγχου ταυτότητας και εξουσιοδότησης για το HeNB κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγγραφής. Η λειτουργικότητα του HeNB GW που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να χωριστεί σε ξεχωριστά στοιχεία δικτύου σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χειριστή. Μια πύλη ασφαλείας SeGW, οι λειτουργίες AAA που αναφέραμε ή ένα MGW μπορούν να κατασκευαστούν ως αυτόνομες συσκευές ή σε έναν πιθανό συνδυασμό: για παράδειγμα το HeNB GW μπορεί να συνδιάζει τις λειτουργίες AAA και το SeGW, ενώ το MGW μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χωριστή οντότητα δικτύου.

4.2.3 Security Gateway (SeGW)

Σε ένα δίκτυο femtocell, ένα SeGW χρησιμοποιείται για να παρέχει ασφαλή σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ του HeNB και του κεντρικού δικτύου. Το SeGW επιτρέπει στα HeNBs να δημιουργούν σήραγγες ασφαλείας από το Πρωτόκολλο Ασφαλείας Internet (IPSec). Το SeGW παρέχει επίσης ασφαλή πρόσβαση δεδομένων με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου GPRS Tunneling Protocol (GTPS) μέσω της διασύνδεσης S1 και τρέχει μέσα σε σύνδεση IPSec. Η σήραγγα GTP συνήθως σχηματίζεται μεταξύ του HeNodeB και του MME και βρίσκεται στο κεντρικό δίκτυο. Με τη βοήθεια αυτών των σηράγγων, η SeGW παρέχει ακεραιότητα δεδομένων.

4.2.4 HeNodeB Management System (HeMS)

Η λειτουργικότητα του συστήματος διαχείρισης eNodeB (HeMS) βασίζεται στην οικογένεια προτύπων TR-069. Το HeMS χρησιμοποιείται για την Παροχή Λειτουργιών Διαχείρισης και Συντήρησης (OAMP) των λειτουργιών του HeNB. Επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης να ελέγχουν και να διαχειρίζονται τη διαμόρφωση των HeNBs. Επιπλέον, παράγει αναφορές βλαβών και συλλέγει αποκλίσεις απόδοσης από τα HeNB. Με το HeMS, ένας φορέας εκμετάλλευσης παρέχει πρόσβαση σε HeNBs με πρόσθετες υπηρεσίες και εφαρμόζει πολιτικές χρήσης υπηρεσιών.

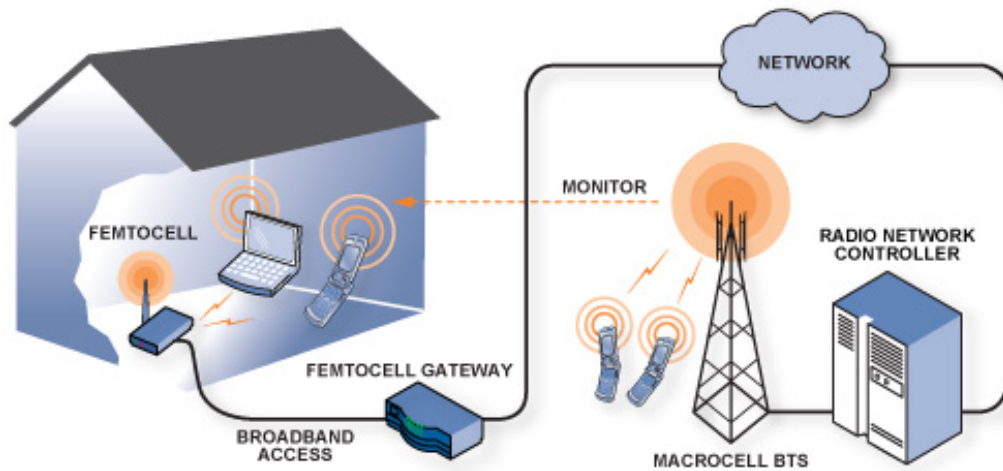
4.2.5 S1 Interface

Η S1 είναι μια πολυ-λειτουργική διεπαφή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά όλων των μηνυμάτων και διαδικασιών μεταξύ του HeNB και του HeNB GW. Χρησιμοποιεί το Πρωτόκολλο μετάδοσης ελέγχου ροής (Stream Control Transmission Protocol - SCTP) για τη μεταφορά των μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδότησης από και προς τα HeNB και HeNB GW. Τα μηνύματα και οι διαδικασίες μεταφέρονται μέσω IPv4 και IPv6. Αυτή είναι η μόνη διεπαφή που χρησιμοποιείται από το SeGW και παρέχει μια σήραγγα IPsec από άκρο σε άκρο διασφαλίζοντας την ακεραιότητα των δεδομένων.

4.3 Πεδία Εφαρμογής

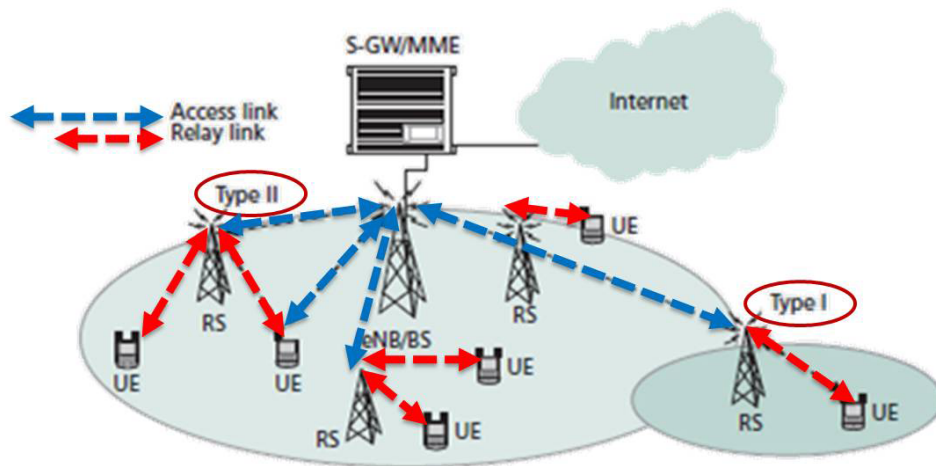
Με την ανάπτυξη των femtocell, η ασύρματη υπηρεσία που παρέχεται από τους χειριστές γίνεται όλο και περισσότερο παρούσα με βελτιωμένη ποιότητα. Τα femtocells ομαδοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τις περιπτώσεις χρήσης τους. Μπορούμε να τα απαρτηθούμε ως εξής:

- Βρίσκονται εσωτερικά και χρησιμοποιούνται κυρίως για ιδιωτικές κατοικίες που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές. Ανάλογα με τη θέση αυτών των femtocell, μια σύνδεση backhaul μπορεί να είναι ενσύρματη ή ασύρματη.



Σχήμα 4.3: Femtocell

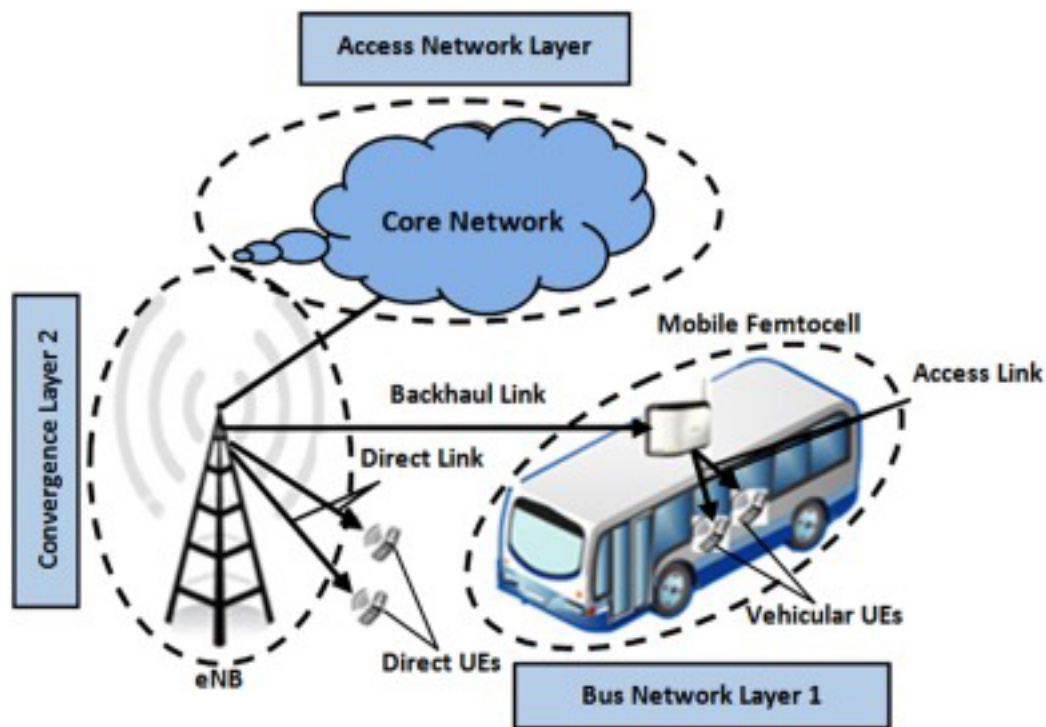
- Δίκτυα Femtocells: Αυτά τα femtocells αναπτύσσονται σε εσωτερικούς χώρους με μεγάλους αριθμούς όπως σε επιχειρήσεις ή εμπορικά κέντρα. Έχουν μια ενσύρματη σύνδεση backhaul στο δίκτυο.
- Fixed Relay Femtocells: Είναι εξωτερικά femtocell που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της κάλυψης και χωρητικότητας, όπου η εξυπηρέτηση ενός macrocell δεν επαρκεί. Απαιτείται μια ασύρματη backhaul σύνδεση για αυτόν τον τύπο femtocell .



Σχήμα 4.4: Fixed Relay Femtocell

- Κινητά Femtocells: Χρησιμοποιούνται σε οχήματα όπως τα τρένα για να παρέχουν υπηρεσίες για χρήστες κινητής τηλεφωνίας. Αυτά τα femtocell

απαιτούν μια ασύρματη σύνδεση backhaul καθώς είναι κινητά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.



Σχήμα 4.5: Κινητά Femtocell

4.4 Πολιτικές Πρόσβασης

Στα συμβατικά δίκτυα macrocell, οι σταθμοί βάσης οι οποίοι αναπτύσσονται από τους φορείς εκμετάλλευσης παρέχουν πρόσβαση στο macrocell σταθμό βάσης σε όλους τους χρήστες χωρίς κανένα περιορισμό. Αντιθέτως, στους σταθμούς βάσης femtocell δίνεται η δυνατότητα να μπορούν να ελέγξουν ποιοι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτά. Περιορισμοί όσον αφορά τους χρήστες που έχουν πρόσβαση είναι απαραίτητοι από τη στιγμή που τα femtocell και η αντίστοιχη backhaul σύνδεση τους έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν ένα μικρό αριθμό χρηστών. Επίσης, οι κάτοχοι femtocell δεν θέλουν να μοιράζονται πόρους χωρίς να έχουν κάποιο κέρδος. Επομένως, για την αντιμετώπιση διαφορετικών στρατηγικών ανάπτυξης, στα femtocell καθορίζονται τρεις πολιτικές πρόσβασης: ανοικτή, κλειστή και υβριδική πρόσβαση [16].

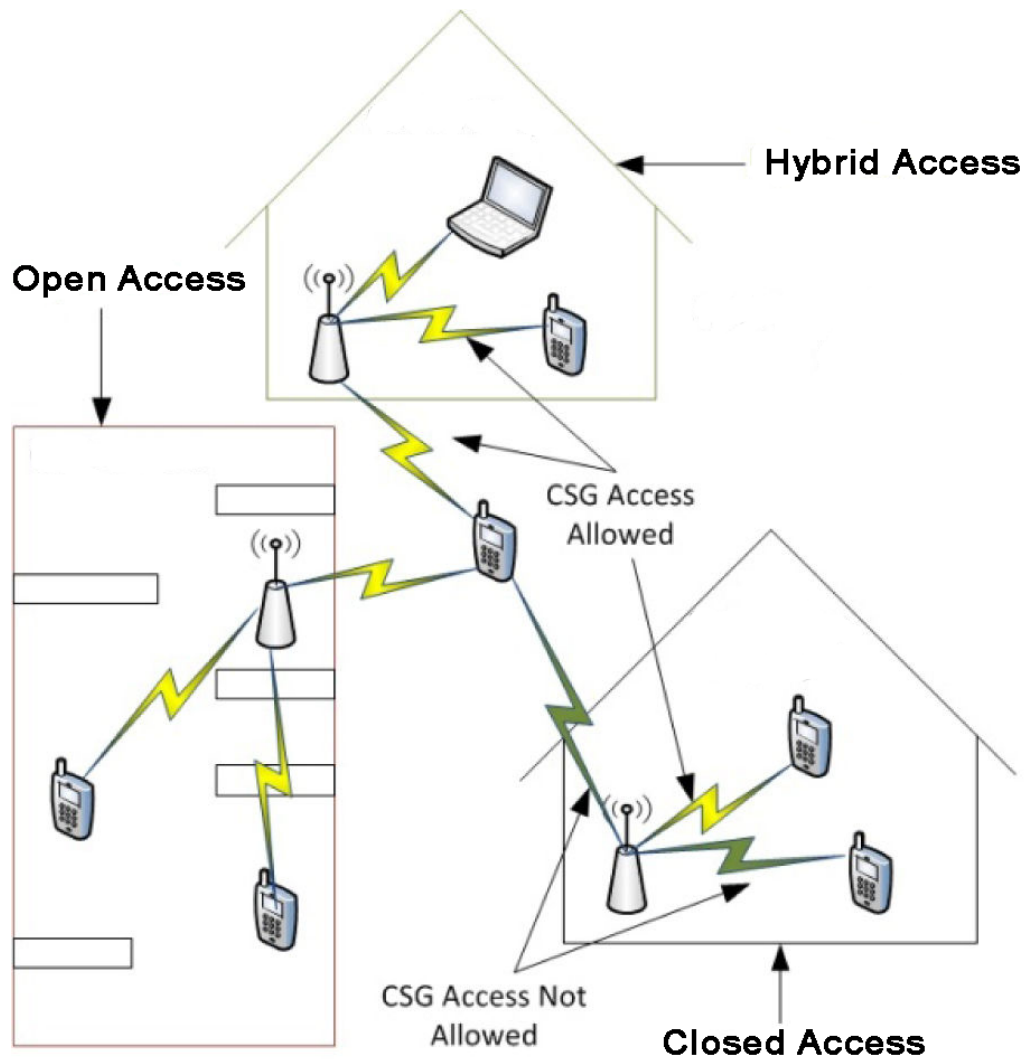


Figure 4.6: Πολιτικές πρόσβασης Femtocell .

4.4.1 Κλειστή Πρόσβαση μέσω Closed Subscriber Group CSG Closed Access

Οι σταθμοί βάσης femtocell κλειστής πρόσβασης εξυπηρετούν ένα σταθερό σύνολο χρηστών. Η ομάδα χρηστών που επιτρέπεται να έχει πρόσβαση στο femtocell είναι γνωστή ως Κλειστή Ομάδα Συνδρομητών (Closed Subscriber Group CSG). Τα femtocell κλειστής πρόσβασης χρησιμοποιούνται κυρίως για ιδιωτικές οικίες. Έτσι, ξένοι χρήστες μακροκυττάρων, οι οποίοι δεν αποτελούν μέρος της ομάδας CSG, δεν μπορούν να απολαμβάνουν υπηρεσίες από το femtocell.

4.4.2 Ανοιχτή Πρόσβαση Open Access

Τα femtocell ανοικτής πρόσβασης προσφέρουν υπηρεσίες σε όλους τους χρήστες χωρίς κανένα περιορισμό. Τέτοια femtocell μπορούν να αναπτυχθούν σε επιχειρήσεις ή δημόσιους χώρους, όπως εμπορικά κέντρα, προκειμένου να εκφορτωθεί η κυκλοφορία από το επικαλυμμένο macrocell. Η συγκεκριμένη πολιτική πρόσβασης προσφέρει αυξημένη περιοχή κάλυψης του δικτύου ενώ βέβαια καταλήγει συνήθως σε υποβαθμισμένη απόδοση λόγω των εξωτερικών χρηστών που αποκτούν πρόσβαση.

4.4.3 Υβριδική Πρόσβαση Hybrid Access

Τέλος, στα femtocell υβριδικής πρόσβασης (Hybrid Access), όλοι οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να προσπαθήσουν να συνδεθούν, όμως οι χρήστες που ανήκουν στην CSG έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα από τους υπόλοιπους. Η προτεραιότητα αυτή μεταφράζεται σε διαθέσιμους πόρους που τους προσφέρονται, δηλαδή για ένα Hybrid Access femtocell προέχει η εξυπηρέτηση και η ικανοποίηση των συνδρομητών του προσφέροντας τους το μεγαλύτερο ποσοστό των πόρων του σε σύγκριση με μη-συνδρομητές που αναζητούν εξυπηρέτηση. Στην συνέχεια, με βάση των εναπομεινάντων πόρων, δίνεται η δυνατότητα σε ορισμένους εξωτερικούς χρήστες να έχουν πρόσβαση και αυτοί. Σε αυτή την πολιτική πρόσβασης συνήθως εφαρμόζονται πολιτικές χρέωσης κ τιμολόγησης προς τους χρήστες της CSG που διαφέρουν από τους χρήστες που δεν ανήκουν στην CSG .

Οι πολιτικές πρόσβασης θα αναπτυχθούν αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο καθώς αποτελούν σημαντικό παράγοντα του ερευνητικού τομέα αυτής της εργασίας.

4.5 Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Με την αξιοποίηση της ανάπτυξης των femtocell, παρουσιάστηκαν αρκετά πλεονεκτήματα, που μπορούμε να συνοψίσουμε ως εξής:

- Τα Femtocell χρησιμοποιούν την ίδια διασύνδεση συχνοτήτων με τα επικαλυπτόμενα macrocell και ως αποτέλεσμα οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν με τον ίδιο τρόπο τα στρώματα macro και femto . Με αυτό τον τρόπο παρέχεται καθολική κάλυψη σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με μικρή επίδραση στην τυποποίηση.
- Οι χρήστες λαμβάνουν σήματα με υψηλότερο λόγο ισχύος-παρεμβολής-συν-θορύβου (SINR) ακόμη και με χαμηλή ισχύ εκπομπής χάρη στη μικρή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Καθώς τα κινητά τηλέφωνα καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια για να συνδεθούν με ένα κοντινό BS , η διάρκεια ζωής της συσκευής βελτιώνεται επίσης.
- Λόγω αύξησης της επαναχρησιμοποίησης των πόρων και της μείωσης απωλειών μέσω διείσδυσης τοίχων, οι χρήστες που εξυπηρετούνται από femtocell απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Έτσι, με την ανάπτυξη των femtocell πάνω από το στρώμα των macrocell , η συνολική χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται.
- Με την εγκατάσταση femtocell, ο χειριστής μπορεί να εκφορτώσει την εσωτερική κυκλοφορία του. Έτσι, περισσότεροι πόροι μπορούν να ανατεθούν σε εξωτερικούς χρήστες με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσής τους.
- Η ανάπτυξη των femtocell μειώνει τελικά την ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη macrocell. Αυτή είναι μια αποτελεσματική λύση για τους φορείς εκμετάλλευσης όσον αφορά το κόστος λειτουργίας καθώς το κόστος ανάπτυξης του femtocelle είναι πολύ χαμηλότερο από το αντίστοιχο ενός macrocell. Το κόστος ενός macrocell σε έναν φορέα εκμετάλλευσης δεν περιλαμβάνει μόνο το κόστος υλικού, αλλά περιλαμβάνει επίσης τη μίσθωση backhaul και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, ο φορέας εκμετάλλευσης δεν πληρώνει για μίσθωση ή ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία ενός femtocel . Επίσης, η τιμή ενός femtocell πληρώνεται εν μέρει από ένα τελικό χρήστη. Συνεπώς, η ανάπτυξη femtocell μειώνει το κόστος των χειριστών.
- Η ανάπτυξη small cell μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Αρχικά, τα femtocells θεωρήθηκε ότι αναπτύχθηκαν μόνο για λύσεις κάλυψης υπό τον έλεγχο των φορέων αντί της μαζικής παραγωγής. Ωστόσο, η αυξημένη προσπάθεια για την τυποποίηση επηρεάζει θετικά την εμπορευματοποίηση των femtocell. Εκτιμάται ότι ο αριθμός των femtocell στην αγορά ήταν περίπου 60 εκατομμύρια μέχρι το 2015, ενώ υπήρχαν 2,3 εκατομμύρια femtocell στα τέλη του 2010 γεγονός που σαφώς προκαλεί προκλήσεις οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το πιο σοβαρό και επιζήμιο πρόβλημα που προκύπτει από την εισαγωγή των femtocells είναι η αύξηση των παρεμβολών. Ο μετριασμός των παρεμβολών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ειδικά σε δίκτυα πυκνής ανάπτυξης femtocell.
- Οι χρόνοι μετάδοσης του femtocell θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με το macrocell για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές πολλαπλής πρόσβασης και να επιτύχουν την κατάλληλη μεταβίβαση μεταξύ των επιπέδων.
- Δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές έχουν plug-and-play φύση, τα femtocell θα πρέπει να παρέχουν αυτο-βελτιστοποίηση και να διαμορφώνουν τις παραμέτρους τους δυναμικά σύμφωνα με το περιβάλλον τους.
- Η υπηρεσία backhaul που παρέχεται από την ευρυζωνική τεχνολογία δεν είναι τόσο προηγμένη όσο η backhaul που χρησιμοποιείται όσον αφορά το macrocell. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση των δικτύων macrocell δεν μπορεί να επιτευχθεί με την τρέχουσα ευρυζωνική υπηρεσία. Επίσης, η απόδοση του backhaul είναι περιορισμένη εάν μια άλλη ευρυζωνική υπηρεσία όπως το Wi-Fi χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με το femtocell.
- Κάθε σταθμός βάσης στο δίκτυο έχει μια ταυτότητα κυψελών γνωστή ως Φυσική Κυτταρική Ταυτότητα (PCI) με αποτέλεσμα να αναγνωρίζονται από γειτονικά κύτταρα. Μια PCI ενός κελιού θα πρέπει να είναι τοπικά μοναδική για να αποφευχθεί σύγχυση μεταξύ σταθμών βάσης. Σε αντίθεση με τα macrocell, οι θέσεις των femtocell μπορεί να αλλάξουν. Ως εκ τούτου, πρέπει να ενημερώσουν δυναμικά τις PCI τους. Επιπλέον, στο LTE, το σύνολο των αριθμών PCI που ορίζονται για ένα σταθμό βάσης είναι 504. Ως εκ τούτου, σε δίκτυα όπου τα femtocell είναι πυκνά αναπτυγμένα, θα αποτελέσει πρόβλημα για κάθε σταθμό βάσης να αποκτήσει μια μοναδική PCI .
- Τα Femtocell χρησιμοποιούν αδειοδοτημένο φάσμα στο οποίο εφαρμόζονται αυστηρές ρυθμίσεις από τις κυβερνήσεις. Αυτό φέρνει επιπλέον ευθύνες για τους χειριστές, όπως ο περιορισμός ισχύος και η ακριβή ανίχνευση θέσης femtocell για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.
- Η ανάπτυξη των femtocell αυξάνει τα γενικά έξοδα σηματοδότησης στο δίκτυο. Αυτό το πρόβλημα γίνεται πιο εμφανές στην ανάπτυξη ανοικτής πρόσβασης.
- Στα δίκτυα macrocell, οι φορείς εκμετάλλευσης έχουν πλήρη έλεγχο του δικτύου. Αποφασίζουν πού θα αναπτυχθεί ένα macrocell ώστε να παρέχει μια σύνδεση backhaul μεταξύ του macrocell και του πυρήνα του δικτύου.

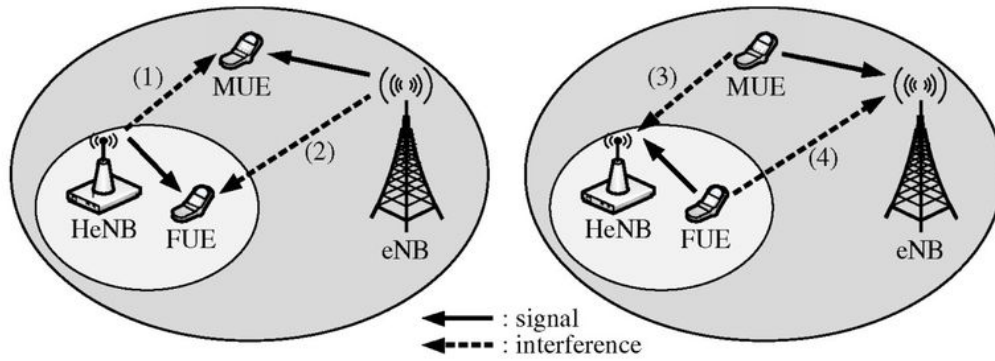
Ωστόσο, τα femtocell αναπτύσσονται από τους τελικούς χρήστες με ad hoc προδιάθεση (κατά απαίτηση), οπότε ο χειριστής δεν μπορεί να γνωρίζει την τοποθεσία a priori. Επίσης, η ευρυζωνική υπηρεσία που χρησιμοποιείται για backhaul μπορεί να παρασχεθεί από τρίτη εταιρεία που δεν είναι υπό τον έλεγχο του χειριστή. Σε τέτοια περίπτωση, το μερίδιο των εσόδων μεταξύ του παρόχου ευρυζωνικών υπηρεσιών και του φορέα εκμετάλλευσης είναι επίσης ένα ανοιχτό ζήτημα.

- Η επιλογή κατάλληλης πολιτικής πρόσβασης είναι μια άλλη πρόκληση για τα δίκτυα femtocell. Οι ιδιοκτήτες Femtocell προτιμούν να έχουν femtocells κλειστής πρόσβασης. Δεν θέλουν να μοιραστούν τις υπηρεσίες των δικών τους femtocell με άλλους χρήστες, εφόσον δεν επωφελούνται. Από την άλλη πλευρά, οι φορείς εκμετάλλευσης προτιμούν την ανάπτυξη femtocells ανοικτής πρόσβασης, δεδομένου ότι είναι λιγότερο δύσκολο να χειριστούν τις παρεμβολές σε τέτοια δίκτυα. Για παράδειγμα, σε femtocells ανοικτής πρόσβασης, οι χρήστες του μακρο-επιπέδου κοντά σε ένα femtocell μπορούν να μεταβούν στο femtocell αν αυτοί αντιμετωπίζουν χαμηλή ποιότητα σήματος μέσω του macrocell .

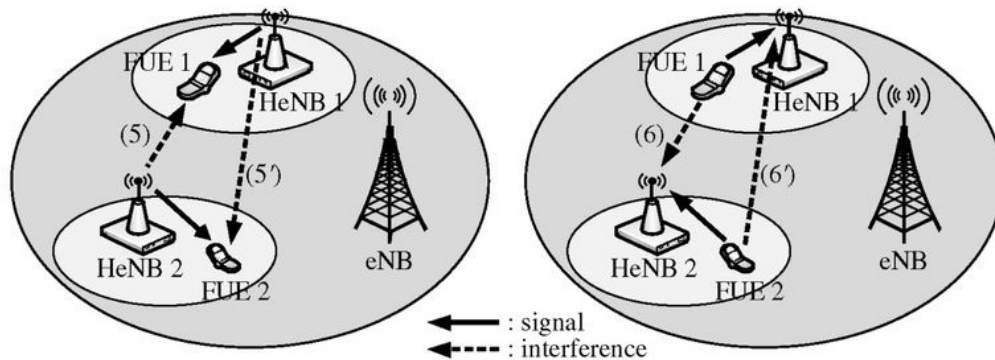
4.6 Παρεμβολές

Η μαζική και πυκνή ανάπτυξη των femtocells προκαλεί διάφορες τεχνικές προκλήσεις. Η σημαντικότερη κατά κοινή ομολογία, θεωρείται η διαχείριση παρεμβολών μεταξύ γειτονικών femtocells και μεταξύ σταθμών βάσης femtocell και macrocell[17]. Αρχικά, οι δύο αυτοί τύποι παρεμβολών που εμφανίζονται σε ένα δίκτυο femtocell δύο επιπέδων αρχιτεκτονικής (δηλ., ένα κεντρικό macrocell είναι επικαλυμμένο με LTE femtocells) έχουν ως εξής:

- Co-tier Interference : Αυτός ο τύπος παρεμβολής αντιστοιχεί σε συστατικά του δικτύου που ανήκουν την ίδια βαθμίδα, στην περίπτωσή μας εφόσον αναφερόμαστε σε femtocell δίκτυα, εμφανίζονται παρεμβολές μεταξύ γειτονικών femtocell. Για παράδειγμα, ένας σταθμός femtocell (επιτιθέμενος) προκαλεί co-tier παρεμβολή ανερχόμενης ζεύξης στους γειτονικούς σταθμούς femtocell (θύματα). Από την άλλη πλευρά, ένας σταθμός femtocell ενεργεί ως πηγή παρεμβολής co-tier κατερχόμενης ζεύξης προς τα γειτονικά femtocell. Ωστόσο, στα συστήματα OFDMA , οι παρεμβολές ανερχόμενης ή κατερχόμενης ζεύξης εμφανίζονται μόνο όταν ο επιτιθέμενος (ή η πηγή παρεμβολής) και το θύμα χρησιμοποιούν τα ίδια υπο-κανάλια. Επομένως, απαιτείται αποδοτική κατανομή υπο-καναλιών σε OFDMA-based δίκτυα femtocell για τον μετριασμό των παρεμβολών.



(a) Cross-tier interference



(b) Co-tier interference

Σχήμα 4.7: Τύποι Παρεμβολών σε δίκτυο Femtocell .

- Cross-tier Interference : Αυτός ο τύπος παρεμβολής εμφανίζεται μεταξύ των στοιχείων του δικτύου που ανήκουν σε διαφορετικές βαθμίδες, δηλαδή παρεμβολές μεταξύ femtocells και macrocells. Για παράδειγμα, οι σταθμοί femtocell και macrocell ενεργούν ως πηγή παρεμβολών (cross-tier) ανερχόμενης ζεύξης στο σταθμό βάσης macrocell και τα κοντινά femtocells, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, ο σταθμός βάσης macrocell και τα femtocells προκαλούν cross-tier παρεμβολή κατερχόμενης ζεύξης στο σταθμό βάσης femtocell και στα κοντινά macrocells, αντίστοιχα.

Και πάλι, στα δίκτυα που βασίζονται στη τεχνολογία OFDMA, παρουσιάζονται παρεμβολές cross-tier ανερχόμενης ή κατερχόμενης ζεύξης μόνο όταν χρησιμοποιούνται τα ίδια δευτερεύοντα κανάλια από τον επιτιθέμενο και το θύμα. Τα Femtocells αναπτύσσονται πάνω από τα υπάρχοντα macrocell και μοιράζονται την ίδια συχνότητα φάσματος με τα macrocells. Λόγω έλλειψης φάσματος, τα femtocells και τα macrocells πρέπει να επαναχρησιμοποιούν και/ή να μοιράζονται την συνολικά κατανομημένη ζώνη συχνοτήτων εν μέρει ή ολικά, γεγονός το οποίο οδηγεί σε cross-tier ή co-channel παρεμβολές. Ταυτόχρονα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη QoS στους χρήστες macrocell, τα femtocell θα πρέπει να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν λιγότερο εύρος ζώνης,

το οποίο οδηγεί σε co-tier παρεμβολές. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση του δικτύου θα μειωνόταν σημαντικά λόγω των co-tier και cross-tier παρεμβολών. Επιπλέον, παρεμβολές σημαντικού μεγέθους μπορεί να οδηγήσουν σε "Dead-zones" (νεκρές ζώνες), δηλαδή περιοχές όπου το QoS υποβαθμίζεται σημαντικά. Οι Deadzones δημιουργούνται λόγω του ασύμμετρου επίπεδο ισχύος μετάδοσης εντός του δικτύου και την απόσταση μεταξύ των χρηστών και του σταθμού βάσης ενός macrocell. Για παράδειγμα, ένας χρήστης macrocell τοποθετημένος σε όριο κυψέλης και μεταδίδοντας σε υψηλή ισχύ μπορεί να δημιουργήσει μια deadzone στο κοντινό femtocell κατά τη μετάδοση uplink που οφείλεται σε co-channel παρεμβολές. Αφετέρου, στην μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης, λόγω του μεγάλου path-loss και του φαινομένου σκίασης, ένας χρήστης macrocell στα όρια του cell μπορεί να αντιμετωπίσει σοβαρές co-channel παρεμβολές από τα κοντινά femtocells. Έτσι, είναι απαραίτητο να υιοθετηθεί μια αποτελεσματική λύση η οποία θα μετριάσει τις co-tier παρεμβολές και θα μειώσει τις cross-tier παρεμβολές, προκειμένου να ενισχύσει την απόδοση του συνολικού δικτύου. Σε δίκτυα femtocell που βασίζονται σε OFDMA, λόγω ευελιξίας στην κατανομή φάσματος, ορθογώνιοι υπο-φορείς μπορούν να εκχωρηθούν σε femtocell και macrocell. Αυτό δίνει στα femtocell που βασίζονται στο OFDMA ένα πλεονέκτημα έναντι των συστημάτων CDMA όσον αφορά την αποτελεσματική χρήση του φάσματος συχνοτήτων. Στο σχήμα 4.7 απεικονίζονται όλα τα πιθανά σενάρια παρεμβολών σε ένα OFDMA-based δίκτυο femtocell.

4.7 Άλλα θέματα Femtocell

Υπάρχουν ορισμένα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν όσον αφορά τον βασικό σχεδιασμό και τη ρύθμιση του συστήματος.

- **Θέματα φάσματος:**

Το φάσμα είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κινδύνου, ειδικά όταν απαιτούνται μεγάλα ποσά δεδομένων. Ο προγραμματισμός του διαθέσιμου φάσματος ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τον πιθανό τεράστιο αριθμό femtocell μπορεί να απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθεί η λειτουργία ενός καναλιού με κύριους σταθμούς βάσης.

- **Θέματα κανονιστικής ρύθμισης:**

Τα δίκτυα Femtocell λειτουργούν σε αδειοδοτημένο ή ρυθμιζόμενο φάσμα. Σε αντίθεση με το Wi-Fi που λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, τα femtocell χρειάζονται κανονιστική έγκριση. Οι κανονισμοί φάσματος και ασύρματης επικοινωνίας διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Μπορεί επίσης να απαιτείται διεθνής συμφωνία, διότι οι ιδιώτες μπορούν να μετακινούν femtocell από τη μια χώρα στην άλλη.

- **Θέματα υγείας:**

Με μεγάλη ευαισθητοποίηση του κοινού για τους πιθανούς κινδύνους της

ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων, ένα βασικό ζήτημα είναι το θέμα της υγείας και της ασφάλειας. Δεδομένου ότι το femtocell είναι ένας κυψελοειδής σταθμός βάσης, θα μπορούσε να υπάρξει δημόσια ανησυχία σχετικά με τα επίπεδα ραδιοσυχνοτήτων που λαμβάνονται. Ωστόσο, τα επίπεδα ισχύος που εκπέμπουν τα femtocell είναι μικρά ενώ δεν υπερβαίνουν τα περισσότερα σημεία πρόσβασης Wi-Fi τα οποία είναι κοινά σε πολλά σπίτια. Ως αποτέλεσμα, από τη βιομηχανία προκύπτει το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν προβλήματα υγείας που πρέπει να προκαλέσουν ανησυχία.

5. Στρατηγικές Ενεργειακής Απόδοσης Σε Πυκνές Δομές Small Cells

5.1 Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις για υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και την ταχεία ανάπτυξη του 5G στις αστικές περιοχές, παρουσιάστηκε το φαινόμενο των πυκνών δομών από κυψελωτούς σταθμούς βάσης. Στην περίπτωση μας, εξετάζουμε την ανάπτυξη πυκνών υποδομών φεμτοσελλ. Τα Φεμτοσελλς εξυπηρετούν ένα μικρό αριθμό χρηστών μέσα σε μια μικρή περιοχή κάλυψης, απαιτώντας μικρή ποσότητα ενέργειας σε αντίθεση με άλλα small cells όπως picocells ή microcells και η αναπτυξή τους αποτελεί συνήθως ιδιωτική πρωτοβουλία. Αρχικά θα πρέπει να καθορίσουμε τις διαθέσιμες πολιτικές πρόσβασης για τα femtocells [18].

Η πολιτικά ανοικτής πρόσβασης παρέχει εξυπηρέτηση σε όλους τους χρήστες, ακόμη και σε μη εγγεγραμμένους χρήστες macrocell οι οποίοι βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψης του εκάστοτε femtocell. Με αυτόν τον τρόπο ένας χρήστης που βρίσκεται κοντά σε αρκετά femtocell ανοικτής πρόσβασης έχει την δυνατότητα να επιλέξει από ποιον σταθμό βάσης θα εξυπηρετηθεί, ώστε να βρεί το femtocell που θα του προσφέρει την καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Τα femtocells ανοικτής πρόσβασης βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του δικτύου και επομένως βρίσκουν εφαρμογή σε δημόσιους χώρους και κτίρια. Παρ'όλα αυτά, η λειτουργία υπό αυτή την πολιτική πρόσβασης, αντιμετωπίζει έντονη υποβάθμιση της απόδοσης που απολαμβάνει ο κάθε χρήστης, καθώς θα πρέπει οι περιορισμένοι πόροι να διανεμηθούν μεταξύ των ενεργών χρηστών. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων προτιμούν συνήθως τη λειτουργία ανοικτής πρόσβασης επειδή επεκτείνει την κάλυψη σε χρήστες macrocell με λιγότερο κίνδυνο για παρουσίαση παρεμβολών μεταξύ των καναλιών.

Η πολιτική κλειστής πρόσβασης μονοπωλεί το backhaul του femtocell ως προς όφελος των χρηστών του femtocell. Αυτή η λειτουργία αποτρέπει έναν χρήστη που δεν ανήκει στην κλειστή ομάδα συνδρομητών (Closed Subscriber Group CSG) από την πρόσβαση στο femtocell, παρέχοντας έτσι δυνατότητες απορρήτου και ασφάλειας στους χρήστες του. Επίσης εξασφαλίζει την κάλυψη υψηλής απόδοσης και τον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων στους συνδρομητές, ικανοποιώντας έτσι στο μέγιστο τις ανάγκες των συνδρομητών. Ακόμη και σε περίπτωση που το δίκτυο χαρακτηρίζεται από αυξημένη πυκνότητα, οι χρήστες που ανήκουν στην CSG έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους, εξαιτίας της ιδιότητας του δικτύου να αρνείται να μοιραστεί τους περιορισμένους πόρους με τους μη συνδρομητές. Ως εκ τούτου οι περισσότεροι ιδιοκτήτες femtocell επιλέγουν να λειτουργούν σε κατάσταση κλειστής πρόσβασης.

Οι παραπάνω πολιτικές πρόσβασης αποτελούν ανελαστικές τεχνικές που περιορίζουν την υπηρεσία σε συγκεκριμένους τύπους χρηστών. Για να αντισταθμιστούν τα χαρακτηριστικά ανοικτής και κλειστής πρόσβασης, εξελίχθηκε μια

νέα πολιτική πρόσβασης, η υβριδική πρόσβαση. Η πολιτική υβριδικής πρόσβασης επιτρέπει σε συγκεκριμένο αριθμό εξωτερικών χρηστών να έχουν πρόσβαση σε περιορισμένο femtocell backhaul χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα των υπηρεσιών των χρηστών του femtocell, ειδικά των εγγεγραμμένων. Καθώς τα femtocell υβριδικής πρόσβασης παρέχουν υπηρεσίες χαμηλής ποιότητας σε εξωτερικούς χρήστες macrocell, η συνολική κίνηση του δικτύου διατηρείται πάνω από το μέσο επίπεδο απόδοσης που επιτυγχάνεται μόνο μέσω του macrocell. Η λειτουργία υβριδικής πρόσβασης επιλέγει και εξυπηρετεί συγκεκριμένους εξωτερικούς χρήστες μαζί με τους εγγεγραμμένους χρήστες. Οι χρήστες macrocell που προκαλούν παρεμβολές επιλέγονται και εξυπηρετούνται από υβριδικά femtocell, ελαχιστοποιώντας έτσι την απειλή για παρεμβολές μεταξύ καναλιών. Με την ανάπτυξη περισσότερων ιδιωτικών femtocell που λειτουργούν υπό συνθήκες κλειστής πρόσβασης, προκαλείται μεγαλύτερη επιβάρυνση σε ολόκληρο το δίκτυο μέσω παρεμβολών και ιδιαίτερα σε femtocell που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απόδοσης των femtocell και της ποιότητας υπηρεσιών προς τους συνδρομητές.

Οι προσεγγίσεις στα [19],[20] προσπαθούν να ξεπεράσουν τις προκλήσεις που προκύπτουν από τις περιπτώσεις αυξημένων παρεμβολών, αξιοποιώντας τα οφέλη που προσφέρουν η λειτουργία υβριδικής πρόσβασης, και παρουσιάζουν μειωμένο ποσοστό παρεμβολής και αυξημένη απόδοση των χρηστών που υιοθέτησαν υβριδική πρόσβαση. Περαιτέρω έρευνα, όπως παρατηρούμε στα [21] και [22], αφορούσε τη λειτουργία ύπνου και τις επιπτώσεις της στο σύνολο της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου. Σε αυτές τις εργασίες παρουσιάζεται εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας κοντά στο 50% σε δίκτυα femtocell σε σχέση με σενάρια που δεν υλοποιούν την λειτουργία sleep mode.

Σε αυτή την εργασία, αναπτύσσουμε μεθόδους με σκοπό να εντοπίσουμε σταθμούς βάσης που βλάπτουν το δίκτυο περισσότερο από ό,τι το ωφελούν και να τους απενεργοποιήσουμε. Ωστόσο, η πλήρης απενεργοποίηση των femtocell δεν είναι ιδανική για την περίπτωσή μας, διότι το δίκτυο πιθανώς να απαιτήσει μια άμεση επανενεργοποίηση του συγκεκριμένου σταθμού βάσης όταν αυτό είναι απαραίτητο. Ωστόσο, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο sleep mode που απενεργοποιεί συγκεκριμένα εξαρτήματα του femtocell που διευκολύνουν την επιστροφή σε κατάσταση πλήρους λειτουργίας όταν χρειάζεται. Η συγκεκριμένη μέθοδος μας βοηθά να βελτιώσουμε την ενεργειακή απόδοση και να μετριάσουμε τις παρεμβολές στα femtocell καθώς μειώνουμε τον αριθμό των ενεργών σταθμών βάσης. Συγκεκριμένα, οι συστοιχίες femtocell ή clusters χρησιμοποιούν έναν μηχανισμό εναλλαγής ύπνου-αφύπνισης σταθμού βάσης για να επιτύχουν ισορροπία μεταξύ καθυστέρησης και κατανάλωσης ενέργειας με κέρδη που φτάνουν τα 40% όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Εκτός από την λειτουργία sleep mode, χρησιμοποιούμε επίσης την πολιτική υβριδικής πρόσβασης για να μειώσουμε τις παρεμβολές μεταξύ των femtocell και να βελτιώσουμε την απόδοση των macrocell.

Με βάση αυτή την έρευνα, ένα υβριδικό femtocell θα εξυπηρετεί μόνο εξωτερικούς χρήστες που βρίσκονται στο CSG κάποιου άλλου μέλος του cluster μαζί με τη προϋπόθεση ότι το τελευταίο θα τεθεί σε sleep mode. Έπειτα από πολλές προσομοιώσεις, μπορούμε να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για να επαληθεύσουμε τις μεθόδους μας όσον αφορά την αύξηση του ρυθμού δεδομένων, την συνολική χωρητικότητα των clusters και την μείωση των παρεμβολών

τόσο για χρήστες femtocell όσο και για τους χρήστες macrocell .

Η παρακάτω προσομοίωση είναι δομημένη ως εξής: Στην επόμενη ενότητα περιγράφουμε το σύστημα μας και γενικά στοιχεία όσον αφορά το περιβάλλον προσομοίωσης. Επομένως, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται καθώς και οποιαδήποτε μαθηματική εξίσωση έχουμε χρησιμοποιήσει και ακολουθεί η αξιολόγηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που λάβαμε μέσω των προσομοιώσεων. Τέλος, αναλύουμε τα συμπεράσματά μας και προσφέρουμε προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της εργασίας.

5.2 Περιβάλλον Προσομοίωσης και Μεθοδολογία

Η ανάπτυξη του προσομοιωτή μέσω του οποίου εφαρμόζουμε το μοντέλο μας έχει βασιστεί στο περιβάλλον Matlab, το οποίο προσφέρει δυνατότητες για εύκολη, γρήγορη και αποτελεσματική διεξαγωγή προσομοιώσεων καθώς και εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσω των οποίων θα καταλήξουμε στα συμπεράσματά μας.

Οι προσομοιώσεις μας βασίζονται σε ένα δίκτυο από 9 macrocells με τον σταθμό βάσης να βρίσκεται στο κέντρο καθενός, τα οποία μεταδίδουν στα 46dBm με την ακτίνα κάθε κυττάρου να καλύπτει τα 250m. Στην περιοχή κάλυψης κάθε macrocell βρίσκονται τυχαία αναπτυγμένα femtocells και οι συνδρομητές τους. Κάθε femtocell έχει την δυνατότητα να εξυπηρετεί μέχρι τρεις συνδρομητές ταυτόχρονα, ενώ και οι χρήστες του επιπέδου Macrocell έχουν αναπτυχθεί τυχαία επίσης. Όλες οι τιμές των παραμέτρων βασίστηκαν στις οδηγίες 3GPP όσον αφορά το LTE-A και τον προσομοιωτή LTE στο [23].

Πίνακας 5.1: Παράμετροι Προσομοίωσης

| Παράμετρος | Τιμή |
|----------------------------------|-----------------|
| #Macrocells | 9 |
| Ακτίνα Macrocell | 250m |
| #Femtocells | 250,350,450,550 |
| #Subscribers (σε κάθε femtocell) | 1-3 |
| #Χρήστες Macrocell | 140 |
| Εύρος Ζώνης | 20 MHz |
| Carrier frequency | 2 GHz |
| Ισχύς Μετάδοσης (BS) | 46 dBm |
| Μέγιστη Ισχύς Μετάδοσης (FBS) | 18 dBm |

Προκειμένου να αξιολογηθεί το μοντέλο μας, εστιάζουμε στα κέρδη απόδοσης των σταθμών βάσης και του cluster, όσον αφορά την επίδραση στο ρυθμό δεδομένων για όλους τους χρήστες του δικτύου. Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε τα βασικά στοιχεία του συστήματός μας.

Πρώτον, πρέπει να αξιολογήσουμε τις επιπτώσεις του μοντέλου μας στο ρυθμό δεδομένων του χρήστη. Αρχικά, στο μοντέλο μας χρησιμοποιούμε την αρχιτεκτονική Long Term Evolution Advanced (LTE-A) και την τεχνολογία ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) [24]. Οι πυκνές δομές small cell κινητών δικτύων επωφελούνται από την ευέλικτη κατανομή των διαθέσιμων πόρων φάσματος μέσω της OFDMA, επιτρέποντας τη δημιουργία πολύπλοκων στρατηγικών κατανομής φάσματος. Όσον αφορά τον υπολογισμό των απαραίτητων παραμέτρων όπως path loss, ακολουθούμε τις προδιαγραφές LTE-A [25]. Προκειμένου να μετρηθεί η στάθμη ισχύος κάθε femtocell, πρέπει να λάβουμε εν γνώση τη θέση των femtocell μέσα στην περιοχή κάλυψης macrocell. Λόγω παρεμβολών, ένα femtocell κοντά στα όρια του macrocell έχει τελείως διαφορετική 'αποτελεσματική' εμβέλεια σε σύγκριση με ένα femtocell που βρίσκεται στο κέντρο του macrocell. Συνεπώς, ρυθμίζουμε τη στάθμη ισχύος του femtocell με ένα μέγιστο επίπεδο ισχύος P_{max} και μια σταθερή ακτίνα κάλυψης [26] λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ που λαμβάνεται από το πλησιέστερο macrocell στην ακτίνα στόχου femtocell r .

$$P_f = \min(P_m + G_j - PL_m(d) + PL_f(r), P_{max}) \quad (5.1)$$

Από την εξίσωση 5.1, το $PL_f(r)$ υποδηλώνει το path loss στην ακτίνα του κυττάρου στόχου r , P_m είναι η δύναμη μετάδοσης του πλησιέστερου macrocell και $PL_m(d)$ είναι η μέση απώλεια macrocell στην απόσταση femtocell d (εξαιρουμένης οποιασδήποτε πρόσθετης απώλειας τοίχων). Το G_j αντιπροσωπεύει το κέρδος κεραίας και περιγράφεται παρακάτω από την εξίσωση 5.2.

$$G = 10^{-PL/10} \quad (5.2)$$

Λόγω της ανάγκης για ένα ευεργετικό τρόπο απενεργοποίηση των σταθμών βάσης, σε αυτή την εργασία στηρίζομαστε σε [27] και [28]. Η αφύπνιση ενός απενεργοποιημένου femtocell αποτελείται από δύο διαδικασίες. Πρώτον, ένα πρόσθετο στοιχείο που ονομάζεται sniffer θα αισθανθεί μια αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος στην ανερχόμενη ζεύξη μετά από μια σύνδεση χρήστη-femtocell. Στη συνέχεια, ο sniffer θα ενεργοποιήσει το femtocell μόνο σε περίπτωση που ξεπεραστεί ένα προκαθορισμένο όριο που αντανακλά την επιθυμητή ακτίνα κάλυψης. Τέλος, καθώς το femtocell ξυπνά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να έχει πρόσβαση σε αυτό μέσω μιας διαδικασίας handover. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει την απενεργοποίηση επιλεγμένων εξαρτημάτων του femtocell, όπως ο πομπός και ο δέκτης ραδιοσυχνοτήτων, προκειμένου να επιτευχθεί ενεργειακή απόδοση. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια ποσότητα $P_{sniffer}$ η οποία είναι η κατανάλωση sniffer, υπολογίζεται σε ένα μέσο όρο κατανάλωσης $0.3W$ το οποίο αντισταθμίζεται από την συνολική εξοικονόμηση ενέργειας που αγγίζει το 40%.

Μόλις υπολογίσουμε την ισχύ του femtocell, θα πρέπει να καθορίσουμε τον λόγο σήματος προς παρεμβολή-συν-θόρυβο (SINR). Το $SINR$ κάθε χρήστη u

σε κάθε sub-carrier k , που εξυπηρετείται από macrocell ή femtocell, δίνεται από:

$$SINR_{u,k} = \frac{P_{B,k}G_{u,B,k}}{N_0\Delta f + \sum_{B'} P_{B',k}G_{u,B',k}} \quad (5.3)$$

Όπου $P_{B,k}$ είναι η ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης εξυπηρέτησης B του χρήστη για το sub-carrier k , και $G_{u,B,k}$ είναι το κέρδος καναλιού μεταξύ του χρήστη u και το cell εξυπηρέτησης B στο sub-carrier k . Επίσης, τα $P_{B',k}$ και $G_{u,B',k}$ αντιπροσωπεύουν τη δύναμη κάθε άλλου σταθμού βάσης που παρεμβαίνει (είτε femtocell είτε macrocell) και το κέρδος μεταξύ αυτών και του χρήστη u αντίστοιχα.

Η πρακτική ικανότητα του χρήστη m για το χρήστη είναι u που δόθηκε από [29]:

$$C_{u,k} = \Delta f \cdot \log_2(1 + \alpha SINR_{u,k}) \quad (5.4)$$

όπου το α ορίζεται από $\alpha = -1.5/\ln(5BER)$. Η συνολική απόδοση ενός σταθμού βάσης που εξυπηρετεί περιγράφεται παρακάτω:

$$T_B = \sum_u \sum_k \beta_{u,k} C_{u,k} \quad (5.5)$$

Θέτοντας $\beta_{u,k} = 1$ όταν ο υποκείμενος φορέας sub-carrier k έχει εκχωρηθεί στο χρήστη u και $\beta_{u,k} = 0$ διαφορετικά, η απόδοση του σταθμού βάσης που εξυπηρετεί βασίζεται στην κατανομή του φορέα, από το [30]

5.2.1 Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουμε στην προκειμένη περίπτωση οφείλονται στον αυξανόμενο αριθμό των οικιών που κατέχουν το δικό τους femtocell, δημιουργώντας ένα πυκνό δίκτυο. Εξηγώντας τα παραπάνω, ένας απλός χρήστης που δεν κατέχει δικό του femtocell, αντιμετωπίζει παρεμβολές εξαιτίας ενός διαφορετικού femtocell που βρίσκεται εγκατεστημένο κοντά στην τοποθεσία του. Για παράδειγμα, ένας χρήστης που βρίσκεται σε ένα συγκρότημα κατοικιών επιβαρύνεται με παρεμβολές από femtocells που εγκαθίστανται από χρήστες σε γειτονικά διαμερίσματα. Επιπλέον, τα ιδιόκτητα femtocell λειτουργούν κυρίως σε πολιτική κλειστής πρόσβασης, η οποία αποκλείει την περίπτωση μεταβίβασης κάποιου χρήστη σε άλλο femtocell. Από τη στιγμή που οι παρεμβολές σε ένα χρήστη φθάνουν σε υψηλά επίπεδα, αυξάνεται η επιθυμία του να αποκτήσει στο μέλλον τη δική του συσκευή για να καλύψει τις ανάγκες του. Τελικά, είναι πιθανό να καταλήξουμε σε μια κατάσταση όπου κάθε νοικοκυριό θα έχει ένα ιδιωτικό femtocell.

Λόγω της πυκνής δομής των femtocell παρουσιάζονται μερικά σημαντικά μειονεκτήματα. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι παρεμβολές μεταξύ των femtocells θα είναι σημαντικές καθώς και παρεμβολές που θα εμφανίζονται σε έναν χρήστη που δεν ανήκει στην λίστα συνδρομητών της συσκευής. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, η οποία πρέπει να αντιμετωπιστεί με αποτελεσματικό τρόπο. Στις επόμενες παραγράφους εξηγούμε πώς αντιμετωπίζουμε αυτά τα μειονεκτήματα. Συνδυάζουμε δύο τρόπους λειτουργίας, λειτουργία sleep mode και λειτουργία υβριδικής πρόσβασης.

- Στοχεύοντας την ενεργειακή απόδοση, χρησιμοποιούμε τη λειτουργία sleep mode που απενεργοποιεί τα περισσότερα από τα εξαρτήματα του σταθμού βάσης. Απενεργοποιούνται όλα τα εξαρτήματα εκτός από τα απαιτούμενα για τη σύνδεση δικτύου back-haul και ανίχνευση της δραστηριότητας των χρηστών. Ωστόσο, η αλλαγή της κατάστασης από sleep-mode σε πλήρως λειτουργική είναι πραγματικά γρήγορη. Όπως είναι εμφανές, ένα femtocell που λειτουργεί σε sleep-mode δεν προκαλεί παρεμβολές σε μη συνδρομητές και επίσης δεν εξυπηρετεί τους συνδρομητές του.
- Η λειτουργία υβριδικής πρόσβασης επιτρέπει σε συγκεκριμένο αριθμό χρηστών με προβλήματα σύνδεσης να έχουν πρόσβαση στο περιορισμένο backhaul χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα των υπηρεσιών που το femtocell παρέχει στους χρήστες του. Η υβριδική πρόσβαση έχει την υποχρέωση να επιλέξει και να προσθέσει τους εξωτερικούς χρήστες μαζί με τους εγγεγραμμένους χρήστες. Οι χρήστες που προκαλούν παρεμβολές επιλέγονται άμεσα και εξυπηρετούνται από υβριδικά femtocells, ελαχιστοποιώντας με τον τρόπο αυτό την απειλή για αλληλεπιδράσεις μεταξύ καναλιών. Κύριος στόχος για ένα femtocell που λειτουργεί υπό καθεστώς υβριδικής πρόσβασης είναι να εξυπηρετεί και να εκπληρώνει τις ανάγκες των χρηστών που συμμετέχουν στο Closed Subscriber Group (CSG). Για να επιτευχθεί αυτό, τα femtocells διατηρούν τους κύριους πόρους τους για τους συνδρομητές τους και διατηρούν ένα μέρος για τους μη συνδρομητές. Καθώς ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται από ένα femtocell μεγαλώνει, οι συνδρομητές μπορεί να φοβούνται ότι η απόδοσή τους θα υποβαθμιστεί. Οι πολιτικές εισαγωγής σε υβριδική πρόσβαση αντιμετωπίζουν συνήθως αυτό το πρόβλημα μέσω συστημάτων τιμολόγησης, όπου οι ιδιοκτήτες αποζημιώνονται για την παροχή των πόρων τους.

Στην περίπτωση μας, συνδυάζουμε τη λειτουργία sleep και τη λειτουργία υβριδικής πρόσβασης, καθώς επιδιώκουμε τόσο την εξοικονόμηση ενέργειας όσο και την αναβάθμιση του ρυθμού δεδομένων. Κάθε femtocell έχει την ευκαιρία να μεταβεί στη λειτουργία ύπνου αν οι χρήστες που εξυπηρετεί μπορούν να ανακατανεμηθούν σε ένα γειτονικό femtocell μέσω της διαδικασίας υβριδικής πρόσβασης.

Παρακάτω παραθέτουμε κίνητρα προς τα femtocell να επιλέξουν τη λειτουργία ύπνου ή την υβριδική πρόσβαση μέσω 3 εκδόσεων:

A) Κάθε ενεργός χρήστης που ανήκει σε απενεργοποιημένο femtocell πρέπει τουλάχιστον να ανακτήσει την απόδοσή του όταν ανακατανεμηθεί. Αυτή η προσέγγιση αναπτύσσεται πλήρως στο [31].

B) Το δεύτερο σενάριο χαλαρώνει τους περιορισμούς. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται η αύξηση του συνολικού ρυθμού δεδομένων που προσφέρεται από κάποιο femtocell. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνουμε την πιθανότητα να πληρούνται οι περιορισμοί καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των απενεργοποιημένων femtocell.

Κατ'άρχάς, εξετάζουμε εάν ένα femtocell είναι υποψήφιο για να μεταβεί σε sleep-mode ελέγχοντας εάν είναι δυνατή και αποτελεσματικότερη η ανακατανομή των χρηστών του σε ένα γειτονικό femtocell. Ακολούθως ορίσαμε τις απαιτήσεις προκειμένου να επιτύχουμε υψηλότερες επιδόσεις για το σύνολο των χρηστών που εξυπηρετούνται από το συγκεκριμένο σταθμό βάσης. Αυτό μπορεί να εκφραστεί από:

$$\prod_i \frac{(1 + aSINR_{i,New})^{1/n}}{(1 + aSINR_{i,Old})^{1/N}} \geq 1 \quad (5.6)$$

Όπου το N αντιπροσωπεύει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από το femtocell πριν από την ανακατανομή και το n αντιπροσωπεύει τους χρήστες μετά την ανακατανομή αντίστοιχα. Όταν πληρούνται αυτές οι απαιτήσεις, οι χρήστες που ανήκουν στο τρέχον femtocell θα προσπαθήσουν να συνδεθούν σε ένα γειτονικό femtocell.

Δεδομένου ότι ένα γειτονικό femtocell αποκτά ένα νέο χρήστη, πρέπει να αναδιανείμει τους πόρους του στο νέο αριθμό χρηστών που εξυπηρετεί. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι χρήστες που εξυπηρετούνται από αυτό το femtocell θα αντιμετωπίσουν μια μικρή υποβάθμιση της απόδοσής τους. Για να αντισταθμίσουμε αυτό το αρνητικό φαινόμενο, αναφερόμαστε σε δύο βελτιώσεις εμφάνισης. Κατ'άρχάς, οι χρήστες αντιμετωπίζουν σημαντικά λιγότερες παρεμβολές εξαιτίας του γειτονικού femtocell που είναι απενεργοποιημένο και σε περιπτώσεις που αυτό δεν καταστεί αρκετό, παρέχουμε μια ενίσχυση ισχύος που θα αντισταθμίσει οποιαδήποτε περαιτέρω απώλεια επιδόσεων. Το επαναξιολογημένο επίπεδο ισχύος υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

$$Power_f = \frac{-F_1 - F_2 + \sqrt{F_1^2 - 2F_1F_2 + 4F_1F_2S + F_2^2}}{2F_1F_2} \quad (5.7)$$

Όπου F_1 και F_2 έχουν οριστεί ως

$$F_1 = \frac{aG_1}{\Delta f * \sum P'_1G'_1}, F_2 = \frac{aG_2}{\Delta f * \sum P'_2G'_2} \quad (5.8)$$

Όπου G_1 και G_2 αντιπροσωπεύουν το κέρδος καναλιού και για τους δύο χρήστες του femtocell, το P_1 και το P_2 είναι η ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης που εξυπηρετεί το χρήστη σε κάθε περίπτωση, Δf το διάστημα sub-carrier. Επίσης, τα P'_1 , P'_2 και G'_1 και G'_2 υποδηλώνουν αντίστοιχα τη

δύναμη κάθε άλλου σταθμού βάσης που προκαλεί παρεμβολές (είτε femtocell είτε macrocell) τόσο για τους χρήστες όσο και για το κέρδος καναλιού. Τέλος, έχει οριστεί το S σαν βοηθητική μεταβλητή:

$$S = \left[\prod_i^2 1 + aSINR_{i,old} \right]^{\frac{N_2+1}{N_1}} \quad (5.9)$$

Όπου N_2 αντιπροσωπεύει τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από το νέο femtocell και N_1 από το αρχικό femtocell αντίστοιχα.

Αφού αξιολογήσουμε το απαιτούμενο επίπεδο ισχύος, ελέγχουμε ότι κανένα femtocell που ανήκει στο ίδιο cluster και δεν συμμετέχει στην ανταλλαγή χρήστη αντιμετωπίζει μείωση της απόδοσης. Εάν αυτός ο έλεγχος επιτύχει, η απενεργοποίηση και η ανταλλαγή χρηστών πραγματοποιούνται με επιτυχία.

Γ) Το τρίτο σενάριο απαιτεί η συνολική χωρητικότητα του cluster να είναι μεγαλύτερη ή ίση αυξάνοντας την πιθανότητα για απενεργοποιημένα femtocell. Παράλληλα, μεμονωμένοι συνδρομητές ενδέχεται να υποβαθμιστούν. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και προηγουμένως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι πρέπει να εκπληρώσουμε μια εξίσωση απαιτήσεων προκειμένου να επιλέξουμε ένα femtocell για να μεταβεί σε sleep mode. Αυτή η εξίσωση πρέπει να αντιπροσωπεύει ότι η συνολική απόδοση των συνδρομητών που εξυπηρετούνται από femtocells που ανήκουν στο παρών cluster, δεν υποβαθμίζεται μετά την ανακατανομή. Αυτό μπορεί να εκφραστεί από:

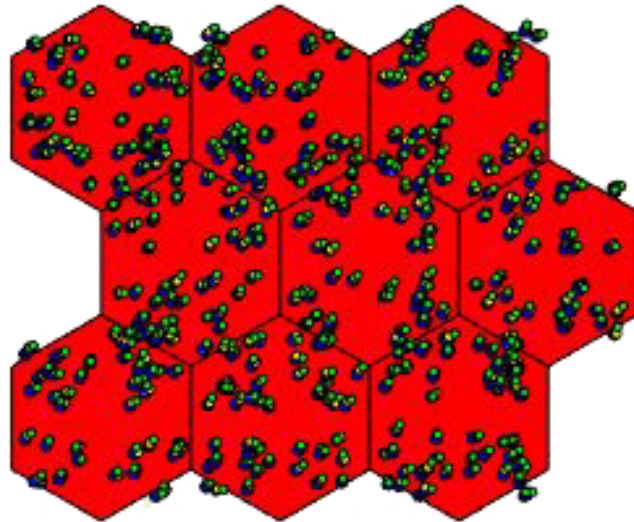
$$\prod_1^s \frac{(1 + aSINR_{i,New})^{1/n}}{(1 + aSINR_{i,Old})^{1/N}} \geq 1 \quad (5.10)$$

Όπου s αντιπροσωπεύει τον αριθμό των συνδρομητών που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης των femtocell που ανήκουν στο τρέχων cluster.

Παρόμοια με το προηγούμενο σενάριο, μετά την ανακατανομή, ορισμένοι χρήστες ενδέχεται να αντιμετωπίσουν υποβάθμιση της απόδοσης καθώς και μειωμένες παρεμβολές, εφόσον το femtocell λειτουργεί τώρα σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Επίσης, υπολογίζουμε και πάλι μια αύξηση ισχύος όπως πριν για να καλύψουμε τις ανάγκες των συνδρομητών.

5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

Αρχικά, παρουσιάζουμε ένα στιγμιότυπο του δικτύου σε μια τυχαία χρονική στιγμή στο παρακάτω σχήμα 5.1.



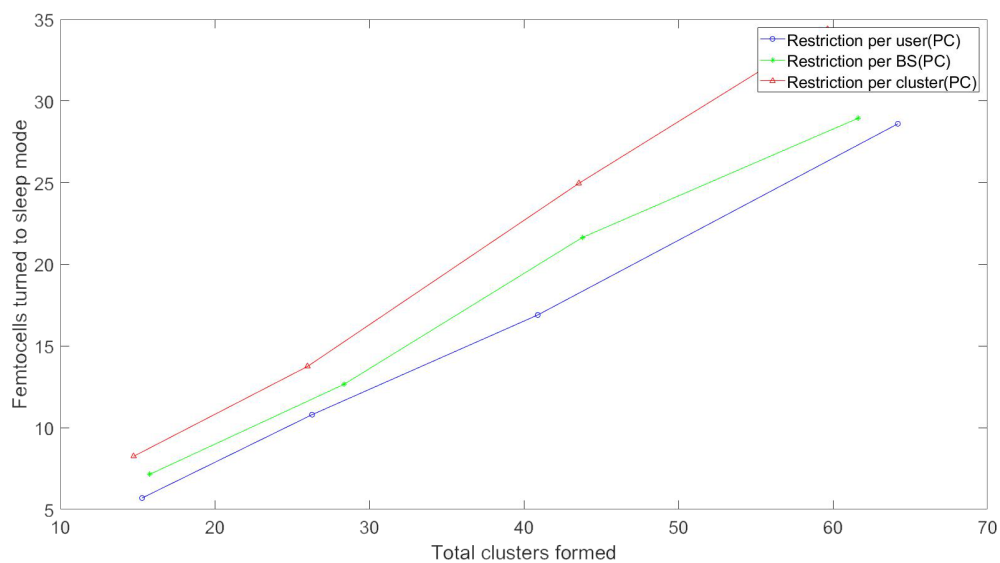
Σχήμα 5.1: Στιγμιότυπο δικτύου

Το σχήμα 5.2 δείχνει τον αυξημένο αριθμό των απενεργοποιημένων femto-cell μεταξύ των τριών σεναρίων που αναπτύχθηκαν παραπάνω, ανάλογα με την πυκνότητα ανάπτυξης του δικτύου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο αριθμός των femto-cell που βρίσκονται σε sleep mode κατά τη διάρκεια του δεύτερου σεναρίου, των οποίων οι περιορισμοί σχετίζονται με τη συνολική απόδοση του femto-cell, είναι υψηλότερος από το αρχικό σενάριο. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στους περιορισμούς του συγκεκριμένου θέματος, και πιο συγκεκριμένα στη συνολική απόδοση των χρηστών κάθε femto-cell. Επομένως, ένα femto-cell θα πάει σε κατάσταση ύπνου μόνο εάν η συνολική απόδοση του μετά την ανταλλαγή χρηστών είναι μεγαλύτερη ή ίση με προηγουμένως. Ο αυξημένος αριθμός απενεργοποιημένων femto-cell προέρχεται επίσης από την αύξηση ισχύος που πραγματοποιείται όταν δεν πληρούνται οι προηγούμενες απαιτήσεις. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνουμε να εξισώσουμε το απαιτούμενο επίπεδο απόδοσης με τον μηχανισμό ελέγχου ισχύος.

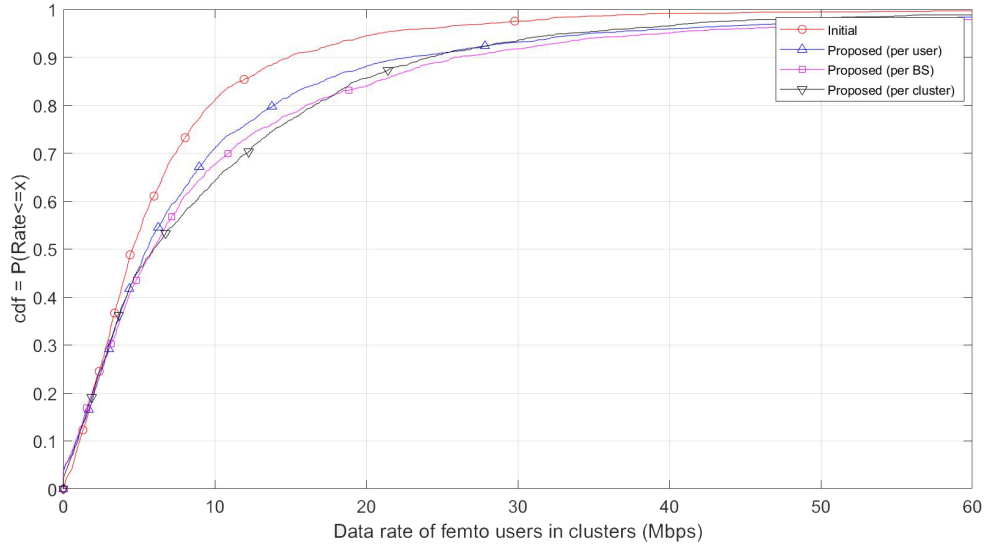
Σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο ελέγχου ισχύος όπου οι προσομοιώσεις μας έδειξαν κατά μέσο όρο 26 femto-cell σε κατάσταση sleep mode σε σχηματισμό 60 cluster, αυξήσαμε περίπου 2-3 φορές τον αριθμό των απενεργοποιημένων femto-cells σε αυτήν την έκδοση. Δεδομένου ότι οι περιορισμοί ήταν πιο χαλαροί, αυτό ήταν αναμενόμενο και ως εκ τούτου το ίδιο συνέβη και όσον αφορά το τρίτο σενάριο. Οι απαιτήσεις για την τρίτη περίπτωση, οι οποίες αφορούν την απόδοση του συνολικού συμπλέγματος (cluster), είναι ακόμη πιο ελαστικές και ο αριθμός των απενεργοποιημένων femto-cell έφτασε στο ανώτερο σημείο στα πλαίσια αυτής της εργασίας, το οποίο είναι τα 34 femto-cell σε sleep mode σε κατά μέσο όρο 60 σχηματισμένες συστάδες.

Εκτός από τον αριθμό των femto-cell που εισέρχονται σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, πρέπει να απεικονίσουμε και την απόδοση των συνδρομητών των femto-cell που ανήκουν στο σύμπλεγμα. Το σχήμα 5.3 απεικονίζει τη βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, που προέρχεται τόσο από την έξυπνη

ανακατανομή των χρηστών όσο και από τον μετριασμό των παρεμβολών στην περιοχή λόγω απενεργοποιημένων σταθμών βάσης. Ενώ ο αριθμός προβάλλει τη συσσωρευμένη απόδοση των συνδρομητών, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι συνδρομητές κάθε femtocell θα συναντήσουν κέρδη στην απόδοση τους ή στην χειρότερη περίπτωση η απόδοση τους θα κυμαίνεται στα αρχικά πλαίσια. Διασφαλίζουμε ότι κανένας από αυτούς δεν βιώνει μεμονωμένα μείωση του ρυθμού δεδομένων, λόγω των επιβαλλόμενων περιορισμών. Η ικανοποίηση των αναγκών των συνδρομητών από πλευράς απόδοσης προέρχεται και από τον μηχανισμό ελέγχου ισχύος. Η αύξηση της ισχύος, ωθεί το femtocell να φτάσει σε υψηλότερα επίπεδα απόδοσης και ως αποτέλεσμα να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των χρηστών του.



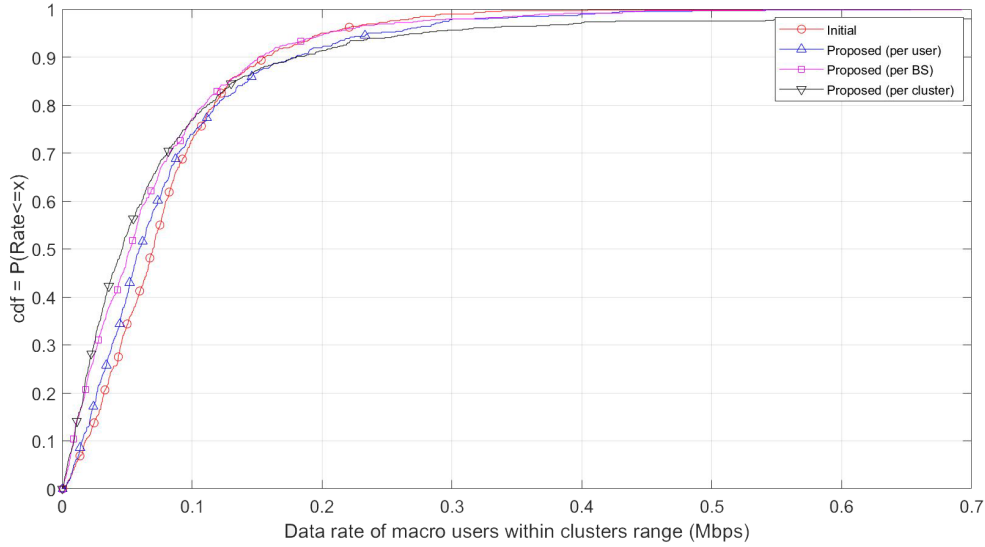
Σχήμα 5.2: Number of femtocells turned to sleep mode



Σχήμα 5.3: Data rate of femto users in clusters (Mbps)

Οι χρήστες macrocell υποφέρουν επίσης από παρεμβολές. Ειδικά, λόγω της πυκνής φύσης του δικτύου μας, ένας χρήστης macrocell που βρίσκεται μέσα σε ένα cluster, επηρεάζεται από τη συνολική παρεμβολή από όλα τα κοντινά femtocell, πράγμα που σημαίνει ότι η απόδοσή του υποβαθμίζεται. Το σχήμα 333 απεικονίζει τη γραφική CDF των χρηστών μακροκυψελών που βρέθηκαν στην περιοχή των femtocell που ανήκουν σε ένα σύμπλεγμα. Η στρατηγική μας στοχεύει και απενεργοποιεί επιτυχώς ορισμένα επιλεγμένα femtocell προκειμένου να επηρεάσει θετικά άλλα femtocells με τον μετριασμό της συνολικής παρεμβολής.

Όσον αφορά τους macrocell χρήστες, στις εκδόσεις ελέγχου ισχύος, κάθε μείωση των παρεμβολών λόγω απενεργοποίησης του femtocell αντισταθμίζεται από την αύξηση που προκύπτει από την αύξηση της ισχύος. Παρόλα αυτά, οι macrocell χρήστες δεν θα βιώσουν καμία σημαντική μείωση των επιδόσεων, συγκρίνοντας τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 5.4: Data rate of macro users in clusters (Mbps)

5.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη νέων και βελτιωμένων μεθόδων προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός των απενεργοποιημένων κυττάρων και να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση των δικτύων small cell. Χρησιμοποιήσαμε τη λειτουργία υβριδικής πρόσβασης και ύπνου και δημιουργήσαμε δύο εκδόσεις της μεθόδου ελέγχου ισχύος. Και στις δύο εκδόσεις ο σκοπός ήταν να παροτρύνουμε τους χρήστες που ανήκουν στη λίστα CSG των femtocell να δεχτούν το γεγονός, ότι χρήστες από τα γειτονικά femtocell θα εξυπηρετούνται από το δικό τους femtocell.

Φυσικά θα πρέπει να παρέχουμε στους συνδρομητές εγγυήσεις ότι οι επιδόσεις τους δεν πρόκειται να υποβαθμιστούν. Ένα femtocell θα μεταβεί σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, εάν και μόνο η απενεργοποίησή του θα ωφελήσει την απόδοση των συνδρομητών του femtocell, μειώνοντας παράλληλα τις παρεμβολές που δέχεται. Επίσης, οι χρήστες που συμμετέχουν στην ανακατανομή λαμβάνουν κίνητρα για να διασφαλίσουν ότι οι επιδόσεις τους δεν θα επηρεαστούν σε καμία περίπτωση αρνητικά. Στη συνέχεια, η ανακατανομή θα ολοκληρωθεί αν και μόνο αν η απόδοση αυτών των χρηστών πρόκειται να είναι μεγαλύτερη ή ίση σε σχέση με την αντίστοιχη από το αρχικό femtocell από το οποία προήλθαν.

Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου, που προκύπτει από τον μειωμένο αριθμό ενεργών σταθμών βάσης. Επιπλέον, οι συνδρομητές τόσο από το femtocell που εισήλθε σε sleep mode όσο και από το femtocell που δέχτηκε χρήστες από ένα άλλο γειτονικό, θα επωφεληθούν από τον αυξημένο ρυθμό δεδομένων και το μικρότερο βαθμό παρεμβολών, αυξάνοντας έτσι τη συνολική χωρητικότητα. Τέλος, η

εργασία μας διασφαλίζει ότι οι χρήστες macrocell που ανήκουν στην περιοχή κάλυψης ενός cluster δεν θα αντιμετωπίσουν σημαντική μείωση στην απόδοση τους.

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η εύρεση και διερεύνηση στρατηγικών για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στον τομέα των ετερογενών δικτύων και ιδιαίτερα όσον αφορά τα δίκτυα small cell. Αρχικά κάναμε μια εισαγωγή, όπου αναφέραμε γενικά και ιστορικά στοιχεία για την τεχνολογία των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ενώ στην συνέχεια αναλύουμε την εξέλιξη και την μετάβαση από τα πρώιμα στάδια (πρώτη γενιά) μέχρι και την τεχνολογία επόμενης γενιάς που αναμένεται να κυριαρχήσει με την είσοδο της νέας δεκαετίας.

Παρουσιάστηκαν επίσης διάφορες επιμέρους τεχνολογίες οι οποίες βοήθησαν στην ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας όπως την ξέρουμε σήμερα. Εστιάσαμε βέβαια στο LTE-Advanced το οποίο αποτελεί μέρος του ερευνητικού τομέα αυτής της εργασίας, αναλύσαμε το δίκτυο, την αρχιτεκτονική του συστήματος καθώς και την αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων. Ακόμα, στο πρώτο κεφάλαιο αναφερθήκαμε στις τεχνολογίες επόμενης γενιάς 5G, τις τεχνολογικές απαιτήσεις που προκύπτουν καθώς και τις προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ούτως ώστε το 5G να γίνει η επικρατέστερη τεχνολογία στον τομέα της κινητής τηλεφωνίας.

Στην συνέχεια, εισάγουμε την έννοια των small cells και αναλύουμε τις ανάγκες που προέκυψαν και οδήγησαν στην ανάπτυξη τους. Περιγράφουμε τους διάφορους τύπους small cells εν συντομία, όπως επίσης και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί η εγκατάσταση ενός τέτοιου σταθμού βάσης να ωφελήσει οποιοδήποτε δίκτυο, αυξάνοντας την χωρητικότητα και την κάλυψη του.

Το επόμενο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια λεπτομερή ανάλυση όσον αφορά τα ετερογενή δίκτυα. Δίνεται έμφαση στη χρήση σταθμών βάσης small cells και ιδιαίτερα στα femtocells τα οποία είναι η βάση για το ερευνητικό μέρος της εργασίας. Αναπτύσσεται η αρχιτεκτονική των σταθμών βάσης Femtocell περιγράφοντας τα επιμέρους συστατικά μέρη τους και ο τρόπος λειτουργίας τους. Επίσης περιγράφουμε τα πεδία εφαρμογής καθώς και τις πολιτικές πρόσβασης σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει ένα femtocell. Σημαντικό κομμάτι αποτελεί το σύνολο των παρεμβολών που δέχεται ένας σταθμός βάσης και ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά, ιδιαίτερα σε δομές με πυκνή ανάπτυξη femtocell. Τέλος, παρουσιάζουμε τα πλεονεκτήματα τα οποία μας προσφέρει η χρήση τους καθώς και προκλήσεις που μπορεί να προκύψουν κυρίως από την μαζική εγκατάστασή τους.

Το κυριότερο κομμάτι της παρούσας εργασίας, αποτελείται από την πρόταση μεθόδων με τις οποίες μπορούμε να μετριάσουμε την κατανάλωση ενέργειας σε ετερογενή δίκτυα που χαρακτηρίζονται από την μαζική και πυκνή εγκατάσταση σταθμών βάσης small cells. Αρχικά παρουσιάζεται και αναλύεται το περιβάλλον προσομοίωσης πάνω στο οποίο εργαστήκαμε και στην συνέχεια αναλύεται η προτεινόμενη μεθοδολογία για την επίλυση του προβλήματος της ενεργειακής κατανάλωσης. Γίνεται χρήση της υβριδικής πρόσβασης καθώς και της λειτουργίας sleep mode με την βοήθεια της οποίας θέτουμε ορισμένους σταθμούς βάσης σε μια κατάσταση μερικής αδράνειας. Ακολούθησαν προσομοιώσεις της λειτουργίας του δικτύου σε πραγματικές συνθήκες και προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Η παρούσα διπλωματική εργασία πέτυχε σημαντι-

κή μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να επηρεάζει αρνητικά την απόδοση που απολαμβάνουν οι χρήστες του δικτύου. Αυτό επιτεύχθη με την χρήση των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως καθώς και ενός μηχανισμού ελέγχου/αύξησης της ισχύς ενός femtocell σε περίπτωση που αυτό κριθεί αναγκαίο. Γίνεται αναπαράσταση των αποτελεσμάτων με την χρήση γραφικών παραστάσεων, αναλύονται λεπτομερώς τα οφέλη που προκύπτουν και τέλος αναφέρονται προοπτικές για μελλοντική εξέλιξη της παρούσας εργασίας.

5.5 Μελλοντική Εξέλιξη

Μελλοντικές εργασίες σχετικές με το υπάρχων ζήτημα ή το γενικότερο τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης των παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο. Αρχικά, μια φυσιολογική εξέλιξη του ερευνητικού τομέα της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να αποτελέσει ο ακριβής υπολογισμός των κερδών απόδοσης και της ενεργειακής κατανάλωσης που επιτυγχάνει η παραπάνω μεθοδολογία.

Τέλος, μπορεί να προκύψει περαιτέρω εξέλιξη και ανάπτυξη μέσω της δημιουργίας διαφορετικών αλγορίθμων ή ακόμα και μέσω της διαφοροποίησης των απαιτήσεων με σκοπό την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.

Ακρωνύμια

| | |
|------------------------|--------------------------------------------------|
| 1G | First Generation |
| 2G | Second Generation |
| 3G | Third Generation |
| 4G | Fourth Generation |
| 5G | Fifth Generation |
| LTE | Long Term Evolution |
| LTE-A | Long Term Evolution Advanced |
| UMTS | |
| AMPS | Analogue Mobile Phone System |
| TACS | Total Access Communication System |
| NMT | Nordic Mobile Telephone |
| J-TACS | Japanese Total Access Communication System |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| SMS | Short Message Service |
| IS-95 | Interim Standard 95 |
| EDGE | Enhanced Data rates for GSM Evolution |
| VoIP | Voice over Internet Protocol |
| CDMA | Code-Division Multiple Access |
| IMT-MC | IMT Multi-Carrier |
| W-CDMA | Wideband Code Division Multiple Access |
| PDC | Personal Digital Cellular |
| HSDPA | High Speed Downlink Packet Access |
| GPRS | General Packet Radio Service |
| HS-DSCH | High Speed Downlink Shared Channels |
| HSPA+ | Evolved High Speed Packet Access |
| DSCH | Downlink Shared Channel |
| QoS | Quality of Service |
| SINR | Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio |
| ITU | International Telecommunication Union |
| 3GPP | 3rd Generation Partnership Project |
| SAE | System Architecture Evolution |
| EPC | Evolved Packet Core |
| E-UTRAN | Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network |
| UTRAN | UMTS Terrestrial Radio Access Network |
| IMT | International Mobile Telecommunications |
| IMT-Advanced .. | International Mobile Telecommunications-Advanced |

| | |
|---------------------|-------------------------------------------------|
| WiMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access |
| UMB | Ultra Mobile Broadband |
| E-UTRA | Evolved Universal Terrestrial Radio Access |
| UE | User Equipment |
| eNB | Evolved Node B |
| HeNB | Home eNB |
| PDCP | Packet Data Convergence Protocol |
| RLC | Radio link control |
| MAC | Medium Access Control |
| PHY | Physical Layer |
| NAS | Non Access Stratum |
| ESM | EPS Session Management |
| MME | Mobility Management Entity |
| EMM | EPS Mobility Management |
| PDN | Packet Data Network |
| IMS | IP Multimedia Subsystem |
| RRC | Radio Resource Control |
| AS | Access Stratum |
| SDU | Session Data Unit |
| ARQ | Automatic Repeat reQuest |
| HARQ | Hybrid Automatic Repeat reQuest |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| USIM | Universal Subscriber Identity Module |
| HSS | Home Subscription Server |
| GUTI | Globally Unique Temporary Identity |
| S-GW | Serving Gateway |
| RNC | Radio Network Controller |
| GTP | GPRS Tunnelling Protocol |
| UP | User Plane |
| PDN-GW | Packet Data Network Gateway |
| PCRF | Policy and Charging Resource Function |
| DHCP | Dynamic Host Configuration Protocol |
| PCEF | Policy and Charging Enforcement Function |
| GRE | Generic Routing Encapsulation |
| PCC | Policy and Charging Control |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplex |
| OFDMA | Orthogonal Frequency-Division Multiple Access |
| RB | Resource Block |
| FDD | Frequency Division Duplex |
| TDD | Time Division Duplex |

| | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------|
| PAPR | Peak to Average Power Ratio |
| SC-FDMA | Single Carrier Frequency Division Multiple Access |
| ICIC | Inter-Cell Interference Coordination |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| MBMS | Multimedia Broadcast Multicast Services |
| MBSFN | MBMS Single-Frequency Network |
| SDO | Standards Development Organization |
| TSG | Technical Specification Group |
| WG | Work Group |
| RRM | Radio Resource Management |
| RF | Radio Frequency |
| TCO | Total Cost of Ownership |
| QoE | Quality of Experience |
| HetNet | Heterogenous Network |
| AP | Access Point |
| MNO | Mobile Network Operator |
| MVNO | Mobile Virtual Network Operator |
| FTTX | Fiber To The x |
| FaaS | Fiber as a Service |
| SCaaS | Small Cell as a Service |
| EAP-SIM | Extensible Authentication Protocol SIM |
| EAP-AKA | Extensible Authentication Protocol Authentication and Key Agreement |
| MGW | Media GateWay |
| AAA | Authentication Authorization Accounting |
| IPSec | Internet Protocol Security |
| HeMS | HeNodeB Management System |
| OAMP | Operations Administration Maintenance and Provisioning. |
| SCTP | Stream Control Transmission Protocol |
| IPv4 | Internet Protocol version 4 |
| IPv6 | Internet Protocol version 6 |
| CSG | Closed Subscriber Group |
| BS | Base Station |
| PCI | Physical Cellular Identity |
| CDF | Cumulative Distribution Function |

Bibliography

- [1] “Ericsson mobility report june 2017,” <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017.pdf>, accessed: 2017-12-5.
- [2] ERICSSON, “Ericsson mobility report june 2017,” Ericsson AB, Tech. Rep., June 2017.
- [3] “About mobile technology and imt-2000,” <https://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html>, accessed: 2017-11-4.
- [4] “Requirements related to technical performance for imt-advanced radio interface(s),” <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008>, accessed: 2017-11-5.
- [5] “3gpp ongoing releases,” <http://www.3gpp.org/specifications/67-releases>, accessed: 2017-12-9.
- [6] “3gpp non-access stratum (nas),” <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/96-nas>, accessed: 2017-12-5.
- [7] “Lte world radio resource control (rrc),” <http://lteworld.org/specification/radio-resource-control-rrc>, accessed: 2017-12-5.
- [8] “Lte world packet data convergence protocol (pdcp),” <http://lteworld.org/specification/packet-data-convergence-protocol-pdcp>, accessed: 2017-12-5.
- [9] “Lte world radio link control (rlc),” <http://lteworld.org/specification/radio-link-control-rlc>, accessed: 2017-12-5.
- [10] “Lte world medium access control (mac),” <http://lteworld.org/specification/medium-access-control-mac>, accessed: 2017-12-5.
- [11] L. Gavrilovska, V. Rakovic, and V. Atanasovski, “Visions towards 5g: Technical requirements and potential enablers,” vol. 87, pp. 1–27, 05 2015.
- [12] “Internet of everything: A \$4.6 trillion public-sector opportunity,” http://internetofeverything.cisco.com/sites/default/files/docs/en/ioe_public_sector_vas, accessed: 2017-11-15.
- [13] D. R. Dr. Yan Q Bian, “Small cells big opportunities,” Huawei, Tech. Rep., February 2014.

- [14] “Small cell definition,” <https://www.smallcellforum.org/about/about-small-cells/small-cell-definition/>, accessed: 2017-12-5.
- [15] “Femtocell history,” <https://www.thinksmallcell.com/FAQs/femtocell-history.html>, accessed: 2017-11-4.
- [16] 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>
- [17] 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. 86–95, June 2012.
- [18] S. Padmapriya and M. Tamilarasi, “A case study on femtocell access modes,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 1534 – 1542, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616301185>
- [19] A. Ahmed, M. Tariqul Islam, M. Ismail, and M. Ghanbarisabagh, “Dynamic resource allocation in hybrid access femtocell network,,” 02 2014.
- [20] A. Golaup, M. Mustapha, and L. B. Patanapongpibul, “Femtocell access control strategy in umts and lte,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 9, pp. 117–123, September 2009.
- [21] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, “Power savings in small cell deployments via sleep mode techniques,” in *2010 IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops*, Sept 2010, pp. 307–311.
- [22] S. Ali, M. Ismail, and R. Nordin, “Femtocell sleep mode activation based interference mitigation in two-tier networks,” *Procedia Technology*, vol. 11, no. Supplement C, pp. 1088 – 1095, 2013, 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313004520>
- [23] M. Simsek, T. Akbudak, B. Zhao, and A. Czylik, “An lte-femtocell dynamic system level simulator,” in *2010 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, Feb 2010, pp. 66–71.
- [24] H. Yin and S. Alamouti, “Ofdma: A broadband wireless access technology,” in *2006 IEEE Sarnoff Symposium*, March 2006, pp. 1–4.
- [25] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9),” 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2010.
- [26] H. Claussen, “Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure,” pp. 1 – 5, 10 2007.

- [27] H. Claussen, I. Ashraf, and L. T. W. Ho, "Dynamic idle mode procedures for femtocells," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 95–116, 2010. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/bltj.20443>
- [28] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. T. W. Ho, "Sleep mode techniques for small cell deployments." *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 8, pp. 72–79, 2011. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/cm/cm49.html#AshrafBH11>
- [29] H. Lei, L. Zhang, X. Zhang, and D. Yang, "A novel multi-cell ofdma system structure using fractional frequency reuse," in *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Sept 2007, pp. 1–5.
- [30] P. Lee, T. Lee, J. Jeong, and J. Shin, "Interference management in LTE femtocell systems using Fractional Frequency Reuse," in *12th International Conference on Advanced Communication Technology 2010 (ICACT'10)*, vol. 2, 2010, pp. 1047–1051.
- [31] C. Bouras and G. Diles, "Distributed sleep mode power control in 5g ultra dense networks," in *15th International Conference on Wired & Wireless Internet Communications (WWIC 2017), St. Petersburg, Russia*, June 21 - 23 2017, pp. 65–76.