



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ &
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εξοικονόμηση ενέργειας με έλεγχο
ισχύος σε 5G δίκτυα**

Θεόδωρος Ι. Μούλιας

A.M: 4137

Υπεύθυνος καθηγητής: Καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας

Επιβλέπων: Δρ. Γεώργιος Δηλές

Ιούλιος 2019

Ευχαριστίες

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν και βοήθησαν στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Κυρίως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Χρήστο Μπούρα που μου έδωσε την ευκαιρία να αναλύσω ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες επίσης προς τον επιβλέποντα και Διδάκτορα του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής κ. Γεώργιο Δηλέ για την βοήθειά του, την καθοδήγησή του καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Πέρα και πάνω από όλα όμως, ευχαριστώ τους γονείς μου, για την αμέριστη και ανιδιοτελή ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη.

Τέλος, στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας και με βάση το θέμα της, πραγματοποιήθηκε δημοσίευση με τίτλο: «Energy savings in power control for 5G dense femtocells», Christos Bouras and Georgios Diles and Theodoros Moulías που παρουσιάστηκε στο συνέδριο BWCCA – 17 τον Νοέμβριο του 2017 [6].

Πάτρα, Ιούλιος 2019

Θεόδωρος Ι. Μούλιας

Περίληψη

Το LTE – A δημιουργήθηκε με σκοπό να καλύψει τη μεγάλη αύξηση της κυκλοφορίας σε κυψελοειδή δίκτυα που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια. Η αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης διαφορετικής εμβέλειας και δυνατοτήτων που δημιουργούν εξαιρετικά πυκνά δίκτυα είναι μια από τις λύσεις που θα χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να καλυφθεί η αυξημένη ζήτηση. Συστήματα λιγότερο ενεργοβόρα είναι απαραίτητα προκειμένου να περιοριστεί ο ενεργειακός αντίκτυπος μιας τέτοιας εκτεταμένης ανάπτυξης σταθμών βάσης (femtocells). Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε την εξοικονόμηση ενέργειας μιας τοπολογίας δικτύου που προκύπτει σε πυκνά αναπτυγμένα femtocells (clusters), εφαρμόζοντας ένα μηχανισμό αδρανοποίησής τους (sleep mode) και χρήση υβριδικής πρόσβασης καθώς και αύξηση της ισχύος μετάδοσης των σταθμών βάσης που δέχονται τους χρήστες από άλλους σταθμούς, που τέθηκαν σε αδράνεια. Επιπλέον, παρατηρούνται οφέλη ως προς το μετριασμό των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών καθώς και βελτίωση της απόδοσής τους. Τέλος, θεωρούμε ότι οι σταθμοί βάσης femtocells είναι υβριδικής πρόσβασης, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό τις μετακινήσεις χρηστών μεταξύ τους. Από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός μοντέλου συστήματος, εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις και παρατηρήθηκαν σημαντικά οφέλη ως προς την κατανάλωση ενέργειας της τοπολογίας δικτύου που εξετάσαμε. Με το μηχανισμό υβριδικής πρόσβασης καθώς και με την επαύξηση ισχύος μετάδοσης για τους σταθμούς βάσης που δέχονται χρήστες από τα αδρανοποιημένα femtocells, προέκυψαν οφέλη στην απόδοση των χρηστών καθώς και μετριασμός των παρεμβολών.

Abstract

The LTE - A was developed to cover the large traffic growth in cellular networks observed in recent years. Increasing the number of deployed base stations of different range and capabilities creating ultra-dense networks is one of the solutions that will be adapted in order to cover the demand to meet increased demand. Less energy consuming systems are necessary in order to mitigate the energy impact of such extensive deployment of femtocells. In this dissertation we study at the energy savings of a network topology that occurs in densely developed clusters by applying a sleep mode mechanism and using hybrid access policies as well as increasing the transmitting power of femto-base stations that accept users from other stations, which turn into sleep mode. In addition, there are benefits in terms of mitigating interference among users and improving their performance. Lastly, we believe that femto-base stations adapting hybrid access mode, thus allowing user relocation to other femto – base stations. From simulations performed with the help of a system model, several cases were studied, and significant energy consumption benefits of the network topology were observed. With the hybrid access mechanism as well as the transmission power increase for base stations that accepts users from slept femtocells, benefits have been generated in user performance as well as mitigation of interference.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Ακρωνύμια	2
Εισαγωγή.....	4
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	5
1.1 Ιστορική αναδρομή ασύρματων δικτύων	5
1.2 Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών	8
1.3 Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων πριν από την LTE	11
1.3.1. Η πρώτη 3G προτυποποίηση.....	12
1.4 Δραστηριότητες της ITU	14
1.4.1 IMT-2000 και IMT-Advanced	14
1.5 Προγράμματα οδήγησης για LTE και LTE-Advanced.....	17
1.6 Τυποποίηση του LTE.....	20
1.6.1 Η διαδικασία τυποποίησης	20
1.6.2 Η διαδικασία 3GPP	22
1.6.3 Η εξέλιξη 3G σε 4G	24
Κεφάλαιο 2 – LTE-A.....	27
2.1 Βασικές αρχές LTE - A	27
2.2 Προγραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι και προσαρμογή ρυθμού	28
2.3 Εκδόσεις LTE	29
2.3.1. LTE έκδοση 9	29
2.3.2. LTE έκδοση 10	31
2.3.3. LTE έκδοση 11	34
2.4.Τεχνολογίες LTE δικτύων	36
2.4.1 Τεχνολογία πολλαπλών φορέων	37
2.4.2 Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών	39
Κεφάλαιο 3 – Femtocells	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2 Αρχιτεκτονική.....	42
3.2.1 Περιοχές εφαρμογής.....	43
3.2.2 Πολιτικές πρόσβασης	44
3.2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης femtocell	45
3.3 Σενάρια παρεμβολών σε ετερογενείς αναπτύξεις	49
3.4 Διαχείριση παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα	66
3.4.1 Διαχείριση παρεμβολών	67
Κεφάλαιο 4 – Εξοικονόμηση ενέργειας με έλεγχο ισχύος.....	73
4.1. Εισαγωγή.....	73
4.2. Μοντέλο Εξοικονόμησης ενέργειας	75
4.3 Μοντέλο παρεμβολής.....	77
4.4 Προτεινόμενος έλεγχος ισχύος.....	78
4.5 Αξιολόγηση απόδοσης.....	80
4.6 Συμπεράσματα και Μελλοντικές εξελίξεις	85
Βιβλιογραφία.....	86
Παράρτημα: Δημοσίευση.....	89
Δημοσίευση που έγινε στα πλαίσια της προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.....	89

Ακρωνύμια

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

ABS: Almost Blank Subframes

AMPS:

BS: Base Station

CA: Carrier Aggregation

CDMA: Code Division Multiple Access

CEPT: European Conference of Postal and Telecommunications Administrations

CoMP: Coordinated Multi-Point

EDGE: Enhanced Data rates for Global Evolution

eICIC: enhanced Inter-Cell Interference Coordination

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FDD: Frequency Division Duplex

FPLMTS: Future Public Land Mobile Telecommunications Systems

FPLMTS: Future Public Land Mobile Telecommunications Systems

GPRS: General Packet Radio Services

GSM: Global System for Mobile communication

HeNB: home evolved NodeB

HII: High Interference Indicator

HSDPA: High Speed Downlink Packet Access

IP: Internet Protocol

ITU: International Telecommunication Union

LAN: Local Area Networks

LTE - A: Long Term Evolution – Advanced

MBSFN: Multicast/Broadcast Single-Frequency Network

MUE: Macro User Equipment

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OI: Overload Indicator
PAPR: Peak – to - Average Power Ratio
PBCH: Physical Broadcast Channel
PCFICH: Physical Control Format Indicator Channel
PCHH: Physical Downlink Control Channel
PCI: Physical Cell Identity
PDSCH: Physical Downlink Shared Channel
POTS: Plain Old Technology Services
PUCCH: Physical Uplink Control Channel
RAN: Radio Access Network
RBs: Resource Blocks
RNTP: Relative Narrowband Transmit Power
RNTP: Relative Narrowband Transmit Power
RRM: Radio Resource Management
SAE: System Architecture Evolution
SINR: Signal-To-Interference-Plus noise Power Ratio
TDD: Time Division Duplex
TDMA: Time Division Multiple Access
TD - SCDMA: Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UMTS: Universal Mobile Telecommunications System
UTRA: Universal Terrestrial Radio Access
WAN: Wide Area Networks

Εισαγωγή

Η δραματική αύξηση τα τελευταία χρόνια της χρήσης των κινητών δικτύων επικοινωνιών είχε ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη ανάπτυξη σταθμών βάσης femtocells με σκοπό να καλυφθεί αυτή η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη των συνδρομητών. Τα ετερογενή αυτά δίκτυα που αναπτύσσονται στις πόλεις είτε στον κλειστό χώρο, λόγω της ad hoc και πυκνής ανάπτυξής τους, δημιουργούν με τη σειρά τους σοβαρά προβλήματα παρεμβολών, επηρεάζοντας την απόδοση των χρηστών καθώς επίσης σπαταλούν πολύ ενέργεια, με αποτέλεσμα να μην είναι φιλικές προς το περιβάλλον οι αναπτύξεις τέτοιων δικτύων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει σε μια τοπολογία πυκνού δικτύου femtocell, εφαρμόζοντας μηχανισμούς υβριδικής πρόσβασης, μηχανισμούς sleep mode καθώς και έλεγχο ισχύος μετάδοσης των femtocells καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τους μηχανισμούς αυτούς ως προς την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται ιστορική ανάδρομη στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών καθώς και μια περιγραφή της μετάβασης από αυτά στα Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών. Στην συνέχεια εξετάζουμε μετάβαση από την πρώτη γενιά, το 1G, στο LTE και τα βήματα που έγιναν για την τυποποίησή του.

Στο Κεφάλαιο 2 αναφερόμαστε στην μετάβαση από το LTE στο LTE-A και στις νέες τεχνολογίες που αυτό εισήγαγε. Αναλύουμε τις διαφορές εκδόσεις του και τις τεχνολογίες που υιοθετήθηκαν στις αντίστοιχες εκδόσεις.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά στα femtocells της περιοχής εφαρμογής, τα πλεονεκτήματά τους και τις πολιτικές πρόσβασης σε αυτά. Ακόμη εξετάζουμε διάφορα σενάρια παρεμβολών και τρόπους μετριασμού αυτών.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά στο μοντέλο συστήματος που εξετάσαμε καθώς και στις προσομοιώσεις του συστήματος αυτού που πραγματοποιήσαμε στον εξομοιωτή, παρουσιάζοντας και αξιολογώντας τα αποτελέσματα που προέκυπταν από τις προσομοιώσεις αυτές.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή ασύρματων δικτύων

Οι τηλεπικοινωνίες έχουν εξελιχθεί με την πάροδο των χρόνων σε ένα πολύ προσιτό μέσο επικοινωνίας, ενώ στο παρελθόν αποτελούσαν προνόμιο μιας μικρής μόνο μερίδας ανθρώπων και επιχειρήσεων. Για να κατανοήσουμε τη σημερινή μορφή των κυψελοειδών δικτύων, είναι σημαντικό να εξετάσουμε την εξέλιξή τους μέσα στο χρόνο.

Οι τεχνολογίες κινητής επικοινωνίας συχνά χωρίζονται σε γενιές (generations), ξεκινώντας από τη γενιά 1G και καταλήγοντας στο LTE-A ή 4G που έχουμε σήμερα. Η Αμερικανική Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) ενέκρινε την πρώτη εμπορική υπηρεσία τηλεφωνίας το 1946, την οποία διαχειρίζεται η AT & T. Το 1947 η AT & T εισήγαγε επίσης την έννοια της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, η οποία κατέστη πρωταρχική για όλα τα επακόλουθα συστήματα κινητής επικοινωνίας. Παρόμοια συστήματα λειτούργησαν από πολλές μονοπωλιακές τηλεφωνικές υπηρεσίες και χειριστές καλωδίων κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 και της δεκαετίας του 1960, χρησιμοποιώντας ογκώδη εξοπλισμό που έκανε μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και παρείχε υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών για έναν πολύ περιορισμένο αριθμό χρηστών.

Τα αναλογικά κυψελοειδή συστήματα πρώτης γενιάς υποστηρίζουν τις «απλές υπηρεσίες παλαιάς τηλεφωνίας» (POTS – Plain Old Technology Services) - δηλαδή τη φωνή με ορισμένες σχετικές συμπληρωματικές υπηρεσίες. Με την εμφάνιση της ψηφιακής επικοινωνίας κατά τη δεκαετία του 1980, εμφανίστηκε η ευκαιρία να αναπτυχθεί μια δεύτερη γενιά προτύπων και συστημάτων κινητής επικοινωνίας, βασισμένα στη ψηφιακή τεχνολογία. Με αυτή, προέκυψε η ευκαιρία να αυξηθεί η χωρητικότητα των συστημάτων, να δοθεί μια σταθερότερη ποιότητα των υπηρεσιών και να αναπτυχθούν πολύ πιο ελκυστικές δυνατότητες για τις φορητές συσκευές [1].

Στην Ευρώπη, το GSM (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών – Global System for Mobile communication) αποτέλεσε το σχέδιο για την ανάπτυξη ενός Πανευρωπαϊκού Συστήματος Κινητής Τηλεφωνίας που ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 από την Ευρωπαϊκή Διάσκεψη Τηλεπικοινωνιών (CEPT)¹ και αργότερα συνεχίστηκε στο νέο Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI).

¹ Αποτελείται από τις διοικήσεις τηλεπικοινωνιών 48 χωρών.

Το πρότυπο GSM βασίστηκε στην πολλαπλή πρόσβαση χρονικού διαχωρισμού (TDMA – Time Division Multiple Access), όπως και στο πρότυπο US-TDMA και στο ιαπωνικό πρότυπο PDC που εισήχθησαν στο ίδιο χρονικό πλαίσιο. Μια κάπως μεταγενέστερη ανάπτυξη ενός προτύπου πολλαπλής πρόσβασης κώδικα-διαίρεσης (CDMA - – Code Division Multiple Access) που ονομάζεται IS-95 και ολοκληρώθηκε στις ΗΠΑ το 1993.

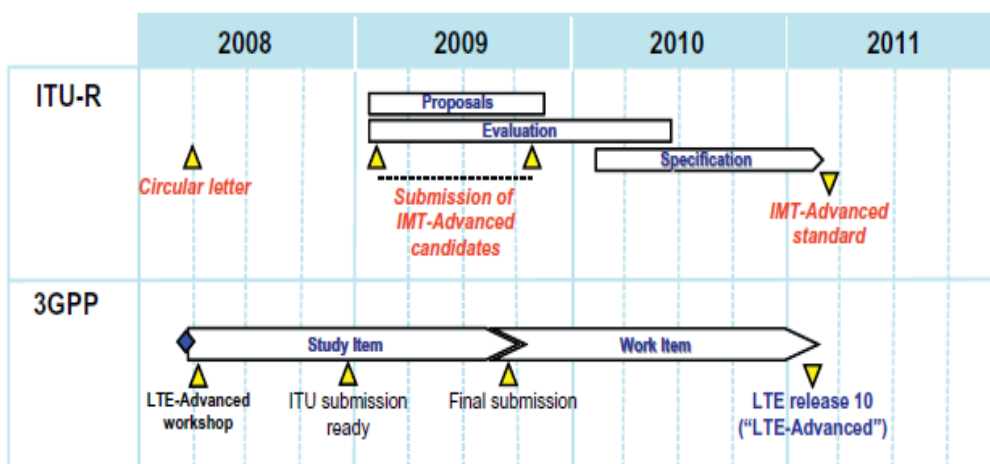
Η προσπάθεια για τυποποίηση ασύρματων δικτύων τρίτης γενιάς, ξεκίνησε στη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) τη δεκαετία του '80, πρώτα με την ονομασία *Future Public Land Mobile Mobile Telecommunications Systems (FPLMTS)*, που αργότερα μετονομάστηκε σε IMT-2000 [2]. Παράλληλα με την εκτεταμένη ανάπτυξη και εξέλιξη των συστημάτων κινητής επικοινωνίας 2G κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, καταβλήθηκαν σημαντικές προσπάθειες σε 3G ερευνητικές δραστηριότητες σε παγκόσμιο επίπεδο με σκοπό τη μοντελοποίηση του

Η πρώτη έκδοση του WCDMA Radio Access που αναπτύχθηκε στο TSG RAN (Radio Access Network) ονομάστηκε έκδοση 993 και περιείχε όλα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων IMT-2000 όπως ορίζονται από την ITU. Αυτό περιελάμβανε υπηρεσίες φωνής, εικόνες καθώς και υπηρεσίες δεδομένων. Η πρώτη σημαντική προσθήκη χαρακτηριστικών ασύρματης πρόσβασης στο WCDMA ήταν η HSPA, η οποία προστέθηκε στην έκδοση 5 με High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και την έκδοση 6 με Enhanced Uplink. Αυτά τα δύο αναφέρονται μαζί ως HSPA. Με το HSPA, το UTRA ξεπερνά τον ορισμό του κινητού συστήματος 3G και περιλαμβάνει επίσης τα ευρυζωνικά δεδομένα κινητής τηλεφωνίας.

Η εξέλιξη του 3G συνεχίστηκε το 2004, όταν διοργανώθηκε ένα εργαστήριο για την έναρξη εργασιών σχετικά με τη διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων 3GPP Long-Term Evolution (LTE). Το αποτέλεσμα του εργαστηρίου LTE ήταν ότι ένα στοιχείο μελέτης στο 3GPP TSG RAN δημιουργήθηκε τον Δεκέμβριο του 2004. Οι πρώτοι 6 μήνες δαπανήθηκαν για τον καθορισμό των απαιτήσεων ή των στόχων σχεδιασμού για το LTE. Αυτά τεκμηριώθηκαν σε μια τεχνική έκθεση 3GPP και εγκρίθηκαν τον Ιούνιο του 2005. Πιο αξιοσημείωτες είναι οι απαιτήσεις σχετικά με τον υψηλό ρυθμό δεδομένων στην άκρη των κυψελών και τη σημασία της χαμηλής καθυστέρησης, πέραν της κανονικής χωρητικότητας και των απαιτήσεων αιχμής δεδομένων. Επιπλέον, η ευελιξία φάσματος και η μέγιστη ομοιομορφία μεταξύ των λύσεων FDD και TDD είναι έντονη.

Η εξέλιξη των συστημάτων από 3G σε 4G προέκυψε από την ανάγκη δημιουργίας νέων υπηρεσιών για κινητές συσκευές και κατέστη δυνατή με την προώθηση της διαθέσιμης τεχνολογίας για κινητά συστήματα. Επίσης, η εξέλιξη του περιβάλλοντος, στο οποίο αναπτύσσονται και λειτουργούν τα κινητά συστήματα, οδήγησαν στην ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα καθώς και στις ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης και ειδικά στις κινητές συσκευές τα τελευταία 20 χρόνια. Οι εργασίες για το IMT-Advanced στο ITU-R WP5D ήρθαν το 2008 σε μια φάση όπου οι λεπτομερείς απαιτήσεις και η διαδικασία ανακοινώθηκαν με εγκύκλιο [3]. Μεταξύ άλλων, αυτό ενεργοποίησε δραστηριότητες στο 3GPP, όπου ξεκίνησε ένα αντικείμενο μελέτης για το LTE-Advanced. Ο στόχος ήταν να καθοριστούν οι απαιτήσεις και να διερευνηθούν και να προταθούν τα στοιχεία της τεχνολογίας για να αποτελέσουν μέρος του LTE-Advanced.

Μέσα στο 3GPP, το LTE-Advanced θεωρείται το επόμενο σημαντικό βήμα στην εξέλιξη του LTE. Επομένως, η τεχνολογία LTEA δεν αποτελεί νέα τεχνολογία, αλλά ένα εξελικτικό βήμα στη συνεχή ανάπτυξη του LTE. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 που ακολουθεί, τα χαρακτηριστικά που αποτελούν το LTE-Advanced αποτελούν μέρος της έκδοσης 10 των προδιαγραφών 3GPP LTE. Το ευρύτερο εύρος ζώνης μέσω της συσσωμάτωσης πολλαπλών φορέων και η εξελιγμένη χρήση προηγμένων τεχνικών κεραιάς τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη είναι τα κύρια συστατικά που προστίθενται στην έκδοση LTE 10 για να φθάσουν στους στόχους IMT-Advanced.



Εικόνα 1: Εκδόσεις προδιαγραφών 3GPP για LTE

Σε συνδυασμό με το Internet υψηλής ταχύτητας που συχνά βασίζεται σε δίκτυα οπτικών ινών, βλέπουμε ότι μια σειρά τεχνολογιών είναι σε θέση να συμβαδίσουν με την πρόοδο στην τεχνολογία κινητών επικοινωνιών, όπως η LTE. Η ταχεία αύξηση της χρήσης του Διαδικτύου για την παροχή πάσης φύσεως υπηρεσιών ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1990 ταυτόχρονα με την ευρεία χρήση των κινητών συστημάτων 2G και 3G [4]. Το φυσικό επόμενο βήμα ήταν ότι αυτές οι υπηρεσίες μέσω διαδικτύου μεταφέρθηκαν επίσης στις κινητές συσκευές, δημιουργώντας αυτό που σήμερα είναι γνωστό ως *ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία*.

1.2 Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία επιτρέπουν πλέον στους χρήστες να έχουν ασύρματες διασυνδέσεις, δίνοντάς τους τη δυνατότητα επικοινωνίας ακόμα και εν' κινήσει. Ο στόχος των ασύρματων δικτύων είναι η δυνατότητα επικοινωνίας παντού και πάντα, χωρίς χρονικούς και χωρικούς περιορισμούς. Η ασύρματη δικτύωση αυξάνει σημαντικά τη χρησιμότητα μιας φορητής συσκευής και αυτό γιατί παρέχει στους κινητούς χρήστες πολύπλευρη επικοινωνία με άλλα άτομα και έγκαιρη ενημέρωση για σημαντικά γεγονότα. Επίσης επιτρέπει συνεχή πρόσβαση στις υπηρεσίες και τους πόρους του ενσύρματου δικτύου. Ο συνδυασμός της δικτύωσης και της κινητικότητας θα δημιουργήσουν νέες εφαρμογές και υπηρεσίες, όπως συνεργατικό λογισμικό για αυτοσχέδιες συναντήσεις, ηλεκτρονικούς πίνακες ανακοινώσεων που θα προσαρμόζουν τα περιεχόμενά τους ανάλογα με τα άτομα που είναι παρόντα και λογισμικό πλοήγησης για την καθοδήγηση χρηστών σε άγνωστα μέρη ή ταξίδια.

Η ασύρματη επικοινωνία παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες από την ενσύρματη, γιατί η επίδραση του περιβάλλοντος και η παρεμπόδιση ορισμένων μονοπατιών μετάδοσης εισάγουν θόρυβο και ηχώ στο μεταδιδόμενο σήμα. Οι ασύρματες συνδέσεις μπορεί να διακοπούν ή να υποβαθμιστούν από την κινητικότητα, καθώς οι χρήστες κινούνται εκτός της περιοχής κάλυψης των πομπών του δικτύου ή εντός περιοχών υψηλής παρεμβολής. Γενικά, οι ασύρματες συνδέσεις είναι χαμηλότερης ποιότητας από τις ενσύρματες με χαρακτηριστικά τους χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, τους υψηλούς ρυθμούς λαθών και τις συχνές και με απρόβλεπτο τρόπο διακοπές συνδέσεων. Διακρίνουμε διάφορα είδη ασύρματων δικτύων, ανάλογα με τις εφαρμογές τους και την τεχνολογία που χρησιμοποιούν:

Κυψελοειδή (cellular) τηλεφωνικά δίκτυα. Αυτή είναι η πιο διαδεδομένη εφαρμογή των ασύρματων δικτύων και θα αναλυθεί με λεπτομέρεια στο δεύτερο κεφάλαιο των ση-

μειώσεων. Τα κυψελοειδή δίκτυα είναι ικανά να παρέχουν υπηρεσίες κατά πρώτο λόγο φωνής και κατά δεύτερο λόγο δεδομένων στους χρήστες. Οι εκτεταμένες περιοχές μετακίνησης απαιτούν από το δίκτυο να ενημερώνεται για τη νέα του θέση του χρήστη [5]. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης στα σημερινά κυψελοειδή δίκτυα είναι αρκετά χαμηλό για εφαρμογές που απαιτούν εντατική μεταφορά δεδομένων και αυτός είναι ο λόγος που αναζητούνται νέες λύσεις για αύξηση της χωρητικότητας.

Δορυφορικά Δίκτυα. Σε τέτοια δίκτυα η επικοινωνία μεταξύ των επίγειων σταθμών γίνεται μέσω του δορυφόρου ως ενδιάμεσου κόμβου. Ο δορυφόρος αναλαμβάνει να προωθήσει τα πακέτα που λαμβάνει από τους επίγειους σταθμούς αφετηρίας των πακέτων στους επιθυμητούς επίγειους σταθμούς-παραλήπτες. Τα δορυφορικά δίκτυα προσφέρονται μεταξύ άλλων και για περιοχές όπου τα συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα είναι δύσκολο, αντικοινωνικό ή αδύνατον να αναπτυχθούν (ωκεανοί, δυσπρόσιτες περιοχές, περιοχές με πολύ μικρό αριθμό χρηστών).

Μητροπολιτικά ασύρματα δίκτυα δεδομένων (ασύρματα WAN). Πρόκειται για ειδικά κινητά δίκτυα που παρέχονται από ιδιωτικούς παροχείς υπηρεσιών. Τα δίκτυα αυτά καλύπτουν μια ορισμένη περιοχή (π.χ. στο μέγεθος μιας πόλης) και επιτρέπουν την μεταφορά δεδομένων μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται σε αυτή [6].

Τοπικά ασύρματα δίκτυα δεδομένων (ασύρματα LAN). Είναι ανάλογα με τα μητροπολιτικά, μόνο που η περιοχή που καλύπτουν είναι πολύ μικρότερη. Τα παραδοσιακά ενσύρματα LAN (π.χ. Ethernet) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα, και το ίδιο αναμένεται να συμβεί στο μέλλον και με τα ασύρματα LAN. Η ιδέα είναι να επεκταθούν τα παραδοσιακά LANs με ένα ασύρματο interface ώστε να εξυπηρετούν μικρά και χαμηλής ισχύος κινητά τερματικά ικανά να έχουν ασύρματη πρόσβαση. Το ασύρματο LAN συνδέεται συνήθως σε ένα πιο εκτεταμένο σταθερό δίκτυο (π.χ. ενσύρματο LAN, WAN, Internet). Τα ασύρματα LAN έχουν περιορισμένη περιοχή κάλυψης και έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά σε τοπικό επίπεδο, εφόσον δεν παρέχουν προς το παρόν δικτυακή υποστήριξη για εκτεταμένης περιοχής μετακινήσεις.

Σταθμοί πληροφοριών (infostations). Τέτοια δίκτυα βρίσκουν εφαρμογή για παράδειγμα στην παροχή πληροφοριών (για τα αξιοθέατα, εστιατόρια, ξενοδοχεία κ.λ.π.) στους επισκέπτες ή τους οδηγούς αυτοκινήτων που εισέρχονται σε μια περιοχή. Οι κινητοί χρήστες παράγουν, αλλά και καταναλώνουν δεδομένα. Τα δεδομένα που παράγονται περιλαμβάνουν

πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα θέση του χρήστη, και πρέπει να ανανεώνονται σταθερά και να ανακτώνται σε πραγματικό χρόνο από το δίκτυο. Αυτό αποτελεί κυρίως ένα πρόβλημα διαχείρισης δεδομένων σε επίπεδο δικτύου, αλλά αναδεικνύει και ένα πλήθος από ενδιαφέροντα προβλήματα βάσεων δεδομένων που αφορούν την ανάκτηση και την ενημέρωση (query και update) των δεδομένων σε ανταπόκριση της μεταβαλλόμενης κατάστασης του συστήματος [7].

Στο επίπεδο εφαρμογών, οι χρήστες μπορούν να ρωτούν και να ενημερώνουν βάσεις δεδομένων χρησιμοποιώντας ασύρματους συνδέσμους χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Οι υπηρεσίες πληροφοριών ευρείας έκτασης παρέχουν γενικές πληροφορίες για το κοινό (π.χ. κυκλοφοριακή κίνηση, καιρός). Η πρόσβαση σε αυτές τις πληροφορίες είναι μόνο για ανάγνωση και αφορά μεγάλο αριθμό χρηστών. Στην πράξη, μια φορητή υπολογιστική συσκευή χειρός λειτουργεί ως μία προσωπική ατζέντα του χρήστη, η οποία αντλεί πληροφορίες από το περιβάλλον του. Από αυτή την οπτική, το περιβάλλον του χρήστη είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί ως μία μεγάλη βάση δεδομένων, από την οποία ο χρήστης αντλεί πληροφορίες οποτεδήποτε και οπουδήποτε.

Δίκτυα μετάδοσης ασύρματων πακέτων ή ad-hoc δίκτυα. Ένα σύνολο κινητών κόμβων σχηματίζουν δυναμικά τέτοιου είδους «τυχαία» (ad-hoc) δίκτυα χωρίς να χρησιμοποιούν σταθερή υλική υποδομή. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων γίνεται είτε μέσω ενός κεντρικού κόμβου, είτε διαδοχικά από κόμβο σε κόμβο (multihop δίκτυα) που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση. Σε multihop ad hoc δίκτυα, κάθε κόμβος είναι υπεύθυνος όχι μόνο για την προώθηση των δικών του πακέτων αλλά και για την προώθηση ως ενδιάμεσος κόμβος και πακέτων που έχουν την αφετηρία τους σε άλλους κόμβους. Για παράδειγμα, η δρομολόγηση μπορεί να γίνει ως εξής: ο κάθε κόμβος στέλνει τα πακέτα στον πιο κοντινό προς αυτόν κόμβο που βρίσκεται προς την κατεύθυνση του προορισμού, αυτός τα προωθεί στην συνέχεια σε έναν κατάλληλο γείτονα του, κ.ο.κ., μέχρι να φτάσουν τα πακέτα στον προορισμό τους.

Δίκτυα σελιδοποίησης (paging networks): Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται για την προώθηση μικρών αλφαριθμητικών μηνυμάτων σε βομβητές (beepers). Η υπηρεσία είναι συνήθως αποκλειστικά λήψης και έχει πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης [8].

1.3 Εξέλιξη των ασύρματων δικτύων πριν από την LTE

Η αμερικανική Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) ενέκρινε την πρώτη εμπορική υπηρεσία τηλεφωνίας στην Carbon το 1946, την οποία διαχειρίζεται η AT & T. Το 1947 η AT & T εισήγαγε επίσης την έννοια της επαναχρησιμοποίησης των ραδιοσυχνοτήτων, η οποία έγινε θεμελιώδης για όλα τα επόμενα συστήματα κινητής επικοινωνίας. Παρόμοια συστήματα λειτουργούν από πολλές μονοπωλιακές τηλεφωνικές υπηρεσίες και χειριστές καλωδίων κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 και του 1960, χρησιμοποιώντας ογκώδη και ενεργοβόρο εξοπλισμό και παρέχοντας υπηρεσίες για αυτοκίνητα σε πολύ περιορισμένο αριθμό χρηστών. Η μεγάλη απορρόφηση των συνδρομητών και η χρήση τους επήλθε όταν η κινητή επικοινωνία έγινε διεθνής μέριμνα με τη συμμετοχή πολλών ενδιαφερομένων μερών, αρχικά κυρίως των φορέων εκμετάλλευσης. Τα πρώτα διεθνή συστήματα κινητής επικοινωνίας ξεκίνησαν από τη δεκαετία του 1980; τα πιο γνωστά είναι τα NMT που ξεκίνησαν στις σκανδιναβικές χώρες, AMPS στη Βόρεια Αμερική, TACS στην Ευρώπη και J-TACS στην Ιαπωνία. Ο εξοπλισμός ήταν ακόμη ογκώδης, και η ποιότητα της φωνής ήταν συχνά ασυνεπής, ενώ η "διασταυρούμενη συζήτηση" μεταξύ των χρηστών ήταν κοινό πρόβλημα. Με την NMT ήρθε η έννοια της "περιαγωγής", η οποία παρέχει μια υπηρεσία για χρήστες που ταξιδεύουν εκτός της περιοχής του "οικιακού" φορέα εκμετάλλευσης [9]. Αυτό δημιούργησε επίσης μια μεγαλύτερη αγορά κινητών τηλεφώνων, προσελκύοντας περισσότερες επιχειρήσεις στην επιχείρηση κινητής επικοινωνίας.

Στην Ευρώπη στα μέσα της δεκαετίας του '80 ξεκίνησε από τις τηλεπικοινωνιακές διοικήσεις της CEPT1 το πρόγραμμα GSM (αρχικά το GSM) για την ανάπτυξη πανευρωπαϊκού συστήματος κινητής τηλεφωνίας και αργότερα συνεχίστηκε στα νέα ευρωπαϊκά πρότυπα τηλεπικοινωνιών Ινστιτούτο (ETSI). Το πρότυπο GSM βασίστηκε στην πολλαπλή πρόσβαση χρονικού διαχωρισμού (TDMA), όπως και το πρότυπο US-TDMA και το ιαπωνικό πρότυπο PDC που εισήχθησαν στο ίδιο χρονικό πλαίσιο. Μια κάπως μεταγενέστερη ανάπτυξη ενός προτύπου πολλαπλής πρόσβασης κώδικα-διαίρεσης (CDMA) [10] που ονομάζεται IS-95 ολοκληρώθηκε στις ΗΠΑ το 1993.

Όλα αυτά τα πρότυπα ήταν "στενής ζώνης" υπό την έννοια ότι στόχευαν υπηρεσίες "χαμηλού εύρους ζώνης" όπως η φωνή. Με τη δεύτερη γενιά ψηφιακών κινητών επικοινωνιών ήρθε η ευκαιρία να παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων μέσω των δικτύων κινητής επικοινωνίας. Οι υπηρεσίες πρωτογενών δεδομένων που εισήχθησαν στο 2G ήταν υπηρεσίες α-

νταλλαγής μηνυμάτων κειμένου (Short Message Services, SMS) και υπηρεσίες μεταγωγής κυκλωμάτων που επιτρέπουν τη χρήση ηλεκτρονικών μηνυμάτων και άλλων εφαρμογών δεδομένων, αρχικά με μέτρια μέγιστη ταχύτητα δεδομένων 9,6 kbit/s. Μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων εισήχθησαν αργότερα σε εξελιγμένα συστήματα 2G με την ανάθεση πολλαπλών χρονικών θυρίδων σε ένα χρήστη και μέσω τροποποιημένων σχημάτων κωδικοποίησης. Τα πακέτα δεδομένων μέσω κυψελοειδών συστημάτων έγιναν πραγματικότητα κατά τη διάρκεια του δεύτερου μισού της δεκαετίας του '90, ενώ η γενική υπηρεσία Packet Radio Services (GPRS) εισήχθη στο GSM και τα πακέτα δεδομένων προστέθηκαν επίσης σε άλλες κυψελοειδείς τεχνολογίες, όπως το ιαπωνικό πρότυπο PDC. Αυτές οι τεχνολογίες συχνά αναφέρονται ως 2.5G. Η επιτυχία της υπηρεσίας ασύρματων δεδομένων iMode στην Ιαπωνία, η οποία περιελάμβανε ένα πλήρες "οικοσύστημα" για την παροχή υπηρεσιών, τη χρέωση, κ.λ.π., έδωσε πολύ σαφή ένδειξη της δυνατότητας εφαρμογής σε πακέτα δεδομένων σε κινητά συστήματα, παρά τα σχετικά χαμηλά δεδομένα τιμές που υποστηρίζονταν τη δεδομένη στιγμή [11].

Με την εμφάνιση του 3G και της διασύνδεσης ραδιοεπικοινωνιών υψηλότερου εύρους ζώνης UTRA (Universal Terrestrial Radio Access) ήρθαν δυνατότητες για μια σειρά από νέες υπηρεσίες που μνημονεύθηκαν μόνο με 2G και 2.5G. Η ανάπτυξη ραδιοεπικοινωνίας 3G/UTRA χειρίζεται σήμερα το 3GPP. Ωστόσο, τα πρώτα βήματα για το 3G λήφθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990, πολύ πριν σχηματιστεί το 3GPP. Αυτό που έθεσε επίσης το στάδιο για το 3G ήταν η διεθνοποίηση των κυψελοειδών προτύπων [12]. Το GSM ήταν ένα πανευρωπαϊκό έργο, αλλά γρήγορα προσέλκυσε παγκόσμιο ενδιαφέρον όταν το πρότυπο GSM αναπτύχθηκε σε διάφορες χώρες εκτός Ευρώπης. Ένα παγκόσμιο τυποποιημένο κέρδος σε οικονομία κλίμακας, δεδομένου ότι η αγορά προϊόντων γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Αυτό οδήγησε σε πολύ στενότερη διεθνή συνεργασία γύρω από τις κυψελοειδείς τεχνολογίες 3G από ό, τι για τις προηγούμενες γενιές.

1.3.1. Η πρώτη 3G προτυποποίηση

Οι εργασίες για ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς ξεκίνησαν στη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) [13] τη δεκαετία του '80, πρώτα με την ετικέτα Future Public Land Mobile Mobile Telecommunications Systems (FPLMTS), που μετατράπηκε αργότερα σε IMT-2000. Το Παγκόσμιο Διοικητικό Ραδιοφωνικό Συνέδριο WARC-92 προσδιόρισε φάσμα 230 MHz για το IMT-2000 σε παγκόσμια βάση. Από αυτά τα 230 MHz, 60

MHz αναγνωρίστηκε ως ζευγαρωμένο φάσμα για FDD (Duplex Division Frequency-Division) και 35 MHz ως μη συζευγμένο φάσμα για TDD (Time-Division Duplex), τόσο για επίγεια χρήση. Κάποιο φάσμα είχε επίσης διατεθεί για τις δορυφορικές υπηρεσίες. Με αυτό τον τρόπο, η σκηνή καθορίστηκε για να προσδιορίσει το IMT-2000.

Παράλληλα με την εκτεταμένη ανάπτυξη και εξέλιξη των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 2G κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, καταβλήθηκαν σημαντικές προσπάθειες σε ερευνητικές δραστηριότητες 3G σε όλο τον κόσμο. Στην Ευρώπη, ορισμένα έργα που χρηματοδοτήθηκαν μερικώς από την ΕΕ οδήγησαν σε μια έννοια πολλαπλής πρόσβασης που περιλάμβανε ένα στοιχείο ευρείας ζώνης CDMA που εισήχθη στο ETSI το 1996. Στην Ιαπωνία, ο Σύνδεσμος Βιομηχανιών Ραδιοεπικοινωνιών και Επιχειρήσεων (ARIB) ορίστηκε ταυτόχρονα μια ασύρματη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας 3G βασισμένη σε Wideband CDMA και στην Αμερική μια Wideband CDMA έννοια που ονομάζεται WIMS αναπτύχθηκε στην επιτροπή T1.P12. Η Νότια Κορέα άρχισε επίσης να εργάζεται για το Wideband CDMA αυτή τη στιγμή. Όταν οι δραστηριότητες τυποποίησης για την 3G άρχισαν στο ETSI το 1996, προτάθηκαν WCDMA έννοιες τόσο από ένα ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα (FRAMES) όσο και από την τυποποίηση της ARIB στην Ιαπωνία [14].

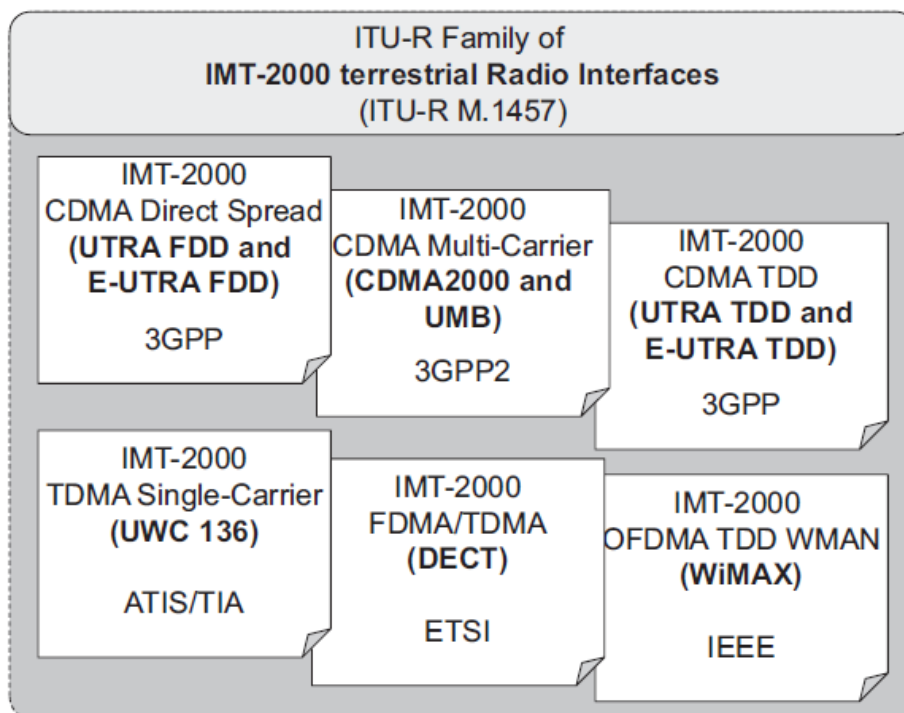
Οι προτάσεις CDMA Wideband από την Ευρώπη και την Ιαπωνία συγχωνεύθηκαν και εξελίχθηκαν ως μέρος της ιδέας που κέρδισε στις αρχές του 1998 στο ευρωπαϊκό έργο για τις παγκόσμιες κινητές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες (UMTS), το οποίο ήταν το ευρωπαϊκό όνομα για το 3G. Η τυποποίηση της WCDMA συνεχίστηκε παράλληλα σε διάφορες ομάδες προτύπων μέχρι το τέλος του 1998, όταν το Σχέδιο Σύμπραξης Τρίτης Γενιάς (3GPP) δημιουργήθηκε από οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων από όλες τις περιοχές του κόσμου. Αυτό επιλύει το πρόβλημα της προσπάθειας να διατηρηθεί παράλληλη ανάπτυξη ευθυγραμμισμένων προδιαγραφών σε πολλές περιοχές. Οι παρόντες οργανωτικοί εταίροι του 3GPP είναι η ARIB (Ιαπωνία), η CCSA (Κίνα), το ETSI (Ευρώπη), η ATIS (ΗΠΑ), η TTA (Νότια Κορέα) και η TTC (Ιαπωνία). Αυτή τη στιγμή, όταν οι φορείς τυποποίησης ήταν έτοιμοι ναβάλουν τις λεπτομέρειες στις προδιαγραφές 3GPP, οι εργασίες για κινητά συστήματα 3G είχαν ήδη ξεκινήσει εδώ και αρκετό καιρό στη διεθνή σκηνή της ITU-R. Το έργο αυτό επηρεάστηκε από το ευρύτερο διεθνές πλαίσιο για την εργασία τυποποίησης στο 3GPP.

1.4 Δραστηριότητες της ITU

1.4.1 IMT-2000 και IMT-Advanced

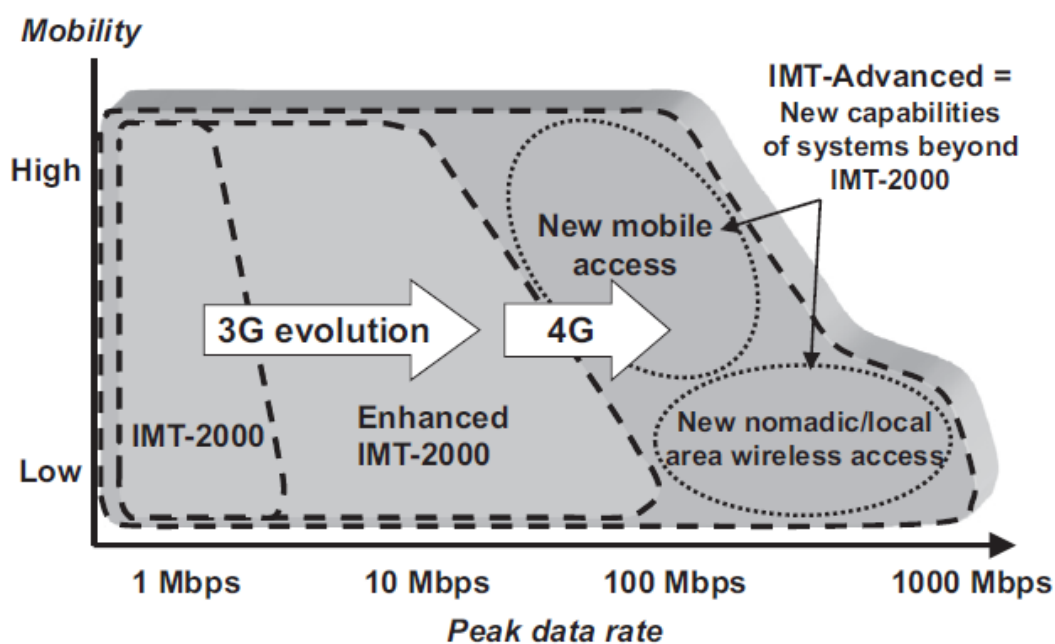
Η ομάδα εργασίας ITU-R 5D (WP5D) έχει την ευθύνη για τα συστήματα IMT, το οποίο είναι το όνομα ομπρέλας για 3G (IMT-2000) και 4G (IMT-Advanced). Το WP5D δεν γράφει τεχνικές προδιαγραφές για το IMT, αλλά διατήρησε τους ρόλους του καθορισμού του IMT σε συνεργασία με τους περιφερειακούς οργανισμούς τυποποίησης και τη διατήρηση σειράς συστάσεων για τα IMT-2000 και IMT-Advanced [15]. Πρόσφατα, η ITU-R ξεκίνησε μια δραστηριότητα, μερικές φορές αναφέρεται ως IMT-2020, για να εξετάσει την ανάπτυξη των τεχνολογιών IMT πέρα από αυτό που ορίζεται για το IMT-2000 και το IMT-Advanced [16].

Η κύρια σύσταση IMT-2000 είναι η ITU-R M.1457 η οποία προσδιορίζει τις προδιαγραφές διασύνδεσης ραδιοσυχνοτήτων IMT-2000 (RSPC). Η σύσταση περιλαμβάνει μια "οικογένεια" ραδιοφωνικών διεπαφών, όλες οι οποίες περιλαμβάνονται σε ισότιμη βάση. Η οικογένεια έξι επίγειων ραδιοφωνικών διεπαφών απεικονίζεται στην Εικόνα 2, η οποία παρουσιάζει επίσης τα Πρότυπα Ανάπτυξης Οργανισμών (SDO) ή τα Σχέδια Συνεργασίας που παράγουν τις προδιαγραφές. Επιπλέον, έχουν οριστεί αρκετές διεπαφές δορυφορικού ραδιοφώνου IMT-2000.



Εικόνα 2: Ο ορισμός του IMT-2000 στην ITU-R

Για κάθε διασύνδεση ραδιοσυχνοτήτων, το M.1457 περιέχει μια επισκόπηση αυτής της διασύνδεσης ραδιοσυχνοτήτων, ακολουθούμενη από μια λίστα αναφορών στις λεπτομερείς προδιαγραφές. Οι πραγματικές προδιαγραφές τηρούνται από τα επιμέρους SDO και το M.1457 παρέχει αναφορές στις προδιαγραφές που μεταφέρθηκαν και διατηρούνται από κάθε SDO. Με τη συνεχή ανάπτυξη των ραδιοφωνικών διεπαφών IMT-2000, συμπεριλαμβανομένης της εξέλιξης του UTRA στο Evolved UTRA, οι συστάσεις της ITU πρέπει επίσης να ενημερωθούν [17]. Το ITU-R WP5D αναθεωρεί συνεχώς τη σύσταση M.1457 και κατά το χρόνο της γραφής βρίσκεται στην ενδέκατη του έκδοση. Οι εισροές στις ενημερώσεις παρέχονται από τα SDO και τα σχέδια εταιρικής σχέσης που συντάσσουν τα πρότυπα. Στην τελευταία αναθεώρηση του ITU-R M.1457, το LTE (ή το E-UTRA) περιλαμβάνεται στην οικογένεια μέσω των μελών της οικογένειας 3GPP για τα UTRA FDD και TDD, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.

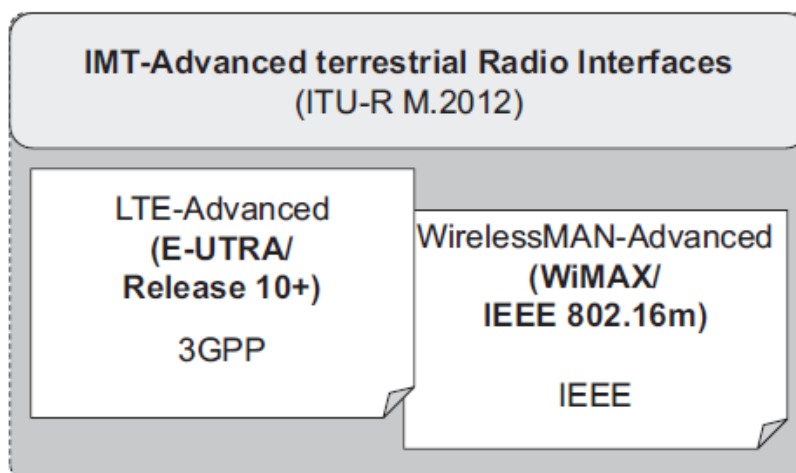


Εικόνα 3: Επεξήγηση των δυνατοτήτων του IMT-2000 και του IMT-Advanced, με βάση το πλαίσιο που περιγράφεται στη Σύσταση ITU-R M.1645

Η διαδικασία καθορισμού του IMT-Advanced καθορίστηκε από το ITU-R WP5D και ήταν αρκετά παρόμοια με τη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των συστάσεων IMT-2000 [18]. Η ITU-R ολοκλήρωσε αρχικά μελέτες για τις υπηρεσίες και τεχνολογίες IMT-Advanced, τις προβλέψεις της αγοράς, τις αρχές τυποποίησης, την εκτίμηση των αναγκών του ραδιοφάσματος και την αναγνώριση των υποψηφίων ζωνών συχνοτήτων.

Τα κριτήρια αξιολόγησης συμφωνήθηκαν, όπου οι προτεινόμενες τεχνολογίες έπρεπε να αξιολογούνται σύμφωνα με ένα σύνολο ελάχιστων τεχνικών απαιτήσεων. Στη συνέχεια, όλα τα μέλη της ITU και άλλοι οργανισμοί προσκλήθηκαν στη διαδικασία μέσω εγκυκλίου το Μάρτιο του 2008. Μετά την υποβολή έξι υποψήφιων τεχνολογιών το 2009, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση σε συνεργασία με εξωτερικούς φορείς όπως οι οργανισμοί ανάπτυξης προτύπων, και εθνικές ομάδες. Μια εξέλιξη του LTE όπως αναπτύχθηκε από το 3GPP υποβλήθηκε ως ένας υποψήφιος στην αξιολόγηση ITU-R. Ενώ στην πραγματικότητα ήταν μια νέα έκδοση (έκδοση 10) του συστήματος LTE και έτσι ένα αναπόσπαστο μέρος της συνεχούς ανάπτυξης LTE, ο υποψήφιος ονομάστηκε LTE-Advanced για τους σκοπούς της υποβολής της ITU [19]. Το 3GPP δημιούργησε επίσης το δικό του σύνολο τεχνικών απαιτήσεων για LTE-Advanced, με βάση τις απαιτήσεις της ITU-R.

Ο στόχος της διαδικασίας ήταν πάντα η εναρμόνιση των υποψηφίων τεχνολογιών μέσω της οικοδόμησης συναίνεσης. Το ITU-R αποφάσισε τον Οκτώβριο του 2010 ότι δύο τεχνολογίες θα συμπεριληφθούν στην πρώτη έκδοση του IMT-Advanced, οι δύο από τις οποίες είναι η LTE από την έκδοση 10 ("Advanced LTE") και την WirelessMAN Advanced [20] με βάση την προδιαγραφή IEEE 802.16m. Τα δύο μπορούν να θεωρηθούν ως "οικογένεια" των IMT-Advanced τεχνολογιών όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Η βασική σύσταση IMTA, η οποία προσδιορίζει τις προδιαγραφές ραδιοεπικοινωνίας IMT Advanced, είναι η ITU-R M.2012 [7]. Όσο για την αντίστοιχη προδιαγραφή IMT-2000, περιέχει μια επισκόπηση για κάθε διασύνδεση ραδιοσυχνότητας, ακολουθούμενη από μια λίστα αναφορών στις λεπτομερείς προδιαγραφές.



Εικόνα 4: Τεχνολογίες διασύνδεσης ραδιοφώνου IMT-Advanced

Εξετάζοντας περαιτέρω το μέλλον, ξεκίνησε μια νέα σύσταση, «Πλαίσιο και γενικοί στόχοι της μελλοντικής ανάπτυξης της IMT για το 2020 και μετά», στο πλαίσιο της ITU-RWP 5D. Η σύσταση αποτελεί ένα πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των εξελίξεων του IMT στο μέλλον, εξετάζοντας τους μελλοντικούς ρόλους του IMT και τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει την κοινωνία, εξετάζοντας τις τάσεις της αγοράς, των χρηστών και της τεχνολογίας και τις συνέπειες του ραδιοφάσματος. Ως παράλληλη δραστηριότητα, η ITU-R WP5D εκπονεί επίσης μια έκθεση σχετικά με τις "Τεχνολογίες των μελλοντικών τεχνολογιών των επίγειων συστημάτων IMT", με επίκεντρο τη χρονική περίοδο 2015-2020. Η έκθεση θα καλύψει τις τάσεις των μελλοντικών πτυχών της τεχνολογίας IMT εξετάζοντας τα τεχνικά και επιχειρησιακά χαρακτηριστικά των συστημάτων IMT και τον τρόπο με τον οποίο βελτιώνονται με την εξέλιξη των τεχνολογιών IMT [21]. Με αυτόν τον τρόπο, η έκθεση για τις τεχνολογικές τάσεις συνδέει τις προσεχείς κυκλοφορίες του LTE-Advanced στην έκδοση 12 και πιο πέρα, ενώ η σύσταση για ένα μελλοντικό όραμα IMT φαίνεται να προχωράει πέρα από το 2020.

1.5 Προγράμματα οδήγησης για LTE και LTE-Advanced

Η εξέλιξη των συστημάτων 3G σε 4G καθοδηγείται από τη δημιουργία και ανάπτυξη νέων υπηρεσιών για κινητές συσκευές και καθίσταται δυνατή η πρόοδος της τεχνολογίας που διατίθεται για τα κινητά συστήματα. Υπήρξε επίσης εξέλιξη του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσονται και λειτουργούν τα κινητά συστήματα, από την άποψη του ανταγωνισμού μεταξύ φορέων εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών, των προκλήσεων από άλλες κινητές τεχνολογίες και της νέας ρύθμισης της χρήσης του φάσματος και των πτυχών της αγοράς των κινητών συστημάτων [22]. Η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, στις ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης και ειδικά στις κινητές συσκευές ήταν αξιοσημείωτη τα τελευταία 20 χρόνια.

Ο νόμος του Moore δείχνει αυτό και υποδεικνύει μια συνεχή εξέλιξη της απόδοσης του επεξεργαστή και αυξημένο μέγεθος μνήμης, συχνά σε συνδυασμό με το μειωμένο μέγεθος, την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος για τις συσκευές. Σε συνδυασμό με μια ραγδικαλιά Internet υψηλής ταχύτητας που συχνά βασίζεται σε οπτικά τα δίκτυα, βλέπουμε ότι υπάρχει μια σειρά τεχνολογικών μέσων για να συμβαδίζουν με την πρόοδο στην τεχνολογία κινητών επικοινωνιών, όπως η LTE. Η ταχεία αύξηση της χρήσης του διαδικτύου για την

παροχή όλων των ειδών υπηρεσιών από τη δεκαετία του 1990 ξεκίνησε ταυτόχρονα με την ευρεία χρήση των κινητών συστημάτων 2G και 3G.

Το φυσικό επόμενο βήμα ήταν ότι αυτές οι υπηρεσίες μέσω διαδικτύου μεταφέρθηκαν επίσης στις κινητές συσκευές, δημιουργώντας αυτό που είναι σήμερα γνωστό ως ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία. Το να είναι σε θέση να υποστηρίξει τις ίδιες υπηρεσίες που βασίζονται στο πρωτόκολλο Internet Protocol (IP) σε μια κινητή συσκευή που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι με σταθερή ευρυζωνική σύνδεση είναι μια μεγάλη πρόκληση και πρωταρχικός παράγοντας για την εξέλιξη του LTE [23]. Ορισμένες υπηρεσίες υποστηρίχθηκαν ήδη από τα εξελιγμένα συστήματα 2.5G, αλλά μόνο μετά την ανάπτυξη των συστημάτων 3G και 4G, τα οποία σχεδιάστηκαν πρωτίστως για υπηρεσίες με βάση την IP, ξεκίνησε η πραγματική επανάσταση κινητής IP. Η αύξηση των μεριδίων των κινητών συσκευών είναι "smartphones" που συνδυάζουν δυνατότητες πολυμέσων με εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητες δεδομένων κινητής ευρυζωνικότητας και η πλειοψηφία των συνδρομών κινητών τηλεφώνων σύντομα θα είναι για κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις.

Η κινητή θέση και οι δυνατότητες κινητικότητας και περιαγωγής δημιουργούν στην πραγματικότητα ένα εντελώς νέο φάσμα υπηρεσιών προσαρμοσμένο στο κινητό περιβάλλον. Σταθερή τηλεφωνία (POTS) και παλαιότερες γενιές κινητής τεχνολογίας κατασκευάστηκαν για υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, κυρίως φωνής. Οι πρώτες υπηρεσίες δεδομένων μέσω GSM ήταν κυκλώματα μεταγωγής, με πακέτα GPRS που έρχονται ως μεταγενέστερη προσθήκη [24]. Αυτό επηρέασε επίσης την πρώτη εξέλιξη της τεχνολογίας 3G, η οποία βασιζόταν σε δεδομένα μεταγωγής κυκλώματος, με υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων ως πρόσθετο. Μόνο μετά την εξέλιξη της τεχνολογίας 3G στο HSPA και αργότερα στο LTE / LTE-Advanced, οι υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων και η IP έγιναν ο πρωταρχικός στόχος του σχεδιασμού. Οι παλιές υπηρεσίες μεταγωγής κυκλωμάτων παραμένουν, αλλά θα παρέχονται στο LTE μέσω IP, με το Voice-over IP (VoIP) ως παράδειγμα.

Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού που σχετίζονται με την υπηρεσία για μια ασύρματη διασύνδεση που υποστηρίζει μια ποικιλία υπηρεσιών είναι [25]:

- *Ρυθμός δεδομένων.* Πολλές υπηρεσίες με χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων, όπως οι υπηρεσίες φωνής, είναι σημαντικές και εξακολουθούν να καταλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος της συνολικής χωρητικότητας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, αλλά οι υψηλότερες υπηρεσίες δεδομένων που καθοδηγούν το σχεδιασμό της διασύνδεσης

ραδιοσυχνοτήτων. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση υψηλότερων ρυθμών δεδομένων για κινητές εφαρμογές όπως η περιήγηση στο Web, η ροή δεδομένων και η μεταφορά αρχείων ωθούν τις μέγιστες ταχύτητες δεδομένων για κινητά συστήματα από kbit/s για 2G σε Mbit/s για 3G και πλησιέστερα προς Gbit/s για 4G.

- *Καθυστέρηση.* Οι διαδραστικές υπηρεσίες όπως το παιχνίδι σε πραγματικό χρόνο, η περιήγηση στο διαδίκτυο και η διαλογική μεταφορά αρχείων έχουν απαιτήσεις για πολύ χαμηλή καθυστέρηση, καθιστώντας το πρωταρχικό στόχο του σχεδιασμού. Υπάρχουν, ωστόσο, πολλές εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και η τηλεόραση όπου οι απαιτήσεις καθυστέρησης δεν είναι τόσο αυστηρές. Η καθυστέρηση για ένα πακέτο που αποστέλλεται από ένα διακομιστή σε έναν πελάτη και την πλάτη ονομάζεται λανθάνουσα κατάσταση.
- *Χωρητικότητα.* Από την άποψη του χειριστή του συστήματος κινητής τηλεφωνίας, δεν είναι μόνο οι μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων που παρέχονται στον τελικό χρήστη που είναι σημαντικοί, αλλά και ο συνολικός ρυθμός δεδομένων που μπορεί να παρέχεται κατά μέσο όρο από κάθε τοποθετημένο σταθμό βάσης και ανά hertz αδειοδοτημένο φάσμα. Αυτό το μέτρο χωρητικότητας ονομάζεται φασματική απόδοση. Στην περίπτωση έλλειψης χωρητικότητας σε ένα κινητό σύστημα, η ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) για τους μεμονωμένους τελικούς χρήστες ενδέχεται να υποβαθμιστεί.

Η ζήτηση για νέες υπηρεσίες και για υψηλότερα ποσοστά bit κορυφής και χωρητικότητα του συστήματος δεν εκπληρώνεται μόνο από την εξέλιξη της τεχνολογίας σε 4G. Υπάρχει επίσης ζήτηση για περισσότερους πόρους ραδιοφάσματος για την επέκταση των συστημάτων και η ζήτηση αυτή οδηγεί επίσης σε μεγαλύτερο ανταγωνισμό μεταξύ ενός αυξανόμενου αριθμού φορέων εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών. Κατά την αρχική ανάπτυξη της 3G και κατά την ανάπτυξη του 4G, υπήρξε επίσης ανταγωνισμός μεταξύ εναλλακτικών τεχνολογιών για την παροχή κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών [24].

Ενώ υπάρχουν ακόμα συστήματα όπως τα CDMA2000 και WiMax σε λειτουργία, η πλειοψηφία των συστημάτων 3G και 4G και ο μεγαλύτερος όγκος της ανάπτυξης κινητής ευρυζωνικότητας αναπτύσσονται με τα εξελιγμένα 3G HSPA και 4G LTE-Advanced συστήματα τυποποιημένα στο 3GPP. Με τη χρήση περισσότερου φάσματος για κινητές ευρυζωνικές συνδέσεις, υπάρχει ανάγκη λειτουργίας κινητών συστημάτων σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων, σε κατανομές φάσματος διαφορετικών μεγεθών και μερικές φορές και σε κατακερματισμένο φάσμα. Αυτό απαιτεί ευρεία ευελιξία φάσματος με δυνατότητα ποικίλου

εύρους ζώνης καναλιού, ο οποίος ήταν επίσης ένας οδηγός και μια βασική παράμετρος σχεδιασμού για το LTE. Η ζήτηση για νέες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και η εξέλιξη της διασύνδεσης ραδιοφώνου με την LTE έχουν χρησιμεύσει ως οδηγοί για την εξέλιξη του κεντρικού δικτύου. Το βασικό δίκτυο που αναπτύχθηκε για το GSM επεκτάθηκε για να υποστηρίξει τα GPRS, EDGE και WCDMA στη δεκαετία του 1990, αλλά εξακολουθούσε να είναι πολύ χτισμένο γύρω από τον τομέα των κυκλωμάτων. Μια εξέλιξη αρχιτεκτονικής συστήματος (SAE) ξεκίνησε την ίδια στιγμή που ξεκίνησε η ανάπτυξη LTE και κατέληξε σε ένα εξελιγμένο πακέτο πυρήνα (EPC), το οποίο αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τα HSPA και LTE/Advanced LTE, με επίκεντρο τον τομέα μεταγωγής πακέτων [26].

1.6 Τυποποίηση του LTE

Με το πλαίσιο για τα συστήματα IMT που δημιουργήθηκε από την ITU-R, με το φάσμα που διατέθηκε από την WRC και με μια συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για καλύτερες επιδόσεις, το καθήκον του προσδιορισμού του συστήματος LTE που ανταποκρίνεται στους στόχους σχεδιασμού εμπίπτει στο 3GPP. Το 3GPP γράφει προδιαγραφές για συστήματα 2G, 3G και 4Gmobile και οι τεχνολογίες 3GPP βρίσκονται σε εξέλιξη παγκοσμίως, ενώ το 90% περίπου των 6.4 δισεκατομμυρίων συνδρομών κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως το πρώτο τρίμηνο του 2013 [27]. Προκειμένου να κατανοήσουμε πώς λειτουργεί το 3GPP, είναι σημαντικό να κατανοήσετε τη διαδικασία σύνταξης προτύπων.

1.6.1 Η διαδικασία τυποποίησης

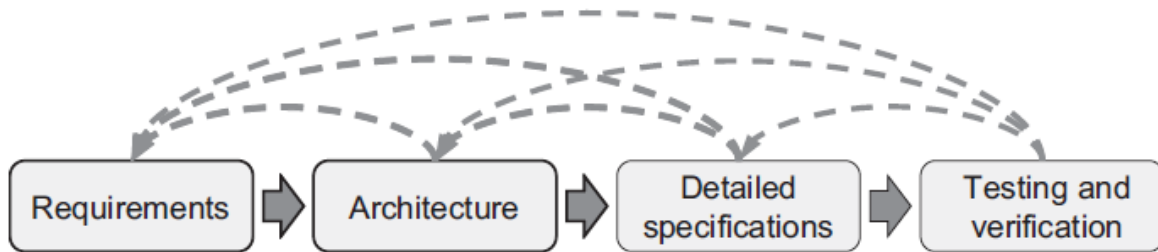
Ο καθορισμός ενός προτύπου για την κινητή επικοινωνία δεν είναι μια εργασία ενός χρόνου. είναι μια συνεχής διαδικασία. Τα φόρουμ τυποποίησης εξελίσσουν συνεχώς τα πρότυπά τους, προσπαθώντας να ανταποκριθούν σε νέες απαιτήσεις για υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Η διαδικασία τυποποίησης είναι διαφορετική στα διάφορα φόρα, αλλά τυπικά περιλαμβάνει τις τέσσερις φάσεις που απεικονίζονται στην Εικόνα 5.

1. Απαιτήσεις, όπου αποφασίζεται τι πρέπει να επιτευχθεί με το πρότυπο.
2. Αρχιτεκτονική, όπου αποφασίζονται τα κύρια δομικά στοιχεία και οι διεπαφές.
3. Λεπτομερείς προδιαγραφές, όπου κάθε διεπαφή καθορίζεται λεπτομερώς.
4. Δοκιμές και επαλήθευση, όπου οι προδιαγραφές διεπαφής αποδεικνύονται ότι λειτουργούν με εξοπλισμό πραγματικής ζωής.

Αυτές οι φάσεις αλληλεπικαλύπτονται και επαναλαμβάνονται. Για παράδειγμα, οι απαιτήσεις μπορούν να προστεθούν, να τροποποιηθούν ή να μειωθούν κατά τις μεταγενέστερες φάσεις, εάν το απαιτούν οι τεχνικές λύσεις. Ομοίως, η τεχνική λύση στις λεπτομερείς προδιαγραφές μπορεί να αλλάξει λόγω προβλημάτων που βρέθηκαν στη φάση δοκιμών και επαλήθευσης. Η τυποποίηση αρχίζει με τη φάση των απαιτήσεων, όπου ο οργανισμός προτύπων αποφασίζει τι πρέπει να επιτευχθεί με το πρότυπο. Αυτή η φάση είναι συνήθως σχετικά σύντομη. Στη φάση της αρχιτεκτονικής, ο οργανισμός προτύπων αποφασίζει για την αρχιτεκτονική που είναι, οι αρχές για το πώς θα ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις. Η φάση της αρχιτεκτονικής περιλαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τα σημεία αναφοράς και τις διεπαφές που πρέπει να τυποποιηθούν. Αυτή η φάση είναι συνήθως αρκετά μεγάλη και μπορεί να αλλάξει τις απαιτήσεις [28]

Μετά τη φάση της αρχιτεκτονικής ξεκινά η φάση λεπτομερών προδιαγραφών. Σε αυτή τη φάση καθορίζονται οι λεπτομέρειες για κάθε μία από τις αναγνωρισμένες διεπαφές. Κατά τη λεπτομερή περιγραφή των διεπαφών, ο οργανισμός τυποποίησης μπορεί να διαπιστώσει ότι οι προηγούμενες αποφάσεις στην αρχιτεκτονική ή ακόμη και στις φάσεις απαιτήσεων πρέπει να επανεξεταστούν. Τέλος, ξεκινά η φάση δοκιμών και επαλήθευσης. Συνήθως δεν αποτελεί μέρος της πραγματικής τυποποίησης στους οργανισμούς τυποποίησης, αλλά πραγματοποιείται παράλληλα μέσω δοκιμών από τους πωλητές και δοκιμών διαλειτουργικότητας μεταξύ πωλητών. Αυτή η φάση είναι η τελική απόδειξη του προτύπου. Κατά τη διάρκεια της φάσης δοκιμών και επαλήθευσης, εξακολουθούν να υπάρχουν σφάλματα στο πρότυπο και τα σφάλματα αυτά ενδέχεται να αλλάξουν αποφάσεις στο λεπτομερές πρότυπο. Παρόλο που δεν είναι συνηθισμένο, μπορεί επίσης να χρειαστούν αλλαγές στην αρχιτεκτονική ή στις απαιτήσεις. Για να επαληθεύσουμε το πρότυπο, χρειάζονται προϊόντα. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή των προϊόντων ξεκινά μετά από (ή κατά τη διάρκεια) της φάσης λεπτομερών προδιαγραφών.

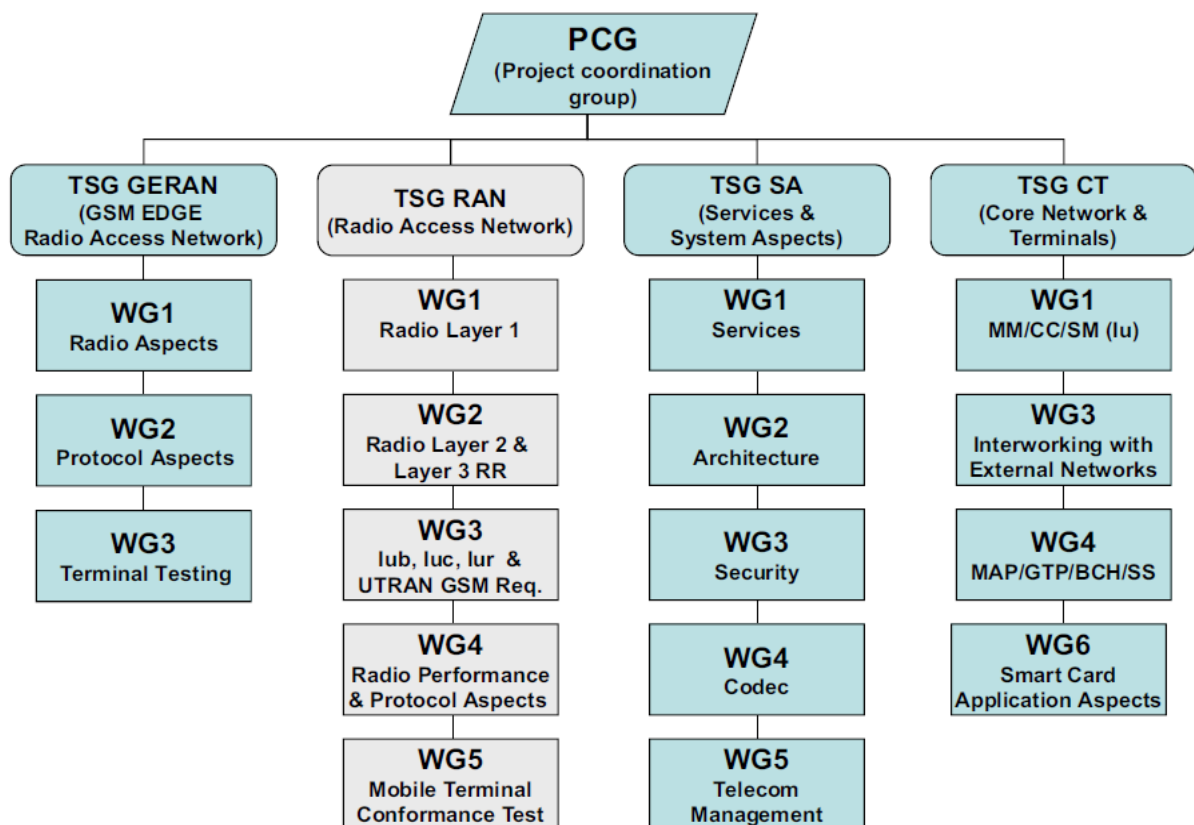
Η φάση δοκιμής και επαλήθευσης λήγει όταν υπάρχουν σταθερές προδιαγραφές δοκιμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξακριβωθεί ότι ο εξοπλισμός πληροί τα πρότυπα. Κανονικά, διαρκεί ένα έως δύο χρόνια από τη στιγμή που ολοκληρώνεται το πρότυπο έως ότου τα εμπορικά προϊόντα εξέρχονται από την αγορά. Ωστόσο, αν το πρότυπο είναι κατασκευασμένο από το μηδέν, μπορεί να χρειαστεί περισσότερος χρόνος, αφού δεν υπάρχουν σταθερά εξαρτήματα από τα οποία να μπορεί να κατασκευαστεί.



Εικόνα 5: Οι φάσεις τυποποίησης και η επαναληπτική διαδικασία

1.6.2 Η διαδικασία 3GPP

Το Σχέδιο Σύμπραξης Τρίτης Γενιάς [29] είναι ο οργανισμός ανάπτυξης προτύπων που καθορίζει τα συστήματα LTE / LTE-Advanced, καθώς και τα 3G UTRA και 2G GSM. Το 3GPP είναι ένα πρόγραμμα συνεργασίας που δημιουργήθηκε από τους οργανισμούς τυποποίησης ETSI, ARIB, TTC, TTA, CCSA και ATIS. Το 3GPP αποτελείται από τέσσερις Ομάδες Τεχνικών Προδιαγραφών (TSG), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Οργάνωση 3GPP

Το 3GPP TSG RAN είναι η ομάδα τεχνικών προδιαγραφών που έχει αναπτύξει την WCDMA, την εξέλιξη της HSPA, καθώς και την LTE / LTE-Advanced και βρίσκεται στην

πρώτη γραμμή της τεχνολογίας κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών. Το TSG RAN αποτελείται από πέντε ομάδες εργασίας (WGs):

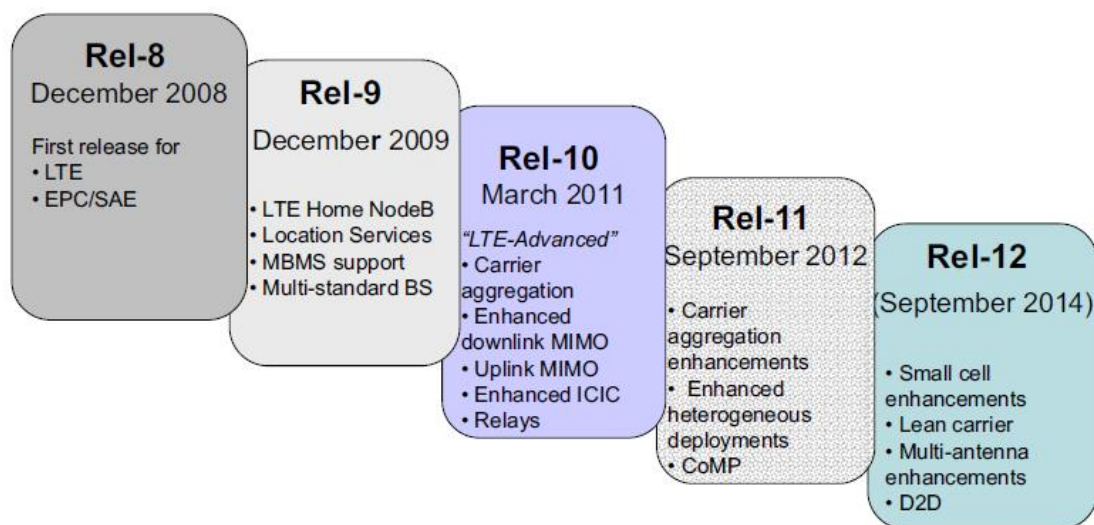
1. RAN WG1, που ασχολείται με τις προδιαγραφές φυσικής στρώσης.
2. RAN WG2, που ασχολείται με τις προδιαγραφές ασύρματης διασύνδεσης επιπέδου 2 και 3.
3. RAN WG3, που ασχολείται με τις σταθερές διασυνδέσεις RAN για παράδειγμα, διασυνδέσεις μεταξύ κόμβων στο RANd αλλά και τη διασύνδεση μεταξύ του RAN και του κεντρικού δικτύου.
4. RAN WG4, που ασχολείται με τις απαιτήσεις επιδόσεων ραδιοσυχνοτήτων (RF) και διαχείρισης ραδιοφωνικών πόρων (RRM).
5. RAN WG5, που ασχολείται με τη δοκιμή συμμόρφωσης τερματικού. Το πεδίο εφαρμογής του 3GPP, όταν δημιουργήθηκε το 1998, ήταν η παραγωγή παγκόσμιων προδιαγραφών για ένα κινητό σύστημα 3G βασισμένο σε ένα εξελιγμένο δίκτυο πυρήνα GSM, συμπεριλαμβανομένης της βάσης WCDMA.

Το πεδίο εφαρμογής του 3GPP όταν δημιουργήθηκε το 1998 ήταν η παραγωγή παγκόσμιων προδιαγραφών για ένα κινητό σύστημα 3G βασισμένο σε ένα εξελιγμένο δίκτυο πυρήνα GSM, συμπεριλαμβανομένης της ραδιοεπικοινωνίας με βάση το WCDMA της UTRA FDD και της ραδιοεπικοινωνίας TD-CDMA της Λειτουργία UTRA TDD. Το έργο της ανάπτυξης και διατήρησης των προδιαγραφών GSM/EDGE προστέθηκε στο 3GPP σε μεταγενέστερο στάδιο και η εργασία τώρα περιλαμβάνει επίσης το LTE (E-UTRA). Οι προδιαγραφές UTRA, E-UTRA και GSM/EDGE αναπτύσσονται, διατηρούνται και εγκρίνονται στο 3GPP. Μετά την έγκριση, οι οργανωτικοί εταίροι τους μεταφέρουν σε κατάλληλα παραδοτέα ως πρότυπα σε κάθε περιοχή. Παράλληλα με την αρχική εργασία 3GPP, αναπτύχθηκε στην Κίνα ένα σύστημα 3G με βάση το TD-SCDMA. Το TD-SCDMA τελικά συγχωνεύτηκε στην έκδοση 4 των προδιαγραφών 3GPP ως πρόσθετη λειτουργία TDD [30].

Οι εργασίες στο 3GPP πραγματοποιούνται με βάση τις σχετικές συστάσεις της ITU και το αποτέλεσμα των εργασιών υποβάλλεται επίσης στην ITU ως μέρος των IMT-2000 και IMT-Advanced. Οι οργανωτικοί εταίροι είναι υποχρεωμένοι να προσδιορίζουν τις περιφερειακές απαιτήσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε επιλογές στο πρότυπο. Παραδείγματα είναι οι περιφερειακές ζώνες συχνοτήτων και οι ειδικές απαιτήσεις προστασίας τοπικές σε μια περιοχή. Οι προδιαγραφές αναπτύσσονται με γνώμονα την παγκόσμια περιαγωγή και την κυκλοφορία τερματικών. Αυτό σημαίνει ότι πολλές περιφερειακές απαιτήσεις ουσιαστι-

κά θα είναι παγκόσμιες απαιτήσεις για όλα τα τερματικά, δεδομένου ότι ένα τερματικό περι-αγωγής πρέπει να πληροί τις αυστηρότερες από όλες τις περιφερειακές απαιτήσεις. Οι τοπι-κές επιλογές στις προδιαγραφές είναι επομένως συχνότερες για τους σταθμούς βάσης από ό-τι για τους τερματικούς σταθμούς.

Οι προδιαγραφές όλων των εκδόσεων μπορούν να επικαιροποιηθούν μετά από κάθε σειρά συνεδριάσεων ETP, οι οποίες πραγματοποιούνται τέσσερις φορές το χρόνο. Τα έγ-γραφα 3GPP χωρίζονται σε εκδόσεις, όπου κάθε έκδοση έχει ένα σύνολο από χαρακτηρι-στικά που προστέθηκαν σε σύγκριση με την προηγούμενη έκδοση. Τα χαρακτηριστικά καθορί-ζονται στα στοιχεία εργασίας που συμφωνήθηκαν και αναλήφθηκαν από τις EPPY. Οι απε-λευθερώσεις από την έκδοση 8 και μετά, με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που παρατί-θενται για το LTE, φαίνονται στην Εικόνα 7. Η ημερομηνία που εμφανίζεται για κάθε έκδο-ση είναι η ημέρα παύσης του περιεχομένου της έκδοσης. Η έκδοση 10 του LTE είναι η πρώ-τη έκδοση που εγκρίθηκε από την ITU-R ως τεχνολογία IMT-Advanced και επομένως είναι και η πρώτη έκδοση που ονομάζεται LTE-Advanced.



Εικόνα 7: Εκδόσεις 3GPP προδιαγραφών για LTE

1.6.3 Η εξέλιξη 3G σε 4G

Η πρώτη έκδοση του WCDMA Radio Access που αναπτύχθηκε στο TSG RAN ονομάστηκε release 993 και περιείχε όλα τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων IMT-2000 όπως ορίζονται από την ITU [31]. Αυτό περιελάμβανε υπη-ρεσίες φωνής και τηλεοπτικών μεταδόσεων με κυκλώματα, καθώς και υπηρεσίες δεδομένων τόσο σε πακέτα όσο και σε κυκλωματομεταφορείς. Η πρώτη σημαντική προσθήκη χαρακτη-

ριστικών ασύρματης πρόσβασης στην WCDMA HSPA, η οποία προστέθηκε στην έκδοση 5 με High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και την έκδοση 6 με Enhanced Uplink. Αυτά τα δύο είναι γνωστά ως HSPA. Με το HSPA, το UTRA ξεπέρασε τον ορισμό του κινητού συστήματος τρίτης γενιάς και περιλάμβανε και δεδομένα ευρυζωνικής κινητής τηλεφωνίας.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας 3G συνεχίστηκε το 2004, όταν διοργανώθηκε ένα εργαστήριο για την έναρξη εργασιών σχετικά με τη διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων 3GPP Long-Term Evolution (LTE). Κατά τη διάρκεια μιας αρχικής φάσης μελέτης που συνεχίστηκε μέχρι τα μέσα του 2005, αναπτύχθηκαν και τεκμηριώθηκαν οι απαιτήσεις και οι στόχοι σχεδιασμού για το LTE [32]. Πιο αξιοσημείωτες είναι οι απαιτήσεις για υψηλό ρυθμό δεδομένων στην άκρη κυψελών και η σημασία της χαμηλής καθυστέρησης, επιπλέον της κανονικής χωρητικότητας και των μέγιστο ρυθμό δεδομένων. Επιπλέον, η ευελιξία φάσματος και η ύπαρξη κοινών χαρακτηριστικών μεταξύ των λύσεων FDD και TDD προφέρονται.

Μετά από εκτεταμένες μελέτες διαφορετικών βασικών τεχνολογιών φυσικού στρώματος, αποφασίστηκε ότι η ραδιοεπικοινωνία LTE θα πρέπει να βασίζεται σε OFDM στο downlink και DFT-προκαθορισμένο OFDM στην ανερχόμενη ζεύξη. Το TSG RAN και οι ομάδες εργασίας του εργάστηκαν στη συνέχεια για τις προδιαγραφές LTE και οι προδιαγραφές εγκρίθηκαν τον Δεκέμβριο του 2007. Οι εργασίες συνεχίστηκαν από τότε στο LTE, με νέα χαρακτηριστικά που προστέθηκαν σε κάθε έκδοση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Οι εργασίες για το IMT-Advanced στο πλαίσιο του ITU-R WP5D ήρθαν το 2008 σε μια φάση όπου οι λεπτομερείς απαιτήσεις και η διαδικασία ανακοινώθηκαν με εγκύκλιο [32]. Μεταξύ άλλων, αυτό προκάλεσε νέες δραστηριότητες στο 3GPP, όπου ξεκίνησε μια μελέτη του LTE-Advanced.

Ο στόχος ήταν να οριστούν οι απαιτήσεις και να διερευνηθούν και να προταθούν τα στοιχεία της τεχνολογίας ως μέρος του LTE-Advanced. Το έργο μετατράπηκε σε είδος εργασίας το 2009 προκειμένου να αναπτυχθούν οι λεπτομερείς προδιαγραφές. Μέσα στο 3GPP, το LTE-Advanced θεωρείται το επόμενο σημαντικό βήμα στην εξέλιξη του LTE. Επομένως, η LTE-Advanced δεν είναι μια νέα τεχνολογία. είναι ένα εξελικτικό βήμα στη συνεχή ανάπτυξη του LTE. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, τα χαρακτηριστικά που αποτελούν το LTE-Advanced αποτελούν μέρος των προδιαγραφών 3GPP LTE από την έκδοση 10. Το μεγαλύτερο εύρος ζώνης μέσω της συσσωμάτωσης πολλαπλών φορέων και η εξελιγμένη χρήση προηγμένων τεχνικών κεραιών τόσο στην uplink όσο και στην downlink είναι τα κύ-

ρια συστατικά που προστίθενται στο LTE έκδοσης 10 για την επίτευξη των στόχων IMT-Advanced.

Οι εργασίες σχετικά με το LTE-Advanced στο πλαίσιο του 3GPP προγραμματίστηκαν με το χρονικό πλαίσιο ITU-R. Η LTE-Advanced υποβλήθηκε ως υποψήφια για το ITU-R το 2009 και τώρα περιλαμβάνεται στο σύνολο των τεχνολογιών ραδιοφωνικών διεπαφών που ανακοινώθηκαν από τον ITU-R τον Οκτώβριο του 2010 ως μέρος των προδιαγραφών της διεπαφής ραδιοεπικοινωνιών IMT-Advanced. Αυτό είναι πολύ ευθυγραμμισμένο με αυτό που είχε αρχικά αναφερθεί ως στόχος για το LTE, δηλαδή ότι το LTE θα πρέπει να αποτελέσει το σημείο εκκίνησης για την ομαλή μετάβαση στην ασύρματη πρόσβαση 4G (IMT-Advanced).

Κεφάλαιο 2 – LTE-A

2.1 Βασικές αρχές LTE - A

Το σύστημα μετάδοσης κάτω ζεύξης LTE βασίζεται σε συμβατικά OFDM. Το OFDM είναι ένα ελκυστικό σύστημα μετάδοσης και παρέχει προγραμματισμό εξαρτώμενο από το κανάλι. Αν και η καταστροφή του σήματος λόγω ενός καναλιού επιλεκτικής συχνότητας μπορεί καταρχήν να αντιμετωπιστεί με εξισορρόπηση στην πλευρά του δέκτη, η πολυπλοκότητα μιας τέτοιας εξίσωσης αρχίζει να καθίσταται ασύμμετρα υψηλή για υλοποίηση σε ένα τερματικό σε μεγαλύτερα εύρη ζώνης και ειδικά σε συνδυασμό με τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών όπως η χωρική πολυπλεξία. Επομένως, το OFDM είναι μια ελκυστική επιλογή για το LTE για το οποίο ένα ευρύ εύρος ζώνης και υποστήριξη για τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών ήταν βασικές απαιτήσεις. Το OFDM παρέχει επίσης ορισμένα πρόσθετα οφέλη σχετικά με το LTE [33]:

- Το OFDM παρέχει πρόσβαση στον τομέα συχνοτήτων, επιτρέποντας έτσι έναν πρόσθετο βαθμό ελευθερίας στον προγραμματιστή που εξαρτάται από το κανάλι σε σύγκριση με τον προγραμματισμό μόνο για το χρονικό πεδίο που χρησιμοποιείται στα μεγάλα συστήματα 3G.

- Το ευέλικτο εύρος ζώνης μετάδοσης για την υποστήριξη της λειτουργίας σε κατανομές φάσματος διαφορετικών μεγεθών είναι απλό με OFDM, τουλάχιστον από την άποψη της βασικής ζώνης, μεταβάλλοντας τον αριθμό OFDM υποφορέων που χρησιμοποιούνται για μετάδοση. Σημειώστε, ωστόσο, ότι η υποστήριξη ενός ευέλικτου εύρους ζώνης μετάδοσης απαιτεί επίσης ευέλικτο φιλτράρισμα RF κ.λπ., για το οποίο το ακριβές σχήμα μετάδοσης είναι σε μεγάλο βαθμό άσχετο. Παρόλα αυτά, η διατήρηση της ίδιας δομής επεξεργασίας βασικής ζώνης, ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης, διευκολύνει την ανάπτυξη και την υλοποίηση τερματικών. Η μετάδοση από την οποία διαβιβάζονται οι ίδιες πληροφορίες από πολλαπλούς σταθμούς βάσης είναι απλούστερη με OFDM.

Η αναβάθμιση LTE βασίζεται επίσης στη μετάδοση OFDM. Ωστόσο, λαμβάνονται διαφορετικά μέσα για τη μείωση της κυβικής μέτρησης των μεταδόσεων ανερχόμενης ζεύξης, επιτρέποντας έτσι την αύξηση της απόδοσης του ενισχυτή ισχύος στην πλευρά του τερματικού. Ειδικότερα, για τη μετάδοση δεδομένων uplink ο ρυθμιστής OFDM προηγείται από έναν προ-κωδικοποιητή DFT, οδηγώντας σε DFT-spread OFDM (DFTS - OFDM). Συ-

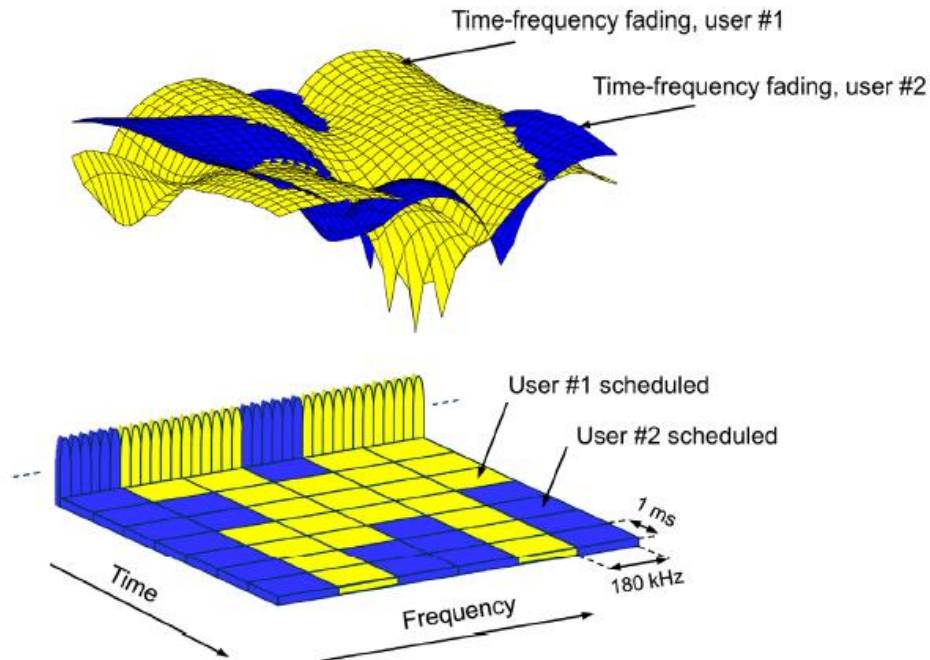
χνά ο όρος DFTS-OFDM χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύστημα μετάδοσης LTE uplink γενικός. Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι το DFTS - OFDM χρησιμοποιείται μόνο για μετάδοση δεδομένων uplink καθώς χρησιμοποιούνται άλλα μέσα για να επιτευχθεί μια χαμηλή κυβική μέτρηση για άλλους τύπους μεταδόσεων ανερχόμενης ζεύξης. Έτσι, το σύστημα μετάδοσης LTE uplink θα πρέπει να περιγραφεί ως OFDM με διαφορετικές τεχνικές, συμπεριλαμβανομένης της DFT προκαθορισμού για μετάδοση δεδομένων, που χρησιμοποιείται για τη μείωση της κυβικής μετρικής του μεταδιδόμενου σήματος [34].

Η χρήση της μετάδοσης OFDM για την ανερχόμενη ζεύξη LTE επιτρέπει τον ορθογώνιο διαχωρισμό των μεταδόσεων ανερχόμενης ζεύξης επίσης στην περιοχή συχνοτήτων. Ο ορθογώνιος διαχωρισμός είναι σε πολλές περιπτώσεις ευεργετικός καθώς αποφεύγει την παρεμβολή μεταξύ μεταδόσεων ανερχόμενης ζεύξης από διαφορετικά τερματικά μέσα στην κυψέλη. Η κατανομή ενός πολύ μεγάλου εύρους ζώνης για μετάδοση από ένα μόνο τερματικό δεν είναι μια αποτελεσματική στρατηγική σε καταστάσεις όπου ο ρυθμός δεδομένων περιορίζεται κυρίως από την διαθέσιμη ισχύ μετάδοσης τερματικού και όχι από το εύρος ζώνης. Σε τέτοιες καταστάσεις, σε ένα τερματικό μπορεί να διατεθεί μόνο ένα μέρος του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης και άλλα τερματικά μέσα στην κυψέλη μπορούν να προγραμματιστούν να μεταδίδουν παράλληλα στο υπόλοιπο μέρος του φάσματος. Με άλλα λόγια, το σύστημα μετάδοσης LTE uplink επιτρέπει τόσο τη διαίρεση χρόνου (TDMA) όσο και τη διαίρεση συχνότητας (FDMA) μεταξύ χρηστών.

2.2 Προγραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι και προσαρμογή ρυθμού

Στον πυρήνα του σχεδίου μετάδοσης LTE είναι η χρήση μετάδοσης κοινόχρηστου καναλιού με τους συνολικούς πόρους χρονικής συχνότητας που διανέμονται δυναμικά μεταξύ των χρηστών (εικόνα 8). Η χρήση μετάδοσης με κοινό κανάλι ταιριάζει με τις ταχέως μεταβαλλόμενες απαιτήσεις πόρων που θέτει η επικοινωνία μέσω πακέτων δεδομένων και επιτρέπει επίσης αρκετές από τις άλλες βασικές τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται η LTE. Ο έλεγχος του scheduler, για κάθε στιγμιαία στιγμή, στον οποίο πρέπει να αντιστοιχούν οι χρήστες των διαφορετικών τμημάτων του κοινόχρηστου πόρου [35]. Ο χρονοπρογραμματιστής καθορίζει επίσης την ταχύτητα δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε μετάδοση. Έτσι, η προσαρμογή του ρυθμού μπορεί να θεωρηθεί ως μέρος της λειτουργικό-

τητας προγραμματισμού. Ο προγραμματιστής είναι ένα βασικό στοιχείο και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική απόδοση του συστήματος.



Εικόνα 8: Προγραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι καθοδικής κατεύθυνσης στα πεδία χρόνου και συχνότητας

2.3 Εκδόσεις LTE

2.3.1. LTE έκδοση 9

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης έκδοσης του LTE, συνεχίστηκε η εργασία στο 3GPP με την εισαγωγή πρόσθετων λειτουργιών στη δεύτερη έκδοση των προδιαγραφών LTE, έκδοση 9. Τα κύρια νέα χαρακτηριστικά που εισήχθησαν στο πλαίσιο της έκδοσης 9, που ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2009, ήταν η υποστήριξη της μετάδοσης πολυεκπομπής, υποστήριξη για υπηρεσίες εντοπισμού θέσης με τη βοήθεια δικτύου και βελτιώσεις στη μορφοποίηση δέσμης στην κατερχόμενη ζεύξη [36].

Αναφορικά με την υποστήριξη απλής (broadcast) και πολλαπλής μετάδοσης (multicast) θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η μετάδοση πολλαπλών κυψελών συνεπάγεται τη μετάδοση των ίδιων πληροφοριών από πολλές κυψέλες. Με την αξιοποίηση αυτού στο τερματικό καθώς και με αποτελεσματική χρήση ισχύος σήματος από πολλαπλά σημεία κυψελών

κατά την ανίχνευση, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στην κάλυψη. Με τη μετάδοση όχι μόνο πανομοιότυπων σημάτων από θέσεις πολλαπλών κυψελών (με ταυτόσημη κωδικοποίηση και διαμόρφωση), αλλά συγχρονίζοντας το χρονισμό μετάδοσης μεταξύ των κυψελών, το σήμα στο τερματικό θα εμφανίζεται ακριβώς σαν ένα σήμα που μεταδίδεται από μία μοναδική θέση της κυψέλης και υπόκειται σε διάδοση πολλαπλών διαύλων [37].

Λόγω της ευρωστίας του OFDM στην πολλαπλή μετάδοση, μια τέτοια μετάδοση πολλών κυψελίδων, στην 3GPP που αναφέρεται επίσης ως μετάδοση Multicast/Broadcast Single-Frequency Network (MBSFN), όχι μόνο θα βελτιώσει την ισχύ του σήματος, αλλά θα μειώσει και τις παρεμβολές εντός της κυψέλης. Έτσι, η χρήση της OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), τόσο στην κατεύθυνση downlink όσο και στην κατεύθυνση uplink, μπορεί τελικά να περιορίζεται μόνο από θόρυβο και στη συνέχεια μπορεί, στην περίπτωση των μικρών κυψελών, να φτάσει σε εξαιρετικά υψηλές τιμές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση μετάδοσης MBSFN για απλή/πολλαπλή μετάδοση πολλαπλών κυψελών, αναλαμβάνει τη χρήση αυστηρού συγχρονισμού και χρονικής ευθυγράμμισης των σημάτων που μεταδίδονται διαφορετικές θέσεις κυψελών [38].

Η τοποθέτηση (positioning), όπως υποδηλώνει το όνομα, αναφέρεται στη λειτουργία του δικτύου ασύρματης πρόσβασης για τον προσδιορισμό της θέσης των μεμονωμένων τερματικών. Ο προσδιορισμός της θέσης ενός τερματικού μπορεί κατ' αρχήν να γίνει με την ενσωμάτωση ενός δέκτη GPS στο τερματικό. Αν και αυτό είναι ένα πολύ κοινό χαρακτηριστικό, δεν υπάρχουν όλοι οι τερματικοί σταθμοί που περιλαμβάνουν τον απαραίτητο δέκτη GPS και μπορεί επίσης να υπάρχουν περιπτώσεις όπου η υπηρεσία GPS δεν είναι διαθέσιμη. Επομένως, η έκδοση LTE 9 εισήγαγε εγγενή υποστήριξη θέσης στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Μετρώντας σε ειδικά σήματα αναφοράς που μεταδίδονται τακτικά από διαφορετικές θέσεις κυψελών, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση του τερματικού σταθμού.

Η έκδοση 9 ενίσχυσε την υποστήριξη για τον συνδυασμό της χωρικής πολυπλεξίας με τη διαμόρφωση δέσμης. Αν και ο συνδυασμός σχηματισμού δέσμης και χωρικής πολυπλεξίας ήταν ήδη δυνατός στην έκδοση 8, περιορίστηκε στην αποκαλούμενη προ - κωδικοποίηση βασισμένη σε βιβλίο κωδίκων (codebook-based precoding). Στην έκδοση 9, εισήχθη η υποστήριξη για χωρική πολυπλεξία σε συνδυασμό με την αποκαλούμενη προ - κωδικοποίηση (precoding), που βασίζεται σε μη - προ - κωδικοποίηση βασισμένη σε βιβλίο κωδίκων (non-codebook-based precoding), επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό βελτιωμένη ευελιξία στην ανάπτυξη διαφόρων συστημάτων πολλαπλών σημείων μετάδοσης.

2.3.2. LTE έκδοση 10

IMT - Advanced είναι ο όρος που χρησιμοποιείται από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) για τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, πέρα από το IMT-2000. Ως πρώτο βήμα στον ορισμό του IMT-Advanced, η ITU όρισε ένα σύνολο απαιτήσεων που πρέπει να πληρούν όλες οι τεχνολογίες που συμμορφώνονται με το IMT-Advanced [39]. Παραδείγματα αυτών των απαιτήσεων ήταν η υποστήριξη για εύρος ζώνης τουλάχιστον 40 MHz, μέγιστη φασματική απόδοση 15 bit/s/Hz στην κατερχόμενη ζεύξη και 6,75 bit/s/Hz στην ανερχόμενη ζεύξη (που αντιστοιχεί σε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τουλάχιστον 600 και 270 Mbit/s αντίστοιχα), και καθυστέρηση επιπέδου ελέγχου και επιπέδου χρήστη μικρότερη από 100 και 10 ms αντίστοιχα. Ένας από τους κύριους στόχους της έκδοσης LTE 10 ήταν να εξασφαλίσει ότι η τεχνολογία LTE ασύρματης πρόσβασης θα ήταν πλήρως συμβατή με τις απαιτήσεις IMT-Advanced, επομένως το όνομα LTE - Advanced χρησιμοποιείται συχνά για την έκδοση LTE 10 και μεταγενέστερη.

Ωστόσο, εκτός από τις απαιτήσεις της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU), το 3GPP όρισε επίσης τους δικούς του στόχους και απαιτήσεις για LTE - Advanced (LTE έκδοση 10) [39]. Αυτοί οι στόχοι/απαιτήσεις επέκτειναν τις απαιτήσεις της ITU, τόσο όσον αφορά την επιθετικότητά της, όσο και τη συμπερίληψη πρόσθετων απαιτήσεων. Μία σημαντική απαίτηση ήταν η συμβατότητα προς τα πίσω. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι ένα τερματικό LTE προγενέστερης έκδοσης θα πρέπει να έχει πρόσβαση σε ένα φορέα που υποστηρίζει τη λειτουργικότητα έκδοσης LTE-10, αν και δεν είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει όλα τα χαρακτηριστικά έκδοσης -10 αυτού του φορέα.

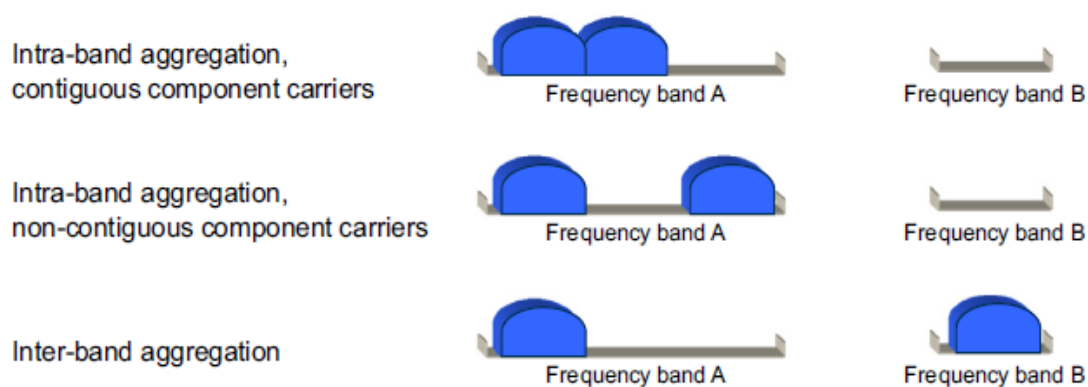
Η έκδοση 10 για το LTE ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2010 και συνεπαγόταν ενισχυμένη ευελιξία φάσματος LTE μέσω συσσωμάτωσης φορέα, περαιτέρω επέκτασης πολλαπλών κεραιών, εισαγωγή υποστήριξης για αναμετάδοση και πρόβλεψη βελτιώσεων στον τομέα του συντονισμού διεπιχειρησιακών παρεμβολών σε ετερογενείς αναπτύξεις δικτύου.

Η πρώτη έκδοση του LTE παρείχε ήδη εκτεταμένη υποστήριξη για την ανάπτυξη σε κατανομές συχνοτήτων διαφόρων χαρακτηριστικών, με εύρος ζώνης που κυμαίνεται από περίπου 1MHz έως 20 MHz σε ζεύγη και σε μη ζεύγη ζώνες. Με την έκδοση LTE 10 το εύρος ζώνης μετάδοσης μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω μέσω της λεγόμενης συσσωμάτωσης φορέα (carrier aggregation), όπου πολλαπλοί φορείς φορέων συσσωματώνονται και χρησιμοποιούνται από κοινού για μετάδοση από / προς ένα μόνο τερματικό. Μπορούν να συγκε-

ντρωθούν μέχρι πέντε φορείς, ενδεχομένως κάθε ένα από τα διαφορετικά εύρη ζώνης, επιτρέποντας τη μετάδοση εύρους ζώνης έως 100 MHz. Η συμβατότητα προς τα πίσω εξασφαλίστηκε καθώς κάθε φορέας χρησιμοποιεί τη δομή έκδοσης 8. Ως εκ τούτου, σε ένα τερματικό έκδοσης 8/9, κάθε φορέας θα εμφανίζεται ως φορέας της έκδοσης LTE-8, ενώ ένα τερματικό ικανό για συνάθροιση φορέα μπορεί να εκμεταλλευτεί το συνολικό συσσωρευμένο εύρος ζώνης, επιτρέποντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων.

Στη γενική περίπτωση, ένας διαφορετικός αριθμός φορέων συνιστωσών μπορεί να συγκεντρωθεί για την κατερχόμενη ζεύξη και την ανερχόμενη ζεύξη. Οι φορείς των συνιστωσών δεν πρέπει να είναι συνεχόμενοι σε συχνότητα, γεγονός που καθιστά δυνατή την εκμετάλλευση του κατακερματισμένου φάσματος. Οι φορείς εκμετάλλευσης με κατακερματισμένο φάσμα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας δεδομένων βασισμένες στη διαθεσιμότητα ενός ευρέος συνολικού εύρους ζώνης, παρόλο που δεν διαθέτουν ενιαία κατανομή φάσματος ευρείας ζώνης [40].

Από την άποψη της βασικής ζώνης, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων στην Εικόνα 9 που ακολουθεί, και όλα υποστηρίζονται από την έκδοση LTE 10. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα της εφαρμογής RF είναι πολύ διαφορετική, ενώ η πρώτη περίπτωση είναι η λιγότερο περίπλοκη. Έτσι, αν και η συνάθροιση (συσσωμάτωση) φορέα (carrier aggregation) υποστηρίζεται από τις βασικές προδιαγραφές, δεν θα το υποστηρίξουν όλοι οι τερματικοί σταθμοί. Επιπλέον, η έκδοση 10 έχει ορισμένους περιορισμούς στη συσσωμάτωση φορέα στην προδιαγραφή RF, σε σύγκριση με ό, τι έχει καθοριστεί για τη φυσική στρώση και τη σηματοδότηση, ενώ στην έκδοση 11 υπάρχει υποστήριξη για τη συσώρευση φορέων μέσα και μεταξύ ενός πολύ μεγαλύτερου αριθμού ζωνών.

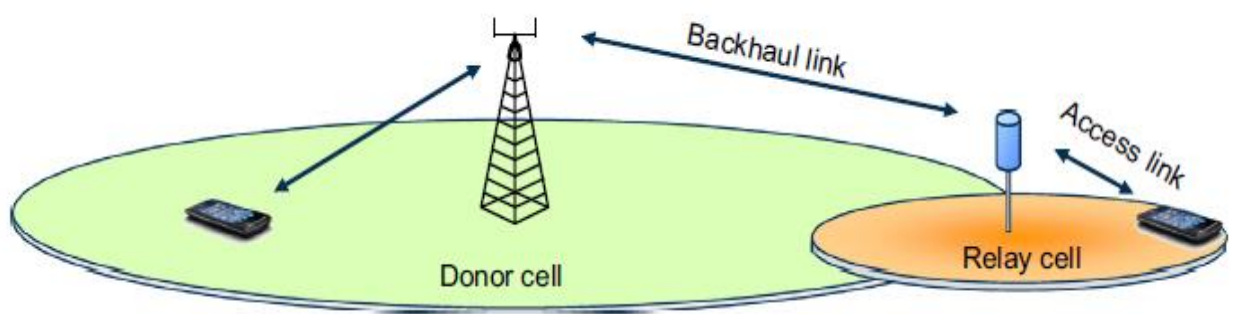


Εικόνα 9: Συνάθροιση φορέα

Στην έκδοση 10, η χωρική πολυπλεξία κάτω ζεύξης διευρύνθηκε για να υποστηρίξει μέχρι οκτώ στρώματα μετάδοσης. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια επέκταση της έκδοσης-9 σχηματισμού δέσμης διπλής στρώσης για να υποστηρίξει έως και οκτώ θύρες κεραίας και οκτώ αντίστοιχες στρώσεις [41]. Μαζί με την υποστήριξη για τη συσσώρευση φορέων, αυτό επιτρέπει ταχύτητες δεδομένων downlink μέχρι 3 Gbit/s σε φάσμα 100 MHz. Η χωρική πολυπλεξία Uplink μέχρι και τεσσάρων στρωμάτων εισήχθη επίσης ως μέρος της έκδοσης LTE 10. Μαζί με τη δυνατότητα συσσωματώσεων φορέων ανερχόμενης ζεύξης, αυτό επιτρέπει ταχύτητες δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης έως 1,5 Gbit/s σε φάσμα 100 MHz. Η χωρική πολυπλεξία Uplink αποτελείται από ένα σχήμα βασισμένο σε βιβλίο κωδίκων υπό τον έλεγχο του σταθμού βάσης, πράγμα που σημαίνει ότι η δομή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για σχηματισμό ακτινών με ανερχόμενη ζεύξη.

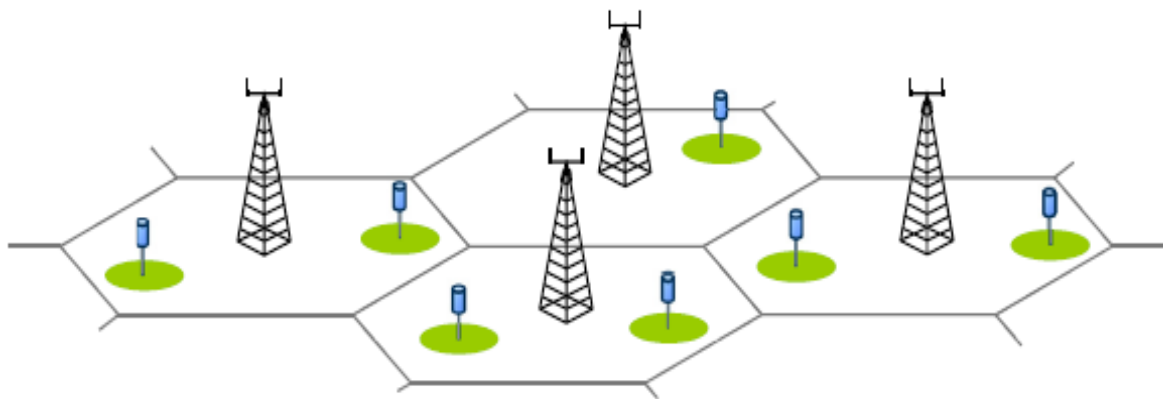
Μια σημαντική συνέπεια των επεκτάσεων πολλαπλών κεραιών στην έκδοση LTE 10 ήταν η εισαγωγή μιας ενισχυμένης δομής σήματος αναφοράς κατερχόμενης ζεύξης, η οποία διαχώρισε εκτενέστερα τη λειτουργία της εκτίμησης του καναλιού και τη λειτουργία της απόκτησης πληροφοριών καναλιού-κατάστασης. Σκοπός αυτού ήταν να καταστεί δυνατή η δημιουργία καινοτόμων διατάξεων κεραίας και νέων χαρακτηριστικών, όπως πιο σύνθετος συντονισμός/διαβίβαση πολλαπλών σημείων με ευέλικτο τρόπο.

Στο πλαίσιο του LTE, η αναμετάδοση υποδηλώνει ότι το τερματικό επικοινωνεί με το δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης, που είναι ασύρματα συνδεδεμένος με μια κυψέλη δότη, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία ασύρματης διεπαφής LTE, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10 που ακολουθεί. Από τελική άποψη, ο κόμβος αναμετάδοσης θα εμφανιστεί ως ένα συνηθισμένο κυψέλη. Αυτό έχει το σημαντικό πλεονέκτημα απλοποίησης της εφαρμογής του τερματικού και καθιστά τον κόμβο αναμετάδοσης συμβατό προς τα πίσω, δεδομένου ότι τα τερματικά LTE έκδοσης - 8/9 μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω του κόμβου αναμετάδοσης [42]. Στην ουσία, ο ηλεκτρονόμος είναι ένας σταθμός βάσης χαμηλής ισχύος που συνδέεται ασύρματα με το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου.



Εικόνα 10: Αναμετάδοση (Relaying)

Οι ετερογενείς αναπτύξεις αναφέρονται σε αναπτύξεις με ένα μείγμα κόμβων δικτύου με διαφορετική ισχύ εκπομπής και επικαλυπτόμενη γεωγραφική κάλυψη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11 που ακολουθεί.



Εικόνα 11: Παράδειγμα ετερογενούς ανάπτυξης με κόμβους χαμηλής ισχύος μέσα σε macrocells

Ένα τυπικό παράδειγμα είναι ένας κόμβος femto τοποθετημένος μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός macrocell. Αν και τέτοιες αναπτύξεις υποστηρίχθηκαν ήδη στην έκδοση 8, η έκδοση 10 εισήγαγε νέα μέσα για να χειριστεί την παρεμβολή μεταξύ επιπέδων που μπορεί να συμβεί μεταξύ, για παράδειγμα, ενός επιπέδου femto και της επικαλυπτόμενης macroστοιβάδας. Οι τεχνικές πολλαπλών σημείων συντονισμού που εισήχθησαν στην έκδοση 11 επεκτείνουν περαιτέρω το σετ εργαλείων για την υποστήριξη ετερογενών αναπτύξεων.

2.3.3. LTE έκδοση 11

Η έκδοση 11 επέκτεινε περαιτέρω την απόδοση και τις δυνατότητες του LTE. Ένα από τα πιο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά της έκδοσης LTE 11, που ολοκληρώθηκε στα τέ-

λη του 2012, ήταν η λειτουργία ασύρματης επικοινωνίας για το συντονισμό και τη μετάδοση πολλών σημείων. Άλλα παραδείγματα βελτίωσης στην έκδοση 11 ήταν βελτιώσεις συσσωμάτωσης φορέα, νέα δομή καναλιού ελέγχου και απαιτήσεις απόδοσης για πιο εξελιγμένους τερματικούς δέκτες. Σε όλες τις νέες κυκλοφορίες 3GPP, προστίθεται υποστήριξη για λειτουργία σε πρόσθετες ζώνες συχνοτήτων. Στην έκδοση 11, δεν προστέθηκε μόνο υποστήριξη για νέες ζώνες, αλλά και απαιτήσεις που καθορίστηκαν για τη συγκέντρωση φορέων μέσα και μεταξύ των υφιστάμενων και των νέων ζωνών. Σύμφωνα με την εξέλιξη της τεχνολογίας ραδιοσυχνοτήτων (RF), για την υποστήριξη μεγαλύτερων εύρους ζώνης πομπού και δέκτη, υπήρχαν επίσης απαιτήσεις που προστέθηκαν στις προδιαγραφές για σταθμούς βάσης πολλαπλών ζωνών, υποστηρίζοντας την ταυτόχρονη μετάδοση και/ή λήψη φορέων σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων .

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πρώτη έκδοση του LTE περιλάμβανε κάποια ειδική υποστήριξη για το συντονισμό μεταξύ σημείων μετάδοσης, που αναφέρεται ως *συντονισμός παρεμβολών μεταξύ κυψελών (ICIC - Inter-Cell Interference Coordination)*, ως μέσο τουλάχιστον για τον έλεγχο της παρεμβολής μεταξύ κυψελών. Ωστόσο, η υποστήριξη αυτού του συντονισμού επεκτάθηκε σημαντικά ως μέρος της έκδοσης LTE 11, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας για πολύ πιο δυναμικό συντονισμό μεταξύ των σημείων μετάδοσης [42].

Σε αντίθεση με την έκδοση - 8 ICIC, η οποία περιοριζόταν στον ορισμό ορισμένων μηνυμάτων X2 για τη διευκόλυνση του συντονισμού μεταξύ των κυψελών, οι δραστηριότητες έκδοσης-11 επικεντρώθηκαν στις λειτουργίες ασύρματων διεπαφών και στη λειτουργικότητα των τερματικών για να βοηθήσουν διαφορετικά μέσα συντονισμού, ανατροφοδότηση κατάστασης για πολλαπλά σημεία μετάδοσης. Από κοινού αυτές οι λειτουργίες και λειτουργίες εμπίπτουν στο όνομα μετάδοσης/λήψης συντεταγμένων πολλαπλών σημείων (CoMP - Coordinated Multi - Point). Η βελτίωση στη δομή του σήματος αναφοράς ήταν επίσης ένα σημαντικό μέρος του υποστηρίγματος του CoMP, όπως και η δομή ενισχυμένου καναλιού ελέγχου που εισήχθη ως τμήμα της έκδοσης 11.

Στην έκδοση 11 εισήχθη μια νέα δομή συμπληρωματικού καναλιού ελέγχου προκειμένου να υποστηριχθεί ο συντονισμός παρεμβολής μεταξύ των κυψελίδων και να αξιοποιηθεί η πρόσθετη ευκαμψία της νέας δομής αναφοράς σήματος όχι μόνο για τη μετάδοση δεδομένων, η οποία ήταν η περίπτωση στην έκδοση 10 αλλά και για τον έλεγχο σηματοδότησης. Η νέα δομή του καναλιού ελέγχου μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως προϋπόθεση για

πολλά σχέδια CoMP, αν και είναι επίσης επωφελής για τον σχηματισμό δεσμών ακτινών (beam-forming) και το συντονισμό παρεμβολών περιοχών συχνοτήτων.

Η συσσωμάτωση (aggregation) του φορέα εισήχθη στην έκδοση 10, αλλά για το TDD (Time Division Duplex) περιορίστηκε στην περίπτωση όλων των φορέων συνιστωσών που είχαν τις ίδιες κατανομές κατερχόμενης ζεύξης. Στην έκδοση 11, ο περιορισμός αυτός απομακρύνθηκε και υποστηρίζεται η συσσωμάτωση πολλαπλών φορέων TDD με διαφορετικές κατανομές μεταφοράς δεδομένων μεταξύ σταθμού βάσης και χρήστη. Το κίνητρο ήταν να βελτιωθεί η συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης σε περίπτωση συνάθροισης φορέα [43]. Μία ενδιαφέρουσα όψη της συσσωμάτωσης διαφορετικών κατανομών μεταφοράς δεδομένων μεταξύ σταθμού βάσης και χρήστη είναι ότι το τερματικό μπορεί να χρειαστεί να δέχεται και να μεταδίδει ταυτοχρόνως, προκειμένου να χρησιμοποιήσει πλήρως και τους δύο φορείς. Έτσι, σε αντίθεση με προηγούμενες εκδόσεις, ένα τερματικό ικανό για TDD μπορεί, όπως και σε ένα τερματικό ικανό για FDD, να χρειάζεται ένα φίλτρο duplex.

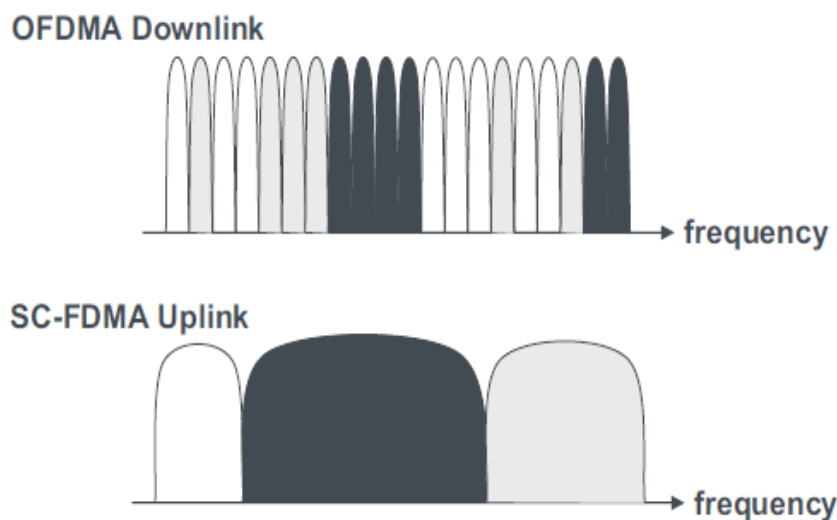
Ενώ οι απαιτήσεις RF για συσσωμάτωση φορέα καθορίστηκαν μόνο για ένα πολύ περιορισμένο σύνολο ζωνών συχνοτήτων στην έκδοση 10, αυτό επεκτάθηκε για να καλύψει έναν αριθμό ζωνών στην έκδοση 11. Οι απαιτήσεις για συσσωμάτωση φορέα εντός ζώνης ορίζονται σε διάφορες ζώνες, ενώ ένας ακόμη μεγαλύτερος αριθμός ζωνών έχει απαιτήσεις που ορίζονται για τη συσσωμάτωση φορέα μεταξύ ζωνών. Υπάρχουν επίσης απαιτήσεις που ορίζονται για μη συνεχή ομαδοποίηση φορέα, όπου έχουν προστεθεί ειδικότερα οι απαιτήσεις για τη στήριξη σταθμών βάσης που λειτουργούν σε μη συνεχόμενες κατανομές φάσματος.

2.4.Τεχνολογίες LTE δικτύων

Η εκπλήρωση της εκτεταμένης σειράς απαιτήσεων που περιγράφονται παραπάνω είναι δυνατή μόνο χάρη στην πρόοδο της υποκείμενης κινητής ασύρματης τεχνολογίας. Σε γενικές γραμμές, περιγράφουμε εδώ τρεις βασικές τεχνολογίες που έχουν διαμορφώσει το σχεδιασμό διασύνδεσης επικοινωνιών LTE: τεχνολογία πολλαπλών φορέων, τεχνολογία πολλαπλών κεραιών και εφαρμογή μεταφοράς πακέτων στη διασύνδεση ραδιοσυχνοτήτων.

2.4.1 Τεχνολογία πολλαπλών φορέων

Η υιοθέτηση μιας προσέγγισης πολλαπλών φορέων για πολλαπλή πρόσβαση στο LTE ήταν η πρώτη σημαντική επιλογή σχεδιασμού. Μετά την αρχική ενοποίηση των προτάσεων, τα υποψήφια σχέδια για την κατερχόμενη ζεύξη ήταν η Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση Διαχωρισμού Συχνότητας (OFDMA) και η Πολλαπλή WCDMA, ενώ τα υποψήφια σχέδια για την ανερχόμενη ζεύξη ήταν η Πολλαπλή Πρόσβαση (SC-FDMA) και πολλαπλών WCDMA [44]. Η επιλογή των συστημάτων πολλαπλής πρόσβασης έγινε τον Δεκέμβριο του 2005, με το OFDMA να επιλέγεται για μεταφορά δεδομένων από σταθμό βάσης προς χρήστη και το SC-FDMA για μεταφορά δεδομένων από χρήστη προς σταθμό βάσης. Και τα δύο αυτά σχήματα ανοίγουν το πεδίο συχνοτήτων ως νέα διάσταση ευελιξίας στο σύστημα, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Προβολή τομέα συχνοτήτων των τεχνολογιών LTE πολλαπλής πρόσβασης

Το OFDMA επεκτείνει την τεχνολογία πολλαπλών φορέων OFDM για να παρέχει ένα πολύ ευέλικτο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Το OFDM υποδιαιρεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης για μετάδοση σήματος σε ένα πλήθος περιορισμένου εύρους ζώνης υποφορέων, διευθετημένων με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι αμοιβαία κάθετοι μεταξύ τους, οι οποίοι είτε μεμονωμένα είτε σε ομάδες μπορούν να μεταφέρουν ανεξάρτητες ροές πληροφοριών. Στο OFDMA, αυτή η υποδιαίρεση του διαθέσιμου εύρους ζώνης γίνεται αντικείμενο εκμετάλλευσης μέσω διαμοιρασμού των υποφορέων μεταξύ πολλών χρηστών.

Αυτή η ευελιξία που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους

[45]:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά εύρη ζώνης φάσματος χωρίς να αλλάξουν οι βασικές παράμετροι του συστήματος ή ο σχεδιασμός του εξοπλισμού.
- Οι πόροι μεταβίβασης μεταβλητού εύρους ζώνης μπορούν να διατεθούν σε διαφορετικούς χρήστες και να προγραμματιστούν ελεύθερα στον τομέα συχνοτήτων.
- Διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση της κλασματικής συχνότητας και ο συντονισμός των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών.

Έχει αποκτηθεί τα τελευταία χρόνια μεγάλη εμπειρία με το OFDM, από την ανάπτυξη ψηφιακών συστημάτων ήχου και εικόνας όπως DAB, DVB και DMB. Αυτή η εμπειρία έχει επισημάνει μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα του OFDM, τα οποία περιλαμβάνουν:

- Ευστάθεια (ευρωστία) στα κανάλια διαμερισμού χρόνου, χάρη στην υποδιαίρεση του σήματος μετάδοσης ευρείας ζώνης σε πολλαπλούς χρήστες περιορισμένου εύρους ζώνης, επιτρέποντας την περιορισμένη αλληλεπίδραση μεταξύ συμβόλων μέσα σε ένα διάστημα προστασίας στην αρχή κάθε συμβόλου.
- Δέκτες χαμηλής πολυπλοκότητας, εκμεταλλευόμενοι την εξισορρόπηση του πεδίου συχνοτήτων.
- Απλός συνδυασμός σημάτων από πολλαπλούς πομπούς σε δίκτυα εκπομπής.

Αντίθετα, ο σχεδιασμός του πομπού για το OFDM είναι πιο δαπανηρός, καθώς ο λόγος αναλογίας μέγιστης προς μέση ισχύς (PAPR - Peak-to-Average Power Ratio) ενός σήματος OFDM είναι σχετικά υψηλός, με αποτέλεσμα την ανάγκη για ένα πολύ γραμμικό ενισχυτή ισχύος RF. Ωστόσο, αυτός ο περιορισμός δεν είναι ασυμβίβαστος με τη χρήση του OFDM για μεταφορές δεδομένων από σταθμό βάσης σε χρήστη, καθώς η εφαρμογή χαμηλού κόστους έχει χαμηλότερη προτεραιότητα για τον σταθμό βάσης από ότι για το κινητό τερματικό.

Ωστόσο, στην αντίθετη μεταφορά δεδομένων από χρήστη προς σταθμό βάσης, ο υψηλός λόγος αναλογίας μέγιστης προς μέση ισχύς (PAPR) του OFDM είναι δύσκολο να ανεκτός για τον πομπό του κινητού τερματικού, αφού είναι αναγκαίο να γίνει συμβιβασμός μεταξύ της ισχύος εξόδου που απαιτείται για καλή εξωτερική κάλυψη, της κατανάλωσης ισχύος και του κόστους του ενισχυτή ισχύος. Η SCFDMA παρέχει μια τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης που έχει πολλά κοινά με το OFDMA - ιδιαίτερα την ευελιξία στον

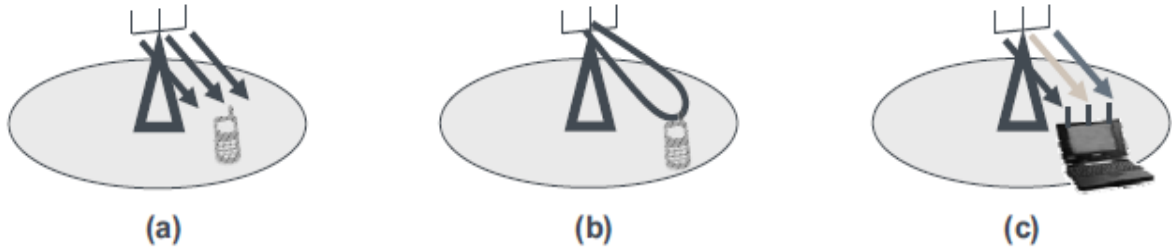
τομέα συχνοτήτων και την ενσωμάτωση ενός διαστήματος προστασίας στην αρχή κάθε μεταδιδόμενου συμβόλου για να διευκολύνει χαμηλής πολυπλοκότητας εξισορρόπησης τομέα στο δέκτη. Ταυτόχρονα, η SC-FDMA έχει σημαντικά χαμηλότερο PAPR. Συνεπώς, επιλύει σε κάποιο βαθμό το δίλημμα του τρόπου με τον οποίο η μεταφορά δεδομένων από χρήστη προς σταθμό βάσης μπορεί να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας πολλαπλών φορέων, αποφεύγοντας ταυτόχρονα το υπερβολικό κόστος για τον πομπό του κινητού τερματικού και διατηρώντας ένα λογικό βαθμό κόστους μεταξύ των τεχνολογιών μεταφοράς δεδομένων από χρήστη προς σταθμό βάσης και από σταθμό βάσης προς το χρήστη.

2 4.2 Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών

Η χρήση τεχνολογίας πολλαπλών κεραιών επιτρέπει την εκμετάλλευση του χωρικού τομέα ως μια άλλη νέα διάσταση. Αυτό καθίσταται απαραίτητο στην αναζήτηση υψηλότερων φασματικών αποδόσεων. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών, η θεωρητικά επιτεύξιμη φασματική απόδοση κλιμακώνεται γραμμικά με τον ελάχιστο αριθμό των κεραιών μετάδοσης και λήψης που χρησιμοποιούνται, τουλάχιστον σε κατάλληλα περιβάλλοντα ασύρματης μετάδοσης. Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών ανοίγει την πόρτα σε μια μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν προσφέρουν όλα αυτά τις θεωρητικές υποσχέσεις τους όταν πρόκειται για την εφαρμογή σε πρακτικά συστήματα. Οι πολλαπλές κεραιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους, βασισμένες κυρίως σε τρεις θεμελιώδεις αρχές, που απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 13 που ακολουθεί [46]:

- *Αύξηση της ποικιλομορφίας.* Χρήση της χωρικής ποικιλομορφίας που παρέχεται από τις πολλαπλές κεραιές για τη βελτίωση της μετάδοσης, έναντι της εξασθένισης πολλαπλών μονοπατιών.
- *Κέρδος συστοιχίας κεραιών.* Συγκέντρωση της ενέργειας σε μία ή περισσότερες δεδομένες κατευθύνσεις μέσω προκαταρκτικής μορφοποίησης ή μορφοποίησης δέσμης. Αυτό επιτρέπει επίσης την ταυτόχρονη προβολή πολλαπλών χρηστών που βρίσκονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις (το λεγόμενο MIMO πολλαπλών χρηστών).

- *Χωρικό πολλαπλασιαστικό κέρδος.* Μετάδοση πολλαπλών ροών σήματος σε ένα μόνο χρήστη σε πολλαπλά χωρικά επίπεδα, που δημιουργούνται από συνδυασμούς των διαθέσιμων κεραιών.



Εικόνα 13: Τρία θεμελιώδη οφέλη από πολλαπλές κεραιές:
(α) αύξηση της ποικιλομορφίας · (β) κέρδος συστοιχίας, (γ) πολλαπλασιαστικό κέρδος χώρου

Ένα μεγάλο μέρος της φάσης της μελέτης του LTE αφορούσε επομένως την επιλογή και το σχεδιασμό των διαφόρων χαρακτηριστικών πολλαπλών κεραιών που θα συμπεριληφθούν στην πρώτη έκδοση του LTE. Το τελικό σύστημα περιλαμβάνει αρκετές συμπληρωματικές επιλογές που επιτρέπουν την προσαρμοστικότητα ανάλογα με την ανάπτυξη του δικτύου και τις συνθήκες διάδοσης των διαφόρων χρηστών.

Κεφάλαιο 3 – Femtocells

3.1 Εισαγωγή

Οι σταθμοί βάσης femtocells (femto - BS) σχεδιάζονται να χρησιμοποιηθούν κυρίως για εσωτερικούς χώρους για την παροχή υψηλών ταχυτήτων δεδομένων σε εσωτερικούς χώρους και ποιότητας υπηρεσιών. Όντας μια φθηνή και εύκολη στην ανάπτυξη της λύση, τα femto - BS έχουν γίνει ένα από τα πολλά υποσχόμενα στοιχεία δικτύου για τη βελτίωση της εσωτερικής κάλυψης και την αποφόρτιση της κυκλοφορίας των σταθμών βάσης (macro-BS). Το 60% των φορέων πιστεύει ότι, σε μελλοντικές αναπτύξεις δικτύων, τα μικρά κυψέλες θα διαδραματίσουν σημαντικότερο ρόλο από τα macrocells και, ήδη από το 2013, οι femto-BS πελάτες έχουν ήδη ξεπεράσει τα μακροοικονομικά μεγέθη [24]. Η αυξανόμενη σημασία των femtocells έχει επιταχύνει τις προσπάθειες τυποποίησης τους

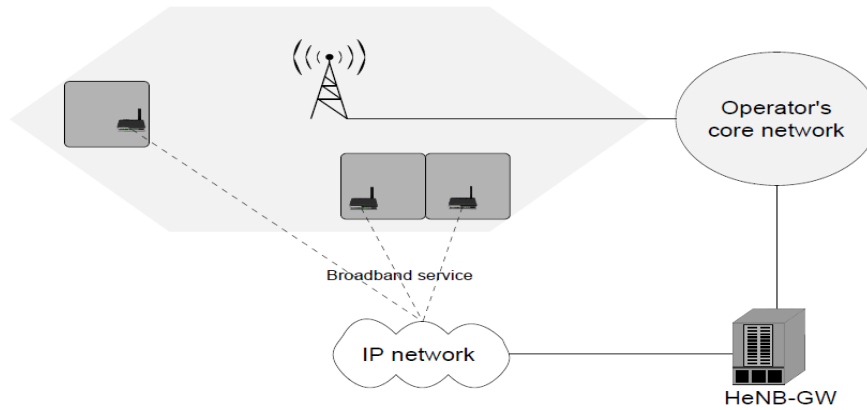
Ο πρωταρχικός οργανισμός τυποποίησης για τα femtocells είναι το Σχέδιο Σύμπραξης 3ης Γενιάς (3GPP). Εκτός από το 3GPP, το Forum Small Cell Forum (πρώην Femto Forum), ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που ιδρύθηκε το 2007 με διάφορους πωλητές και φορείς εκμετάλλευσης, συνέβαλε επίσης στη διαδικασία τυποποίησης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδότησε επίσης ένα έργο με τίτλο «Ευρυζωνικά εξελιγμένα δίκτυα FEMTO» με σκοπό την ανάπτυξη μελλοντικών τεχνολογιών femtocell για βελτιωμένες και ευρύτερες υπηρεσίες.

Σε αντίθεση με τα macro - BS, τα femto - BS είναι μικρής κλίμακας BS με χαμηλή ισχύ και χαμηλό κόστος και από την ίδια τους τη φύση μπορούν να αναπτυχθούν τυχαία από τους τελικούς χρήστες. Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες των δικτύων femtocell τα διαφοροποιούν από τα δίκτυα macrocell σε πολλές πτυχές, συμπεριλαμβανομένων των πολιτικών πρόσβασης και του αριθμού των εξυπηρετούμενων χρηστών. Καθώς αυτή η εργασία επικεντρώνεται κυρίως στα δίκτυα femtocell, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τα δίκτυα femtocell και τις αντίστοιχες προκλήσεις τους, προκειμένου να αναπτύξουμε αποτελεσματικές μεθόδους μετριασμού παρεμβολών.

3.2 Αρχιτεκτονική

Το Femto-BS (γνωστό και ως home evolved NodeB (HeNB)) χρησιμοποιεί τα κυψελοειδή πρότυπα όπως το Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), το LTE και το LTE-A που χρησιμοποιούνται επίσης από το επικαλυπτόμενο δίκτυο macrocell. Αυτά τα BS μπορούν να εγκατασταθούν από τελικούς χρήστες στις εγκαταστάσεις τους, όπως τα σημεία πρόσβασης Wireless Fidelity (Wi-Fi). Ωστόσο, σε αντίθεση με τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi, τα femto-BS χρησιμοποιούν το φάσμα που έχει λάβει ο φορέας του δικτύου. Ανάλογα με το επιχειρηματικό μοντέλο του χειριστή, τα femto-BS μπορούν να αγοραστούν εν μέρει ή εξ' ολοκλήρου από ένα χρήστη. Επειδή είναι χαμηλής ισχύος (η ισχύς ενός femto-BS που έχει μία κεραία πρέπει να είναι μικρότερη από 20 dBm [27]), οι femto-BS έχουν περιορισμένη κάλυψη και είναι σε θέση να εξυπηρετούν λιγότερους χρήστες από τους macro-BS. Επειδή οι femto-BS αναπτύσσονται από τους τελικούς χρήστες, έχουν ένα plug-and-play χαρακτήρα, όπου μπορούν να διαμορφώσουν τις παραμέτρους ασύρματης πρόσβασης μετά την ενεργοποίησή τους.

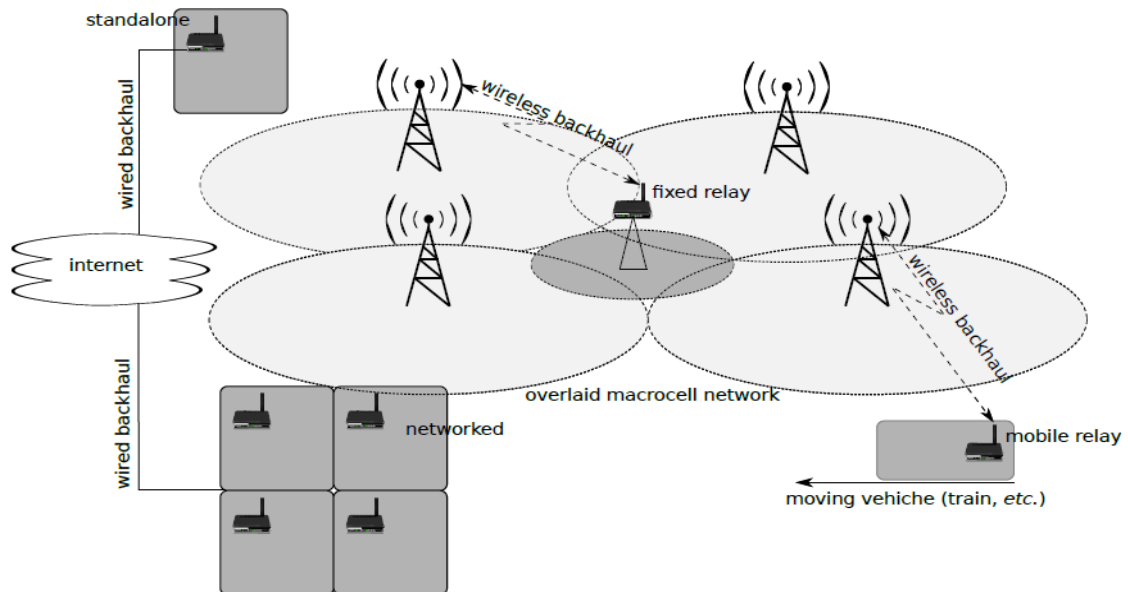
Ως σύνδεση backhaul στο δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης, χρησιμοποιούνται ευρυζωνικές συνδέσεις όπως ψηφιακή γραμμή συνδρομητών (DSL) ή οπτικές ίνες. Μια οντότητα δικτύου που ονομάζεται πύλη HeNB (HeNB-GW), χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση μεγάλου αριθμού femto-BS και τη σύνδεσή τους στο κεντρικό δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης [45]. Η HeNB-GW είναι επίσης υπεύθυνη για τη διαχείριση των femto-BS που είναι συνδεδεμένα με αυτήν. Λόγω της μη ασφαλούς σύνδεσης στο Internet ανάμεσα σε femto-BS και HeNB-GW, οι σήραγγες Security Protocol (IPsec) χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση της επικοινωνίας μεταξύ αυτών των δύο οντοτήτων [46]. Η επισκόπηση της ανάπτυξης ενός δικτύου femtocell φαίνεται στην Εικόνα 14 που ακολουθεί:



Εικόνα 14: Ανάπτυξη δικτύου femtocell

3.2.1 Περιοχές εφαρμογής

Με την ανάπτυξη των femto-BS, η ασύρματη υπηρεσία που παρέχεται από τους χειριστές γίνεται πιο ευρέως προσβάσιμη με βελτιωμένη ποιότητα. Υπάρχουν αρκετοί χώροι χρήσης για femtocells. Στο [47] τα femtocells ομαδοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τις περιπτώσεις χρήσης τους, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 15, που ακολουθεί. Μπορούμε να τα απαριθμήσουμε ως εξής:



Εικόνα 15: Παραδείγματα τεσσάρων περιπτώσεων χρήσης femtocells

- *Αυτόνομα femtocells (Standalone Femtocells)*: femtocells που χρησιμοποιούνται κυρίως για ιδιωτικές κατοικίες που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές. Ανάλογα με τη θέση αυτών των femtocells, μια σύνδεση backhaul μπορεί να είναι ενσύρματη ή ασύρματη.

- *Δικτυωμένα femtocells (Networked Femtocells)*: αναπτύσσονται σε μεγάλους εσωτερικούς χώρους, όπως σε επιχειρήσεις ή εμπορικά κέντρα. Έχουν μια ενσύρματη σύνδεση backhaul στο δίκτυο του φορέα εκμετάλλευσης.
- *Σταθερής αναμετάδοσης femtocells (Fixed Relay Femtocells)*: υπαίθρια femtocell που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της κάλυψης και της βελτίωσης χωρητικότητας του δικτύου, όταν η υπηρεσία ενός macro-BS δεν επαρκεί. Μια ασύρματη σύνδεση backhaul απαιτείται για αυτόν τον τύπο femtocells.
- *Φορητής αναμετάδοσης femtocells (Fixed Relay Femtocells)*: χρησιμοποιούνται σε οχήματα όπως τα τρένα για την παροχή υπηρεσιών στους χρήστες κινητών τηλεφώνων. Αυτά τα femtocell χρειάζονται μια ασύρματη σύνδεση backhaul καθώς είναι φορητά κατά τη διάρκεια των λειτουργιών τους.

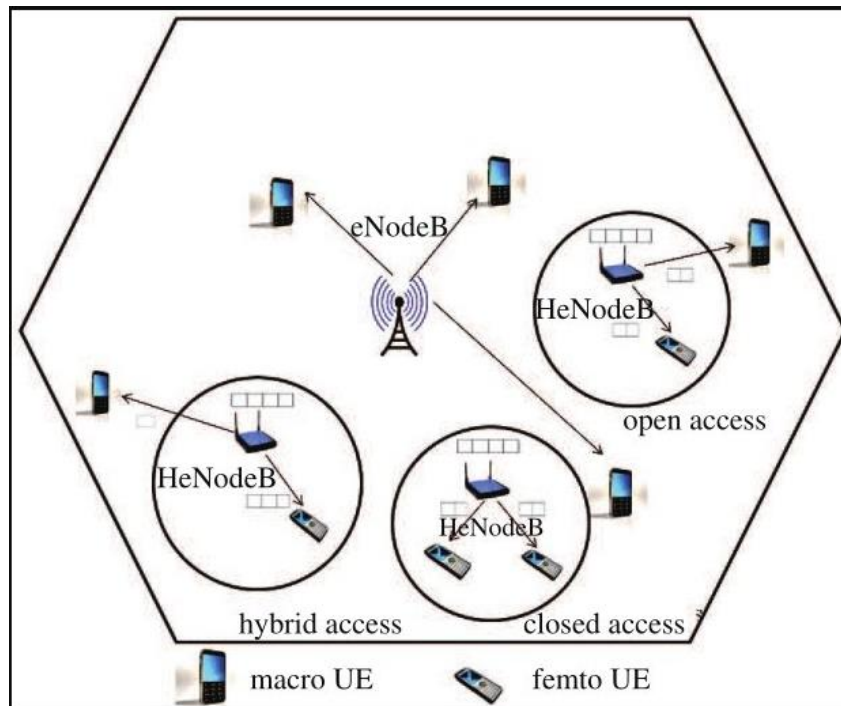
3.2.2 Πολιτικές πρόσβασης

Σε συμβατικά δίκτυα macrocell, τα BS αναπτύσσονται από τους φορείς εκμετάλλευσης και όλοι οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε macrocells χωρίς περιορισμούς. Από την άλλη πλευρά, οι femto-BS μπορούν να ελέγξουν ποιοι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτά. Αυτοί οι περιορισμοί είναι απαραίτητοι, καθώς τα femto-BS και οι αντίστοιχες συνδέσεις backhaul έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν ένα μικρό αριθμό χρηστών. Επίσης, οι ιδιοκτήτες των femto-BS μπορεί να μην θέλουν να μοιράζονται πόρους τους χωρίς να αποκομίσουν κάποιο όφελος. Επομένως, προκειμένου να αντιμετωπιστούν διαφορετικές στρατηγικές ανάπτυξης, καθορίζονται τρεις πολιτικές πρόσβασης για τα femtocells: η κλειστή πρόσβαση, η ανοικτή πρόσβαση και η υβριδική πρόσβαση [48].

Οι κλειστές ομάδες πρόσβασης femto-BS εξυπηρετούν ένα σταθερό σύνολο χρηστών. Η ομάδα των χρηστών που επιτρέπεται να έχει πρόσβαση στο femto-BS είναι γνωστή ως *κλειστή συνδρομητική ομάδα (CSG)*. Αυτά τα femto-BS χρησιμοποιούνται κυρίως για ιδιωτική οικιακή χρήση. Έτσι, οι εξωτερικοί χρήστες macrocells, που δεν ανήκουν στην CSG, δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν από το femto-BS. Τα femtocells με πολιτικές κλειστής πρόσβασης απεικονίζονται στην Εικόνα 16 που ακολουθεί.

Οι femto-BS ανοικτής πρόσβασης προσφέρουν υπηρεσίες σε όλους τους χρήστες χωρίς κανένα περιορισμό. Αυτά τα femtocells μπορούν να αναπτυχθούν σε επιχειρήσεις ή δημόσιους χώρους, όπως εμπορικά κέντρα, προκειμένου να αποφορτιστεί η κυκλοφορία από το επικαλυπτόμενο macrocell.

Τέλος, τα femto-BS υβριδικής πρόσβασης είναι ανοιχτά σε όλους τους χρήστες, αλλά οι χρήστες CSG έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα από τους άλλους χρήστες. Αυτή η προτεραιότητα μπορεί να είναι από πλευράς πόρων, στους οποίους οι χρήστες μη CSG μπορούν να έχουν πρόσβαση μόνο σε περιορισμένο αριθμό πόρων. Μια άλλη επιλογή μπορεί να είναι η εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών τιμολόγησης στους χρήστες που ανήκουν στην CSG και στους χρήστες που δεν ανήκουν στην CSG.



Εικόνα 16: Πολιτικές πρόσβασης femtocell

3.2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης femtocell

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα της ανάπτυξης των femtocells που μπορούν να συνοψιστούν ως:

- Τα Femto-BS χρησιμοποιούν την ίδια διασύνδεση επικοινωνίας με τον επικάλυπτομενο macro-BS έτσι ώστε οι χρήστες να μπορούν να

χρησιμοποιήσουν το ίδιο μοντέλο για στρώματα macro και femto. Αυτό φέρνει καθολική κάλυψη εσωτερικών και εξωτερικών χώρων με μικρή επίδραση στην τυποποίηση.

- Οι χρήστες μπορούν να λαμβάνουν σήματα με μειωμένες παρεμβολές SINR (Signal-To-Interference-Plusnoise Power Ratio), ακόμη και με χαμηλή ισχύ εκπομπής του femtocell χάρη στη μικρή απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Επίσης καθώς οι κινητές συσκευές καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια για να συνδεθούν με κοντινό σταθμό βάσης, βελτιώνεται η διάρκεια ζωής των μπαταριών του [36].
- Λόγω της αύξησης της χωρικής επαναχρησιμοποίησης των πόρων και της μείωσης της απώλειας διείσδυσης από την τοιχοποιία, οι χρήστες που εξυπηρετούνται από femto-BS απολαμβάνουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Έτσι, με την ανάπτυξη femtocells στην κορυφή του επιπέδου των macrocells, αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του συστήματος.
- Με την εγκατάσταση του femtocell, ο χειριστής μπορεί να εκφορτώσει την εσωτερική κυκλοφορία. Έτσι, μπορούν να ανατεθούν περισσότεροι πόροι σε εξωτερικούς χρήστες, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσής τους.
- Η ανάπτυξη των femto-BS μειώνει τελικά την ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη macro-BS. Πρόκειται για μια αποτελεσματική λύση για τους φορείς εκμετάλλευσης όσον αφορά το κόστος λειτουργίας, καθώς το κόστος μιας εγκατάστασης femto-BS είναι πολύ χαμηλότερο από την ανάπτυξη μιας μακροοικονομικής μονάδας BS. Το κόστος ενός macro -BS σε έναν φορέα του δικτύου δεν περιλαμβάνει μόνο το κόστος υλικού, αλλά περιλαμβάνει επίσης τη χρηματοδοτική μίσθωση, το backhaul και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, ο φορέας του δικτύου δεν επιβαρύνονται το κόστος λειτουργίας των femtocells, καθώς αυτό καλύπτεται από τους χρήστες στους οποίους ανήκει.. Επίσης, η τιμή ενός femto-BS καταβάλλεται εν' μέρει από τον τελικό χρήστη. Επομένως, η ανάπτυξη του femtocell μειώνει το κόστος για τους φορείς του δικτύου [48].

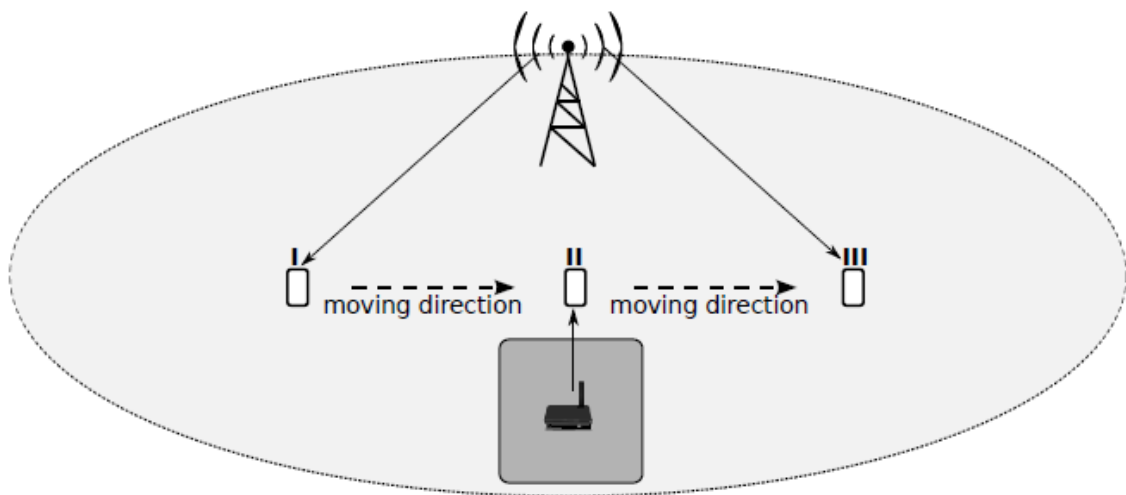
- Η ανάπτυξη small cells μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και τις αποδόσεις σε ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα [8], [21].

Αρχικά, τα femtocells θεωρήθηκαν ότι αναπτύχθηκαν μόνο για λύσεις κάλυψης υπό τον έλεγχο των φορέων εκμετάλλευσης αντί για παραγωγή μαζικής αγοράς. Ωστόσο, η αυξημένη προσπάθεια τυποποίησης επηρέασε θετικά την εμπορευματοποίηση των femto-BS [17]. Εως το τέλος του 2010 υπήρχαν 2,3 εκατομμύρια femto-BS ενεργά. Αυτή η πυκνή ανάπτυξη των femto-BS έρχεται προφανώς με προκλήσεις που μπορούν να αναφερθούν ως:

- Το πιο σοβαρό και επιζήμιο πρόβλημα που προκύπτει από την εισαγωγή των femto-BS είναι η αύξηση των παρεμβολών. Ο μετριασμός των παρεμβολών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ειδικά σε δίκτυα όπου υπάρχουν πυκνοκατοικημένες περιοχές και οι μονάδες αναπτύσσονται πυκνά.
- Οι χρόνοι μετάδοσης του Femto-BS θα πρέπει να ευθυγραμμιστούν με macro-BS, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές πολλαπλής πρόσβασης και να επιτευχθεί η σωστή μεταβίβαση μεταξύ των επιπέδων.
- Δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές διαθέτουν plug-and-play χαρακτήρα, τα femtocells θα πρέπει να αυτο-βελτιστοποιηθούν και να διαμορφώνουν τις παραμέτρους τους σύμφωνα με το δυναμικό τους περιβάλλον.
- Η υπηρεσία backhaul που παρέχεται από την ευρυζωνική τεχνολογία δεν είναι τόσο προηγμένη όσο η backhaul που χρησιμοποιείται για macro-BS. Για παράδειγμα, η απόδοση καθυστέρησης των δικτύων macrocells δεν μπορεί να επιτευχθεί από την τρέχουσα ευρυζωνική υπηρεσία. Επίσης, η απόδοση της υπηρεσίας backhaul είναι περιορισμένη αν μια άλλη ευρυζωνική υπηρεσία όπως το Wi-Fi είναι ταυτόχρονα που χρησιμοποιείται με femto-BS.
- Κάθε BS στο δίκτυο έχει ταυτότητα κυψελών γνωστή ως φυσική ταυτότητα κυψελών (PCI - physical cell identity) προκειμένου να αναγνωριστεί από γειτονικές κυψέλες. Μια PCI μιας κυψέλης θα πρέπει να είναι τοπικά μοναδική για να αποφεύγεται η σύγχυση μεταξύ των κυψελών. Σε αντίθεση με τα macro-BS, οι θέσεις των femto-BS μπορούν να αλλάξουν. ως εκ τούτου, πρέπει να ενημερώσουν δυναμικά τους PCI τους. Επιπλέον, στο LTE, ο συνολικός αριθμός των PCI που ορίζονται για BS είναι

504 [1]. Ως εκ τούτου, σε δίκτυα όπου τα femto-BS αναπτύσσονται πυκνά, θα είναι προβληματικό για κάθε BS να αποκτήσει μια μοναδική PCI.

- Femto-BS χρησιμοποιεί το αδειοδοτημένο φάσμα στο οποίο εφαρμόζονται οι αυστηροί κανονισμοί από τις κυβερνήσεις. Αυτό φέρνει επιπλέον ευθύνες για τους χειριστές, όπως ο περιορισμός ισχύος και ο ακριβής εντοπισμός των femto-BS για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.
- Η ανάπτυξη των femto-BS αυξάνει τα γενικά έξοδα σηματοδότησης στο δίκτυο. Αυτό το πρόβλημα γίνεται πιο εμφανές σε περιπτώσεις ανάπτυξης ανοικτής πρόσβασης και οδηγεί σε περιττές μετακινήσεις χρηστών.
- Για παράδειγμα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 17, ένας macro-user που διέρχεται κοντά σε ένα σπίτι με ένα ενεργό femto-BS κάνει την μετάβαση στο femtocell κατά τη χρονική περίπτωση II, αλλά αλλάζει πίσω στο macrocell στην χρονική περίπτωση III καθώς απομακρύνεται από το σπίτι. Έτσι, ο χρήστης πραγματοποιεί δύο περιττές διαδικασίες παράδοσης που προκαλούν επιπλέον σηματοδότηση.



Εικόνα 17: Ένα παράδειγμα διαδικασίας παράδοσης που εφαρμόστηκε από ένα χρήστη. Τα βέλη υποδεικνύουν τη μετάδοση από μια υπηρεσία BS.

- Στα δίκτυα macrocell, οι φορείς του δικτύου έχουν πλήρη έλεγχο στο δίκτυο. Αποφασίζουν πού να αναπτύξουν μια μακροεντολή BS και να παράσχουν μια

σύνδεση backhaul μεταξύ του macro-BS και του βασικού τους δικτύου. Ωστόσο, τα femto-BS αναπτύσσονται από τους τελικούς χρήστες κατά τρόπο ad hoc, οπότε ο χειριστής δεν μπορεί να γνωρίζει εκ των προτέρων την τοποθεσία. Επίσης, η ευρυζωνική υπηρεσία που χρησιμοποιείται για backhaul μπορεί να παρέχεται από μια τρίτη εταιρεία που δεν είναι υπό τον έλεγχο του χειριστή. Σε μια τέτοια περίπτωση, το μερίδιο των εσόδων μεταξύ του παρόχου ευρυζωνικών υπηρεσιών και του φορέα εκμετάλλευσης είναι επίσης ένα ανοικτό ζήτημα.

- Η επιλογή μιας κατάλληλης πολιτικής πρόσβασης είναι μια άλλη πρόκληση για τα δίκτυα femtocell. Οι ιδιοκτήτες του femto-BS προτιμούν να έχουν κλειστά femtocells πρόσβασης. Δεν θέλουν να μοιράζονται τους πόρους των δικών τους femto-BS με άλλα άτομα, εφόσον καλυπτουν οι ίδιοι το κόστος λειτουργίας και εγκατάστασης και δεν κερδίζουν από αυτό. Από την άλλη πλευρά, οι φορείς του δικτύου ευνοούν την ανάπτυξη femtocells ανοικτής πρόσβασης, δεδομένου ότι είναι λιγότερο δύσκολο να χειριστούν παρεμβολές σε τέτοια δίκτυα. Για παράδειγμα, με την ανάπτυξη femtocell με ανοιχτή πρόσβαση, οι macro - χρήστες κοντά σε ένα femto-BS μπορούν να μεταβούν στο femto-BS αν αντιμετωπίσουν χαμηλή ποιότητα σήματος από το macros-serving. Διερευνάται στο [11] ότι οι υψηλότερες χωρητικότητες αποκτώνται με τη χρήση femtocells ανοικτής πρόσβασης αντί για femtocells κλειστής πρόσβασης.

3.3 Σενάρια παρεμβολών σε ετερογενείς αναπτύξεις

Μία διακριτή ιδιότητα μιας ετερογενούς ανάπτυξης είναι η μεγάλη διαφορά στην ισχύ μετάδοσης μεταξύ του επικαλυπτόμενου επίπεδου και του υποκείμενου femto επιπέδου. Ανάλογα με το σενάριο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά πιο πολύπλοκα σενάρια παρεμβολής σε σύγκριση με ένα ομοιογενές δίκτυο, ειδικότερα την παρεμβολή μεταξύ των επιπέδων. Ο χειρισμός παρεμβολών μεταξύ επιπέδων είναι επομένως μια κρίσιμη πτυχή στις περισσότερες ετερογενείς αναπτύξεις [49].

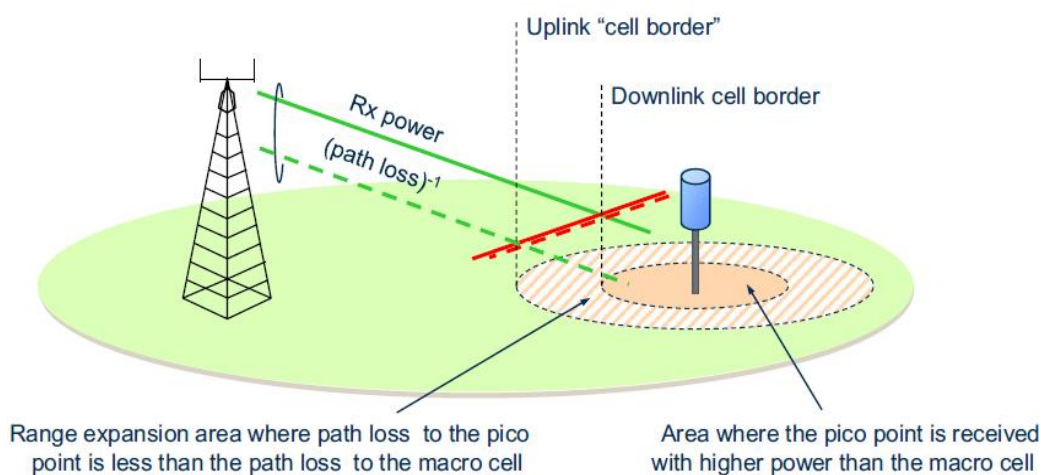
Εάν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί πόροι συχνοτήτων, ιδιαίτερα διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για τα διαφορετικά επίπεδα, η παρεμβολή μεταξύ επιπέδων είναι μικρότερο πρόβλημα. Ο διαχωρισμός συχνότητας είναι επίσης ο παραδοσιακός τρόπος

χειρισμού παρεμβολών μεταξύ επιπέδων, για παράδειγμα, στο GSM, όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες φορέων στα διάφορα επίπεδα. Ωστόσο, για μια τεχνολογία ευρείας ζώνης ραδιοεπικοινωνίας, όπως το LTE, χρησιμοποιώντας διαφορετικές συχνότητες φορέα για διαφορετικά επίπεδα μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητο κατακερματισμό φάσματος. Για παράδειγμα, για έναν φορέα εκμετάλλευσης που έχει πρόσβαση σε φάσμα 20 MHz, ένας στατικός διαχωρισμός συχνότητας μεταξύ δύο επιπέδων θα σήμαινε ότι το συνολικό διαθέσιμο φάσμα έπρεπε να διαιρεθεί, ενώ λιγότερο από 20 MHz φάσματος ήταν διαθέσιμο σε κάθε επίπεδο. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τους μέγιστους επιτευξίμους ρυθμούς δεδομένων σε κάθε επίπεδο. Επίσης, η ανάθεση ενός σημαντικού μέρους του συνολικού διαθέσιμου φάσματος σε ένα επίπεδο κατά τη διάρκεια περιόδων σχετικά χαμηλής κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική χρήση του φάσματος. Έτσι, με ένα ευρυζωνικό σύστημα υψηλής ταχύτητας δεδομένων όπως το LTE, θα πρέπει κατά προτίμηση να είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός πολυστρωματικού δικτύου με το ίδιο φάσμα διαθέσιμο σε όλα τα επίπεδα. Παρόλα αυτά, η χωριστή κατανομή φάσματος για τα δύο επίπεδα είναι ένα σχετικό σενάριο, ειδικά εάν διατίθεται νέο φάσμα σε πολύ υψηλές συχνότητες λιγότερο κατάλληλες για κάλυψη ευρείας περιοχής. Επιπλέον, αναπτύξεις διαχωριζόμενες από συχνότητα υποδηλώνουν ότι το σχήμα διπλής όψης μπορεί να επιλεγεί ανεξάρτητα μεταξύ των επιπέδων, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας FDD στο macro επίπεδο ευρείας περιοχής και TDD στο femto επίπεδο τοπικής περιοχής.

Η ταυτόχρονη χρήση του ίδιου φάσματος σε διαφορετικά στρώματα συνεπάγεται παρεμβολή μεταξύ επιπέδων [37]. Τα χαρακτηριστικά της παρεμβολής μεταξύ επιπέδων εξαρτώνται από τη δύναμη μετάδοσης στο αντίστοιχο επίπεδο, καθώς και από τη στρατηγική σύνδεσης κόμβου που χρησιμοποιείται. Παραδοσιακά, η σύνδεση κόμβου ή η συσχέτιση κυψελών - δηλαδή ο προσδιορισμός του σημείου δικτύου στο οποίο πρέπει να συνδέεται το τερματικό, βασίζεται σε μετρήσεις τερματικού της ληφθείσας ισχύος κάποιου σήματος κατερχόμενης ζεύξης, πιο συγκεκριμένα στα ειδικά σήματα αναφοράς για την κυψέλη στην περίπτωση του LTE. Με βάση το τερματικό που αναφέρει αυτές τις μετρήσεις στο δίκτυο, το δίκτυο αποφασίζει αν πρέπει να πραγματοποιηθεί η παράδοση ή όχι. Πρόκειται για μια απλή και στιβαρή προσέγγιση. Σε ομοιογενείς αναπτύξεις με όλα τα σημεία μετάδοσης που έχουν την ίδια ισχύ, οι μετρήσεις κατερχόμενης ζεύξης αντανakλούν την απώλεια διαδρομής ανερχόμενης ζεύξης και η βελτιστοποιημένη σύνδεση δικτύου είναι επίσης λογική από την άποψη της ανερχόμενης ζεύξης. Ωστόσο,

σε μια ετερογενή ανάπτυξη, αυτή η προσέγγιση μπορεί να αμφισβητηθεί λόγω της μεγάλης διαφοράς στην ισχύ μετάδοσης μεταξύ των επιπέδων.

Καταρχήν, το καλύτερο σημείο λήψης ανερχόμενης ζεύξης δεν είναι αναγκαστικά το καλύτερο σημείο μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης, υποδηλώνοντας ότι ιδανικά θα πρέπει να προσδιορίζονται ξεχωριστά τα σημεία ανερχόμενης ζεύξης και κατερχόμενης ζεύξης. Για παράδειγμα, η επιλογή σημείου κατερχόμενης ζεύξης θα μπορούσε να βασίζεται στην ισχύ του σήματος, ενώ η επιλογή σημείων ανερχόμενης ζεύξης κατά προτίμηση βασίζεται στην χαμηλότερη απώλεια διαδρομής. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 18 που ακολουθεί, όπου το "κυψελοειδές περίγραμμα" είναι διαφορετικό για uplink και downlink [40]. Εντούτοις, καθώς υπάρχουν χρονικές εξαρτήσεις μεταξύ της ανερχόμενης ζεύξης και της κατερχόμενης ζεύξης, οι δύο συνδέσεις στην πράξη τερματίζονται στον ίδιο κόμβο². Κατά συνέπεια η σύνδεση κόμβου αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ της καλύτερης επιλογής από την άποψη ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης.



Εικόνα 11: Περιοχή υψηλής παρεμβολής σε ετερογενή ανάπτυξη δικτύου με επέκταση εμβέλειας

Από την οπτική ενός απλού συνδέσμου, η σύνδεση του τερματικού με το σημείο μετάδοσης με την υψηλότερη λαμβανόμενη ισχύ συνεπάγεται ότι το τερματικό είναι συχνά συνδεδεμένο σε ένα μακροοικονομικό σημείο υψηλότερης ισχύος ακόμη και αν η απώλεια διαδρομής σε ένα σημείο femto είναι σημαντικά μικρότερη. Αυτό δεν θα είναι βέλτιστο από άποψη κάλυψης και χωρητικότητας ανερχόμενης ζεύξης. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, ακόμη και από την άποψη της αποτελεσματικότητας του συ-

² Το σημείο μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης και το σημείο λήψης ανερχόμενης ζεύξης θα μπορούσαν να χωριστούν γεωγραφικά εάν χρησιμοποιούνται απομακρυσμένες κεραιές.

στήματος downlink, μπορεί να μην είναι βέλτιστο να επιλέγεται το σημείο μετάδοσης με την υψηλότερη λαμβανόμενη ισχύ σε μια ετερογενή ανάπτυξη του δικτύου. Αν και οι μεταδόσεις από το μακροσκοπικό σημείο λαμβάνονται με υψηλότερη ισχύ από ότι από το σημείο femto, αυτό οφείλεται, τουλάχιστον εν μέρει, στην υψηλότερη ισχύ μετάδοσης του μακροσκοπικού σημείου.

Σε αυτή την περίπτωση, η μετάδοση από το μακροσκοπικό σημείο συνδέεται με ένα υψηλότερο "κόστος" όσον αφορά την παρεμβολή σε άλλες κυψέλες. Εκτεθειμένα εναλλακτικά, μια μετάδοση από το μακροσκοπικό σημείο θα απαγορεύει τη χρήση του ίδιου φυσικού πόρου σε οποιοδήποτε από τα υποκείμενα σημεία femto. Εναλλακτικά, στο άλλο άκρο, η σύνδεση κόμβου θα μπορούσε να βασίζεται αποκλειστικά σε εκτιμήσεις της απώλειας διαδρομής ανερχόμενης ζεύξης. Στην πράξη αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μιας μετατόπισης στις μετρήσεις ισχύος που ελήφθησαν στη συμβατική συσχέτιση κυψελών, μια μετατόπιση που θα αντισταθμίσει τη διαφορά στην ισχύ μετάδοσης μεταξύ διαφορετικών σημείων μετάδοσης [46]. Μια τέτοια αντιστάθμιση υποστηρίζεται από το LTE ήδη από την πρώτη έκδοση και είναι δυνατόν να διαμορφωθεί σε βάση ανά τερματικό. Χρησιμοποιώντας μια μετατόπιση στη στρατηγική σύνδεσης κόμβου, επεκτείνεται η περιοχή στην οποία επιλέγεται το σημείο femto, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18. Αυτό μερικές φορές αναφέρεται ως επέκταση σειράς.

Η επιλογή του σημείου δικτύου στο οποίο η απώλεια της διαδρομής είναι η μικρότερη, θα μεγιστοποιούσε τη λαμβανόμενη ισχύ ανερχόμενης ζεύξης προς το SINR, μεγιστοποιώντας έτσι τις επιτεύξιμες ταχύτητες δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης. Εναλλακτικά, για μια δεδομένη λαμβανόμενη ενέργεια στόχου, η ισχύς μετάδοσης του τερματικού και συνεπώς η παρεμβολή σε άλλες κυψέλες θα μειωνόταν, οδηγώντας σε υψηλότερη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος ανερχόμενης ζεύξης. Επίσης, θα μπορούσε να επιτρέψει για τον ίδιο φυσικό πόρο κάτω ζεύξης να χρησιμοποιηθεί επίσης από άλλα femto σημεία, βελτιώνοντας έτσι επίσης την απόδοση του συστήματος downlink [23].

Ωστόσο, λόγω της διαφοράς στην ισχύ μετάδοσης μεταξύ των σημείων μετάδοσης των διαφορετικών επιπέδων ανάπτυξης, οι μεταδόσεις κάτω ζεύξης από το μακροσκοπικό σημείο θα λαμβάνονται με σημαντικά υψηλότερη ισχύ στην περιοχή επέκτασης (που απεικονίζεται από τη διακεκομμένη περιοχή στην Εικόνα 18) με την επιθυμητή μετάδοση ζεύξης κάτω από το σημείο femto. Στην περιοχή αυτή, υπάρχει έτσι η πι-

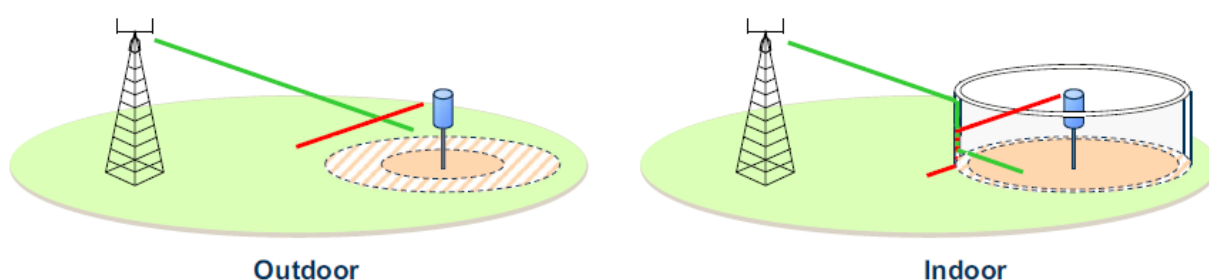
θανότητα σοβαρής παρεμβολής μεταξύ κυψελών κατερχόμενης ζεύξης από το μακροστοιχείο έως τους ακροδέκτες που λαμβάνουν μεταδόσεις από ένα σημείο femto που είναι ο λόγος σήματος προς παρεμβολή στο τερματικό για οποιαδήποτε σήματα που μεταδίδεται από το σημείο femto είναι κάτω από 0 dB. Η παρεμβολή έχει τόσο ένα στατικό εξάρτημα ανεξάρτητο από το φορτίο που προέρχεται από τα σήματα αναφοράς της κυψέλης (CRS), τα σήματα συγχρονισμού (PSS, SSS) και τις πληροφορίες συστήματος (PBCH), και από μια συνιστώσα δυναμικά εξαρτώμενη από το φορτίο, συστατικό που προέρχεται από μεταφορές δεδομένων (PDSCH) και σημάτων ελέγχου (PCFICH, PHICH, PDCCH, EPDCCH).

Η παρεμβολή από τις μεταδόσεις PDSCH στο μακροεπίπεδο σε μεταδόσεις PDSCH χαμηλότερης ισχύος από ένα σημείο femto μπορεί να αντιμετωπιστεί σχετικά άμεσα από τον προγραμματισμό του συντονισμού μεταξύ των κόμβων σύμφωνα με τις ίδιες αρχές. Για παράδειγμα, ένα επικαλυπτόμενο μακροεπίπεδο θα μπορούσε απλώς να αποφύγει τη μετάδοση PDSCH υψηλής ισχύος σε μπλοκ πόρων όπου ένα τερματικό στην περιοχή επέκτασης περιοχής ενός σημείου femto πρόκειται να λάβει μετάδοση δεδομένων προς τα κάτω. Αυτός ο συντονισμός μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο δυναμικός ανάλογα με το βαθμό και σε ποια χρονική κλίμακα μπορούν να συντονιστούν οι επικαλυπτόμενοι και υποβαθμισμένοι κόμβοι. Ο ίδιος συντονισμός με το PDSCH θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί στο EPDCCH. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι, για ένα σημείο δικτύου femto που βρίσκεται στο όριο μεταξύ δύο μακροκυψελών, ίσως είναι απαραίτητο να συντονιστεί ο προγραμματισμός μεταξύ του σημείου femto και των δύο macrocells.

Λιγότερο εμφανές είναι το πώς να χειριστούμε τις παρεμβολές λόγω των macro-μεταδόσεων που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν δυναμική διαχείριση παρεμβολών μεταξύ κυψελών, όπως η σηματοδότηση ελέγχου L1/L2 (PDCCH, PCFICH και PHICH). Εντός ενός επιπέδου, για παράδειγμα μεταξύ δύο κόμβων, η παρεμβολή μεταξύ τέτοιων μεταδόσεων δεν είναι κρίσιμο ζήτημα καθώς το LTE, συμπεριλαμβανομένων των καναλιών ελέγχου του, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπει επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μιας κυψέλης και αντίστοιχο SIR ακόμη και κάτω από 5 dB. Αυτή η εγγενής ευρωστία επιτρέπει το μετριασμό της επέκτασης εύρους.

Σε πολλά σενάρια αυτό το εύρος επέκτασης είναι επαρκές και η περαιτέρω αύξηση δεν θα βελτιώνει τις επιδόσεις, ενώ σε άλλα σενάρια μπορεί να είναι χρήσιμο ένα

μεγαλύτερο εύρος επέκτασης. Η χρήση ενός μεγάλου εύρους επέκτασης μπορεί να οδηγήσει σε ένα λόγο σήματος προς παρεμβολή που είναι πολύ χαμηλός ώστε τα κανάλια ελέγχου να λειτουργούν σωστά και να χρησιμοποιούνται μέσα (τρόποι) για το μετριασμό των παρεμβολών. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η χρησιμότητα της επέκτασης του εύρους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περίπτωση [42]. Ένα απλουστευμένο παράδειγμα, όπου η επέκταση εύρους μπορεί να μην είναι χρήσιμη, απεικονίζεται στο δεξιό μέρος της Εικόνας 19, όπου τα τοιχώματα του κτιρίου παρέχουν απομόνωση μεταξύ δύο κυψελών.



Εικόνα 12: Απεικόνιση της επέκτασης εύρους σε διάφορα σενάρια

- **Ετερογενείς αναπτύξεις χρησιμοποιώντας λειτουργικότητα έκδοσης 8**

Ετερογενείς αναπτύξεις είναι ήδη δυνατές από την πρώτη έκδοση του LTE χρησιμοποιώντας τη λειτουργικότητα έκδοσης - 8. Σε αυτή την περίπτωση, τα σημεία μετάδοσης ορίζουν μοναδικές κυψέλες και σημεία συσχέτισης ή επιλογή κυψελών με βάση τη λαμβανόμενη ισχύ κατερχόμενης ζεύξης όπως και στις ομογενείς αναπτύξεις. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει ανάγκη για συγχρονισμό μεταξύ κυψελών, μπορεί να επιτευχθεί μια εύλογη ποσότητα επέκτασης εύρους έως και αρκετά dBs. Η ποσότητα των παρεμβολών στο μακροεπίπεδο περιορίζει με τρόπο φυσικό την ποσότητα της δυνατής επέκτασης εύρους, αλλά το μέγεθος της επέκτασης που είναι εφικτό, είναι επαρκές για πολλά σενάρια. Πρόσθετα εργαλεία που διατίθενται στην έκδοση 8 για να αποκτήσουν ένα εύλογο μέγεθος επέκτασης, περιλαμβάνουν την αύξηση ισχύος του φυσικού καναλιού καθοδικής σύνδεσης (PDCCH - Physical Downlink Control Channel) στο femto cell, τη στιγμιαία φόρτιση του PDCCH στην επικαλυμμένη μακροκυψέλη για τη μείωση των παρεμβολών και την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας του PDCCH όσον αφορά την πιθανότητα σφάλματος PDCCH.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, σε πολλά σενάρια, τα περισσότερα κέρδη αποκτώνται απλώς αναπτύσσοντας femτοκόμβους χωρίς ή με μικρή μόνο επέκταση εύρους. Ωστόσο, σε ορισμένα συγκεκριμένα σενάρια, μπορεί μια μεγαλύτερη επέκταση εύρους να είναι χρήσιμη, σε ορισμένες αναπτύξεις.

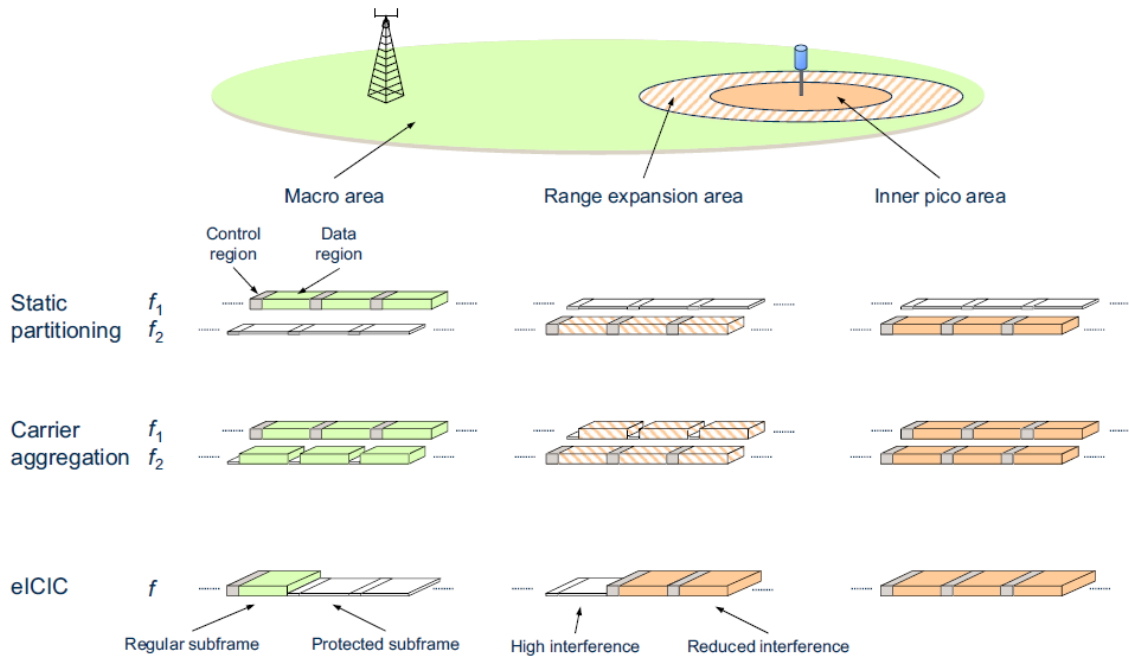
- **Διαίρεση στο επίπεδο συχνότητας**

Η διαίρεση στο επίπεδο συχνότητας προσπαθεί να μειώσει την παρεμβολή, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μέρη του φάσματος συχνοτήτων στα διάφορα επίπεδα. Τα σημεία μετάδοσης ορίζουν μοναδικά κελιά και οι μετρήσεις της λαμβανόμενης ισχύος κατερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιούνται ως βάση της σύνδεσης σημείων (δηλαδή της επιλογής κυψελών). Η απλούστερη περίπτωση είναι η στατική διάσπαση, χρησιμοποιώντας διαφορετικά και μη επικαλυπτόμενα τμήματα φάσματος στα macro και femto επίπεδα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 20. Παρόλο που είναι απλό, ένα τέτοιο σύστημα πάσχει από το γεγονός ότι δεν είναι σε θέση να αναδιανείμει δυναμικά τους πόρους μεταξύ των επιπέδων στο εσωτερικό τους για να ακολουθήσει τις στιγμιαίες διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Μία πιο δυναμική προσέγγιση για τον χειρισμό της παρεμβολής μεταξύ των επιπέδων κατερχόμενης ζεύξης, στη ζώνη εξάπλωσης του εύρους σε περίπτωση μεγάλης επέκτασής της, είναι η χρήση ενσωμάτωσης φορέα σε συνδυασμό με προγραμματισμό διασταυρούμενων φορέων. Η βασική ιδέα είναι να χωριστεί το συνολικό φάσμα σε δύο μέρη μέσω της χρήσης δύο φορέων κατερχόμενης ζεύξης, f_1 και f_2 , όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 20, αλλά χωρίς την απώλεια ευελιξίας που προκύπτει από ένα στατικό διαχωρισμό [48].

Όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων (PDSCCH), αμφότεροι οι φορείς είναι διαθέσιμοι και στα δύο επίπεδα και η παρεμβολή μεταξύ των επιπέδων γίνεται με "συμβατικό" συντονισμό αλληλεπιδράσεων μεταξύ κυψελών. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένας τέτοιος συντονισμός παρεμβολών μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο δυναμικός, ανάλογα με το χρονικό διάστημα στο οποίο μπορούν να συντονιστούν τα επίπεδα. Επίσης, η δυνατότητα για ενσωμάτωση φορέα (carrier aggregation) επιτρέπει και για τους δύο φορείς, δηλαδή το συνολικό διαθέσιμο φάσμα να εκχωρηθεί για μετάδοση σε ένα μόνο τερματικό. Επομένως, τουλάχιστον για τερματικά ικανά για ενσωμάτωση φορέα, δεν υπάρχει κατακερματισμός φάσματος όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων (PDSCCH). Οι τερματικοί σταθμοί παλαιού τύπου, από την άλλη πλευρά, θα έχουν μέγιστες τιμές μόνο από έναν μόνο φορέα. Αυτό μπορεί να είναι ένα ζήτημα για έναν φορέα

εκμετάλλευσης με μεγάλο αριθμό τερματικών παλαιού τύπου.

Από την άλλη πλευρά, όσον αφορά τη σηματοδότηση ελέγχου L1/L2 (PCFICH, PHICH, PDCCH), υπάρχει τουλάχιστον εν μέρει ένας περισσότερο σημαντικός διαχωρισμός συχνότητας μεταξύ των επιπέδων. Ειδικότερα, το μακροεπίπεδο θα πρέπει να αποφεύγει τη μετάδοση υψηλής ισχύος εντός της περιοχής ελέγχου επί του φορέα f1. Υποθέτοντας ένα δίκτυο συγχρονισμένο στο χρόνο, η παρεμβολή στην περιοχή ελέγχου του επιπέδου femto μειώνεται σε αυτόν τον φορέα και οι κυψέλες femto μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον φορέα για τη σηματοδότηση ελέγχου σε τερματικά στην περιοχή επέκτασης της περιοχής. Λόγω της δυνατότητας προγραμματισμού διασταυρούμενων φορέων, η μετάδοση DL-SCH μπορεί ακόμα να προγραμματιστεί και για τους δύο φορείς καθώς και για μια ενσωμάτωση αυτών που υπόκεινται σε δυναμικό συντονισμό μεταξύ παρεμβολών, ακόμη και αν το macro cell μεταδίδει μόνο σηματοδότηση ελέγχου στον φορέα f1. Το ίδιο ισχύει για μια κυψέλη femto, ακόμη και αν αυτό μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο φορέα f2 για τη μετάδοση αναθέσεων προγραμματισμού σε τερματικά στη ζώνη επέκτασης εμβέλειας, οι μεταδόσεις DL-SCH μπορούν ακόμα να προγραμματιστούν και στους δύο φορείς. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, για τερματικά στο εσωτερικό τμήμα μιας κυψέλης femto, ο φορέας f1 θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για σηματοδότηση ελέγχου L1 / L2. Παρομοίως, τα macro cells θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιούν φορέα f2 για σηματοδότηση ελέγχου, υποθέτοντας ότι χρησιμοποιείται μειωμένη ισχύς μετάδοσης [44]. Έτσι, η μακροκυψέλη θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει φορέα f2 για σηματοδότηση ελέγχου χαμηλής ισχύος, για παράδειγμα, για τερματικά κοντά στο αντίστοιχο σημείο μετάδοσης μακροεντολών.



Εικόνα 3: Διαίρεση στο επίπεδο συχνότητας και στο επίπεδο χρόνου

Εκτός από το PDCCH, το EPDCCH μπορεί εξίσου να χρησιμοποιηθεί καλά. Κατ'αρχήν, το EPDCCH μπορεί να υπόκειται στο ίδιο σύστημα συντονισμού μεταξύ των κυψελών παρέμβασης όπως το PDSCH. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη μεγάλων ποσοτήτων επέκτασης εύρους χωρίς ενσωμάτωση φορέα. Σε αυτή την περίπτωση, τα επίπεδα macro και femto χρησιμοποιούν απλά διαφορετικές ομάδες φυσικών ζευγών μπλοκ-πόρων, που συντονίζονται με έναν περισσότερο ή λιγότερο δυναμικό τρόπο. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το EPDCCH περιορίζεται μόνο στους χώρους αναζήτησης συγκεκριμένων τερματικών. Κατά συνέπεια, το PDCCH είναι αναγκαίο για τον προγραμματισμό συστήματος πληροφοριών. Τέλος, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα σήματα που χρησιμοποιούνται από τον τερματικό για να διατηρηθεί ο συγχρονισμός με την femto κυψέλη στην ζώνη επέκτασης της περιοχής, υπόκεινται σε παρεμβολές από το μακροστοιχείο. Το πόσο καλά το τερματικό μπορεί να χειριστεί αυτό, θα θέσει ένα ανώτερο όριο για το μέγεθος της επέκτασης φάσματος. Ως εκ τούτου, για την πλήρη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της επέκτασης της εμβέλει-ας, οι δέκτες χρειάζονται να υπάρχουν στο τερματικό σταθμό.

- **Διαίρεση στο επίπεδο χρόνου**

Μια εναλλακτική λύση για την διαίρεση περιοχών συχνοτήτων είναι η χρήση κατανομής χώρου χρόνου όπως απεικονίζεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 20. Στο 3GPP,

αυτό είναι γνωστό ως (περαιτέρω) ενισχυμένος συντονισμός παρεμβολών μεταξύ κυψελών, (F) eICIC. Οι εργασίες για το eICIC ξεκίνησαν από την έκδοση 10 και ολοκληρώθηκαν στην 11 με την ονομασία FeICIC. Επίσης σε αυτή την περίπτωση, τα σημεία μετάδοσης αντιστοιχούν σε ξεχωριστά κελιά, εξ ου και το όνομα FeICIC που χρησιμοποιείται στο 3GPP.

Η βασική ιδέα της διαίρεσης στο επίπεδο χρόνου είναι να περιορίσει τη δύναμη μετάδοσης της επικαλυπτόμενης μακροκυψέλης σε ορισμένα υποπλάισια. Σε αυτά τα υποπλάισια μειωμένης ισχύος (ή σχεδόν κενά υποπλάισια), τα τερματικά που είναι συνδεδεμένα στη femto κυψέλη θα αντιμετωπίσουν λιγότερες παρεμβολές από το επικαλυμμένο macro στοιχείο, τόσο για δεδομένα όσο και για έλεγχο. Από την άποψη του τερματικού, χρησιμεύουν ως προστατευμένα υποπλάισια. Η κυψέλη μπορεί επομένως να προγραμματίζει τερματικά στην περιοχή επέκτασης της περιοχής χρησιμοποιώντας τα προστατευμένα υποπλάισια και τερματικά στο εσωτερικό μέρος της κυψέλης femto χρησιμοποιώντας όλα τα υποπλάισια. Η κυψέλη μακροεντολών, από την άλλη πλευρά, προγραμματίζει κυρίως τερματικά έξω από τα προστατευμένα υποπλάισια (Εικόνα 20). Το κέρδος από την ανάπτυξη των κυψελών πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την απώλεια που προκύπτει από τη μείωση της ισχύος των μακροκυψελών σε ορισμένα υποπλάισια για να είναι ελκυστική η διαίρεση σε επίπεδο χρόνου. Το αν ισχύει ή όχι αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σενάριο, αν και η χρήση μειωμένης αλλά όχι μηδενικής ισχύος μετάδοσης στη μακροκυψέλη για τα προστατευμένα υποπλάισια για τον περιορισμό της απώλειας πόρων στο macrocell είναι συχνά επωφελής [49].

Για να υποστηρίξουμε την κατανομή σε επίπεδο χρόνου σε ένα ετερογενές δίκτυο, η σηματοδότηση των προτύπων προστατευμένων υποπλαισίων - πληροφορίες σχετικά με το σύνολο προστατευμένων υποπλαισίων - που υποστηρίζονται μεταξύ eNodeBs διαφορετικών επιπέδων χρησιμοποιώντας τη διασύνδεση X2. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το σύνολο των προστατευμένων υποπλαισίων μπορεί να είναι διαφορετικό σε διαφορετικές κυψέλες και περισσότερο ή λιγότερο δυναμικά, και πάλι ανάλογα με το χρονικό διάστημα στο οποίο μπορούν να συντονιστούν τα επίπεδα ανάπτυξης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μακροκυψέλη δεν πρέπει απαραίτητα να αποφεύγει την πλήρη μετάδοση σηματοδοσίας ελέγχου στα προστατευμένα υποπλάισια. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να είναι επωφελές να διατηρηθεί η δυνατότητα για περιορισμένη ποσότητα σηματοδότησης ελέγχου που σχετίζεται με μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης, για παράδειγμα, περιορισμένη ποσότητα προγραμματισμού ανερχόμενης ζεύξης ή / και μετάδοσης

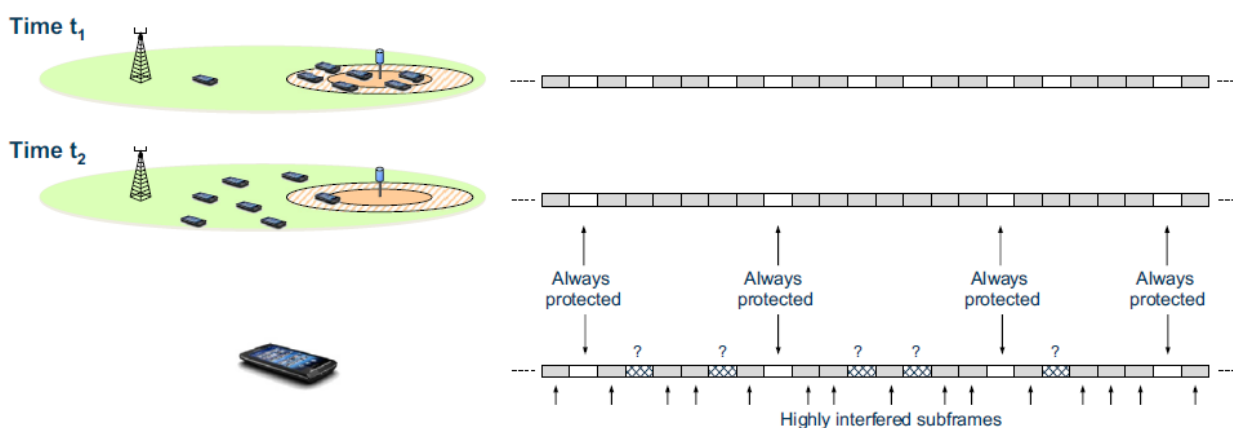
PHICH, προκειμένου να μην προκαλείται υπερβολική επίδραση στην ανερχόμενη ζεύξη χρονοδρομολόγηση.

Όσο οι μεταδόσεις ελέγχου σήματος μακροκυψέλης είναι περιορισμένες και καταλαμβάνουν μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής περιοχής ελέγχου, θα μπορούσε να διατηρηθεί σε αποδεκτό επίπεδο η παρεμβολή σε τερματικά στην περιοχή επέκτασης της περιοχής του κυψέλης. Εντούτοις, η σηματοδότηση προτύπων προστατευμένου υποπλαισίου ορίζεται επίσης έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο αντίκτυπος στον προγραμματισμό ανερχόμενης ζεύξης ακόμα και αν δεν χορηγούνται διευκολύνσεις (παροχές) προγραμματισμού ανερχόμενης ζεύξης και η PHICH μπορεί να μεταδοθεί σε προστατευμένα υποπλάισια. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντιστοίχιση (ταίριασμα) των προτύπων προστατευόμενου πλαισίου με τον συγχρονισμό οκτώ υποπλαισίων του πρωτοκόλλου υβριδικών-ARQ ανερχόμενων ζεύξεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό υποδηλώνει ότι το σχέδιο δεν ευθυγραμμίζεται με το πλαίσιο των 10 ms αλλά μόνο με μια δομή τεσσάρων πλαισίων 40 ms για το FDD. Για το TDD η περιοδικότητα εξαρτάται επίσης από τη διαμόρφωση uplink-downlink [28].

Μπορούν να ανταλλάσσονται έως και τέσσερα διαφορετικά μοτίβα μεταξύ eNodeBs: δύο μοτίβα για προγραμματισμό και σκοπούς μέτρησης πληροφοριών κατάστασης καναλιού (CSI), ένα μοτίβο για μετρήσεις διαχείρισης ασύρματων πόρων (RRM - Radio Resource Management) στην κυψέλη εξυπηρέτησης και ένα μοτίβο για μετρήσεις RRM σε γειτονικές κυψέλες. Ο σκοπός της ύπαρξης δύο σχημάτων για σκοπούς CSI είναι να χειριστούν τις μεταβολές φορτίου μεταξύ στρώσεων macro και femto χωρίς συχνές αναδιαρθρώσεις των ακροδεκτών, όπως θα συζητηθεί περαιτέρω παρακάτω (βλ. Εικόνα 21). Σε περίπτωση υψηλού φορτίου στην περιοχή επέκτασης της περιοχής, η οποία είναι η χρονική στιγμή t_1 στο σχήμα, μπορεί να είναι ευεργετικό να έχουμε σχετικά μεγάλο αριθμό προστατευμένων υποπλαισίων για να επιτρέψουμε σε αυτά τα τερματικά να εξυπηρετούνται από την κυψέλη femto. Σε μεταγενέστερη στιγμή, t_2 στο σχήμα, η πλειονότητα των τερματικών μετακινήθηκε από την περιοχή επέκτασης της σειράς στην περιοχή μακροεντολών, ζητώντας τη μείωση του αριθμού των προστατευμένων υποπλαισίων. Έτσι, μεταβάλλοντας το μέγεθος του συνόλου των επί του παρόντος προστατευμένων υποπλαισίων, οι διαμορφώσεις μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ταιριάζουν με τις αλλαγές στο σενάριο.

Ταυτόχρονα, πρέπει να υπάρχει ένα σύνολο υποπλαισίων που προστατεύονται πάντοτε ώστε η femto κυψέλη να μπορεί να έρθει σε επαφή με ένα τερματικό στην περιοχή επέκτασης της περιοχής, καθώς η σύνδεση με ένα τερματικό θα μπορούσε να χαθεί. Συνεπώς, υποστηρίζεται η ανταλλαγή δύο μορφών υποπλαισίου στο X2, ένα από τα οποία προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για τα τρέχοντα προστατευμένα υποπλάισια και ένα για τα πάντα προστατευμένα υποπλάισια [29].

Η πρόθεση είναι να χρησιμοποιηθεί ο πρώτος για τον προγραμματισμό του συντονισμού μεταξύ των κυψελών, επιτρέποντας σχετικά συχνές ενημερώσεις, ενώ ο τελευταίος ενημερώνεται σπάνια και χρησιμοποιείται ως βάση για τη διαμόρφωση προστατευμένων υποπλαισίων στους ακροδέκτες, όπως περιγράφεται παρακάτω. Τα υποπλάισια που ανήκουν σε κανένα από τα δύο σύνολα παραπάνω μπορούν να θεωρηθούν ως υποπλάισια που ποτέ δεν προστατεύονται.



Εικόνα 4: Ανταλλαγή μοτίβων υποπλαισίων μεταξύ macro και femto κόμβων και την αντίστοιχη διαμόρφωση στο τερματικό

Η παρεμβολή που υφίστανται οι ακροδέκτες που συνδέονται με την femto κυψέλη μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ προστατευμένων και μη προστατευμένων υποπλαισίων. Οι μετρήσεις CSI που εκτελούνται από κοινού τόσο σε προστατευμένα όσο και σε μη προστατευμένα υποπλάισια δεν θα αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια την παρεμβολή οποιουδήποτε τύπου υποπλαισίου. Για την αντιμετώπιση αυτού, παρέχεται στο τερματικό πληροφορίες σχετικά με τα προστατευμένα υποπλάισια μέσω αποκλειστικής σηματοδότησης RRC χρησιμοποιώντας παρόμοιες εικόνες bitmap όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Δύο bitmap εικόνες μπορούν να σταλούν στο τερματικό, η μια να ορί-

ζει τα σύνολα προστατευμένων υποπλαισίων και η άλλη να ορίζει το σύνολο των υποπλαισίων υψηλής παρεμβολής. Κατά προτίμηση, τα προστατευόμενα και παρεμβαλλόμενα σε υψηλό βαθμό υποπλάισια αντιστοιχούν στα πάντα και ποτέ προστατευόμενα υποπλάισια που προέρχονται από τη σηματοδότηση X2 που παρουσιάστηκε προηγουμένως [27].

Τα υπόλοιπα υποπλάισια, αν υπάρχουν, που δεν ανήκουν σε κανένα από αυτά τα δύο υποσύνολα, έχουν μια πιο απρόβλεπτη κατάσταση παρεμβολής, καθώς η μακροενοχή μπορεί να χρησιμοποιεί μειωμένη ισχύ ή όχι. Οι εκθέσεις CSI εκτελούνται ξεχωριστά για τα δύο υποσύνολα. Ποιο υποσύνολο αντανακλά μια συγκεκριμένη έκθεση CSI, εξαρτάται από το ποιο υποπλάισιο μεταδίδεται το CSI. Το CSI αντικατοπτρίζει την κατάσταση παρεμβολής στο υποσύνολο στο οποίο ανήκει το υποπλάισιο. Συνεπώς, το τερματικό θα πρέπει να μετρά μόνο μετρήσεις παρεμβολής κατά τη διάρκεια υποπλαισίων που ανήκουν στο ίδιο υποσύνολο. Μια αναφορά CSI που μεταδίδεται σε ένα υποπλάισιο που δεν ανήκει σε κανένα από τα υποσύνολα δεν αναγνωρίζεται από μια άποψη μέτρησης παρεμβολών. Μέσω της χρήσης δύο υποσυνόλων, το δίκτυο μπορεί να προβλέψει την ποιότητα των ραδιοφωνικών καναλιών για επερχόμενες μεταδόσεις, ανεξάρτητα από το αν εμφανίζονται σε προστατευμένα υποπλάισια ή όχι. Η κατοχή δύο υποσυνόλων είναι ευεργετική για πολλούς λόγους. Ένα παράδειγμα είναι η κατάσταση που περιγράφηκε παραπάνω, όπου το σύνολο των προστατευμένων υποπλαισίων ποικίλει με την πάροδο του χρόνου. Οι συχνές ενημερώσεις των διαμορφώσεων σε όλα τα επηρεαζόμενα τερματικά ενδέχεται να μην είναι εφικτές με λογικές επιβαρύνσεις [38]. Αντ' αυτού, η μέτρηση CSI σε ένα υποσύνολο υποπλάισιο που προστατεύεται πάντοτε προτιμάται συνήθως καθώς επιτρέπει στο δίκτυο να χρησιμοποιεί δυναμικά μειωμένη ισχύ και προγραμματισμό τερματικών στη ζώνη επέκτασης της σειράς σε πρόσθετα υποπλάισια χωρίς να επαναδιαμορφώνει όλα τα τερματικά.

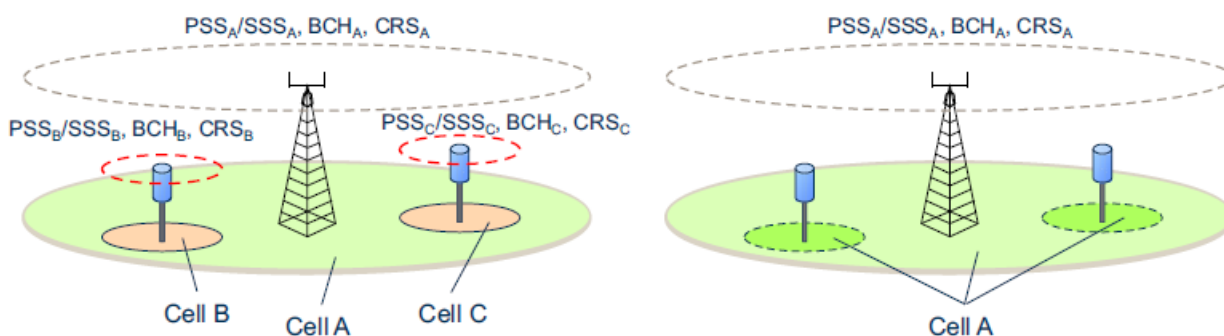
Οι αναφορές CSI που αντικατοπτρίζουν την κατάσταση στα προστατευμένα υποπλάισια χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για προσαρμογή ζεύξης στη ζώνη επέκτασης της σειράς, ενώ οι αναφορές CSI από τα υποπλάισια υψηλής παρεμβολής είναι χρήσιμα κατά τον προγραμματισμό τερματικών στην εσωτερική περιοχή femto. Ένα άλλο παράδειγμα είναι όταν μια κυψέλη femto βρίσκεται στο όριο μεταξύ, και υπόκειται σε παρεμβολή από, δύο μακροκυψέλων. Εάν οι μακροκυψέλες έχουν διαμορφωθεί διαφορετικά και μόνο μερικώς επικαλύπτονται σύνολα προστατευμένων υποπλαισίων, ο προ-

γραμματισμός των femto κυψελών καθώς και η διαμόρφωση των συνόλων μέτρησης CSI πρέπει να λάβουν υπόψη τη δομή των προστατευμένων συνόλων και των δύο μακροκυψελών.

Έως τώρα μελετήσαμε το δυναμικό μέρος της παρεμβολής που είναι το τμήμα παρεμβολής που ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο κυκλοφορίας και μπορεί να αντιμετωπιστεί από το ICIC και την προσωρινή διαίρεση. Ωστόσο, υπάρχει επίσης στατική παρεμβολή από το στοιχείο μακροεντολών στην περιοχή επέκτασης. Για παράδειγμα, τα σήματα αναφοράς για τα κυψέλες, τα σήματα συγχρονισμού και το PBCH πρέπει ακόμα να μεταδοθούν. Για να υποστηρίξει εκτεταμένη επέκταση εμβέλειας, παρά την παρουσία αυτών των σημάτων και καναλιών, τα σήματα παρεμβολής πρέπει να ακυρωθούν. Επομένως, απαιτείται η ακύρωση του CRS, του PSS / SSS και του PBCH για την πλήρη εκμετάλλευση των λειτουργιών που περιγράφηκαν προηγουμένως, των λειτουργιών που δεν έχουν εντολή στην έκδοση 10. Για να βοηθήσουν το τερματικό στην ακύρωση της παρεμβολής, η σηματοδότηση RRC παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα φυσικής στρώσης των γειτονικών κυψελών, τον αριθμό των θυρών κεραίας σε αυτά τα κελιά και τη διαμόρφωση του MBSFN (απαιτείται διαμόρφωση του MBSFN, καθώς δεν υπάρχει CRS στην περιοχή δεδομένων σε αυτά τα υποπλαίσια).

Διαμοιραζόμενη κυψέλη

Τα σημεία μετάδοσης αντιστοιχούν σε ξεχωριστές κυψέλες, καθεμία από τις οποίες έχει ξεχωριστή ταυτότητα κυψέλης, διαφορετική από τα γειτονικές κυψέλες σε οποιοδήποτε από τα επίπεδα του δικτύου. Συνεπώς, κάθε κόμβος μεταδίδει μοναδικές πληροφορίες συστήματος, σήματα συγχρονισμού και σήματα αναφοράς συγκεκριμένων κυψελών. Αυτό απεικονίζεται στο αριστερό τμήμα της Εικόνας 22 που ακολουθεί:



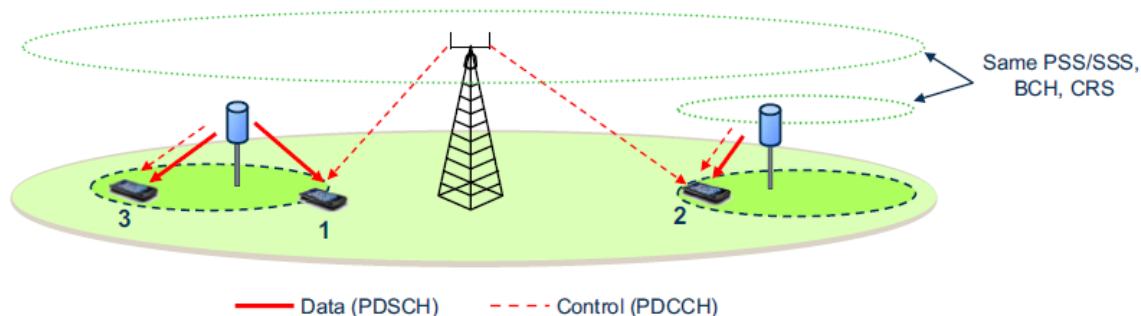
Εικόνα 5: Ανεξάρτητες κυψέλες (αριστερά) και κοινόχρηστες κυψέλες (δεξιά)

Εναλλακτικά, οι τεχνικές του CoMP μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση ετερογενών αναπτύξεων. Για να κατανοήσουμε αυτήν την προσέγγιση, θα πρέπει να δούμε τη διάκριση μεταξύ μιας κυψέλης και ενός σημείου μετάδοσης. Μια κυψέλη έχει μια μοναδική ταυτότητα, που η θέση της προσδιορίζεται από ειδικά σήματα αναφοράς. Με την απόκτηση της ταυτότητας κυψελών, ένα τερματικό μπορεί να καθορίσει τη δομή CRS της κυψέλης και να λάβει πληροφορίες συστήματος που είναι απαραίτητες για την πρόσβαση στο δίκτυο [41]. Από την άλλη πλευρά, ένα σημείο μετάδοσης είναι απλά μία ή περισσότερες συνεγκατεστημένες κεραίες από τις οποίες ένα τερματικό μπορεί να δέχεται μεταδόσεις δεδομένων. Με την εκμετάλλευση του DM-RS που εισάγεται στην έκδοση 10, το PDSCH δεν χρειάζεται να μεταδοθεί από το ίδιο σημείο όπως τα ειδικά σήματα αναφοράς κυψελών. Τα δεδομένα μπορούν αντ' αυτού να μεταδοθούν από ένα από τα σημεία μετάδοσης femto όταν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ωφέλιμα και οι πόροι χρονικής συχνότητας μεταξύ femto χωρικών διαχωρισμένων σημείων μετάδοσης.

Δεδομένου ότι τα σημεία μετάδοσης femto δεν μεταδίδουν σήματα αναφοράς ειδικά για κάθε κυψέλη, ούτε πληροφορίες συστήματος, δεν ορίζουν κυψέλες αλλά είναι μέρος του επικαλυμμένου μακροκυψέλης. Αυτή η προσέγγιση του CoMP σε ετερογενείς αναπτύξεις επομένως αναφέρεται συνήθως ως κοινόχρηστο αναγνωριστικό πακέτου, που απεικονίζεται στο δεξιό τμήμα της Εικόνας 22. Τα δεδομένα μεταδίδονται στον τερματικό αριθμό δύο από το ακρότατο σημείο μετάδοσης. Δεδομένου ότι το σχετικό DM-RS μεταδίδεται από το ίδιο σημείο μετάδοσης με τα δεδομένα, το σημείο που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων δεν χρειάζεται να είναι γνωστό από το τερματικό. Τα κέρδη χωρικής επαναχρησιμοποίησης είναι η επαναχρησιμοποίηση των πόρων χρονικής συχνότητας που χρησιμοποιούνται για τη διαβίβαση δεδομένων σε πολλαπλούς κόμβους femto των ίδιων μακροεντολών, οπότε λαμβάνεται παρόμοια με τα σχήματα διαμοιρασμού πόρων.

Οι πληροφορίες ελέγχου που απαιτούνται στην έκδοση 10 βασίζονται σε CRS και επομένως οι πληροφορίες ελέγχου πρέπει να μεταδίδονται από (τουλάχιστον) τη μακροθέση όπως στην περίπτωση του πρώτου τερματικού στην Εικόνα 22. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα και η σχετική σηματοδότηση ελέγχου προέρχονται από διαφορετικά σημεία μετάδοσης. Αυτό είναι θεωρητικά διαφανές στο τερματικό. Χρειάζεται μόνο να γνωρίζει ποιο σήμα αναφοράς πρέπει να χρησιμοποιήσει για το οποίο πληροφορία,

αλλά όχι από ποιο σημείο μετάδοσης προέρχονται οι πληροφορίες. Ο μηχανισμός συστή-
 γασης που εισάγεται στην έκδοση 11 χρησιμοποιείται κατά προτίμηση για να εξασφαλί-
 σει ότι το τερματικό εκμεταλλεύεται μόνο τα σχετικά σήματα αναφοράς. Στην Εικόνα 23
 απεικονίζονται πολλοί τρόποι μετάδοσης των πληροφοριών ελέγχου [38].



Εικόνα 6: Ετερογενής ανάπτυξη χρησιμοποιώντας μια κοινόχρηστη κυψέλη

Η πρώτη περίπτωση, στην οποία εμπλέκεται ο τερματικός σταθμός 1 με σήμανση
 ελέγχου που προέρχεται μόνο από τη μακροσκοπική τοποθεσία, έχει ήδη περιγραφεί.
 Εναλλακτικά, τα ίδια κανάλια CRS και τα κανάλια ελέγχου μπορούν να μεταδοθούν
 από τον macro - και τον femto - κόμβο όπως φαίνεται για το τερματικό 2. Στο τερματι-
 κό αυτό θα εμφανιστεί ως ένας σύνθετος κόμβος καθώς το ίδιο σήμα μεταδίδεται και
 από τους δύο κόμβους. Η πρώτη περίπτωση είναι επωφελής από την προοπτική κατα-
 νάλωσης ισχύος δικτύου, καθώς το σημείο μετάδοσης femto είναι ενεργό μόνο όταν
 υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση. Η δεύτερη περίπτωση, από την άλλη πλευρά, πα-
 ρέχει μια βελτιωμένη αναλογία σήματος προς θόρυβο για τη σηματοδότηση ελέγχου
 μέσω συνδυασμού μεταδόσεων macro και femto. Περαιτέρω, καθώς ένας τερματικός
 σταθμός LTE υπολογίζει την απώλεια διαδρομής ανερχόμενης ζεύξης για λόγους ελέγ-
 χου ισχύος από την ληφθείσα ισχύ σήματος CRS, η δεύτερη περίπτωση μπορεί μερικές
 φορές να οδηγήσει σε πιο ακριβή έλεγχο ισχύος προς τα πάνω.

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις δεν υπάρχει κέρδος χωρικής επαναχρησιμοποίη-
 σης για τη σηματοδότηση ελέγχου καθώς ο μακροσκοπικός χώρος εμπλέκεται σε όλες
 αυτές τις μεταδόσεις και οι πόροι χρονικής συχνότητας δεν μπορούν να επαναχρησιμο-
 ποιηθούν σε femto κόμβους. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση του EPDCCH
 με βάση DM-RS για σηματοδότηση ελέγχου και μετάδοση από τον ίδιο κόμβο όπως
 χρησιμοποιείται για το PDSCH, όπως συμβαίνει με τον τρίτο τερματικό στην Εικόνα 23
 Τα τερματικά που δεν υποστηρίζουν τη μετάδοση που βασίζεται σε DM-RS μπορούν να

λειτουργήσουν ακόμα στο σχήμα των κοινόχρηστων κελιών. Οι μεταδόσεις δεδομένων σε αυτά τα τερματικά είναι βασισμένες σε CRS και έτσι χειρίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως η σηματοδότηση ελέγχου PDCCH που περιγράφηκε προηγουμένως. Παρόλο που δεν θα υπάρχει κέρδος χωρικής επαναχρησιμοποίησης για αυτά τα τερματικά, θα επωφεληθούν από τους κόμβους femto μέσω βελτιωμένου λόγου σήματος προς θόρυβο. Η ανατροφοδότηση της κατάστασης καναλιού που χρησιμοποιείται για αποφάσεις προγραμματισμού βασίζεται κατά προτίμηση στο CSI-RS.

Διαφορετικοί femto - κόμβοι, καθώς και ο macro - κόμβος, μπορούν να διαμορφωθούν έτσι ώστε να χρησιμοποιούν διαφορετικές και μη παρεμβαλλόμενες διαμορφώσεις CSI-RS ώστε να επιτρέπουν στα τερματικά να εκτιμούν τις συνθήκες του καναλιού στα σημεία μετάδοσης που αντιστοιχούν στους διάφορους κόμβους. Για τα τερματικά που δεν υποστηρίζουν το CSI-RS, η ανατροφοδότηση της κατάστασης καναλιού βασίζεται στο ΗΣΚ. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το eNodeB ίσως χρειαστεί να αξιολογήσει τις ληφθείσες αναφορές για να υπολογίσει τη διαφορά στο σύνολο σημείων μετάδοσης που χρησιμοποιούνται για CRS και PDSCH [29]. Η ανάπτυξη ενός συνδυασμού κοινόχρηστων κυψελών μπορεί να γίνει συνδέοντας μία ή περισσότερες απομακρυσμένες μονάδες ραδιοσυχνότητας (RRU) καθώς και τη μακροεντολή στην ίδια κύρια μονάδα χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες. Ένας λόγος για αυτό είναι η στενή σύζευξη μεταξύ των macro - και των femto - κόμβων με έλεγχο και τα δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικά σημεία μετάδοσης, που απαιτούν συνδέσεις χαμηλής λανθάνουσας κατάστασης.

Η επεξεργασία σε κεντρικό επίπεδο παρέχει οφέλη και από την άποψη των επιδόσεων ανερχόμενης ζεύξης και, σε πολλές περιπτώσεις, αυτή η μόνη μπορεί να παρακινήσει τη χρήση των RRU με εντατική επεξεργασία. Οποιοσδήποτε συνδυασμός σημείων μετάδοσης, όχι απαραίτητα εκείνων που χρησιμοποιούνται για μετάδοση κάτω ζεύξης σε ένα τερματικό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη των μεταδόσεων από αυτό το τερματικό. Συνδυάζοντας τα σήματα από τις διαφορετικές κεραιές με έναν επικοινωνιακό τρόπο στην κεντρική τεχνολογία ανάλυσης CoMP ανερχόμενης επικοινωνίας, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στα ποσοστά δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης. Στην ουσία, η μετάδοση ζεύξης ανερχόμενης ζεύξης και downlink έχει αποσυνδεθεί και είναι δυνατή η "επέκταση της κλίμακας ανερχόμενης ζεύξης" χωρίς να προκαλείται πρόβλημα παρεμβολής κατερχόμενης ζεύξης όπως σε αναπτύξεις ID ξεχωριστών

κυψελίδων. Τα κέρδη ανερχόμενης ζεύξης μπορούν να επιτευχθούν επίσης και για τερματικά έκδοσης 8.

Οι ετερογενείς αναπτύξεις που χρησιμοποιούν κοινόχρηστες κυψέλες μπορούν επίσης να παρέχουν πρόσθετη ευρωστία κινητικότητας σε σύγκριση με την ανάπτυξη με χωριστές κυψέλες. Αυτό μπορεί να είναι μια σημαντική πτυχή, ειδικά όταν μετακινείται από έναν femto κόμβο στον macro κόμβο. Σε μια ανάπτυξη ξεχωριστών κυψελών, απαιτείται διαδικασία αλλαγής παραλαβής για να αλλάξετε η κυψέλη εξυπηρέτησης. Αν κατά το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση της διαδικασίας παράδοσης, το τερματικό έχει μετακινηθεί πολύ μακριά στην περιοχή μακροεντολών, ενδέχεται να πέσει η σύνδεση downlink από τον femto κόμβο πριν ολοκληρωθεί η παράδοση και να οδηγήσει σε αποτυχία ασύρματης ζεύξης [43]. Σε μια κοινή χρήση κυψελών, από την άλλη πλευρά, το σημείο μετάδοσης που χρησιμοποιείται για μετάδοση κάτω ζεύξης μπορεί να αλλάξει ταχέως χωρίς μια διαδικασία παράδοσης. Έτσι μειώνεται η πιθανότητα διακοπής των συνδέσεων.

3.4 Διαχείριση παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα

Η διαχείριση παρεμβολών αποτελεί βασικό ζήτημα για την ανάπτυξη ετερογενών δικτύων macrocells στο LTE. Το πρόβλημα είναι πιο οξύ για τα femtocell που λειτουργούν σε κατάσταση κλειστής πρόσβασης που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα φορέα, όπως τα macrocells. Οι παρεμβολές είναι συνήθως πιο εύκολα διαχειρίσιμες σε συστήματα με femtocells ή στις υβριδικής πρόσβασης κυψέλες, επειδή τα UEs που προκαλούν ή δέχονται παρεμβολές, μπορούν να μεταβιβαστούν ελεύθερα μεταξύ κυψελών. Για παράδειγμα, αν ένα MUE (Macro User Equipment) (δηλαδή ένα UE συνδεδεμένο σε ένα macrocell) είναι κοντά στην άκρη του macrocell και είναι επίσης κοντά σε ένα femtocell κλειστής πρόσβασης (CSG), τότε θα μεταδίδει με μεγάλη ισχύ και μπορεί να δημιουργεί παρεμβολές στη ζεύξη του μικρότερης κυψέλης με το σταθμό βάσης.

Εάν το MUE μπορεί να παραδοθεί στο μικρό κελί, η παρεμβολή στο μικρό κύτταρο θα εξαλειφθεί. Ομοίως, στην κατερχόμενη ζεύξη του σταθμού βάσης με ένα MUE που είναι κοντά σε ένα macrocell μπορεί να υποστεί παρεμβολές από ένα κοντινό femtocell, η οποία θα εξαλειφθεί εάν το MUE μπορεί να παραδοθεί στο femtocell. Η πιο σοβαρή παρεμβολή συμβαίνει όταν τα femtocells και macrocells εκπέμπουν στην

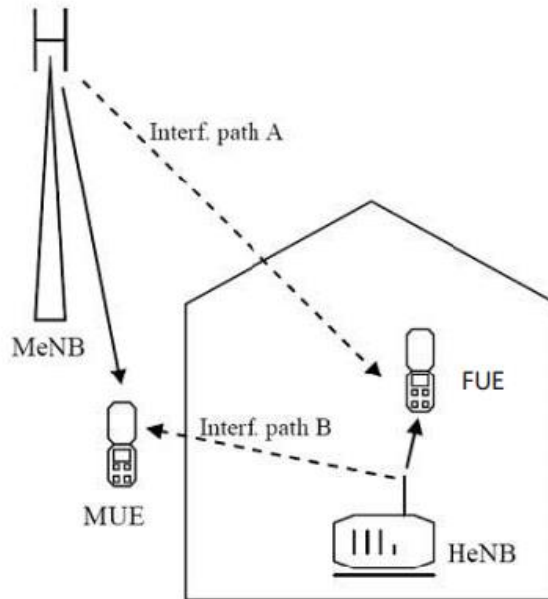
ίδια συχνότητα φορέα, διαφορετικά η παρεμβολή εξαρτάται από το φάσμα εκπομπής (SEM) και στην περίπτωση της λειτουργίας παρακείμενου καναλιού, από το Δείκτη Διαρροής παρακείμενου Καναλιού (ACLR) και την παρακείμενη επιλεκτικότητα καναλιού (ACS).

Επομένως σε αυτή την ενότητα εστιάζουμε στην περίπτωση της ανάπτυξης καναλιών femtocells και macrocells. Τα femtocells εγκαθίστανται συνήθως από τον καταναλωτή με τρόπο ad hoc αντί να αποτελούν μέρος προγραμματισμένης ανάπτυξης. Επομένως, έχουν σχεδιαστεί να αυτοδιαμορφώνονται, επειδή απαιτούν να ανιχνεύουν το περιβάλλον τους (π.χ. ανίχνευση και μέτρηση γειτονικών macrocells και femtocells) και να προσαρμόζουν ανάλογα τη λειτουργία τους. Αν το femtocell μπορεί να επιλέξει τη φερεγγυότητα του, τότε η παρεμβολή μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή φορέα (για παράδειγμα με βάση τις πληροφορίες προτεραιότητας για το RSRP και την προτεραιότητα επανεπιλογής κυψελών).

3.4.1 Διαχείριση παρεμβολών

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο περιγράφουμε τρόπους διαχείρισης των παρεμβολών για διαφορετικά σενάρια. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτά τα σενάρια ισχύουν τόσο για τα συστήματα αμφίδρομης (διπλής διαίρεσης) διαίρεσης συχνότητας (FDD – Frequency Division Duplex) όσο και για τα συστήματα αμφίδρομης διαίρεσης στο χρόνο (TDD - Time Division Duplex). Στην περίπτωση των συστημάτων TDD υποτίθεται ότι ο συγχρονισμός των σημείων μεταγωγής uplink/downlink επιτυγχάνεται μεταξύ των macrocells και των femtocells. Οι μεταδόσεις Downlink από το femtocell υποφέρουν από παρεμβολές από μεταδόσεις από ένα μακροκυψέλη όπως φαίνεται από τη διαδρομή παρεμβολής A στην Εικόνα 24.

Macro to Femto, Downlink: Οι UE που είναι συνδεδεμένες με femtocells (γνωστές ως Femto UEs ή FUE) είναι πιο ευαίσθητες σε αυτή την παρεμβολή όταν αυτές (και ο συνδεδεμένος τους HeNB) είναι πιο κοντά στο macrocell, αφού η ισχύς μετάδοσης του macrocell είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του femtocell και έτσι οι παρεμβολές που θα δέχεται ο UE θα είναι υψηλότερες. Οι FUE είναι επίσης πιο επιρρεπείς όταν βρίσκονται μακριά από το εξυπηρετικό HeNB, ειδικά αν βρίσκονται έξω από το σπίτι ή το διαμέρισμα που έχει σχεδιαστεί για να καλύπτει το femtocell.



Εικόνα 7: Σενάρια παρεμβολών Macro/femto downlink.

Οι πιθανές προσεγγίσεις μετριασμού των παρεμβολών για αυτό το σενάριο μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Προστασία του καναλιού ελέγχου (PCHH - Physical Downlink Control Channel), φυσικού καναλιού μετάδοσης (PBCH - Physical Broadcast Channel), ρυθμίζοντας τα κανάλια ελέγχου να είναι ορθογώνια σε χρόνο και/ή συχνότητα, π.χ. εφαρμόζοντας μια μετατόπιση υποπλαισίου στα femtocells σε σχέση με τα macrocells.
- Προστασία διαύλου δεδομένων (PDSCH). Εάν χρησιμοποιείται επαναχρησιμοποίηση μερικής συχνότητας στο femtocell, τότε ένα HeNB μπορεί να προγραμματίσει δεδομένα σχετικά με τα RBs (Resource Blocks - μπλοκ πόρων) με χαμηλή ισχύ μετάδοσης από το macrocell (π.χ. RBs που χρησιμοποιούνται για το κέντρο των κυψελών UE από το macrocell). Το HeNB μπορούσε να εξακριβώσει τις πληροφορίες κατανομής συχνότητων του HeNB με διάφορα μέσα, π.χ. με διαμόρφωση ή με παρακολούθηση των μεταδόσεων του macrocell.

Femto to Macro, Downlink. Οι μεταδόσεις κατερχόμενης ζεύξης από μια μακροκυψέλη υποφέρουν από παρεμβολές από τις μεταδόσεις των HeNB όπως φαίνεται από τη διαδρομή παρεμβολής B στην Εικόνα 24. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μια νεκρή ζώνη γύρω από ένα HeNB, εντός του οποίου ένα MUE δεν είναι σε θέση να

λάβει μεταδόσεις που πραγματοποιούνται από το macrocell. Τέτοιες νεκρές ζώνες είναι μεγαλύτερες για HeNBs κοντά στην άκρη του macrocell, όπου το σήμα που λαμβάνεται από το macrocell είναι ασθενέστερο ή για MUE που βρίσκονται εσωτερικά στην κάλυψη ενός CSG HeNB. Οι πιθανές προσεγγίσεις μετριασμού των παρεμβολών για αυτό το σενάριο μπορεί να περιλαμβάνουν [43]:

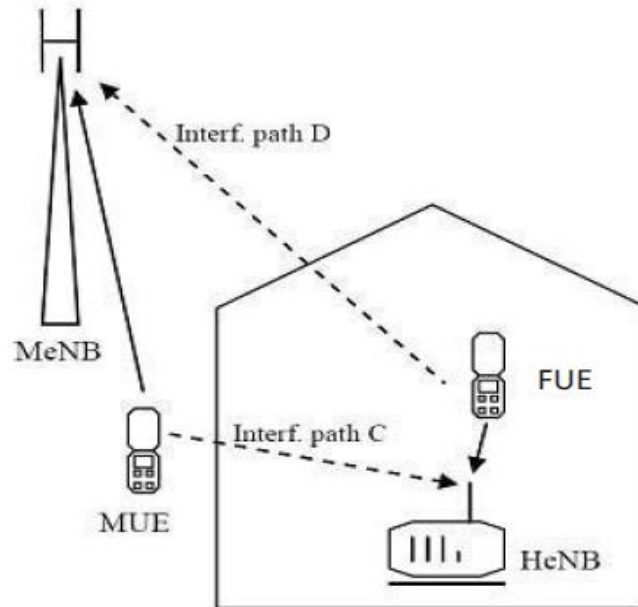
- Ενεργοποίηση υβριδικής ή ανοιχτής πρόσβασης, αν είναι δυνατόν. Στην περίπτωση της υβριδικής πρόσβασης, οι ρυθμίσεις ισχύος του HeNB θα μπορούσαν να προσαρμοστούν διαφορετικά στην περίπτωση κλειστής πρόσβασης, λαμβάνοντας υπόψη την συνολική απόδοση του συστήματος (macro + υβριδική κυψέλη) και τους πόρους που καταναλώνονται από την εξυπηρέτηση των μη CSG UE χρηστών.
- Ρύθμιση ισχύος κατερχόμενης ζεύξης. Το HeNB μπορεί να περιορίσει τη μέγιστη ισχύ κατερχόμενης ζεύξης (ή την ισχύ ανά RB) ανάλογα με το περιβάλλον της. Στην περίπτωση της ανάπτυξης καναλιών macrocells και femtocells με κλειστή πρόσβαση, υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί, όπως ο καθορισμός της ισχύος για επίτευξη συμφωνίας μεταξύ κάλυψης και παρεμβολής, με βάση την εκτιμώμενη απώλεια κατά τη μετάδοση (pathloss) μεταξύ του HeNB και του MUE που δέχεται τις παρεμβολές και οι απαιτήσεις κάλυψης του femtocell. Μία τέτοια λύση θα μπορούσε επίσης να περιλαμβάνει την ανίχνευση της παρουσίας κοντινών MUE που δέχονται παρεμβολές και την αντίστοιχη μείωση της ισχύος μετάδοσης κάτω ζεύξης. Αυτό θα μπορούσε να γίνει ανιχνεύοντας μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης στο HeNB ή με τη βοήθεια αναφορών μετρήσεων από το MUE που δέχεται παρεμβολές στο HeNB εξυπηρέτησης, εάν είναι δυνατόν να σηματοδοτήσουμε αυτές τις πληροφορίες στο HeNB.
- Συντονισμός χρονικού πεδίου χρησιμοποιώντας σχεδόν κενά υποπλαίσια (ABS), μια έννοια που εισάγεται στην έκδοση 10. Τα ABS περιέχουν μόνο ορισμένες βασικές μεταδόσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της παρεμβολής που δέχονται οι UE. Συνήθως, ένας HeNB που προκαλεί παρεμβολές θα δημιουργήσει ένα πρότυπο ABS που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση παρεμβολών που δέχονται οι MUE. Στην έκδοση 10 δεν υπάρχει διεπαφή X2 μεταξύ HeNBs και macro eNodeBs και επομένως τα πρότυπα ABS σε ένα HeNB θα πρέπει να διαμορφωθούν είτε με λειτουργία και συντήρηση (O & M) είτε αυτόνομα από το HeNB. Για παράδειγμα, ένα πρότυπο ABS θα μπορούσε να ρυθμιστεί σε ένα HeNB για να προστατεύσει υπο-

πλαίσια που περιέχουν PSS/SSS/PBCH και ευκαιρίες τηλεειδοποίησης σε μακροε-
ντολή eNodeB, υποθέτοντας ότι το HeNB έχει λάβει συγχρονισμό χρόνου με το
macro eNodeB. Επιπρόσθετο μετριασμό της υπολειπόμενης παρεμβολής λόγω των
βασικών μεταδόσεων είναι δυνατόν π.χ. ρυθμίζοντας τις θέσεις συχνότητας του
σήματος αναφοράς κυψέλης να είναι διαφορετικές σε αυτούς που δέχονται παρεμ-
βολές και στις κυψέλες που τις προκαλούν.

Macro to Femto, Uplink. Οι μεταδόσεις Uplink από ένα FUE υποφέρουν από
παρεμβολές από μεταδόσεις από MUE όπως φαίνεται από τη διαδρομή παρεμβολής C
στην Εικόνα 25, που ακολουθεί. Τα femtocells είναι πιο ευαίσθητα στις παρεμβολές αυ-
τές όταν βρίσκονται κοντά στην άκρη του άκρου των macrocells, καθώς τα MUEs κο-
ντά στο HeNB θα μεταδίδουν σε υψηλότερη ισχύ σε αυτή την περίπτωση. Αυτό το σε-
νάριο δεν δημιουργεί σημαντικό αντίκτυπο στις παρεμβολές, διότι στις περισσότερες
περιπτώσεις οι MUEs δεν μπορούν να λειτουργούν πολύ κοντά στο HeNB και ως εκ
τούτου οι FUEs θα είναι συνήθως πιο κοντά στο HeNB από ό, τι οι MUEs. Παρ 'όλα
αυτά, η παρεμβολή μπορεί να είναι σοβαρή εάν οι MUE και HeNB βρίσκονται αμφότε-
ρες μέσα σε εσωτερικούς χώρους. στην περίπτωση αυτή ενδέχεται να ισχύουν οι ακό-
λουθες πιθανές προσεγγίσεις για τη διαχείριση των παρεμβολών:

- *Έλεγχος ισχύος Uplink:* ο HeNB μπορεί να ελέγξει τη δύναμη των FUEs του για να ξεπεράσει τις παρεμβολές από τα γειτονικά MUEs.

- *Προστασία καναλιού ελέγχου (PUCCH):* εάν οι πόροι PUCCH (Physical Uplink Control Channel) υπερφορτιστούν στο HeNB τότε τα RBs (Resource Blocks) που χρη-
σιμοποιούνται για το PUCCH στο HeNB μπορούν να απομακρυνθούν από τα άκρα της
ζώνης έτσι ώστε να μην αλληλεπικαλύπτονται με τα RBs που χρησιμοποιούνται για το
PUCCH από το macrocell.



Εικόνα 8: Σενάρια παρεμβολής ανερχόμενης ζεύξης Macro / femto

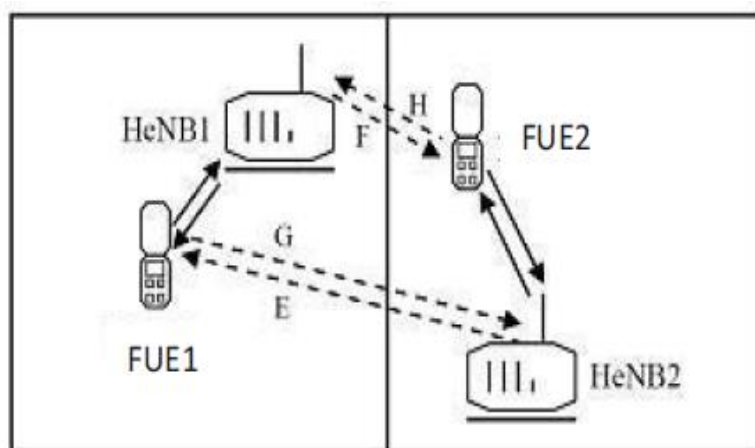
Femto to Macro, Uplink. Οι μεταδόσεις Uplink από ένα MUE υποφέρουν από παρεμβολές από μεταδόσεις από FUE όπως φαίνεται από τη διαδρομή παρεμβολής D στην Εικόνα 25. Η επίδραση αυτής της παρεμβολής αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των femtocells εντός της περιοχής κάλυψης macrocells. Το μέγεθος της παρεμβολής εξαρτάται επίσης από το εάν οι FUE λειτουργούν σε εξωτερικούς χώρους (οπότε οι FUEs θα τείνουν να μεταδίδουν με μεγαλύτερη ισχύ και απώλεια διαδρομής στο macrocell θα είναι χαμηλότερη). Οι πιθανές προσεγγίσεις της διαχείρισης των παρεμβολών για αυτό το σενάριο περιλαμβάνουν [38]:

- *Έλεγχος ισχύος Uplink:* ο HeNB μπορεί να ελέγξει τη δύναμη των FUEs του για να περιορίσει τις παρεμβολές σε γειτονικά macrocells. Αυτό μπορεί, για παράδειγμα, να βασίζεται στην εκτιμώμενη απώλεια διαδρομής μεταξύ των FUE και των macrocells ή στην εκτιμώμενη απώλεια διαδρομής μεταξύ των FUE και του HeNB [26].

- *Προστασία καναλιού ελέγχου (PUCCH):* όπως περιγράφεται παραπάνω για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών ανερχόμενης ζεύξης μακροεντολών.

Femto to Femto Downlink. Οι downlink μεταδόσεις των femtocells υποφέρουν από παρεμβολές μεταδόσεων γειτονικών femtocell όπως φαίνεται από τις διαδρομές παρεμβολής E και F στην Εικόνα 26, η οποία παρουσιάζει ένα σενάριο εσωτερικού χώρου, με μόλις δύο διαμερίσματα για απλότητα. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην πράξη μπορεί να υπάρξουν παρεμβολές μεταξύ πολλαπλών διαμερισμάτων στο

ίδιο και διαφορετικό επίπεδο ορόφου. Οι πιθανές προσεγγίσεις μετριασμού των παρεμβολών για αυτό το σενάριο περιλαμβάνουν τη δημιουργία μοντέλων ABS ή/και προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, με τα οποία κάθε HeNB καθορίζει τους γείτονές του (από μετρήσεις που έγιναν στο HeNB ή FUE) και τις σχετικές απώλειες διαδρομής. Αυτές οι γειτονικές πληροφορίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ορθογώνιων προτύπων RB ή ABS για χρήση από γειτονικά HeNBs. Και οι δύο κατανεμημένες προσεγγίσεις (με ή χωρίς ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ HeNBs [37], [15] και οι συγκεντρωτικές προσεγγίσεις (π.χ. στο HeNB GW) έχουν προταθεί για την κατασκευή των ορθογώνιων συνόλων. Η άμεση συνδεσιμότητα X2 μεταξύ HeNBs προστέθηκε στην έκδοση 10 για την υποστήριξη της κινητικότητας και αυτό επιτρέπει επίσης τον συντονισμό των προτύπων ABS μεταξύ HeNBs.



Εικόνα 9: Σενάρια παρεμβολής Femto / femto σε εσωτερικό χώρο

Femto to Femto Uplink. Οι μεταδόσεις Uplink από ένα FUE υποφέρουν από παρεμβολές από μεταδόσεις από άλλο FUE συνδεδεμένο σε άλλο HeNB όπως φαίνεται από τις διαδρομές παρεμβολών G και H στην Εικόνα 26. Ο έλεγχος ισχύος Uplink είναι μια πιθανή τεχνική μετριασμού παρεμβολών για αυτό το σενάριο.

Κεφάλαιο 4 – Εξοικονόμηση ενέργειας με έλεγχο ισχύος

4.1. Εισαγωγή

Τα femtocells είναι σταθμοί βάσης χαμηλής εμβέλειας που θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην προσεχή πέμπτη γενιά κινητών δικτύων. Συνδυάζουν την ευελιξία που καλύπτει τις τοπικές απαιτήσεις χρηστών χωρίς την ανάγκη για μεγάλες αναπτύξεις macrocells και το χαμηλό κόστος στην ανάπτυξη και τη συντήρησή τους. Δεδομένου ότι προορίζονται κυρίως για ιδιωτική χρήση, το κόστος αφαιρείται από τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου και επιβαρύνει τους ιδιοκτήτες κάνοντας τα πιο ελκυστικά. Αυτό συνεπάγεται επίσης τον μεγάλο αριθμό που αναπτύσσεται, δεδομένου ότι μπορεί να οδηγήσει σε ένα femtocell ανά νοικοκυριό στο μέλλον. Αυτό δεν είναι ρεαλιστικό σε αστικά σενάρια λαμβάνοντας υπόψη τον αναμενόμενο αριθμό σημείων πρόσβασης στο μέλλον [50].

Είναι εύκολο να διαπιστώσουμε τα μειονεκτήματα τέτοιων σεναρίων. Ο μεγάλος αριθμός ιδιόκτητων σταθμών βάσης μη συντονισμένης ανάπτυξης, που βρίσκονται σε στενή σχέση με την ανταγωνιστική χρήση των πόρων, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές παρεμβολές. Ο μεγάλος αριθμός τους οδηγεί επίσης την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Τόσο η άμβλυση των παρεμβολών όσο και η κατανάλωση ενέργειας έχουν οριστεί ως μείζονες προκλήσεις στα επερχόμενα δίκτυα. Όταν ο αριθμός των femtocells είναι μικρός, η χαμηλή εμβέλειά τους και η χαμηλή κατανάλωσή τους σε σύγκριση με τα macrocells καθιστούν τα θέματα αυτά ασήμαντα. Εντούτοις, στο μέγεθος της αναμενόμενης πυκνής ανάπτυξης, τα θέματα αυτά επικρατούν. Ένας τρόπος αντιμετώπισης των δύο αυτών προκλήσεων είναι η υιοθέτηση διαφορετικών τρόπων λειτουργίας για τα femtocells.

Δύο κύριοι εναλλακτικοί τρόποι για αυτό το στόχο είναι η χρήση του μηχανισμού sleep mode και η υβριδική πρόσβαση. Και οι δύο αυτοί τρόποι έχουν εξεταστεί και ρυθμίζεται για χρήση στο στρώμα femtocell, προσπαθώντας να σέβονται τα ειδικά χαρακτηριστικά του στρώματος, όπως η δικτικότητα των femtocells καθώς και η έλλειψη κεντρικού ελέγχου. Στο [51] οι συγγραφείς προτείνουν ενεργειακά αποδοτικούς αλγόριθμους οι οποίοι οδηγούν τους μικρούς σταθμούς βάσης κυψελών σε αναστολή λειτουργίας (sleep mode) σε μια προσπάθεια να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας των κυψελοειδών δικτύων. Τρεις διαφορετικές στρατηγικές για τον έλεγχο του αλγορίθμου συζητούνται, στηριζόμενοι σε προσεγγίσεις με γνώμονα τα μικρά κυψελωτά δίκτυα, βασικό δίκτυο και προσεγγίσεις από τον εξοπλισμό των χρηστών, που οδηγούν σε εξοικονόμηση ενέργειας. Οι συγ-

γραφείς στο [52] συγκρίνουν επίσης διαφορετικούς μηχανισμούς λειτουργίας sleep mode (αδράνειας) σε πυκνά δίκτυα μικρών κυψελών για να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι ο τρόπος sleep mode μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική ενεργειακή απόδοση, ιδίως με την προσεκτική επιλογή των σταθμών βάσης.

Μια προσέγγιση βασισμένη σε συμπλέγματα ενσωματώνεται στο [53] για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων femtocells. Συγκεκριμένα, οι συστοιχίες χρησιμοποιούν έναν ευκαιριακό μηχανισμό μετάβασης sleep mode - αφύπνισης (ενεργοποίησης) σταθμού βάσης για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ καθυστέρησης και κατανάλωσης ενέργειας με κέρδη που φθάνουν το 40% στην κατανάλωση ενέργειας και το 23% στο φορτίο. Το έργο στο [54] από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί τη λειτουργία sleep mode, αλλά επικεντρώνεται στην άμβλυση παρεμβολών για τους χρήστες macrocells. Η αξιολόγηση έδειξε ότι η στρατηγική πέτυχε καλύτερες επιδόσεις μαζί με σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Υπάρχει επίσης σημαντική εργασία στο θέμα της υβριδικής πρόσβασης. Στο [55] προτείνεται ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος, ο οποίος μπορεί να παρέχει υποστήριξη QoS σε ελάχιστες αναλογίες σήματος προς παρεμβολή συν το θόρυβο (SINRs) για όλους τους χρήστες ενώ εκμεταλλεύεται διαφοροποιημένες συνθήκες καναλιού. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη θεωρία παιγνίων που δεν συνεργάζονται και το εφαρμόζει σε ένα σύστημα υβριδικής πρόσβασης μέσω μιας κατανεμημένης σύνδεσης ανάθεσης φορτίου για χρήστες μακροεντολών, η οποία επιτρέπει την εύελικτη σύνδεση χρηστών με BS σε κάθε κατηγορία. Οι συγγραφείς στο [56] προτείνουν ένα μηχανισμό κατανομής πόρων που λαμβάνει υπόψη την προγενέστερη τιμή SINR των χρηστών που δεν είναι CSG, για τον προσδιορισμό του ανώτερου και κατώτερου ορίου των περιοχών φάσματος που μπορούν να κατανεμηθούν σε αυτούς τους χρήστες.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, υιοθετούμε έναν μηχανισμό ελέγχου ισχύος που ενσωματώνει και τους δύο τρόπους. Συγκεκριμένα, επεκτείνουμε το έργο του εγγράφου [57] και αξιολογούμε την εξοικονόμηση ενέργειας του προτεινόμενου σχεδίου μας. Συγκεκριμένα, το σύστημα προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό των femtocells που λειτουργούν, μετατρέποντας μερικά από αυτά σε sleep mode, όταν εκτιμά ότι οι ανάγκες των χρηστών τους μπορούν να καλυφθούν από τη λειτουργία γειτονικών femtocells, τα οποία πρόθυμα μετατρέπονται σε λειτουργία υβριδικής πρόσβασης. Συνεπώς, διεξάγεται μια διαπραγματευση μεταξύ γειτονικών femtocells, όπου ο μετριασμός των παρεμβολών λόγω της αδρα-

νοποίησης ενός αριθμού femtocells σε ένα σύμπλεγμα γίνεται κίνητρο για κέρδη απόδοσης στους γείτονές τους, καθιστώντας τους πρόθυμους να δεχτούν τους μη εγγεγραμμένους χρήστες αυτών των femtocells που είναι σε sleep mode. Ο προτεινόμενος μηχανισμός εξετάστηκε όσον αφορά την αύξηση της παραγωγικής. Στο παρόν κεφάλαιο διερευνώνται ποιες είναι οι εξοικονομήσεις ενέργειας που προκύπτουν από την αδρανοποίηση (κατάσταση λειτουργίας) ενός μεγάλου αριθμού femtocells. Εμείς προσομοιώνουμε την εφαρμογή του μηχανισμού για αρκετές πυκνότητες ανάπτυξης femtocells και αποδεικνύουμε ότι έχει μερικά σημαντικά οφέλη στην κατανάλωση ενέργειας.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο είναι δομημένο ως εξής. Η επόμενη ενότητα περιγράφει το μοντέλο παρεμβολής και ισχύος που εξετάσαμε κατά την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών παρεμβολής και ενέργειας σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας των femtocells. Το τμήμα 4.3 παρέχει μια εις βάθος περιγραφή του προτεινόμενου μηχανισμού. Το τμήμα 4.4 είναι μια εκτεταμένη εμφάνιση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, όπου αξιολογείται ο μηχανισμός. Τέλος, συνάγουμε τα συμπεράσματά μας και προτείνουμε τα επόμενα βήματά μας στην Ενότητα 4.5.

4.2. Μοντέλο Εξοικονόμησης ενέργειας

Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε το μοντέλο λειτουργίας sleep mode (λειτουργία αδράνειας) που χρησιμοποιήσαμε για να αξιολογήσουμε την εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε femtocell σε αδράνεια. Περιγράφουμε επίσης ένα μοντέλο καλής παρεμβολής που χρησιμοποιήσαμε για να εκτιμήσουμε τους περιορισμούς χωρητικότητας που περιγράφονται στην ενότητα 4.3.

Για να αξιολογηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας κάθε φορά που ένα femtocell απενεργοποιεί μερικώς, χρησιμοποιούμε το μοντέλο λειτουργίας sleep mode που περιγράφεται στο [58], [51]. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, όταν το κρίνει απαραίτητο, το femtocell απενεργοποιεί τμήματα που δεν χρησιμοποιούνται όπως τμήματα της μνήμης συσχετισμένης με μικροεπεξεργαστή και συστοιχίας προγραμματιζόμενης συστοιχίας πύλης (FPGA), του πομπού και του δέκτη ραδιοσυχνότητας (RF) και του ενισχυτή ισχύος. Ανάλογα με το αν η ευθύνη της αφύπνισης του femtocell προέρχεται από το ίδιο το femtocell ή από το δίκτυο, υπάρχουν διαφορές σε ορισμένα πρόσθετα λειτουργικά μέρη. Στην πρώτη περίπτωση, απαιτείται ένα τμήμα sniffer για να διατηρηθεί σε λειτουργία κατά την αναστολή

(sleep mode), προκειμένου να εντοπιστούν τα σήματα που θα μπορούσαν να υποδηλώσουν την ανάγκη αποκατάστασης της πλήρους λειτουργικότητας του femtocell. Αυτά τα σήματα θα μπορούσαν να είναι μεγάλες αυξήσεις στην παραληφθείσα ισχύ στην ανερχόμενη ζεύξη, η οποία θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει συνδέσεις μεταξύ των κοντινών χρηστών και του σταθμού βάσης μακροεντολών. Στην περίπτωση αυτή, δεν είναι απαραίτητο αυτό το χαρακτηριστικό, αφού το δίκτυο έχει κεντρική γνώση και αποφασίζει εάν ένα συγκεκριμένο femtocell πρέπει να είναι σε λειτουργία με βάση τις ανάγκες του δικτύου και την τοπολογία. Κάθε προσέγγιση έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Το πλεονέκτημα είναι ότι είναι πλήρως κατανοητό και δεν απαιτεί κεντρικό συντονισμό. Το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτούνται περισσότερα μέρη για να παραμείνουν ενεργά, η δυνατότητα του χρήστη να συνδεθεί με μια macro BS και την επακόλουθη παράδοση. Χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω Πίνακα 1, για να αξιολογήσουμε την εξοικονόμηση ενέργειας για αυτήν την περίπτωση, η οποία αποδίδει:

$$P_{\text{savings}} = P_{\text{micro}} + P_{\text{FPGA}} + P_{\text{receiver}} + P_{\text{transmitter}} + P_{\text{amplifier}} - P_{\text{sniffer}} = 4.2W$$

Η παραπάνω μείωση αντιστοιχεί σε μείωση κατά 40% στην κατανάλωση ενέργειας των femtocells. Η δεύτερη προσέγγιση είναι σε θέση να απενεργοποιήσει περισσότερα εξαρτήματα όπως οι λειτουργίες που είναι υπεύθυνες για τη συνδεσιμότητα backhaul, ενώ δεν απαιτεί κανένα υλικό ανίχνευσης καθώς αυτές οι λειτουργίες ελέγχονται από το κεντρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να φτάσει το 70%.

Πίνακας 1: Κατανάλωση ενέργειας τμημάτων των Femtocell

Συνιστώσα υλικού	Κατανάλωση ενέργειας (Watts)
Μνήμη σχετιζόμενη με μικροεπεξεργαστή	1.7 (0.5 ^a)
Μνήμη σχετιζόμενη με FPGA	2.0 (0.5 ^a)
Άλλα κυκλώματα	2.0
RF transmitter	1.0 ^a
RF receiver	0.5 ^a
RF power amplifier	2.0 ^a

Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η συμμετοχή των πόρων του δικτύου για τον συντονισμό των αναγκών σε κεντρικό επίπεδο, όπως μέσω του φορέα διαχείρισης κινητικότητας (Long Term Evolution, LTE), που μπορεί να ελέγξει για ένα κοντινό femtocell ότι ο χρήστης έχει πρόσβαση στη σύνδεση. Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιούμε και τα δύο αυτά σενάρια για να αξιολογήσουμε την απόδοση του

μηχανισμού μας σχετικά με πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας. Λαμβάνουμε επίσης υπόψη τη μεταβολή στην ισχύ της μετάδοσης του femtocells. Δηλαδή, θεωρούμε την αύξηση των επιπέδων ισχύος που ο αλγόριθμος μας καθορίζει περιστασιακά και την αφαιρεί από την εξοικονόμηση ενέργειας.

4.3 Μοντέλο παρεμβολής

Στον προτεινόμενο μηχανισμό που περιγράφουμε στην επόμενη ενότητα, επιτρέπουμε το sleep mode και υβριδική πρόσβαση σε femtocell δεδομένου ότι τα ποσοστά δεδομένων των συνδρομητών είναι εγγυημένα και ότι τα οφέλη μετριασμού παρεμβολών που προέρχονται από τη λειτουργία sleep mode αντισταθμίζουν τη μείωση των σταθμών βάσης. Για να αξιολογηθεί αυτό, χρησιμοποιούμε ένα πολύ γνωστό μοντέλο παρεμβολής για να μετρήσουμε το αποτέλεσμα μεταξύ των χρηστών και των κοντινών BS. Αξιολογούμε το SINR ενός χρήστη u σε κάθε επιμέρους φορέα k , που εξυπηρετείται είτε από macrocell είτε από femtocell, δίνεται από:

$$\text{SINR}_{u,k} = \frac{P_{B,k} G_{u,B,k}}{N_0 \Delta f + \sum_B P_{B,k} G_{u,B',k}}$$

όπου το $P_{B,k}$ είναι η ισχύς μεταδόσεως του σταθμού βάσης εξυπηρέτησης του χρήστη B επί του υποφορέα k , και το $G_{u,B,k}$ είναι το κέρδος καναλιού μεταξύ του χρήστη u και του εξυπηρετούμενου κελιού B επί του φορέα k . Ομοίως, τα $P_{B,k}$ και $G_{u,B,k}$ σημαίνουν αντίστοιχα την ισχύ κάθε άλλου σταθμού βάσης παρεμβολής (είτε femtocell είτε macrocell) και το κέρδος μεταξύ αυτών και του χρήστη u . N_0 είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος λευκού θορύβου και Δf είναι η απόσταση του υποφορέα. Από το SINR υπολογίζουμε τη χωρητικότητα του χρήστη u σε αυτόν τον επιμέρους φορέα k από [59]:

$$C_{u,k} = \Delta f \times \log_2(1 + \alpha \text{SINR}_{u,k})$$

όπου η παράμετρος α ορίζεται από τον τύπο $\alpha = -1.5/\ln(5\text{BER})$. Με βάση την κατανομή φάσματος και τους φορείς που χρησιμοποιεί ο χρήστης, αξιολογούμε τη συνολική απόδοση του σταθμού βάσης εξυπηρέτησης σύμφωνα με το [60]:

$$T_B = \sum_u \sum_k \beta_{u,k} C_{u,k}$$

όπου η παράμετρος $\beta_{u,k}$ ειδοποιεί την εκχώρηση υποφορέα για τους χρήστες. Όταν $\beta_{u,k} = 1$, τότε ο υποφορέας k εκχωρείται στο χρήστη u . Διαφορετικά, $\beta_{u,k} = 0$. Πριν αναλάβει ο προτεινόμενος έλεγχος ισχύος, υπολογίζουμε την ισχύ του πιλότου λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση macrocell στην αποτελεσματική περιοχή του femtocell. Επομένως, υιοθετούμε την πιλοτική ισχύ στο [61] που εξασφαλίζει σταθερή ακτίνα κάλυψης.

4.4 Προτεινόμενος έλεγχος ισχύος

Ενώ η αξιοποίηση των femtocells είναι ωφέλιμη, συζητήσαμε εν συντομία κάποιες προκλήσεις στην εισαγωγή. Συγκεκριμένα, την παρεμβολή που προκύπτει από πολλούς σταθμούς βάσης χωρίς σχεδιασμό ανάπτυξης. Αυτό το πρόβλημα εντείνεται στο επίπεδο femtocell, θεωρώντας ότι σε αντίθεση με το macro επίπεδο, οι σταθμοί βάσης δεν συνεργάζονται και οι συνδρομητές του σταθμού βάσης του δικαιούνται τους πόρους μόνο ενός BS. Το επιχειρηματικό μοντέλο ιδιοκτησίας συνδρομητών που συνήθως υιοθετούν τα femtocells, αυξάνει τον αριθμό τους, καθώς εξαρτώνται από τον αριθμό των ξεχωριστών νοικοκυριών και όχι από τις απαιτήσεις δεδομένων των χρηστών αυτών των νοικοκυριών.

Προτείνουμε ένα σχήμα συντονισμού όπου οι femtocells συνεργάζονται για να μειώσουν τον αριθμό των ενεργών BS μέσω της ανακατανομής των χρηστών τους. Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη παροχής κινήτρων στους ιδιοκτήτες των femtocells για να το υιοθετήσουν, παρέχουμε εξοικονομήσεις παραγωγικής ικανότητας και εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της λειτουργίας sleep mode και της υβριδικής πρόσβασης. Συγκεκριμένα, όταν ένα σύμπλεγμα femtocells σχηματίζεται (δηλαδή πολλαπλά femtocells σε μια μικρή περιοχή), ο μηχανισμός προσπαθεί να ταυτοποιήσει για femtocells τα οποία μπορούν να τεθούν σε κατάσταση αδράνειας χωρίς να επηρεαστούν αρνητικά οι συνδρομητές των συστάδων femtocells. Μια καινοτομία του μηχανισμού μας είναι ότι μπορεί να επιλέξει να απενεργοποιήσει ένα femtocell ακόμη και αν οι συνδρομητές τους έχουν ενεργές συνδέσεις με αυτό. Ο μηχανισμός αναζητά γειτονικό femto BS και ανακατανέμει τους χρήστες σε αυτό (έως και έναν χρήστη ανά γειτονικό femtocell).

Τα παραπάνω απαιτούν δύο προδιαγραφές προκειμένου να ξεπεραστεί η απροθυμία του ιδιοκτήτη των femtocells να υιοθετήσει είτε τη λειτουργία αδράνειας (sleep mode) και την ανακατανομή σε άλλους σταθμούς βάσης, είτε τη λειτουργία υβριδικής πρόσβασης όπου μοιράζονται τους πόρους τους με μη εγγεγραμμένους χρήστες στο δίκτυο. Και

στις δύο περιπτώσεις, εγγυόμαστε το ρυθμό μετάδοσης των συνδρομητών. Ωστόσο, με το απενεργοποιημένο femtocell, ο ίδιος αριθμός χρηστών πρέπει να επιτύχει τα ίδια ποσοστά δεδομένων με λιγότερους διαθέσιμους πόρους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε τον έλεγχο ισχύος. Καταρχήν, για τους χρήστες που διατίθενται σε ένα γειτονικό femtocell, υπολογίζουμε εάν απαιτείται κάποιος έλεγχος ισχύος. Από τη μία πλευρά ίσως χρειαστεί να μοιραστούν τους πόρους, ωστόσο το νέο femtocell τους έχει μια λιγότερη πηγή παρεμβολής, δηλαδή το γειτονικό πρόσφατα απενεργοποιημένο femtocell. Αυτό κάνει τον αλγόριθμο έναν απλό αλγόριθμο ανακατανομής που εκμεταλλεύεται την απρογραμμάτιστη, συχνά κακή ανάπτυξη των femtocells. Αν όμως δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο, μπορεί να χρειαστεί να αυξηθούν τα επίπεδα ισχύος από το femtocell που τώρα εξυπηρετεί έναν επιπλέον χρήστη. Για να αντισταθμίσουμε τους συνδρομητές του femtocell που εισήλθε σε κατάσταση sleep mode, η απαιτούμενη αύξηση είναι:

$$P_{\text{Inc}} \geq \frac{R \times (\Delta f + \sum_B P_B G_{u,B}) - P_{\text{Old}} \times G_{u,N}}{G_{u,N}}$$

όπου το άθροισμα $\Delta f + \sum_B P_B G_{u,B}$, υποδηλώνει την παρεμβολή στον χρήστη όταν συνδέεται με το νέο femtocell, το $G_{u,N}$ υποδηλώνει το κέρδος του/της σε σχέση με τον σταθμό βάσης που μπορεί να ανατεθεί προς εξυπηρέτηση ο χρήστης, το P_{Old} υποδηλώνει την ισχύ του σταθμού και το R είναι:

$$R = \frac{(1 + \alpha \text{SINR}_{\text{Old}})^{(N_2+1)/N_1} - 1}{\alpha}$$

όπου το μέγεθος SINR_{Old} είναι το SINR που ο χρήστης θα βιώσει εάν εξυπηρετείται από το αρχικό femtocell, N_2 είναι ο αριθμός χρηστών που εξυπηρετούνται από τον γείτονα και N_1 είναι ο αριθμός χρηστών που εξυπηρετούνται από το femtocell προέλευσης. Η αύξηση της ισχύος υπόκειται επίσης σε μέγιστη επιτρεπόμενη μετάδοση ισχύος του femtocell.

$$P_{\text{Inc}} \geq \frac{R \times (\Delta f + \sum_B P_B G_{u,B}) - P_{\text{Old}} \times G_{u,N}}{G_{u,N}}$$

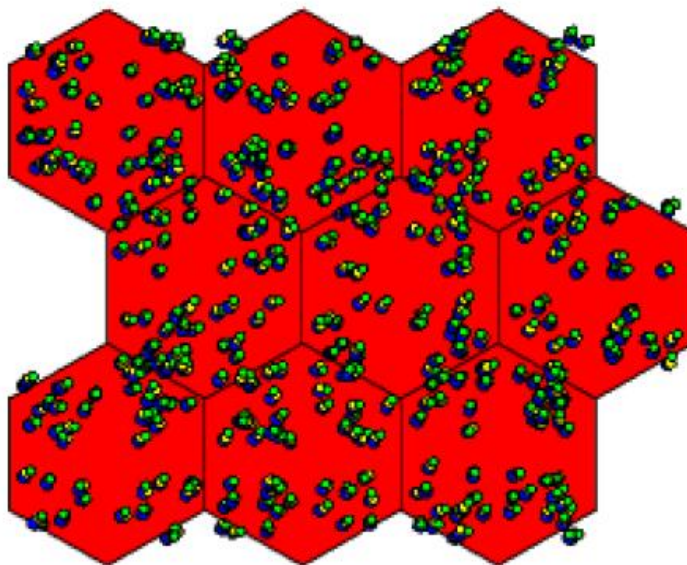
όπου το άθροισμα $\Delta f + \sum_B P_B G_{u,B}$, υποδηλώνει την παρεμβολή στο συνδρομητή, το $G_{u,N}$ υποδηλώνει το κέρδος του/της όπως πριν, το P_{Old} υποδηλώνει την ισχύ του σταθμού και το R είναι:

$$R = \frac{(1 + \alpha \text{SINR}_{\text{Old}})^{(N_2+1)/N_1} - 1}{\alpha}$$

Θέλουμε σε κάθε συνδρομητή του femtocell να διατηρείται τουλάχιστον ο ρυθμός των δεδομένων, είτε συμμετέχει στην παραπάνω ανακατανομή είτε όχι. Επομένως, αν προσδιορίσουμε τα επίπεδα ισχύος (και είναι εφικτά), ελέγχουμε τον αντίκτυπό τους στους υπόλοιπους συνδρομητές των femtocells. Συνήθως, ο μετριασμός παρεμβολής από την απενεργοποίηση του femtocell, ξεπερνά τις επιπτώσεις από οποιαδήποτε αύξηση των επιπέδων ισχύος. Αν συμβαίνει αυτό, ο μηχανισμός επιβάλλει να απενεργοποιηθεί το femtocell και να επιβάλει νέα επίπεδα ισχύος.

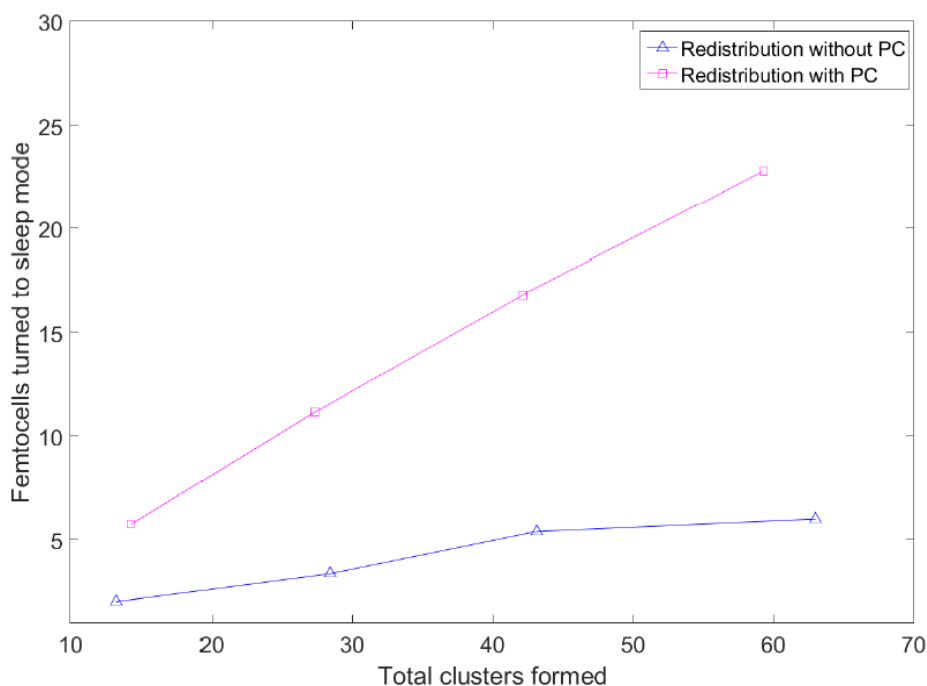
4.5 Αξιολόγηση απόδοσης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε τις μεταβλητές του προσομοιωτή και αξιολογούμε τα αποτελέσματα. Στις προσομοιώσεις μας, θεωρήσαμε ένα δίκτυο 9 macrocells με το σταθμό βάσης που βρίσκεται στο κέντρο κάθε κελιού και μεταδίδει στα 46 dBm. Η ακτίνα των κυψελών ήταν 250 m. Σε αυτόν τον τομέα αναπτύξαμε τυχαία πολλαπλά femtocells και τους συνδρομητές τους. Κάθε femtocell θα μπορούσε να έχει έως και τρεις συνδρομητές ταυτόχρονα. Οι χρήστες του Macrocell αναπτύχθηκαν επίσης τυχαία. Οι τιμές των παραμέτρων βασίστηκαν στις οδηγίες 3GPP από τον LTE-A και τον προσομοιωτή LTE στο [62]. Τα αποτελέσματα που απεικονίζουν τη συνάρτηση σωρευτικής κατανομής (CDF) δείχνουν τον μέσο όρο που προκύπτει από 20 επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις. Μια απεικόνιση της τοπολογίας του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση φαίνεται στην Εικόνα 27 που ακολουθεί:



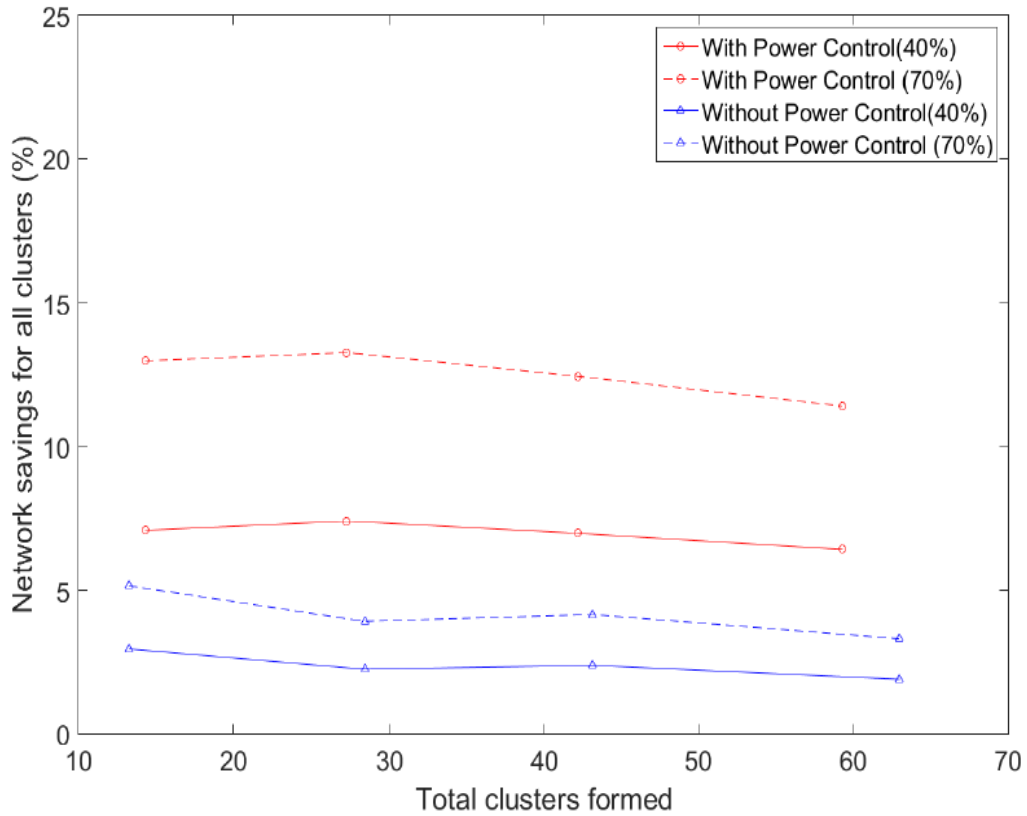
Εικόνα 27: Στιγμιότυπο δικτύου

Η Εικόνα 28 που ακολουθεί, παρουσιάζει τη σημαντική αύξηση στον αριθμό των femtocells που εισήλθαν σε sleep mode με τη χρήση των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζουμε τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η ανακατανομή χρηστών απαιτούσε αύξηση ισχύος για τα femtocells και η περίπτωση όπου η ανακατανομή βασιζόταν απλώς σε μια καλύτερη αναδιανομή των χρηστών χωρίς μεταβολή της ισχύος μετάδοσης.



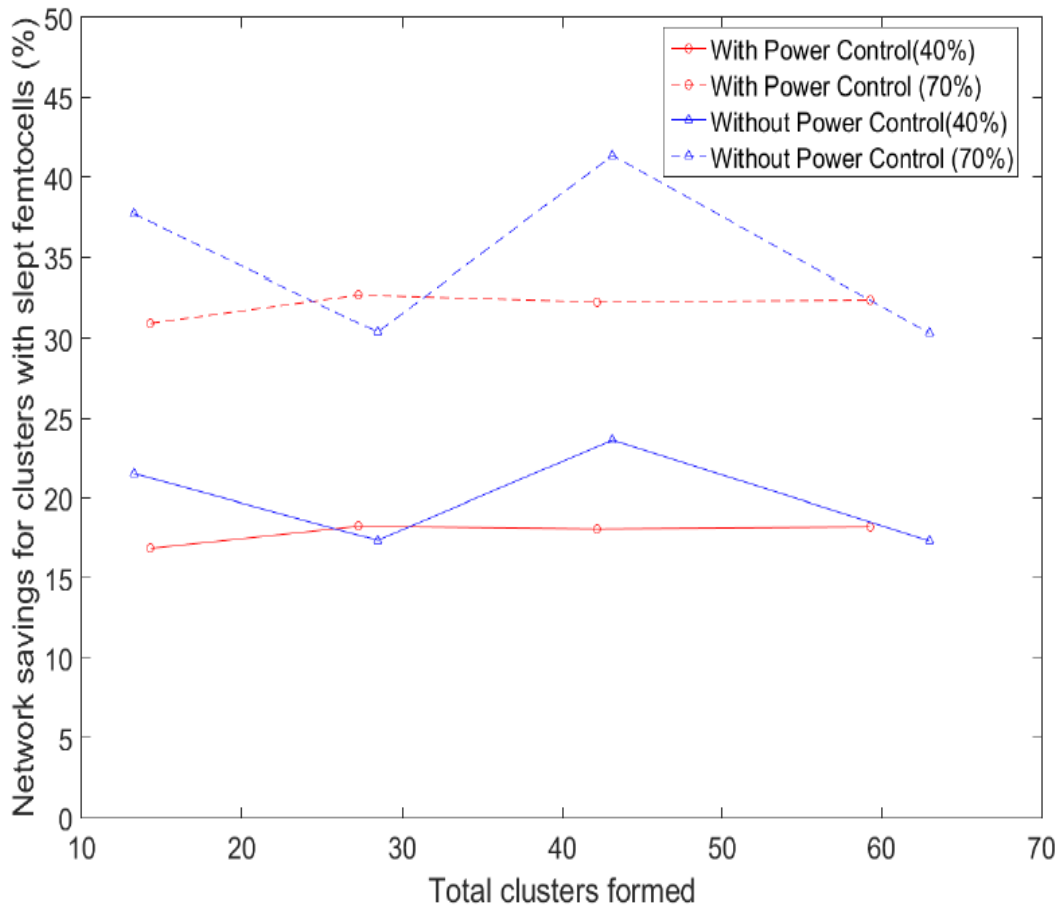
Εικόνα 10: Ο αριθμός των femtocells που εισήλθε σε sleep mode σε σχέση με την πυκνότητα του δικτύου με/χωρίς χρήση ελέγχου ισχύος

Η Εικόνα 29 που ακολουθεί, παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο το προηγούμενο σχήμα μεταφράζεται σε εξοικονόμηση ενέργειας. Ο αριθμός των femtocell που αδρανοποιούνται είναι σημαντικός, όπως και η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει. Παρουσιάζουμε αυτά ως ποσοστό, που σημαίνει ότι απεικονίζουν τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Όπως αναμενόταν, ο έλεγχος ισχύος επιτρέπει στα femtocells να αξιοποιήσουν τους πόρους τους πολύ καλύτερα, οδηγώντας πολλά από αυτά να είναι περιττά και να οδηγούνται σε sleep mode, με αποτέλεσμα τη μείωση κατά 7% κατά μέσο όρο για το μοντέλο λειτουργίας ελέγχου ισχύος από τα femtocell. Για το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιούμε, η μείωση φθάνει το 12%, που είναι ένας σημαντικός αριθμός λαμβάνοντας υπόψη ότι μετράμε την κατανάλωση ολόκληρης της βαθμίδας femtocell, με τα femtocells τοποθετημένα σε συστάδες.



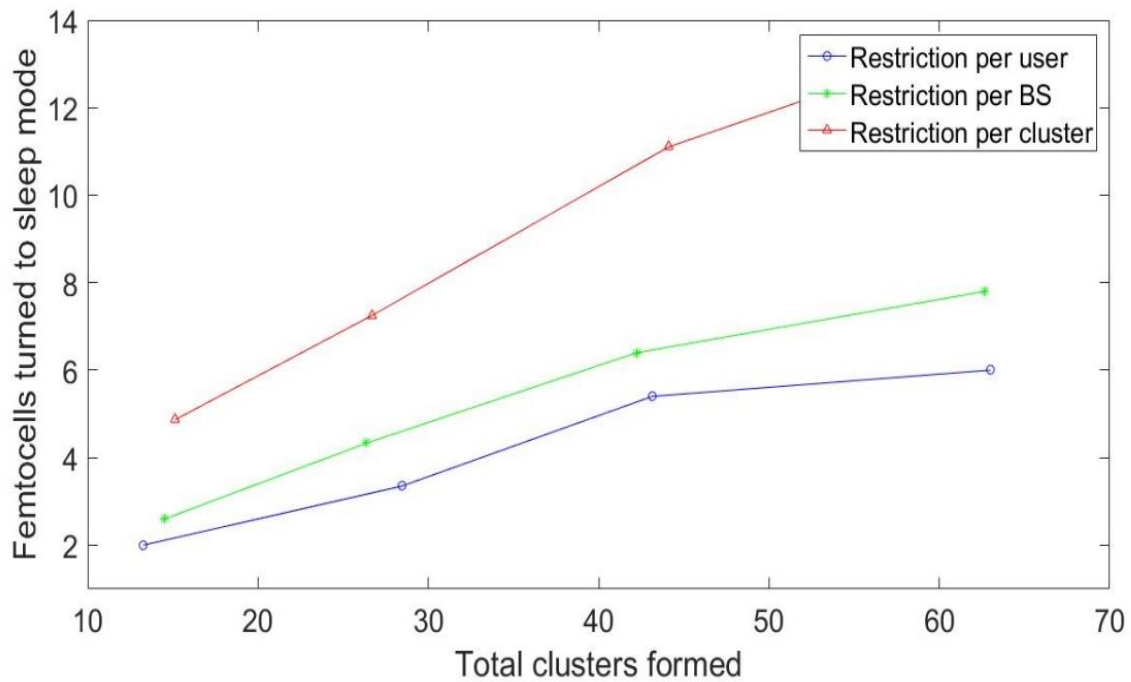
Εικόνα 29: Εξοικονόμηση ενέργειας (%) για όλα τα femtocells που ανήκουν σε ομάδες (συστάδες)

Τέλος, εστιάζουμε στα αποτελέσματα στην Εικόνα 30 που ακολουθεί, παρουσιάζοντας την εξοικονόμησης ενέργειας σε συστάδες που έχουν femtocells σε sleep mode. Η προσομοίωση δείχνει ότι ο έλεγχος ισχύος αυξάνει την πιθανότητα μια συστάδα να περιέχει ένα femtocell σε sleep mode και δεν αυξάνει τον αριθμό των femtocells που έχουν εισέλθει σε sleep mode σε ένα σύμπλεγμα. Ως εκ τούτου, μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 31 ότι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι αρκετά παρόμοια σε περιπτώσεις με/χωρίς τον έλεγχο ισχύος (power control). Παρόλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις θεωρούμε σημαντική την εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει.



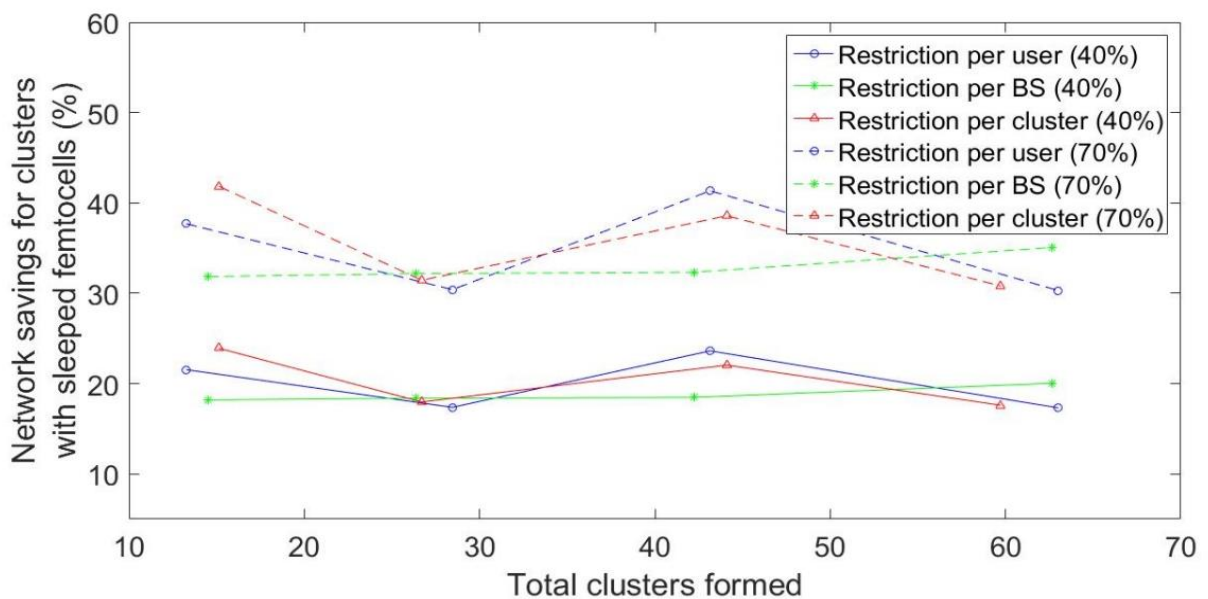
Εικόνα 30: Εξοικονόμηση ενέργειας (%) για femtocells που ανήκουν σε συστάδες που περιέχουν τουλάχιστον ένα femtocell σε sleep mode

Στην Εικόνα 31 παρατηρούμε εφαρμογή κριτηρίων αναφορικά με την απόδοση του χρήστη (Restriction per user), με τη συνολική απόδοση των χρηστών που εξυπηρετούνται από τον ίδιο σταθμό βάσης (Restriction per BS) και με μια συστάδα χρηστών (Restriction per cluster) ως προς την εισαγωγή στο sleep mode .



Εικόνα 31: Femtocells που εισήλθαν σε sleep mode με χαλαρότερα κριτήρια

Εξετάζοντας τη συνολική απόδοση του δικτύου και παραμερίζοντας την επιμέρους απόδοση κάποιων χρηστών που ίσως ζημιώνονται από την εισαγωγή στο sleep mode των femtocells που τους εξυπηρετούν ή την εξυπηρέτηση άλλων χρηστών από τα δικά τους femtocells παρατηρούμε ότι συνδυαστικά με χρήση ελέγχου ισχύος, περισσότερα femtocells εισέρχονται σε sleep mode και ως αποτέλεσμα έχουμε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32 που ακολουθεί.



Εικόνα 32: Εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο με εφαρμογή χαλαρών κριτηρίων sleep mode

4.6 Συμπεράσματα και Μελλοντικές εξελίξεις

Στο κεφάλαιο αυτό αυτό προσπαθήσαμε να αξιολογήσουμε την πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας ως αποτέλεσμα του προτεινόμενου μηχανισμού μας. Ο μηχανισμός χρησιμοποιεί τους τρόπους αδρανοποίησης των femtocells και χρήσης υβριδικής πρόσβασης και μαζί με τον έλεγχο ισχύος, καλύπτει τις απαιτήσεις σε ρυθμούς δεδομένων μειώνοντας τον αριθμό των ενεργών femtocells. Το αποτέλεσμα του μηχανισμού είναι η αυξημένη εξοικονόμηση ενέργειας του δικτύου, χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στη συνολική του απόδοση ή στην επιμέρους απόδοση των χρηστών των femtocells. Ο μηχανισμός επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση των πόρων και δίνει περιθώριο βελτίωσης που μπορεί να επιτευχθεί όταν χρησιμοποιούμε καταναμημένο συντονισμό, μεταξύ ad-hoc δικτύων femtocells. Επίσης, απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο η βελτίωση της απόδοσης μπορεί να είναι ένα κρίσιμο κίνητρο, όταν οι στόχοι του παρόχου πρέπει να περιλαμβάνουν ιδιωτική υποδομή και πόρους.

Στο μειονέκτημα, οι απαιτήσεις για τη σηματοδότηση και την ικανότητα υπολογισμού αυξάνονται. Μελλοντικές πιθανές επεκτάσεις μπορεί να είναι ο συνδυασμός του κινήτρου απόδοσης με κίνητρα τιμολόγησης από τον πωλητή. Αυτό θα αυξήσει την ανοχή των ιδιοκτητών είτε για να δεχθεί την κατάσταση sleep mode/υβριδικής πρόσβασης για την ιδιοκτησία τους, μειώνοντας τους αυστηρούς περιορισμούς απόδοσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο αριθμό femtocells σε sleep mode και έτσι να αυξήσει την εξοικονόμηση ενέργειας των δικτύων.

Βιβλιογραφία

1. 3GPP. (2010). Mobility Procedures for Home NodeB. 3GPP TS 25.367 V9.2.0 (2009-12), Dec. 2009. Retrieved Feb. 18.
2. 3GPP. (2012). 3rd generation partnership project; Technical specification group radio access network.
3. A. Golaup, M. M. (2009, Σεπτέμβριος). Femtocell Access Control Strategy. IEEE Communications Magazine, vol. 47.
4. A. Tyrrell, F. Z. (2011). Use Cases, Enablers and Requirements. Proc. of the 73rd IEEE Vehicular Technology Conference.
5. B. Badic, T. O. (2009). Energy Efficient Radio Access Architectures for Green Radio: Large versus Small Cell Size Deployment.
6. Bouras, C. D. (2017). Distributed sleep mode power control in 5G ultra dense networks. In: 15th IFIP International Conference on Wired/Wireless Internet Communications.
7. Christos Bouras and Georgios Diles and Theodoros Moulialis. (2017). Energy savings in power control for 5G dense femtocells.
8. D. Chase. (1985). Code combining – a maximum-likelihood decoding approach for combining and arbitrary number of noisy packets.
9. D. Knisely, T. Y. (2009, September). Standardization of Femtocells in 3GPP.
10. D. Lopez-Perez, A. V. (2008). Access Methods to WiMAX Femtocells: A Downlink System-Level Case Study.
11. D1.1, A. (2010). Definitions and Architecture Requirements for Supporting Interference.
12. E. Dahlman, S. P. (2008). G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband.
13. E. Dahlman, S. P. (2011). 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. 1η έκδοση. Academic Press.
14. E. So et al, M. a. (2015, June). Sleep mode mechanisms in dense small cell networks. IEEE International Conference on Communications (ICC).
15. Ericsson. (2008, May). R1-082024: A discussion on some technology components for LTE-Advanced.
16. FemtoForum. (2010, Μάρτιος). Interference Management in OFDMA Femtocells.
17. G. Korinthios, E. T. (2009). Early Experiences and Lessons learned from Femtocells.
18. H. Claussen. (2007). Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure. In: IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2007, p. 15.
19. H. Claussen, I. A. (2010). Dynamic idle mode procedures for femtocells, Bell Labs Technical Journal, vol. 15, no. 2, pp.
20. H. Le, N. V. (2012). Hybrid access design for femtocell networks with dynamic user association and power control. in Vehicular Technology Conference.
21. H. Leem, S. Y. (2010). The Effects of Cell Size on Energy Saving, System Capacity, and Per-Energy Capacity.
22. I. Ashraf et al, F. B. (2011, August). Sleep mode techniques for small cell deployments. IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 8, pp.
23. Informa. (2018, February). Small Cell Market Status, Issue 1.
24. ITU-R. (2008). Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface.
25. J. H. Winters. (1984, July). Optimum Combining in Digital Mobile Radio with Cochannel Interference. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,.
26. J.G. Proakis. (2011). Digital Communications. McGraw-Hill,.

27. Johnson, C. (2012). Long Term Evolution In Bullets.
28. K. Okino, T. N. (2011, June). Pico cell range expansion with interference mitigation toward lte-advanced heterogeneous networks. in 2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC),.
29. K. T. Cho, B. H. (2012). Partitioning resource priority regions for hybrid access mode femtocells in Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC).
30. Khan, F. (2009). LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance.
31. L.C. Godara. (1997). Applications of antenna arrays to mobile communications.
32. Lars Lindbom, R. L. (2011). Enhanced Inter-cell Interference Coordination for Heterogeneous Networks in LTE-Advanced.
33. Lee, P. L. (2010). Interference management in LTE femtocell systems using fractional frequency reuse. In: 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2010), vol. 2, pp. 1047–1051.
34. Lei, H. Z. (2007). A novel multi-cell OFDMA system structure using fractional frequency reuse. In: IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2007, p.
35. M. Alendal. (2010). Operators need an ecosystem to support 50 billion connections.
36. M. Simsek, T. A. (2010, February). An LTE-femtocell dynamic system level simulator. n: 2010 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA).
37. M. Sternad, T. O. (2003). Attaining Both Coverage and High Spectral Efficiency with Adaptive OFDM Downlinks,.
38. M.L. Honig and U. Madhow. (1993). Hybrid intra-cell TDMA/inter-cell CDMA with inter-cell interference suppression for wireless networks. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology.
39. M.W. Thelander. (2005). The 3 G Evolution: Taking CDMA2000 into the Next Decade, Signal Research Group, LLC. White Paper developed for the CDMA Development Group.
40. Ortiz, S. (2008). The Wireless Industry Begins to Embrace Femtocells.
41. P. Viswanath, D. T. (2002). Opportunistic beamforming using dumb antennas.
42. Panasonic. (2008, June). R1-082397: Discussion on the various types of relays.
43. R. Attar. (2006). Evolution of CDMA2000 cellular networks. Multicarrier EV-DO, IEEE Commun.
44. R. Kreher, K. G. (2011). LTE Signaling: Troubleshooting and Optimization.
45. S. Ali, M. I. (2013). Femtocell sleep mode activation based interference mitigation in twotier networks. 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics.
46. S. Samarakoon, M. B.-a. (2014, August). Dynamic clustering and sleep mode strategies for small cell networks. in 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS).
47. S. Sesia, I. T. (2011). LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice.
48. WG1, R. (2008). LS on Ran1 ICIC status.
49. Αναστασάκης, Α. (2012, Μάϊος). Εισαγωγή στις αγορές χρήματος και κεφαλαίου. Ηράκλειο.
50. K. Okino, T. Nakayama, C. Yamazaki, H. Sato, and Y. Kusano, Pico cell range expansion with interference mitigation toward lte-advanced heterogeneous networks, in 2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), June 2011, pp. 1-5

51. I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, Sleep mode techniques for small cell deployments, *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 8, pp. 72-79, August 2011
52. E. Mugume and D. K. C. So, Sleep mode mechanisms in dense small cell networks, in 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2015, pp. 192-197
53. S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Latva-aho, Dynamic clustering and sleep mode strategies for small cell networks, in 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Aug 2014, pp. 934-938
54. S. Ali, M. Ismail, and R. Nordin, Femtocell sleep mode activation based interference mitigation in two-tier networks, *Procedia Technology*, vol. 11, pp. 1088-1095, 2013, 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics, fICEEIG 2013
55. H. N. Vu and L. B. Le, Hybrid access design for femtocell networks with dynamic user association and power control, in Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE, 2012, pp. 1-5
56. K. T. Cho and B. H. Ryu, Partitioning resource priority regions for hybrid access mode femtocells, in Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on, 2012, pp. 625-630
57. C. Bouras and G. Diles, Distributed Sleep Mode Power Control in 5G Ultra Dense Networks, in Wired/Wireless Internet Communications (WWIC), 15th IFIP International Conference, 2017, pp. 65-76
58. 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, Sept 2010
59. H. Lei, L. Zhang, X. Zhang, and D. Yang, A novel multi-cell OFDMA system structure using fractional frequency reuse, in Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on, 2007, pp. 15
60. 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 (ICACT10), vol. 2, 2010, pp. 1047-1051
61. 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 (ICACT10), vol. 2, 2010, pp. 1047-1051
62. M. Simsek, T. Akbudak, B. Zhao, and A. Czylik, An LTE-femtocell dynamic system level simulator, in Smart Antennas (WSA), 2010 International ITG Workshop on, Feb 2010, pp. 66-71

Παράρτημα: Δημοσίευση

Δημοσίευση που έγινε στα πλαίσια της προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας

C. Bouras, Diles, G., and Moulias, T., “Energy savings in power control fro 5G dense femtocells”, in 12th International Conference on Broa-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA - 2017), 2017, pp. 299-308..

Περίληψη. Η δραματική αύξηση της κυκλοφορίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν αναμένεται να επιβραδυνθεί. Η αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης διαφορετικής εμβέλειας και δυνατοτήτων και η δημιουργία εξαιρετικά πυκνών δικτύων είναι μια από τις λύσεις που θα υιοθετηθούν προκειμένου να καλυφθεί η αυξημένη αυτή ζήτηση. Ενεργειακά αποδοτικά συστήματα είναι απαραίτητα προκειμένου να περιοριστεί ο ενεργειακός αντίκτυπος μιας τέτοιας προσέγγισης. Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στα πυκνά αναπτυγμένα δυκτια femtocells (clusters) αξιολογοντας την εξοικονόμηση ενέργειας που προέκυψε εφαρμοζοντας ένα μηχανισμό λειτουργίας ελεγχου ισχύος μεταδοσης και λειτουργία αδραναποίησης των femtocells (sleep mode). Ο μηχανισμός προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό των κλειστής πρόσβασης femtocells, παρέχοντας κίνητρα στους χρήστες τους, ώστε να συνεργαστούν με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου χωρίς να θυσιάσουν την απόδοσή τους . Οι προσομοιώσεις διερευνούν τα διαφορετικά επίπεδα εξοικονόμησης ενέργειας ανάλογα με την επιλεγμένη διαμόρφωση και την πυκνότητα του δικτύου.