



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ
ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Επιστήμη και Τεχνολογία Υπολογιστών»

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ
LTE-A ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΔΗΛΕΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.M.: 818

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Επιστήμη και Τεχνολογία Υπολογιστών»

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ LTE-A ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) και ο εμπλουτισμένος διάδοχός του LTE-A (Long Term Evolution Advanced) δημιουργήθηκε με σκοπό να καλύψει της αυξημένες ανάγκες, και τις αυξημένες απαιτήσεις στον τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών. Τη δεδομένη στιγμή, η τεχνολογία LTE-A αποδεικνύεται τόσο επιτυχημένη που πιθανότατα θα αποτελέσει το πρώτο παγκόσμια αποδεκτό πρότυπο τηλεπικοινωνιών. Οι στόχοι που τέθηκαν κατά το σχεδιασμό και την υλοποίησή της, περιλάμβαναν μεταξύ άλλων μεγαλύτερες ταχύτητες, νέες υπηρεσίες, μικρότερη καθυστέρηση και μεγαλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων, επιτρέποντας παράλληλα ανταγωνιστικό κόστος υλοποίησης σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών τέταρτης γενιάς. Μέρος της επίτευξης των στόχων αυτών, αποδίδονται στην υιοθέτηση της OFDMA τεχνολογίας στην μεταφορά δεδομένων, στην εισαγωγή νέων τεχνολογιών όπως Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), και την υποστήριξη και προτυποποίηση ετερογενών δικτύων (π.χ. femtocells, picocells, relay nodes κ.α.) για τη μέγιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, τα παραπάνω χαρακτηριστικά εισάγουν και αρκετές τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να διευθετηθούν, με βασικότερη την παρουσία παρεμβολών. Η εναπόθεση αριθμού femtocells, που λειτουργούν στο ίδιο διαθέσιμο bandwidth με το υποκείμενο macrocell δίκτυο, οδηγεί στην ύπαρξη ισχυρών παρεμβολών με αποτέλεσμα τη δραματική μείωση απόδοσης στους χρήστες.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, δύο είναι οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται: Η διαχείριση ισχύος και η διαχείριση κατανομής συχνοτήτων, και μπορούν να εφαρμοστούν τόσο ξεχωριστά, όσο και παράλληλα. Η πρώτη μέθοδος προτιμάται σε καταστάσεις ομοζωνικής παράταξης του macrocell δικτύου και των femtocells, ενώ η δεύτερη ενδείκνυται σε καταστάσεις που εφαρμόζεται κάποιο σχέδιο κατανομής συχνοτήτων σε επίπεδο macrocell, αφήνοντας αδιάθετους υπο-φορείς (sub-carriers) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα femtocells.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής παρουσιάζονται και αναλύονται οι μέθοδοι διαχείρισης ισχύος και κατανομής συχνοτήτων, και αναπτύσσεται και προτείνεται ένα περιβάλλον προσομοίωσης που εφαρμόζει κύριες προσεγγίσεις των μεθόδων σε περιβάλλον ετερογενών LTE-A δικτύων. Συγκεκριμένα, για την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, το εργαλείο επιτρέπει τη δημιουργία δισδιάστατης τοπολογίας με παράταξη femtocells πάνω από macrocell δίκτυο σε γραφικό περιβάλλον, την εξομοίωση των συνακόλουθων φαινομένων παρεμβολών και την πρόβλεψη της απόδοσης του δικτύου μετά από την εφαρμογή διαφορετικών μοντέλων διαχείρισης ισχύος. Για την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου, το εργαλείο επιτρέπει τη προσομοίωση δικτύων macrocells συντονισμένων με Inter-Cell Interference Cancellation (ICIC), και την εφαρμογή των κυριότερων και δημοφιλέστερων σχημάτων κατανομής συχνοτήτων μεταξύ του δημιουργούμενου ετερογενούς δικτύου και την συγκριτική αξιολόγησή τους στην συνακόλουθη απόδοση του δικτύου για διαφορετικές πυκνότητες παράταξης femtocells, ως προς τη μέγιστη χωρητικότητα, την απόδοση των προβληματικών περιοχών και τη φασματική απόδοση.

EXECUTIVE SUMMARY

Long Term Evolution (LTE) technology and his enriched successor Long Term Evolution Advanced (LTE-A) was created to meet the increased needs and demands in mobile communications. At this moment, the LTE-A technology is proving to be so successful that probably it will be the first globally acceptable telecommunication standard. The objectives set in its planning and implementation include greater speeds, new services, lower latency and higher utilization of the available spectrum, while allowing competitive implementation cost compared with other fourth generation telecommunications technologies. Part of the success in achieving these objectives, is attributed to the adoption of OFDMA technology in data transfer, the introduction of multiple services such as Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), and the support and standardization of heterogeneous networks (eg. femtocells, picocells, relaying etc.) in order to increase spectral efficiency.

Despite their many advantages, such features introduce several technological challenges to be addressed, the most important of which, is the presence of interference. The deployment of a number of femtocells, which may operate in the same available bandwidth along with the underlying macrocell network, leads to strong interference effects resulting to a dramatic drop in users' performance.

To address these problems, there are two main methods that are encompassed: power management and frequency allocation management and they can be applied both separately and simultaneously. The first method is preferred in situations of co-channel operation for macrocells and femtocells, while the latter is appropriate in situations where there is a scheme of distribution of frequencies at macrocell level, leaving unallocated sub-carriers that can be used by femtocells.

In this work, we present and analyze approaches of power management and frequency allocation, and we develop and propose a simulator framework that implements several main techniques in LTE-A heterogeneous networks simulation environment. Specifically, for the implementation and evaluation of the first method, the tool allows the creation of a two dimensional topology with femtocells in a macrocell network facilitated by a graphical user interface to simulate the resulting interference phenomena and predicts the network performance after the application of the different models of power management. To implement the second method, the tool allows the simulation of ICIC-coordinated macrocells network, and the integration of the main and most popular schemes of frequency allocation between the generated heterogeneous layers. We evaluate their performance for several degrees of femtocells deployment density in terms of maximum capacity, cell-edge user performance and spectral efficiency.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσης διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους, που με τον έναν ή τον άλλο τρόπο προσέφεραν πολύτιμη αρωγή κατά την εκπόνησή της.

Πρώτο από όλους τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή Χρήστο Μπούρα που αποτέλεσε τον σύμβουλό μου κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον πεδίο. Θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση και την επιμονή του για συστηματική δουλειά.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ, κ. Ιωάννη Γαροφαλάκη και τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κωνσταντίνο Μπερμπερίδη, εξαιρετικούς καθηγητές με βαρύνουσα άποψη και κύρος, για την τιμή που μου έκαναν να αποτελέσουν μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Βασίλειο Κόκκινο και Δρ. Ανδρέα Παπαζώη, άριστους επιστήμονες και με σπουδαίο ήθος, οι οποίοι με τις πολύτιμες και ουσιαστικές τους γνώσεις και συμβουλές με καθοδήγησαν και με βοήθησαν σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας.

Τελευταία αλλά όχι έσχατα αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου που με στήριξαν με την υπομονή και την αγάπη τους, για όλα όσα μου προσέφεραν και συνεχίζουν να μου προσφέρουν.

Πάτρα 2013
Δηλές Γεώργιος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
EXECUTIVE SUMMARY	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: LTE-ADVANCED.....	19
LTE-ADVANCED	20
2.1. Εξέλιξη των κυψελωτών δικτύων	20
2.2. LTE/LTE-A στόχοι και εξέλιξη	22
2.3. LTE-A προδιαγραφές	25
2.4. LTE-A αρχιτεκτονική	27
2.4.1. Αρχιτεκτονική Συστήματος	27
2.4.2. Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων.....	30
2.5. LTE-A τεχνολογίες	31
2.5.1. Έκδοση 8	32
2.5.2. Έκδοση 9	35
2.5.3. Έκδοση 10	36
2.6. Διαδικασία προτυποποίησης LTE-A	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: FEMTOCELLS	41
FEMTOCELLS	42
3.1. Εισαγωγή	42
3.2. Λειτουργικότητα	43
3.3. Πλεονεκτήματα.....	47
3.4. Αρχιτεκτονική LTE-A femtocells	50
3.5. Προτυποποίηση LTE-A Femtocells.....	53
3.6. Αυτο-οργανώσιμα δίκτυα	55
3.7. Τεχνικά ζητήματα	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ.....	59
ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ	60
4.1. Ομοστροφματικές παρεμβολές στο femtocell στρώμα.....	60

4.2.	Διαστρωματικές παρεμβολές	64
4.3.	Ομοστρωματικές παρεμβολές στο <i>macrocell</i> στρώμα	68
4.4.	Ανίχνευση και ακύρωση παρεμβολών	69
4.4.1.	Ορισμός	69
4.4.2.	Μέθοδοι ανίχνευσης παρεμβολών	70
4.5.	Τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών	71
4.5.1.	Διαμερισμός συχνότητας	71
4.5.2.	Έλεγχος ισχύος	75
4.5.3.	Άλλες μέθοδοι	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	81
	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	87
	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	88
6.1.	Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη	89
6.2.	Αρχιτεκτονική	92
6.3.	Μοντέλο ανάλυσης	93
6.4.	Δυνατότητες	95
6.5.	Παραμετροποίηση	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	101
	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	102
7.1.	Έλεγχος ισχύος	102
7.2.	Καταμερισμός φάσματος	107
7.3.	Αξιολόγηση τεχνικών	112
7.3.1.	Αλγόριθμοι ισχύος	112
7.3.2.	Αλγόριθμοι ισχύος και καταμερισμού φάσματος – Απόδοση μέσου χρήση	113
7.3.1.	Αλγόριθμοι ισχύος και καταμερισμού φάσματος – Απόδοση ακριτικού χρήση	117
7.3.2.	Αλγόριθμος καταμερισμού φάσματος μεταξύ <i>femto BSs</i>	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	123
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	124
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9:	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	127
	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	128
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ		131
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		135
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	136
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ		141

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ	142
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΑΚΡΩΝΥΜΑ	147
ΑΚΡΩΝΥΜΑ	148

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Στάδια εξέλιξης των εκδόσεων LTE και το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του LTE-A.	24
Εικόνα 2. Η αρχιτεκτονική του EPS. Πηγή: <i>www.ieee-globecom.org</i>	27
Εικόνα 3. Οι λειτουργικές αρμοδιότητες του E-UTRAN και του EPC.	28
Εικόνα 4. Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN. Πηγή: <i>www.ieee-globecom.org</i>	29
Εικόνα 5. Η User Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων.	31
Εικόνα 6. Η Control Plane στοιβά πρωτοκόλλων.	31
Εικόνα 7. Ο διαχωρισμός του φάσματος σε φορείς βάση του OFDMA (downlink) και SC-FDMA (uplink).	32
Εικόνα 8. Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE/LTE-A.	38
Εικόνα 9. Η οργανωτική δομή του οργανισμού προτυποποίησης 3GPP.	40
Εικόνα 10. Τα femtocells συνδέονται με το δίκτυο κορμού (CN) διαμέσου της backhaul σύνδεσης του χρήστη.	44
Εικόνα 11. Ανάπτυξη της αγοράς των femtocells τα τελευταία 5 έτη.	47
Εικόνα 12. Διείσδυση της τεχνολογίας femtocells ανά τον κόσμο.	48
Εικόνα 13. Η ενσωμάτωση των femtocells στην αρχιτεκτονική του δικτύου.	50
Εικόνα 14. Διάγραμμα ενός LTE δικτύου που περιλαμβάνει ένα δίκτυο femtocell.	51
Εικόνα 15. Λογικό μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου femtocells (Πηγή : <i>3rd Generation Partnership Project</i>	52
Εικόνα 16. Η στοιβά πρωτοκόλλου ελέγχου που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό δικτύωσης των LTE femtocells.	53
Εικόνα 17. Ο χρήστης 1 δεν μπορεί να γνωρίζει ποιοι υπο-φορείς χρησιμοποιούνται ήδη, αν δεν ενημερωθεί από το femtocell.	63
Εικόνα 18. Χωρίς την σωστή κατανομή των πόρων στο πεδίο της συχνότητας, μπορεί να προκύψουν ισχυρές παρεμβολές.	64
Εικόνα 19. Σενάρια διαστρωματικών παρεμβολών.	67
Εικόνα 20. Η κύρια πηγή των παρεμβολών στο downlink είναι τα femtocells προς τους χρήστες macrocell.	68
Εικόνα 21. Τα σημαντικότερα σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.	72
Εικόνα 22. Τα femtocells χρησιμοποιούν το ανεκμετάλλευτο φάσμα στο σημείο εγκατάστασής τους, αν ο διαμερισμός έχει γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Πηγή: 3GPP.	74
Εικόνα 23. Η ανίχνευση των συνθηκών μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε λανθασμένα συμπεράσματα. Είτε στην αναίτια αύξηση της ισχύς του femtocell (αριστερά), είτε στην μείωσή της με αρνητικές επιπτώσεις στην εμβέλεια κάλυψης. Πηγή: 3GPP	76
Εικόνα 24. Παράδειγμα εξαγόμενων αποτελεσμάτων στον LTE εξομοιωτή του πανεπιστημίου της Βιέννης.	82
Εικόνα 25. Παράδειγμα χρήσης του εξομοιωτή LTE-EPC.	83
Εικόνα 26. Παράδειγμα χρήσης του εμπορικού εξομοιωτή iBuildNet®.	83
Εικόνα 27. Δομή του σχήματος κατανομής συχνοτήτων βασισμένου στο FFR και το διαχωρισμό της κυψέλης σε τομείς.	85
Εικόνα 28. Η γραφική διασύνδεση χρήστη του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο στάδιο των ρυθμίσεων.	90
Εικόνα 29. Η γραφική διασύνδεση χρήστη του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο στάδιο της απεικόνισης της επίδοσης του δικτύου.	91

Εικόνα 30. Η δομική αρχιτεκτονική του εξομοιωτή.....	92
Εικόνα 31. Γραφική απεικόνιση του ρυθμού δεδομένων για την περίπτωση σταθερών επιπέδων ισχύος μετάδοσης των femtocells.	103
Εικόνα 32. Χάρτης του ρυθμού δεδομένων κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.....	104
Εικόνα 33. Γραφική απεικόνιση του ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε εσωτερικό περιβάλλον α) για σταθερά επίπεδα ισχύος μετάδοσης των femtocells β) κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.....	105
Εικόνα 34. Διαδοχική προσαρμογή των επιπέδων ισχύος των femtocells, κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου σταθερού SINR.	106
Εικόνα 35. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε co-channel παράταξη με τα femtocells και απουσία σχήματος ελέγχου ισχύος.	107
Εικόνα 36. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε co-channel παράταξη με τα femtocells και IFR στο macrocell στρώμα.	108
Εικόνα 37. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε FFR περιβάλλον και femtocells σε διαφορετικές συχνότητες.	109
Εικόνα 38. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε SFR περιβάλλον και femtocells σε διαφορετικές συχνότητες.	110
Εικόνα 39. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε co-channel παράταξη με τα femtocells και εφαρμογή ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.....	110
Εικόνα 40. Χάρτης ρυθμού δεδομένων για έναν macro χρήστη σε σενάριο εφαρμογής ελέγχου ισχύος α) πριν και β) μετά την εφαρμογή σχήματος καταμερισμού φάσματος μεταξύ γειτονικών femtocells.....	111
Εικόνα 41. Σύγκριση των σχημάτων ελέγχου ισχύος, για διαφορετική απόσταση ενός macro χρήστη εντός της εμβέλειας femto BS.	112
Εικόνα 42. Μέση ισχύς μετάδοσης 10 femtocells τυχαία εγκατεστημένων εντός του macrocell.	113
Εικόνα 43. Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για έναν macro χρήστη.	114
Εικόνα 44. Εμπειρική CDF ρυθμού δεδομένων για κάθε σχήμα και διαφορετικές πυκνότητες παράταξης femtocells α) 5, β) 20 και γ) 40 FBS/κελί).....	117
Εικόνα 45. Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για έναν macro χρήστη στα όρια της κυψέλης.	118
Εικόνα 46. Εμπειρική CDF του ρυθμού δεδομένων για macro χρήστες στα όρια της κυψέλης για πυκνότητα femtocells α) 5, β) 20 και γ) 40 ανά κυψέλη.	120
Εικόνα 47. Απόδοση ενός μέσου και ενός ακριτικού macro χρήστη, πριν και μετά την εφαρμογή διαμέρισης συχνότητας μεταξύ γειτονικών femto BS.....	121

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Κύριες IMT-Advanced προδιαγραφές	25
Πίνακας 2. Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση κατά περίπτωση.....	26
Πίνακας 3. Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση για χρήστες στα όρια της κυψέλης.	26
Πίνακας 4. Ο αριθμός των διαθέσιμων resource blocks για κάθε εύρος φάσματος.....	32
Πίνακας 5. Κύριες διαφορές μεταξύ των picocells και femtocells.	46
Πίνακας 6. Πιθανές πηγές παρεμβολών κατά περίπτωση.	62
Πίνακας 7. Οι δυνατότητες παραμετροποίησης του εξομοιωτή και οι προεπιλεγμένες τιμές.	97
Πίνακας 8. Ρυθμίσεις τοπολογίας και μετάδοσης.....	102
Πίνακας 9. Ρυθμίσεις τοπολογίας και μετάδοσης.....	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας των συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών θεωρείται από τους πλέον δυναμικούς ερευνητικά τομείς ενώ η αντίστοιχη βιομηχανία αναπτύσσεται παγκοσμίως με ταχύτατους ρυθμούς. Έχοντας συναντήσει γόνιμο έδαφος στην αγορά, που δείχνει να απορροφά βιαστικά κάθε καινούρια βελτίωση στις υπηρεσίες κινητής, ως αποτέλεσμα ερευνητικών καινοτομιών, η εξέλιξη στο πεδίο αυτό είναι αλματώδης. Μόλις πριν από λίγα χρόνια, τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η χρήση ασύρματης επικοινωνίας στις περισσότερες χώρες θεωρούνταν προνόμιο για λίγους. Η έκρηξη που ακολούθησε εξέπληξε πολλούς, ακόμα και τις μεγαλύτερες εταιρείες τηλεπικοινωνιών που είδαν τις προβλέψεις τους για την εξάπλωση των υπηρεσιών τους να πέφτουν εξαιρετικά έξω.

Από τότε τα πράγματα έχουν αλλάξει, και οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν ταυτιστεί με την καθημερινότητά μας. Οι χρήστες κινητής ανά τον κόσμο φτάνουν τις εκατοντάδες εκατομμύρια και οι συνδρομές ανέρχονται σε μερικά δισεκατομμύρια [1]. Η εξοικείωση με τις νέες τεχνολογίες φτάνει στο σημείο να τείνει να εξαλείψει τις διακρίσεις στις δυνατότητες μεταξύ ασύρματων και ενσύρματων τεχνολογιών. Βασισμένη στο σύνθημα «Επικοινωνία οπουδήποτε, οποτεδήποτε και με οποιονδήποτε», εξασφάλισε την άμεση υιοθέτηση της αγοράς και διείσδυσε σε όλους τους τομείς της ζωής μας. Κάποιος μπορεί με ασφάλεια να πει πως η ασύρματη επικοινωνία αφού διαπέρασε την καθημερινότητά μας, έγινε αναπόσπαστο πλέον μέρος τόσο της ζωής των πολιτών, όσο και της λειτουργίας του κόσμου γενικότερα.

Αν και θεωρείται πρόσφατη η διείσδυση της κινητής στη ζωή μας, η πρώτη εμπορική υπηρεσία τηλεφωνίας λειτούργησε επισήμως το 1946 από την εταιρεία AT&T. Η ίδια εταιρεία εισήγαγε την ιδέα της κυψέλης διαμέσου της οποίας γινόταν εφικτή η επαναχρησιμοποίηση των ραδιοσυχνοτήτων. Η ιδέα αυτή κυριάρχησε σε όλα τα ακόλουθα δίκτυα. Το κύριο χαρακτηριστικό της πρώτης αυτής γενιάς ήταν η χρήση αναλογικών συστημάτων, που περιόριζε τις παρεχόμενες υπηρεσίες σε απλές υπηρεσίες σχετικές αποκλειστικά με μετάδοση φωνής.

Η έλευση των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών σηματοδότησε τη δεύτερη γενιά των δικτύων κινητής και επέτρεψε την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων, την παροχή μεγαλύτερης αξιοπιστίας και ποιότητας και τη δυνατότητα παροχής ευρύτερων υπηρεσιών. Στην Ευρώπη, αναπτύχθηκε το έργο Global System for Mobile communications (GSM), με στόχο την ανάπτυξη ενός πανευρωπαϊκού δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Αν και επιτυχημένα, τα συστήματα αυτά είχαν σχεδιαστεί για μετάδοση φωνής και αδυνατούσαν να καλύψουν τις ανάγκες για υπηρεσίες που απαιτούσαν ευρύ φάσμα. Η τεχνολογία βασισμένη στη μεταγωγή πακέτου που εισήχθη στο σύστημα GSM για το σκοπό αυτό ονομάστηκε General Packet Radio Services (GPRS), και χαρακτηρίστηκε 2.5G. Η επιτυχία των συστημάτων αποτέλεσε κύριο γνώμονα στη σχεδίαση και δημιουργία των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς.

Η πρώτη επίσημη έκδοση του προτύπου τρίτης γενιάς από το Third Generation Partnership Project (3GPP), κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT-2000 της International Telecommunication Union (ITU) και καθόριζε μεταξύ άλλων, δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος φωνής και βίντεο, όπως και υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων πάνω από δίκτυα μεταγωγής

πακέτου. Το πρότυπο 3G συνέχισε να εξελίσσεται προσφέροντας σημαντική αύξηση στις προσφερόμενες ταχύτητες.

Τον Μάρτιο του 2008, ο τομέας τηλεπικοινωνιών του ITU (ITU-R), έθεσε τις προδιαγραφές που θα έπρεπε να πληρούν τα αναπτυσσόμενα πρότυπα ώστε να θεωρηθούν 4^{ης} γενιάς (4G ή 4th generation). Το σύνολο των προδιαγραφών ονομάστηκε International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced), και περιείχε μεταξύ άλλων κριτήρια για την ταχύτητα, την καθυστέρηση και την αποδοτικότητα φάσματος. Συγκεκριμένα όριζε τα νέα συστήματα να είναι επί του συνόλου τους δίκτυα μεταγωγής IP (Internet Protocol), παρέχοντας διασυνδεσιμότητα με τα υπάρχοντα ασύρματα πρότυπα. Μεταξύ των διαθέσιμων υπηρεσιών και των δυνατοτήτων του δικτύου, περιλαμβάνονται ultra-broadband πρόσβαση, διαδικτυακά παιχνίδια, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, βίντεο τηλεδιασκέψεις και 3D βίντεο.

Τα πλέον κυρίαρχα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που μπόρεσαν να χαρακτηριστούν 4^{ης} γενιάς είναι το Mobile WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) του WiMAX Forum και το Long Term Evolution Advanced (LTE-A, εξέλιξη του LTE) από το 3GPP, οργανισμό υπεύθυνο και για τα GSM, GPRS και Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE). Και τα δύο συστήματα αυτά, για να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις IMT-A, βασίστηκαν στην τεχνολογία Orthogonal frequency-division Multiple Access (OFDMA) για την διαχείριση των καναλιών/φορέων. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη διαδικασία Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM), που διαχωρίζει το διαθέσιμο φάσμα σε έναν αριθμό παράλληλων, ορθογώνιων υπο-φορέων (sub-carriers), επιτρέποντας τη δυναμική ανάθεσή τους σε διαφορετικούς χρήστες και διαφορετικές χρονικές στιγμές, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και μεγάλη φασματική απόδοση. Κύριο γνώρισμα της τεχνολογίας είναι η ορθογωνιότητα των υπο-φορέων και η μεγάλη ευελιξία στη χρήση τους, γεγονός που απέφερε μεγάλη ευρωστία στο σύστημα απέναντι σε φαινόμενα παρεμβολών εντός της κυψέλης. Η δυνατότητα ευέλικτης κατανομής των ορθογώνιων υπο-φορέων σε χρήστες οδηγεί στην εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών του ίδιου δικτύου που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη (intra-cell παρεμβολές) [2]. Από την άλλη, η επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας από γειτονικές κυψέλες, είναι δυνατόν να οδηγήσει στην χρήση ίδιων φορέων από κοντινούς χρήστες σε γειτονικά κελιά, με αποτέλεσμα την εμφάνιση παρεμβολών (inter-cell παρεμβολές) και μείωση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Αν και η χρήση τεχνολογιών όπως OFDMA, και Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO) βελτίωσαν κατακόρυφα την φασματική απόδοση του δικτύου, επιδιώχθηκε η περαιτέρω και πανταχόθεν αξιοποίηση του ακριβού φάσματος συχνοτήτων. Από την άλλη, η δομή της κυψελωτής δομής είναι εν γένει ανισομερής και οι εκάστοτε συνθήκες δημιουργούν περιοχές με διαφορετικά μεταξύ τους επίπεδα πρόσβασης υπηρεσιών. Θύματα τέτοιων καταστάσεων αποτελούν περιοχές μακρινές από το σταθμό βάσης με χαμηλό σήμα είτε λόγω της απόστασής τους από το σταθμό βάσης, είτε λόγω της γενικότερης διαμόρφωσης της περιοχής (εσωτερικά κτίρια, μετρό κ.α.). Η αντιμετώπιση των μεμονωμένων αυτών περιστατικών μέσω macrocell κάλυψης αποδεικνύεται εξαιρετικά αντιοικονομική. Αντίθετα η χρήση μικρής εμβέλειας, οικονομικών, και χαμηλής κατανάλωσης σταθμών βάσης που εγκαθίστανται από τους χρήστες, αποτελούν την καλύτερη λύση. Οι σταθμοί αυτοί ονομάζονται femtocells, και αυξάνουν το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης τοπικά, ενώ ανακουφίζουν το φορτίο του γενικότερου δικτύου, χρησιμοποιώντας την ενσύρματη σύνδεση του χρήστη στο διαδίκτυο για τη μεταφορά των

δεδομένων. Τα femtocells λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων τους, παρουσιάζουν τεράστια εξάπλωση τα τελευταία δύο χρόνια, με τις περισσότερες χώρες να έχουν προβεί στην εμπορική διάθεσή τους [3]. Λαμβάνοντας την εξάπλωση αυτή υπόψη, το LTE-Advanced, έθεσε συγκεκριμένα κριτήρια εφαρμογής και διασύνδεσης των femtocells και βελτίωσε την υποστήριξη ετερογενών δικτύων στα πλαίσιά του, προς την κατεύθυνση αυτή.

Αν και ο βαθμός διείσδυσης των femtocells στην αγορά συνεχώς αυξάνει, δε σημαίνει ότι μια σειρά προβλημάτων και τεχνικών προκλήσεων δε πρέπει να ξεπεραστούν. Το σημαντικότερο, ίσως πρόβλημα που ανακύπτει είναι η ύπαρξη παρεμβολών εξαιτίας της χρήσης ίδιων ή γειτονικών συχνοτήτων. Η εναπόθεση των femtocells σε περιβάλλον macrocell, δημιουργεί ένα ετερογενές δίκτυο δύο επιπέδων/στρωμάτων με χρήστες δύο ειδών, τους χρήστες που εξυπηρετούνται από το macrocell σταθμό βάσης (macro Base Station - MBS) και τους χρήστες που εξυπηρετούνται από το femtocell επίπεδο και τους femto σταθμούς βάσης (femto Base Station - FBS). Καθώς το διαθέσιμο φάσμα είναι ακριβό, κατά τη συνύπαρξη των δύο στρωμάτων, μπορεί να επιτραπεί στους χρήστες των δύο επιπέδων να έχουν πρόσβαση στις ίδιες συχνότητες. Το γεγονός αυτό ακυρώνει την ευρωστία της τεχνολογίας OFDMA απέναντι σε παρεμβολές, με τον κίνδυνο υψηλών παρεμβολών να είναι υψηλός, ειδικά όσο η χωρητικότητα του δικτύου φθάνει στα όριά της.

Συνολικά, τα φαινόμενα παρεμβολών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Τις ομοστρωματικές (co-layer) και τις διαστρωματικές (cross-layer) παρεμβολές. Οι πρώτες αφορούν τις παρεμβολές που εμφανίζονται μεταξύ χρηστών που ανήκουν σε διαφορετικές κυψέλες ίδιου επιπέδου και γειτνιάζουν. Σενάρια τέτοιων παρεμβολών είναι παρεμβολές σε ένα χρήστη femtocell από ένα κοντινό femto BS, και παρεμβολές σε χρήστη macrocell από γειτονικό macro BS. Η δεύτερη κατηγορία προκύπτει με την εμφάνιση των ετερογενών δικτύων όπως προαναφέραμε, όταν οι σταθμοί βάσης femtocell και macrocell έχουν πρόσβαση στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Παράδειγμα τέτοιων παρεμβολών είναι οι παρεμβολές που υφίσταται το τερματικό (user equipment-UE) ενός macro χρήστη όταν βρεθεί εντός της εμβέλειας ενός femtocell. Κάθε κατηγορία περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό διαφορετικών προσεγγίσεων αντιμετώπισης, διαφορετικής καταλληλότητας και επιδόσεων.

Οι παρεμβολές μπορούν κάτω από περιστάσεις να δημιουργήσουν μεγάλη πτώση στην ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας. Για την αντιμετώπισή τους, έχουν προταθεί δύο κύριες μέθοδοι: η κατανομή συχνοτήτων και η διαχείριση ισχύος [4]. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο αποκλειστικά όσο και συνδυασμένα, και η ενσωμάτωση και η επίπτωσή τους στη λειτουργία του δικτύου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα εργαλείο προσομοίωσης LTE-A συστημάτων στα οποία διατίθεται η δυνατότητα εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων αποφυγής ομοστρωματικών και διαστρωματικών παρεμβολών σε καθορισμένες από τον χρήστη τοπολογίες. Το εργαλείο επιτρέπει την επιλογή αλλά και την αξιολόγησή τους όσο αφορά την συνακόλουθη επίδοση του δικτύου. Σκοπός της εργασίας ήταν τόσο η ανάλυση και η παρατήρηση της συμπεριφοράς των μεθόδων αποφυγής φαινομένων παρεμβολής σε LTE-A κυψελωτά δίκτυα, όσο και η διάθεση στην ακαδημαϊκή κοινότητα του εργαλείου προσομοίωσης, πλήρως παραμετροποιήσιμου και ικανού να αναπαράγει αποτελέσματα για κάθε προσωπική απαίτηση και χρήση. Το εργαλείο διατίθεται ελεύθερα μέσω του [5].

Η εργασία ξεκινάει με την αναλυτική παρουσίαση του προτύπου LTE-Advanced στο δεύτερο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν κατά την σχεδίασή του, τα χαρακτηριστικά του και οι επιδόσεις του. Περιγράφονται επίσης, η αρχιτεκτονική του δικτύου και οι τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται και επιτρέπουν την επίτευξη των απαιτητικών σχεδιαστικών στόχων. Τέλος αναφέρονται οι υπηρεσίες που εισήγαγε κάθε καινούρια έκδοση του προτύπου σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις και περιγράφεται η διαδικασία προτυποποίησής του.

Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στα femtocells. Αρχικά περιγράφεται η λειτουργία τους, η αρχιτεκτονική τους και η διασύνδεσή τους με το υπόλοιπο δίκτυο. Στη συνέχεια δίνονται τα εγνωσμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που εμφανίζουν, και τα επακόλουθα τεχνικά ζητήματα που εμφανίζονται στο δημιουργούμενο ετερογενές δίκτυο που χρήζουν επίλυσης ή βελτίωσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξηγείται το φαινόμενο των παρεμβολών και οι μέθοδοι αντιμετώπισής του. Αναλύονται οι αιτίες του φαινομένου, και περιγράφονται οι διαφορετικές προσεγγίσεις των παραπάνω μεθόδων, οι δημοφιλέστερες των οποίων έχουν υλοποιηθεί στα πλαίσια των εργαλείων προσομοίωσης.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση του εργαλείου, της ανάπτυξής του και των δυνατοτήτων που παρέχει. Περιγράφεται το μοντέλο στο οποίο βασίζεται, οι δυνατότητές που παρέχει, οι δυνατότητες παραμετροποίησής του και η διασύνδεση που προσφέρεται με το χρήστη.

Στο έκτο κεφάλαιο απεικονίζονται και αναλύονται τα ευρήματα από την εφαρμογή του εξομοιωτή σε ενδεικτικές αλλά χαρακτηριστικές συνθήκες. Βάσει αποτελεσμάτων αξιολογείται ξεχωριστά αλλά και συγκριτικά κάθε μέθοδος που ενσωματώνουν τα εργαλεία. Αναλύονται οι συμπεριφορές κάθε προσέγγισης, η καταλληλότητα κάθε μεθόδου και κατηγοριοποιούμε όλα τα πιθανά σενάρια με βάση τη βέλτιστη λύση.

Το έβδομο κεφάλαιο συγκεντρώνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας.

Τέλος, το όγδοο κεφάλαιο προτείνει διάφορα ανοιχτά και νέα θέματα πάνω στο πεδίο αυτό, που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας και επέκτασης της παρούσης εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: LTE-ADVANCED

LTE-ADVANCED

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η τεχνολογία LTE-A, για την καλύτερη κατανόηση των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια της εργασίας. Μετά την ιστορική ανασκόπηση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, παρουσιάζονται οι ανάγκες που αποτέλεσαν τη βάση στην σχεδίαση του συστήματος τέταρτης γενιάς, η αρχιτεκτονική και οι επίσημες προδιαγραφές του συστήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται το LTE-A για την επίτευξη των προδιαγραφών αυτών.

2.1. Εξέλιξη των κυψελωτών δικτύων

Η πρόοδος των δικτύων κινητής, αν και συντελέστηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα περιελάμβανε πολλά και σημαντικά βήματα εξέλιξης που οδηγούσαν σε νέες ή βελτιωμένες δυνατότητες της ασύρματης επικοινωνίας. Κάνοντας μια ιστορική αναδρομή, μπορούμε να πούμε πως αν και εμπορικά η αφετηρία θεωρείται η δεκαετία του '90, τεχνολογικά μπορούμε να θεωρήσουμε πως η απαρχή των ασύρματων τεχνολογιών έγινε το 1895. Τη χρονιά αυτή, ο Marconi ξεκινούσε τα πειράματά του στη σοφίτα του σπιτιού του, καταφέροντας την πρώτη ασύρματη μετάδοση σε απόσταση μεγαλύτερη των 1.500 μέτρων. Με τη δημοσίευση και την εξασφάλιση χορηγιών σε ερευνητές τα επόμενα χρόνια, ακολούθησε η μετάδοση σε ολόένα και μεγαλύτερες αποστάσεις, με αξιοσημείωτα επιτεύγματα την αμφίδρομη υπερατλαντική μετάδοση το 1902, αλλά και την μετάδοση broadcast το 1909 από τον Charles David Herrold.

Η δραστηριοποίηση πολλών εταιρειών στο νεοσύστατο χώρο της ασύρματης επικοινωνίας και η προσπάθεια εμπορικής εκμετάλλευσής του, οδήγησε τελικά στην ανάπτυξη των Mobile Radio Telephone συστημάτων, που θεωρούνται τα πρώτα δημόσια τηλεφωνικά συστήματα που ήταν ανοιχτά, εμπορικού χαρακτήρα, και με το δικό τους τηλεφωνικό αριθμό. Τέτοια συστήματα όπως το Mobile Telephone Service το 1946 των Bell System, και μετέπειτα το Improved Mobile Telephone Service το 1964, θεωρούνται ως οι πρόγονοι των μετέπειτα κυψελωτών συστημάτων, για αυτό και αναφέρονται συχνά ως 0G (zero generation) συστήματα. Αν και η χρήση τους ίσχυε για μεγάλη περίοδο, μέχρι την άφιξη της πρώτης γενιάς συστημάτων τη δεκαετία του '80, ποτέ δεν μπόρεσαν να εξαπλωθούν εξαιτίας της ακριβής απαιτούμενης τεχνολογίας υλοποίησης την εποχή εκείνη και της μη πρακτικής εφαρμογής τους (ογκώδεις πομποδέκτες, μη αποδοτική χρήση διαθέσιμου φάσματος κλπ).

Η πρώτη γενιά κυψελωτών συστημάτων ή αλλιώς 1G (first generation) ορίζεται από την εφαρμογή της κυψελωτής δομής το 1980. Ο διαχωρισμός του δικτύου σε κυψέλες, προκάλεσε ραγδαία εξέλιξη στις διαθέσιμες υπηρεσίες αυξάνοντας κατακόρυφα την απόδοση του δικτύου. Τα συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν αναλογική σηματοδότηση για τη διαμόρφωση της φωνής, αν και η επικοινωνία των σταθμών με το υπόλοιπο τηλεφωνικό σύστημα γινόταν ψηφιακά. Από τα πρώτα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι το Nordic Mobile Telephone (NMT) το 1979 στη Σκανδιναβία, όπως και το Nippon Telegraph and Telephone (NTT) την ίδια εποχή στην Ιαπωνία. Οι ταχύτητες στο 1G κυμαίνονταν μεταξύ 2.9KBytes/s (28k modem) και 5.6KBytes/s (56k modem). Αν και η πρώτη γενιά έφερε επανάσταση στο πεδίο της ασύρματης επικοινωνίας,

σύντομα έγινε φανερό πως η χρήση αναλογικών σημάτων περιόριζε σημαντικά την ποιότητα υπηρεσιών, αφού ήταν ευάλωτα σε φαινόμενα παρεμβολών, δεν επιδέχονταν εκτενή επεξεργασία και παρουσίαζαν χαμηλή φασματική απόδοση.

Η μετατροπή σε πλήρως ψηφιακά συστήματα σήμανε τη δεύτερη γενιά (2G - second generation) κυψελωτών συστημάτων. Η δεύτερη γενιά βελτίωσε σημαντικά πολλά προβλήματα των προκατόχων του. Αύξησε την ποιότητα των υπηρεσιών και την προστασία της ιδιωτικότητας, μείωσε το κόστος αυξάνοντας τη φασματική απόδοση και εισήγαγε με την υπηρεσία Short Message Service (SMS) τις υπηρεσίες δεδομένων, με αποτέλεσμα και τη μεγάλη εξάπλωση τους στην αγορά. Μεταξύ των διάφορων προτύπων 2G, όπως τα cdmaOne (code-division multiple access One) και D-AMPS (Digital- Advanced Mobile Phone System), το πιο διαδεδομένο 2G πρότυπο αποδείχτηκε το GSM, που αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Τηλεπικοινωνιακό Συμβούλιο (ETSI - European Telecommunications Standards Institute). Το GSM δίκτυο υποστηρίζει τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης τόσο στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Division Multiple Access - FDMA), όσο και στο πεδίο του χρόνου (Time division multiple access - TDMA), ενώ λειτουργεί συνηθέστερα στις συχνότητες 900 MHz, 1800 MHz και 1900 MHz.

Μια σημαντική αναβάθμιση του GSM ήταν οι τεχνολογίες GPRS και EDGE. Το GPRS επέτρεπε την αποστολή και λήψη δεδομένων χρησιμοποιώντας τεχνολογία μεταγωγής πακέτων πάνω από το δίκτυο του GSM (το οποίο λειτουργούσε με μεταγωγή κυκλώματος). Αυτό επέτρεψε την μεταφορά δεδομένων με ταχύτητες έως και 171,2 kbps. Το EDGE αποτελεί μια εξέλιξη του GPRS, πετυχαίνοντας ταχύτητες 384Kbps ή και 768kbps. Επειδή τα GPRS και EDGE αποτέλεσαν σημαντικές βελτιώσεις της τεχνολογίας 2G, χωρίς όμως να φθάσουν τις προδιαγραφές για να θεωρηθούν τρίτης γενιάς (3G - third generation), τους δόθηκε η ονομασία 2.5G και 2.7G αντίστοιχα.

Καθώς η αύξηση στις ταχύτητες των ενσύρματων δικτύων εξοικείωσε τους χρήστες με την αποδοτική χρήση του διαδικτύου για ογκώδεις πολυμεσικές εφαρμογές, έγινε φανερό το χάσμα με τα ασύρματα δίκτυα. Ως εκείνη την εποχή, τα ασύρματα δίκτυα προσανατολιζόνταν κυρίως στη μεταφορά φωνής και όχι δεδομένων. Σε αυτήν την κατεύθυνση, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU), έθεσε συγκεκριμένα κριτήρια για την ανάπτυξη της νέας γενιάς κινητής τηλεφωνίας [6]. Τα κριτήρια αυτά ήταν αρχικά προσανατολισμένα στη μετάδοση δεδομένων, περιλαμβάνοντας μεταξύ άλλων στόχους για όρια ταχύτητας τουλάχιστον 200 kbit/s, αλλά και για μεγαλύτερη αξιοπιστία στις παρεχόμενες υπηρεσίες.

Τα αρχικά στάδια ανάπτυξης για το 3G ξεκίνησαν στις αρχές του 1990, παράλληλα με την εξάπλωση των δικτύων δεύτερης γενιάς. Πολλά έργα ανά τον κόσμο (Ευρώπη, Ιαπωνία, ΗΠΑ και Νότια Κορέα) αναζήτησαν πρότυπα τα οποία θα εξυπηρετούσαν τις αυξανόμενες ανάγκες. Κοινό στοιχείο των περισσότερων ήταν η τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (Wideband CDMA). Την εποχή εκείνη, κρίθηκε απαραίτητο να αφομοιωθεί ένα κοινό πρότυπο διεθνώς, ώστε να διευκολύνει τόσο τη δημιουργία ενιαίας αγοράς όσο και την υλοποίηση. Στο διαγωνισμό για το βέλτιστο πρότυπο, η ενοποιημένη πρόταση από Ιαπωνία και Ευρώπη προτιμήθηκε, και τέθηκε ως η επικρατέστερη τεχνολογία για τη Τρίτη γενιά. Για να διευκολυνθεί η συντονισμένη περαιτέρω προτυποποίηση του WCDMA, το έργο Third Generation Partnership Project (3GPP) δημιουργήθηκε, από οργανισμούς προτυποποίησης ανά τον κόσμο. Στόχος του έργου ήταν να αποφευχθεί η παράλληλη ανάπτυξη στις διάφορες περιοχές, υπέρ της

δημιουργίας κοινών προδιαγραφών. Στο 3GPP εκπροσωπούνται οι οργανισμοί από την Ιαπωνία, την Κίνα, την Ευρώπη, τις ΗΠΑ και την Νότια Κορέα.

Η πρώτη επίσημη έκδοση του προτύπου παρουσιάστηκε καλύπτοντας τις απαιτήσεις International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) όπως αυτές καθορίστηκαν από τον οργανισμό ITU. Μεταξύ άλλων, αυτές καθόριζαν δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος φωνής και βίντεο, όπως και υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων πάνω από δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Το πρότυπο 3G συνέχισε να εξελίσσεται με σημαντικότερη επέκταση την τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA) που προσέφερε σημαντική αύξηση στις προσφερόμενες ταχύτητες. Η τρίτη γενιά σχεδιάστηκε να υποστηρίξει πέραν της ασύρματης τηλεφωνίας, υπηρεσίες γρήγορης πρόσβασης στο διαδίκτυο, βιντεοκλήσεις και Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS), όπως mobile TV.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα 3G είναι το Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) και το Code division Multiple Access 2000 (CDMA2000). Το UMTS αντικατέστησε το GSM στην Ευρώπη, Ιαπωνία και Κίνα, και η δομή του χωρίζεται σε τρία μέρη: τον κινητό σταθμό (Mobile Station - MS), δηλαδή η συσκευή του χρήστη, το κεντρικό δίκτυο (core network) που περιέχει πύλες (gateways) για βασικές λειτουργίες, όπως διαχείριση κίνησης, πολιτική χρεώσεων, σύνδεση με άλλα δίκτυα κλπ., και το Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) που αποτελεί την τεχνολογία του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Network - RAN) και συνδέει τα προηγούμενα δύο. Το UTRAN αποτελείται από τους NodeBs, την εξέλιξη δηλαδή των σταθμών βάσης του GSM, και από τους Radio Network Controllers (RNC) που επιτελούν λειτουργίες όπως έλεγχος των NodeBs, διαχείριση συχνοτήτων κλπ. Οι NodeBs χρησιμοποιούν συνηθέστερα W-CDMA για την ασύρματη επικοινωνία, ενώ σε κάποιες χώρες χρησιμοποιείται η τεχνολογία Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA). Το CDMA2000 από την άλλη χρησιμοποιείται κυρίως στην Βόρεια Αμερική και τη Νότια Κορέα, και σχεδιάστηκε να είναι συμβατό με το 2G πρότυπο cdmaOne (ή IS-95).

Οι προδιαγραφές για την τρίτη γενιά δημιουργήθηκαν την εποχή που το διαδίκτυο δεν είχε την γιγαντιαία εξάπλωση και διείσδυση που απολαμβάνει σήμερα. Αν και τα συστήματα 3G εξελίχθηκαν και προσέφεραν ταχύτητες κατά πολύ μεγαλύτερες του κατώτερου κριτηρίου (έως και κάποια Mbits σε ευνοϊκές συνθήκες), έγινε προφανές πως οι τρέχουσες όσο και οι μελλοντικές εφαρμογές θα απαιτήσουν νέα δίκτυα, αυξημένης χωρητικότητας, επιδόσεων και υπηρεσιών. Σε αυτό το κλίμα τέθηκαν οι βάσεις για τη δημιουργία και τη σχεδίαση του δικτύου της τέταρτης γενιάς (4G – fourth generation).

2.2. LTE/LTE-A στόχοι και εξέλιξη

Όσο τα δίκτυα κινητής αποκτούσαν ολοένα και μεγαλύτερη εξάπλωση, ήταν φανερό πως η εξέλιξη των δικτύων κατευθυνόταν σαφώς στην επίτευξη ολοένα μεγαλύτερων ταχυτήτων και μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων. Ήδη, από το 2004 ξεκίνησαν διαβουλεύσεις για να θεσπιστούν οι απαιτήσεις της νέας 3GPP LTE τεχνολογίας [7]. Το LTE έθεσε βασικούς σχεδιαστικούς στόχους τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε όλη την επιφάνεια της κυψέλης, τη χαμηλή καθυστέρηση, την ελαστικότητα στη χρησιμοποίηση του φάσματος, και την φασματική απόδοση [8]. Για την επίτευξη των παραπάνω υιοθετήθηκε η τεχνολογία OFDM για το

downlink και η Discrete Fourier transform -precoded OFDM (DFT-OFDM) για το uplink. Η πρώτη επίσημη έκδοση του LTE παρουσιάστηκε το 2008 και ονομάστηκε LTE Έκδοση 8.

Την ίδια εποχή περίπου, ο τομέας ραδιοεπικοινωνιών της ITU (ITU-R) ανακοίνωσε τις απαιτήσεις IMT-Advanced, οι οποίες καθόριζαν τις ελάχιστες προδιαγραφές για τα δίκτυα 4G [5]. Οι προδιαγραφές αυτές έθεταν, μεταξύ άλλων, στόχους για τον επιτεύξιμο ρυθμό δεδομένων που απαιτούν οι σύγχρονες υπηρεσίες, την ελάχιστη καθυστέρηση για την προώθηση διαδραστικών εφαρμογών και την χωρητικότητα συνολικά του δικτύου, ώστε να καλύψει την ολοένα αυξανόμενη ανταλλαγή δεδομένων. Αυτό τροφοδότησε διεργασίες μέσα στην 3GPP για την εξέλιξη του LTE προς την κατεύθυνση αυτή.

Το LTE στην πρώτη επίσημη έκδοση του (Έκδοση 8) επιτυγχάνει θεωρητικά ταχύτητες της τάξης των 100 Mbit/s, αν και τέτοια επίπεδα αφορούν ιδανικές συνθήκες που σπάνια συναντώνται. Το κεντρικό του δίκτυο (core network ή CN), αποτελεί εξέλιξη του CN στο GPRS και ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC), ενώ η ασύρματη διασύνδεση είναι η εξέλιξη του UTRAN ή αλλιώς evolved-UTRAN (e-UTRAN). Το δίκτυο του LTE στο σύνολό του είναι αποκλειστικά δίκτυο μεταγωγής πακέτου, και υποστηρίζει Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS), καθώς και Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD) σχήματα. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι η χαμηλή καθυστέρηση, η μεγάλη φασματική ευελιξία και απόδοση, και η χρήση τεχνολογίας OFDMA στη χρήση καναλιού στο downlink και Single-carrier FDMA (SC-FDMA) στο uplink.

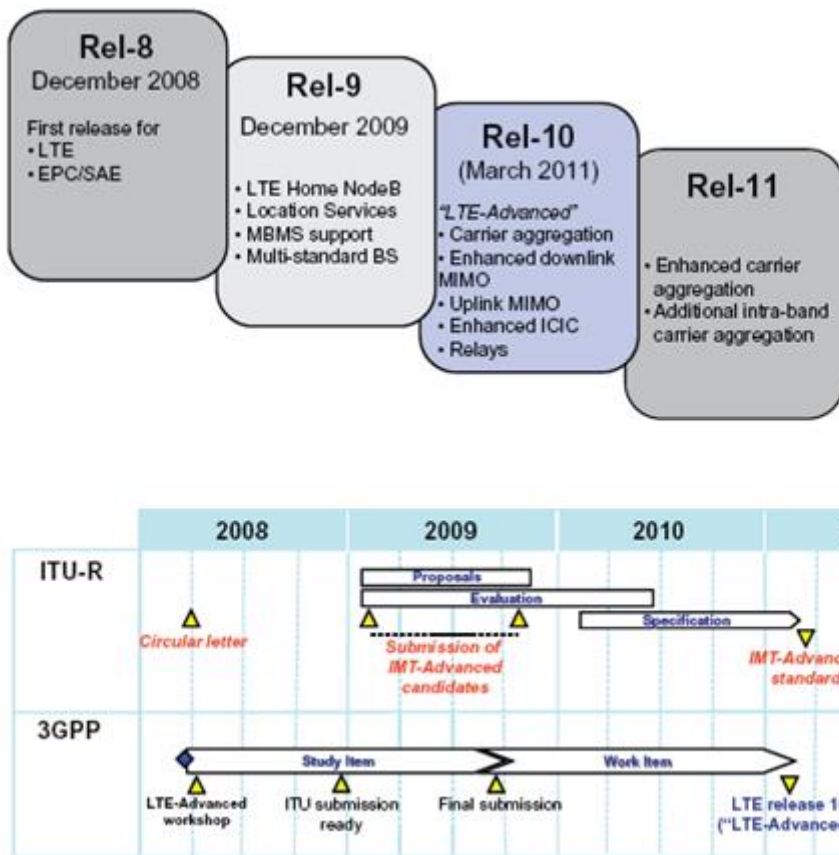
Η έκδοση που ακολούθησε (Έκδοση 9), εμπλούτισε την προϋπάρχουσα έκδοση, χωρίς τροποποιήσεις στην υποδομή και αρχιτεκτονική. Με την βελτίωση της δυνατότητας 4x4 multiple-input and multiple-output (MIMO), ήτοι πολλαπλές κεραιές παράλληλης μετάδοσης στο δέκτη και πομπό, τριπλασίασε σχεδόν τη μέγιστη ταχύτητα, αγγίζοντας τα 300 Mbit/s στο downlink, και 75 Mbit/s στο uplink. Η έκδοση αυτή, εισήγαγε ακόμα το Multicast-Broadcast Single Frequency Network (MBSFN) για υπηρεσίες όπως mobile TV, και έθεσε συγκεκριμένες προδιαγραφές για την υποστήριξη αυτό-οργανώσιμων (SON - self-organizing networks) και ετερογενών δικτύων (femtocells, picocells).

Οι εκδόσεις αυτές δεν κάλυπταν πλήρως τις προδιαγραφές του IMT-Advanced, και για αυτό αρχικά χαρακτηρίστηκαν 3.9G τεχνολογίες. Κάτω από την πίεση του μάρκετινγκ, όμως, τελικά κατάφεραν να χαρακτηριστούν και να προωθηθούν εμπορικά ως 4ης γενιάς υπηρεσίες, με τις μετέπειτα ανώτερες και επαρκείς βάσει IMT-Advanced εκδόσεις να διαφοροποιούνται με τον όρο «πραγματικό 4G» (true 4G).

Η έκδοση 10 που ακολούθησε (Έκδοση 10), κατατέθηκε για έγκριση το 2009 και οριστικοποιήθηκε το 2011, και βελτιώνει αρκετά στοιχεία των προκατόχων του. Η έκδοση αυτή επέτρεπε ανώτερες τεχνικές MIMO έως 8x8, και εισήγαγε τη δυνατότητα σύμπραξης των φορέων (carrier aggregation - CA), αυξάνοντας το μέγιστο εύρος ζώνης από 20 MHz σε 100 MHz. Με αυτό τον τρόπο, η μέγιστη ταχύτητα φθάνει και ξεπερνάει το 1 Gbit/s στο downlink και τα 500 Mbit/s στο uplink. Πέραν των παραπάνω, η νέα έκδοση εισάγει ή βελτιώνει αρκετά ακόμα χαρακτηριστικά. Τα σημαντικότερα από αυτά, είναι η δυνατότητα Coordinated Multipoint (CoMP) μετάδοσης και λήψης, η αναβάθμιση της δυνατότητας του δικτύου για συντονισμό, με στόχο την αντιμετώπιση παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα, η διασύνδεση μεταξύ των eNodeBs (evolved NodeBs), την εξέλιξη δηλαδή των NodeBs στην νέα έκδοση, η υποστήριξη relaying,

καθώς και σαφείς προδιαγραφές των HeNBs (Home eNodeBs), δηλαδή των σταθμών βάσης των femtocells για την τεχνολογία LTE-A.

Η έκδοση αυτή ήταν η πρώτη που κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT-Advanced ώστε να θεωρηθεί true 4G. Για αυτό το λόγο, η έκδοση ονομάστηκε LTE-Advanced και τέθηκε υποψήφια στην ITU-R για το παγκόσμιο πρότυπο 4G. Στην Εικόνα 1 διακρίνονται τα στάδια εξέλιξης του LTE χρονικά, μαζί με τις κυριότερες επεκτάσεις που σηματοδοτούσε κάθε έκδοση.



Εικόνα 1. Στάδια εξέλιξης των εκδόσεων LTE και το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του LTE-A.

Οι διεργασίες για την εξέλιξη και βελτίωση του LTE-Advanced φυσικά δε σταμάτησε εκεί. Αντίθετα, είναι συνεχής και υποστηρίζεται έντονα από την ισχυρή αποδοχή παγκοσμίως του LTE-Advanced ως πρότυπο 4G. Μαζί με το Mobile WiMAX του WiMAX Forum, το LTE του 3GPP (τον οργανισμό υπεύθυνο και για τα GSM, GPRS και EDGE) αποτελούν τα πλέον κυρίαρχα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που μπόρεσαν να χαρακτηριστούν 4^{ης} γενιάς. Το Mobile WiMAX προέρχεται και έχει ομοιότητες με το Wi-Fi, αλλά με τη δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων περιοχών, όπως μια ολόκληρη πόλη. Οι αρχικές εκδόσεις υποστήριζαν ταχύτητες της τάξης των 40 Mbit/s, ενώ οι πιο πρόσφατες μπορεί να φτάσουν μέχρι το 1 Gbit/s σε ιδανικές συνθήκες. Αν και το Mobile WiMAX προηγήθηκε του LTE (2006-2008), άργησε να υλοποιηθεί και έχασε σύντομα έδαφος εμπορικά, με αποτέλεσμα την προτίμηση των παρόχων ή και την μετακίνησή τους από Mobile WiMAX σε LTE. Οι ανώτερες υπηρεσίες που προσφέρει το LTE και το μικρότερο κόστος σε σχέση με τον ανταγωνισμό, το έχουν καταστήσει τον ισχυρότερο υποψήφιο 4G τεχνολογίας, και λόγω της σχεδόν καθολικής αποδοχής του, πιθανότατα το πρώτο παγκόσμια υιοθετημένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας.

2.3. LTE-A προδιαγραφές

Οι σχεδιαστικοί στόχοι που αναφέρθηκαν παραπάνω καθόρισαν την βάση της θέσπισης των ελάχιστων προδιαγραφών του LTE-A. Το 3GPP τις ανανεώνει, προσαρμόζει και ενημερώνει όποτε κάτι τέτοιο κρίνεται απαραίτητο. Οι προδιαγραφές αρχειοθετούνται στο [9] και ο Πίνακας 1 απεικονίζει τις βασικότερες εξ αυτών.

Πίνακας 1. Κύριες IMT-Advanced προδιαγραφές

Εύρος φορέα	5–20 MHz, κλιμακωτά
Ρυθμός μετάδοσης (στατικό χρήστη)	1 Gbit/s
Ρυθμός μετάδοσης (κινούμενο χρήστη)	100 Mbit/s
Φασματική απόδοση (downlink)	15 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (uplink)	6.75 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (Συστήματος)	3 bit/s/Hz/cell
Φασματική απόδοση (Συστήματος σε εσωτερικό χώρο)	2.25 bit/s/Hz/cell
Χαρακτηριστικά	<ul style="list-style-type: none"> • Αποκλειστικά-Internet Protocol (IP) δίκτυο μεταγωγής πακέτου • Διασυνδεσιμότητα με υπάρχοντα ασύρματα πρότυπα • Δυναμικός διαμοιρασμός και χρήση πόρων • Υψηλής ποιότητας υπηρεσίες για υποστήριξη πολυμέσων • Ανεπαίσθητη συνδεσιμότητα • Παγκόσμια περιαγωγή μεταξύ πολλαπλών δικτύων με απροβλημάτιστες μεταπομπές

Αν και ο πρωταρχικός στόχος ήταν να καλυφθούν οι απαιτήσεις του IMT-Advanced, σε πολλά στοιχεία οι επιδόσεις ξεπερνούν κατά πολύ τις προδιαγραφές αυτές, αποτελώντας μια μακροπρόθεσμη εγγύηση για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών στο χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, ως μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα τέθηκε να είναι τουλάχιστον το 1 Gbit/s για το downlink, ενώ για χρήστες με υψηλή κινητικότητα η ταχύτητα αναμένεται να φτάνει στα 100 Mbit/s. Ο στόχος για το uplink τέθηκε να είναι 500 Mbps και η μέγιστη ταχύτητα χρήστη που υποστηρίζεται φτάνει τα 350 km/h.

Πέρα από τη μέγιστη ταχύτητα, ορίστηκε η ελάχιστη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, που εκφράζεται μέσω του βαθμού εκμετάλλευσης του φάσματος. Η μετρική αυτή ονομάζεται spectrum efficiency ή φασματική απόδοση, ορίζεται ως bps/Hz, και τέθηκαν στόχοι τόσο για το σύνολο της κυψέλης όσο και για τις περιοχές στα όριά της. Συγκεκριμένα, θεωρώντας

ιδανικές συνθήκες και με ανάθεση όλων των διαθέσιμων πόρων στο link υπό εξέταση, το σύστημα οφείλει να υποστηρίζει 30 bps/Hz στο downlink, και 15 bps/Hz στο uplink.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει την ελάχιστη μέση φασματική απόδοση της κυψέλης που πρέπει να πληροί το σύστημα. Καθώς διαφορετικές συνθήκες (όπως εσωτερικοί χώροι ή υψηλές ταχύτητες) επιτρέπουν διαφορετικό βαθμό εκμετάλλευσης του φάσματος, το 3GPP σχεδιάζει να θέσει συγκεκριμένες τιμές και για τις υποπεριπτώσεις αυτές. Παρόλα αυτά, η συμπλήρωση του πίνακα για όλες τις περιπτώσεις είναι προς το παρόν στη διαδικασία αξιολόγησης, και θεωρείται μικρής προτεραιότητας έργο [4].

Πίνακας 2. Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση κατά περίπτωση.

Radio env.		Case 1	Micro	Indoor	Rural/ High speed
Ant. Config		[bps/Hz/cell]			
UL	1x2	1.2	/	/	/
	2x4	2.0			
DL	2x2	2.4	/	/	/
	4x2	2.6			
	4x4	3.7			

Όπως ορίστηκε η μέγιστη απόδοση που μπορεί να φθάσει ένας χρήστης, εξίσου σημαντική κρίθηκε και η προστασία των χρηστών που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης, δηλαδή η θέσπιση ελάχιστης απόδοσης. Αυτό γίνεται θέτοντας ελάχιστη τιμή στο σημείο 5% της CDF του ρυθμού δεδομένων κανονικοποιημένο ως προς το σύνολο του φάσματος που χρησιμοποιεί η κυψέλη. Η ελάχιστη τιμή εξαρτάται προφανώς και από τους πόρους που είναι διαθέσιμοι εκείνη τη στιγμή. Ο Πίνακας 3 περιλαμβάνει τις καθορισμένες τιμές. Η συμπλήρωση του πίνακα για όλες τις υποπεριπτώσεις είναι σε διαδικασία αξιολόγησης, αλλά όπως και με τη γενική περίπτωση, θεωρείται μικρής προτεραιότητας έργο.

Πίνακας 3. Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση για χρήστες στα όρια της κυψέλης.

Radio env.		Case 1	Micro	Indoor	Rural/ High speed
Ant. Config		[bps/Hz/cell/user*]			
UL	1x2	0.04	/	/	/
	2x4	0.07			
DL	2x2	0.07	/	/	/
	4x2	0.09			
	4x4	0.12			

* θεωρώντας 10 χρήστες ομοιόμορφα-τυχαία καταναμημένους στο κελί

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε και στη μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση ώστε να διευκολυνθούν διαδραστικές εφαρμογές και άλλες υπηρεσίες για τις οποίες η καθυστέρηση είναι κρίσιμης σημασίας. Συγκεκριμένα, για μετάβαση από Idle mode σε Connected mode η μέγιστη καθυστέρηση ορίστηκε στα 50 ms, ενώ αντίστοιχα για μετάβαση από dormant state σε active ορίστηκε σε 10 ms.

Οι απαιτήσεις για κάλυψη δικτύου, συγχρονισμό δικτύου καθώς και διαχείριση των πόρων συχνοτήτων ακολουθούν τις απαιτήσεις του LTE (Έκδοση 8). Έμφαση δόθηκε και στη συμβατότητα των τερματικών, αφού κρίθηκε απαραίτητο ένα UE έκδοσης 8 ή έκδοσης 10 να λειτουργεί απροβλημάτιστα και ανεξάρτητα από το αν το περιβάλλον είναι LTE ή LTE-Advanced.

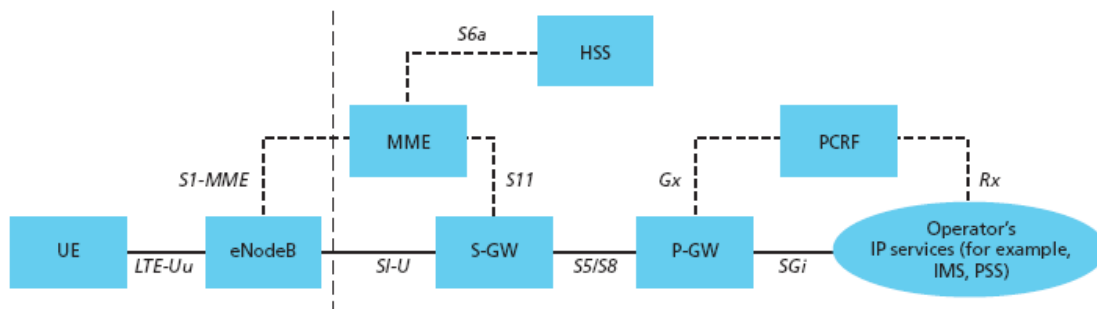
Το ίδιο σημαντικό είναι και η αρμονική συνύπαρξη μεταξύ των συστημάτων, δηλαδή η λειτουργία LTE και LTE-Advanced στο ίδιο φάσμα, όπως και η ύπαρξη συστημάτων GSM EDGE Radio Access Network (GERAN)/UTRA/E-UTRA σε γειτονικά κανάλια. Η ευλυγισία χρήσης φάσματος του LTE ισχύει και για το LTE-A με την προσθήκη της δυνατότητας χρήσης φάσματος μεγαλύτερου των 20MHz μέσω της πρόσθεσης φορέων (carrier aggregation). Το μέγιστο φάσμα που μπορεί να ανατεθεί σε έναν μοναδικό χρήστη κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται πλέον 100 MHz.

2.4. LTE-A αρχιτεκτονική

2.4.1. Αρχιτεκτονική Συστήματος

Σε αντίθεση με τα δίκτυα βασισμένα στο μοντέλο μεταγωγής κυκλώματος, το LTE σχεδιάστηκε να υποστηρίζει αποκλειστικά υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Κύρια μέριμνα είναι να παρέχει στο χρήστη αδιάλειπτη σύνδεση Internet Protocol (IP), μεταξύ του χρήστη και του δικτύου πακέτου δεδομένων (Packet Data Network ή PDN).

Παράλληλα με την ανάπτυξη του εξελιγμένου δικτύου ασύρματης πρόσβασης UMTS για το LTE μέσω του E-UTRAN, πραγματοποιήθηκαν ανεξάρτητες διεργασίες με στόχο την εξέλιξη και του κεντρικού δικτύου (CN), έργο που πήρε την ονομασία System Architecture Evolution (SAE). Η εξέλιξη του CN οδήγησε στη δημιουργία του Evolved Packet Core (EPC) network [10]. Ο συνδυασμός LTE και SAE ονομάζεται Evolved Packet System (EPS).



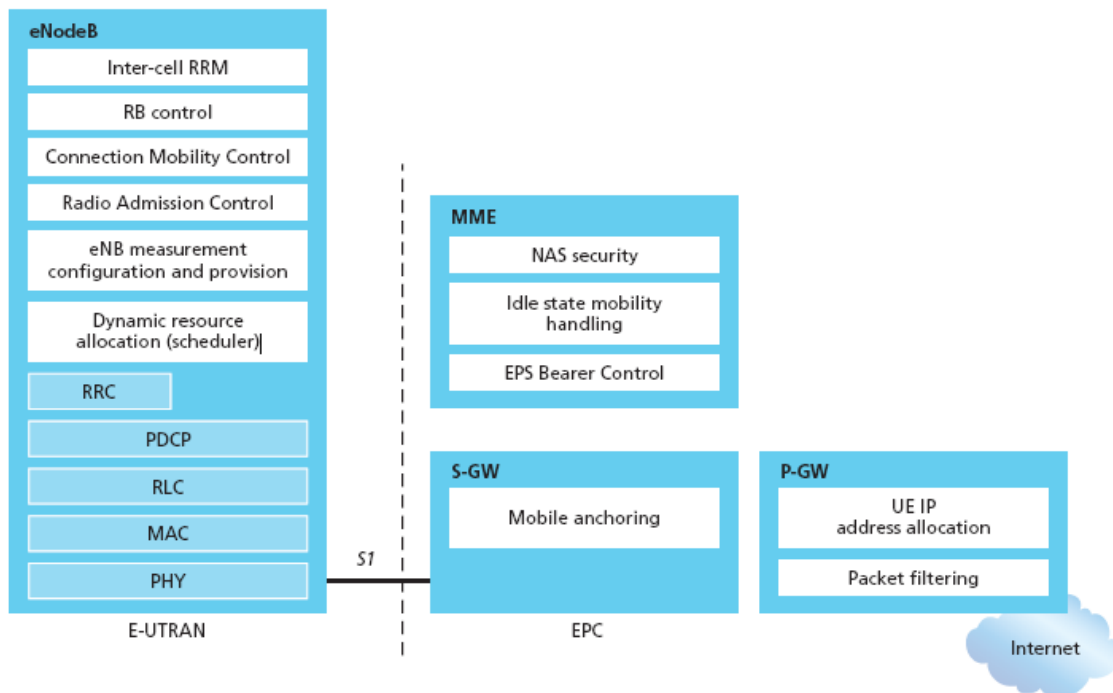
Εικόνα 2. Η αρχιτεκτονική του EPS.
Πηγή: www.ieee-globecom.org

Η IP κίνηση ανάμεσα σε μια πύλη (gateway) του PDN και στο UE, εκφράζεται μέσω της έννοιας του EPS ασύρματου φορέα μετάδοσης (EPS bearer). Ένα bearer είναι μια ροή πακέτων IP μεταξύ της πύλης και του UE με καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Το EPC και το E-UTRAN μαζί διευθετούν και απελευθερώνουν bearer όπως απαιτείται από τις εφαρμογές.

Το EPS παρέχει στον χρήστη συνδεσιμότητα σε ένα PDN για πρόσβαση στο Internet, αλλά και για υπηρεσίες όπως Voice over IP (VoIP), με συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Επίσης παρέχει ασφάλεια και ιδιωτικότητα για το χρήστη αλλά και προστασία του ίδιου του δικτύου από κακόβουλη χρήση.

Η Εικόνα 2 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συνολικού δικτύου μαζί με τα ξεχωριστά στοιχεία του και τις προτυποποιημένες διασυνδέσεις. Αν και κάθε στοιχείο και η διασύνδεσή του με τα άλλα έχουν καθοριστεί σαφώς μέσω προτυποποίησης, η φυσική υλοποίηση επαφίεται στην κρίση του διαχειριστή του δικτύου, όπως και η δυνατότητα συγχώνευσης στοιχείων. Ο

λειτουργικός διαχωρισμός του δικτύου σε EPS και E-UTRAN φαίνεται στην Εικόνα 3, όπου απεικονίζονται οι αρμοδιότητες του καθενός.



Εικόνα 3. Οι λειτουργικές αρμοδιότητες του E-UTRAN και του EPC.

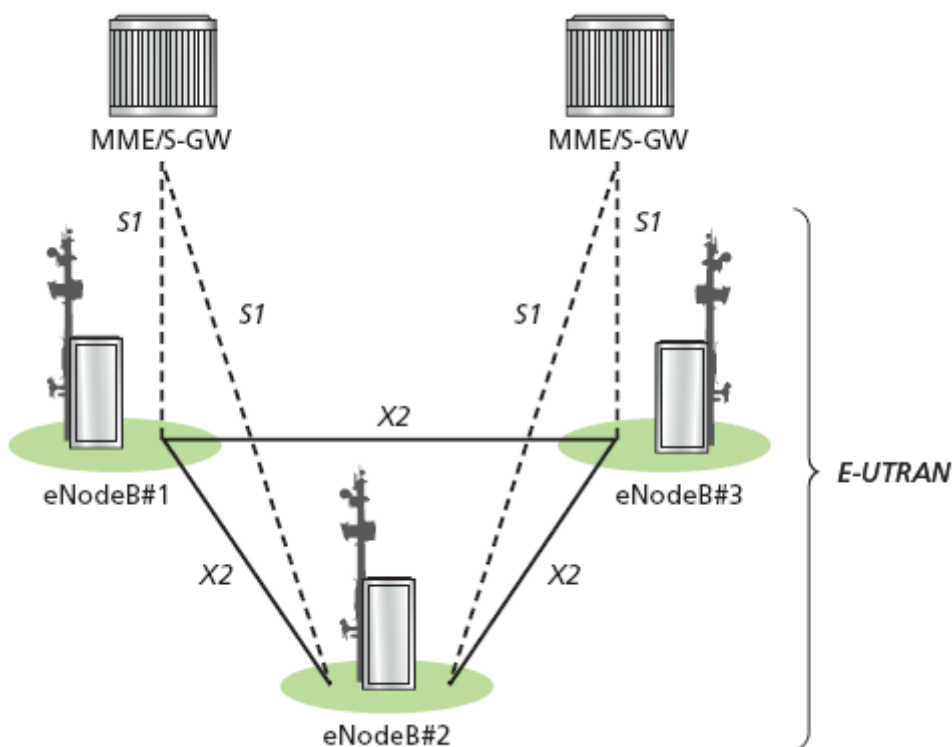
Συνοπτικά, το CN είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του UE και την εγκαθίδρυση των bearers. Οι βασικές λογικές μονάδες του EPC είναι οι παρακάτω:

- PDN Gateway (P-GW): Η μονάδα P-GW είναι υπεύθυνη για την ανάθεση διεύθυνσης IP στους χρήστες και για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας βάση των κανόνων του PCRF (που περιγράφεται παρακάτω). Λειτουργεί επίσης ως συνδετικός κρίκος για λειτουργίες με μη 3GPP τεχνολογίες όπως CDMA2000 και WiMAX δίκτυα.
- Serving Gateway (S-GW): όλα τα πακέτα IP μεταφέρονται διαμέσου της S-GW, λειτουργώντας ως συνδετικός κρίκος για τους bearers όταν το UE μετακινείται μεταξύ των eNodeB. Επίσης, διατηρεί τις πληροφορίες για τους bearers όταν το τερματικό είναι σε αδρανή κατάσταση (idle) και προσωρινά αποθηκεύει τα δεδομένα προς downlink όσο η μονάδα Mobility Management Entity (MME) κάνει το paging των UE. Πέραν των παραπάνω, η S-GW εκτελεί λειτουργίες όπως η συλλογή πληροφοριών για την χρέωση και την θεμιτή πιθανή αναχαίτιση των υπηρεσιών. Τέλος, χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος για λειτουργίες με άλλες 3GPP τεχνολογίες όπως GPRS και UMTS.
- Mobility Management Entity (MME): Η MME είναι η μονάδα που επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ του UE και του CN. Τα πρωτόκολλα μεταξύ τους ονομάζονται πρωτόκολλα Non Access Stratum (NAS).
- Home Subscriber Server (HSS): Η μονάδα αυτή περιέχει στοιχεία των συνδρομητών, όπως τα προφίλ QoS και περιορισμούς πρόσβασης. Διατηρεί επίσης πληροφορίες σχετικά με τα PDNs που επιχειρεί να συνδεθεί ο χρήστης, όπως και πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα της MME που εξυπηρετεί εκείνη τη στιγμή το χρήστη.
- Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): Η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για τις αποφάσεις σχετικά με τον έλεγχο των πολιτικών, όπως και για τον έλεγχο των λειτουργιών

χρέωσης. Το PCRF παρέχει την εξουσιοδότηση της QoS που κρίνει πώς μια ροή δεδομένων θα αντιμετωπιστεί και αν κάτι τέτοιο είναι ευθυγραμμισμένο με το προφίλ συνδρομής του χρήστη.

Πέραν των παραπάνω λειτουργικών μονάδων, υπάρχει και η μονάδα IP Multimedia Subsystem (IMS) με αρμοδιότητα τον έλεγχο πολυμεσικών εφαρμογών όπως VoIP. Όμως η συγκεκριμένη μονάδα δε θεωρείται μέρος του EPS.

Από την άλλη, το δίκτυο πρόσβασης του LTE E-UTRAN αποτελείται αποκλειστικά από ένα δίκτυο από eNodeBs όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Σε κανονική χρήση (δηλαδή όχι broadcast), δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής. Αντίθετα τα eNodeBs συντονίζονται μεταξύ τους επικοινωνώντας μέσω της διασύνδεσης X2. Για το λόγο αυτό η αρχιτεκτονική του E-UTRAN θεωρείται επίπεδη. Με το EPC επικοινωνούν μέσω της διασύνδεσης S1, και συγκεκριμένα με το S1-MME για τη σύνδεση με το MME και με το S1-U για τη σύνδεση με το S-GW. Τα πρωτόκολλα μεταξύ των eNodeBs και των UE ονομάζονται AS πρωτόκολλα.



Εικόνα 4. Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN.

Πηγή: www.ieee-globecom.org

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις σχετικές με ασύρματη μετάδοση λειτουργίες. Αυτές χωρίζονται σε:

- Radio resource management (RRM): με τον όρο αυτό ονομάζουμε όλες τις λειτουργίες σχετικά με τα bearers, όπως ο έλεγχός τους, ο χρονοπρογραμματισμός και η δυναμική ανάθεση πόρων σε UEs.
- Header Compression: Η συγκεκριμένη λειτουργία εξυπηρετεί στην αποδοτική χρήση της ασύρματης διασύνδεσης μέσω της συμπίεσης των επικεφαλίδων των IP πακέτων, που ειδάλλως θα αποτελούσαν εξαιρετική επιβάρυνση, ειδικά για μικρού μεγέθους πακέτα.
- Ασφάλεια: Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου, όλα τα δεδομένα που αποστέλλονται μέσω της ασύρματης διασύνδεσης είναι κρυπτογραφημένα.

- Συνδεσιμότητα με το EPC: η συγκεκριμένη λειτουργία αναφέρεται στη σηματοδότηση για τη σύνδεση με τη μονάδα MME και τη S-GW.

Από την πλευρά του δικτύου, αυτές οι λειτουργίες γίνονται αποκλειστικά στα eNodeBs, καθένα από τα οποία μπορεί να είναι υπεύθυνο για πολλαπλές κυψέλες. Σε αντίθεση με προηγούμενες τεχνολογίες, στο LTE το eNodeB περιλαμβάνει το ραδιοελεγκτή. Αυτό επιτρέπει τη στενή διασύνδεση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων RAN, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση. Η κατανεμημένη φύση του ελέγχου που προκύπτει, εξαλείφει την ανάγκη για απαιτητικούς ελεγκτές, μειώνοντας σημαντικά και το κόστος. Συνέπεια της έλλειψης κεντρικού ελεγκτή, είναι πως στην περίπτωση που το UE μετακινηθεί, το δίκτυο πρέπει να μεταφέρει όλη τη σχετική πληροφορία στο αντίστοιχο eNodeB. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια του X2.

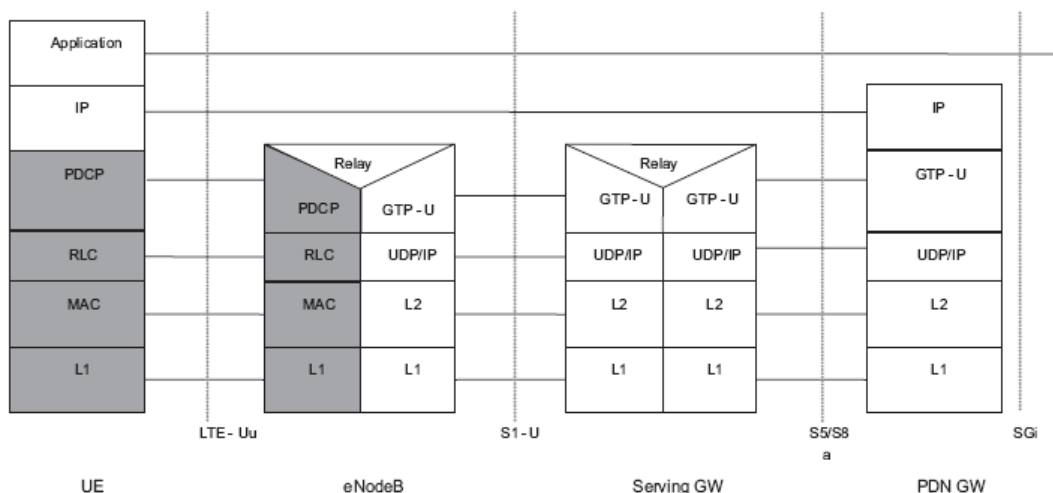
Την ίδια στιγμή, ένα eNodeB μπορεί να εξυπηρετηθεί από πολλαπλά MME/S-GWs. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος πως αντί για την ανάθεση ενός MME/S-GWs σε ένα eNodeB, αποφασίστηκε ένα σύνολο MME/S-GWs να ανατίθεται για την εξυπηρέτηση μια κοινής περιοχής. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τα UEs σε ένα ή περισσότερα κελιά που ελέγχονται από ένα eNodeB, να μοιράζονται μεταξύ πολλαπλών CN μονάδων, με στόχο την κατανομή φόρτου, και την ευρωστία του συστήματος απέναντι σε ενδεχόμενη αστοχία των CN μονάδων. Η αναγκαία πληροφορία για τα UEs παραμένει στην ίδια MME για όσο διάστημα το UE παραμένει στην περιοχή αυτή.

2.4.2. Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων

User plane

Ένα IP πακέτο για έναν χρήστη ενθυλακώνεται σε ένα συγκεκριμένο EPC πρωτόκολλο και μεταφέρεται από την πύλη P-GW προς το eNodeB για μετάδοση στο UE. Διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές διασυνδέσεις. Πάνω από διασυνδέσεις CN, S1 και S5/S8.1 χρησιμοποιείται το GPRS Tunneling Protocol (GTP) [11].

Το πρωτόκολλο E-UTRAN user plane απεικονίζεται στην Εικόνα 5, και αποτελείται από τα Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) και Medium Access Control (MAC) υποστρώματα που τερματίζουν στο eNodeB από την πλευρά του δικτύου.

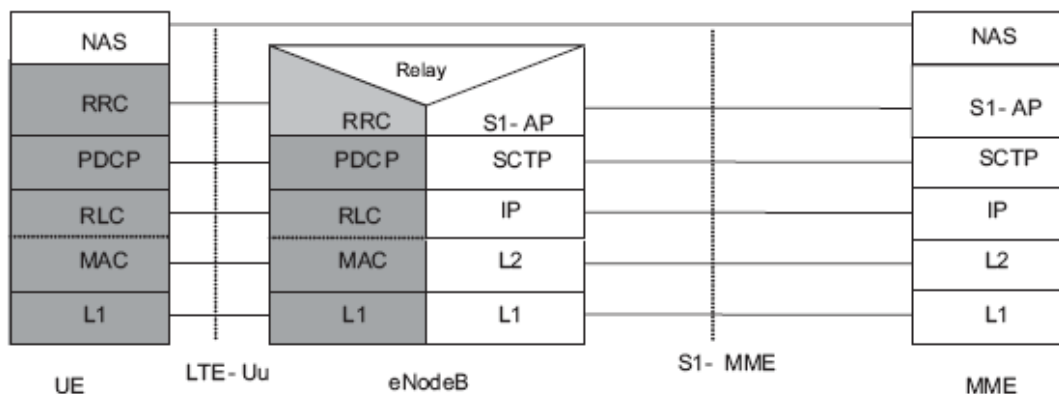


Εικόνα 5. Η User Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων.

Control plane

Η στοιβά του πρωτοκόλλου control plane μεταξύ του UE και της μονάδας MME απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Η σκιασμένη περιοχή αποτελεί τα AS πρωτόκολλα. Τα κατώτερα στρώματα έχουν τις ίδιες λειτουργίες με τα αντίστοιχα του user plane, με την εξαίρεση πως στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει λειτουργία συμπίεσης επικεφαλίδων.

Το πρωτόκολλο Radio Resource Control (RRC) είναι γνωστό ως “layer 3” στη στοιβά του πρωτοκόλλου AS. Αποτελεί την κύρια λειτουργία ελέγχου στο AS, όντας υπεύθυνο για την εγκατάσταση των bearers, και ρυθμίζοντας όλα τα κατώτερα στρώματα χρησιμοποιώντας Radio Resource Control (RRC) σηματοδασία μεταξύ του eNodeB και του UE.



Εικόνα 6. Η Control Plane στοιβά πρωτοκόλλων.

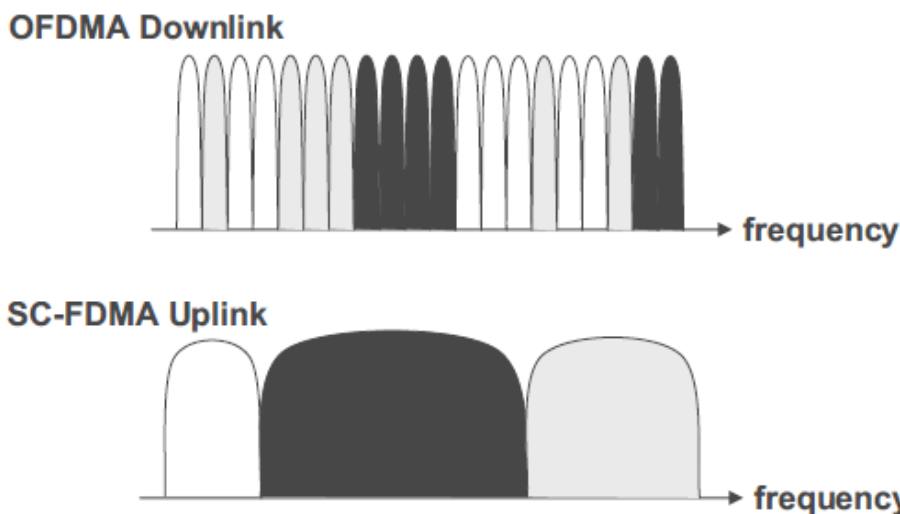
2.5. LTE-A τεχνολογίες

Η κάλυψη των απαιτητικών προδιαγραφών από το LTE/LTE-A έγινε εφικτή χάρη στην χρήση νέων τεχνολογιών στο τομέα των κινητών συστημάτων. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά που καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό τις επιδόσεις του συστήματος, κατηγοριοποιημένα ως προς την έκδοση στην οποία έκαναν την εμφάνισή τους.

2.5.1. Έκδοση 8

Η έκδοση 8 ήταν η πρώτη έκδοση του LTE, ορίζοντας τις βάσεις της τεχνολογίας. Τα κύρια στοιχεία του συστήματος ήταν:

Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM): Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία OFDM για το downlink. Αυτό σημαίνει πως ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα στο τερματικό μέσω πολλαπλών φορέων μικρού εύρους, αντί της μεταφοράς μέσω ενός μοναδικού σήματος που καλύπτει το σύνολο του εύρους ζώνης. Οι φορείς αυτοί ονομάζονται υπο-φορείς (subcarriers) και είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, ούτως ώστε είτε ατομικά είτε ως γκρουπ να μεταφέρουν ανεξάρτητες ροές δεδομένων.



Εικόνα 7. Ο διαχωρισμός του φάσματος σε φορείς βάση του OFDMA (downlink) και SC-FDMA (uplink).

Η τεχνολογία Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) επεκτείνει την τεχνολογία του OFDM ώστε να παράγει ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με μεγάλο βαθμό ελευθερίας. Οι υποφέρουσες ομαδοποιούνται σε resource blocks (12 subcarriers). Τα resource blocks έχουν μέγεθος 180 kHz στο πεδίο της συχνότητας και 0.5 ms στο πεδίο του χρόνου. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας αριθμός από resource blocks. Όσο περισσότερα resource blocks/χρήστη και όσο ανώτερο σχήμα διαμόρφωσης υιοθετηθεί, τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται. Την ανάθεση των resource blocks στους χρήστες στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αναλαμβάνει ένα σύνολο μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού. Στο LTE-A, ο διαθέσιμος αριθμός των resource blocks έχει προτυποποιηθεί και εξαρτάται από το διαθέσιμο φάσμα. Ο Πίνακας 4. απεικονίζει αυτήν την αντιστοιχία.

Πίνακας 4. Ο αριθμός των διαθέσιμων resource blocks για κάθε εύρος φάσματος.

Εύρος φάσματος (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Αριθμός resource blocks	6	15	25	50	75	100

Η τεχνολογία OFDMA παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, τα βασικότερα των οποίων είναι:

- Παρέχει μεγάλη ευρωστία απέναντι σε φαινόμενα channel selectivity χωρίς μεγάλη πολυπλοκότητα υλοποίησης.
- Παρέχει πρόσβαση στο πεδίο της συχνότητας, ενεργοποιώντας μεγαλύτερη ευελιξία στους χρονοπρογραμματιστές, σε σχέση με αυτούς που λειτουργούν μόνο στο πεδίο του χρόνου. Αυτό επιτρέπει τη χρήση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που εξυπηρετούν στο συντονισμό του συστήματος για την αποφυγή παρεμβολών, όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο 4.
- Διευκολύνεται η δυνατότητα λειτουργίας του LTE σε διαφορετικά διαθέσιμα εύρη φάσματος, μέσω της προσαρμογής του αριθμού των υπο-φορέων, απλοποιώντας την ανάπτυξη και υλοποίηση των τερματικών.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν καταστήσει την τεχνολογία OFDM εξαιρετικά δημοφιλή, έχοντας υιοθετηθεί από πλήθος σύγχρονων δικτύων. Πέρα από τα συστήματα τηλεφωνίας (LTE, mobile WiMAX), τα γνωστότερα από αυτά περιλαμβάνουν ασύρματα δίκτυα τηλεόρασης Digital Video Broadcasting–Handheld (DVB-H), Digital Video Broadcasting–Terrestrial (DVB-T), όσο και ενσύρματα δίκτυα όπως Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), Digital Video Broadcasting – Cable (DVB-C) κ.α.

Ένα μειονέκτημα της τεχνολογίας OFDM είναι το υψηλό Peak to Average Power Ratio (PAPR). Το υψηλό PAPR απαιτεί αφενός ακριβούς και μη αποδοτικούς ενισχυτές ισχύος, και αφετέρου απαιτεί τερματικά υψηλού κόστους και με μικρό σχετικά χρόνο ζωής της μπαταρίας.

Για το λόγο αυτό, το LTE χρησιμοποιεί στο uplink μια προ-κωδικοποιημένη έκδοση του OFDM που ονομάζεται Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). Το SC-FDMA λύνει το πρόβλημα ενώνοντας τα resource blocks με τρόπο που μειώνει την κατανάλωση ισχύος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7. Η επίτευξη μικρού PAPR βελτιώνει επίσης την κάλυψη και την απόδοση στα όρια της κυψέλης.

Channel-Dependent Scheduling and Rate Adaptation: Στον πυρήνα της μετάδοσης στο σύστημα LTE βρίσκεται η χρήση της μετάδοσης μέσω διαμοιρασμένου καναλιού μέσω της δυναμικής ανάθεσης πόρων μεταξύ των χρηστών στα πεδία χρόνου και συχνότητας. Η χρήση του διαμοιρασμένου καναλιού ταιριάζει στην συχνή μεταβολή των απαιτήσεων πόρων από τους χρήστες σε τηλεπικοινωνίες βασισμένες στη μετάδοση πακέτου.

Ο χρονοπρογραμματιστής ελέγχει σε κάθε χρονική στιγμή σε ποιους χρήστες θα αναθέσει πόρους. Επίσης αποφασίζει το ρυθμό δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε μετάδοση. Με αυτό τον τρόπο η προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων γίνεται στα πλαίσια της λειτουργίας χρονοπρογραμματισμού, μετατρέποντας τον χρονοπρογραμματισμό σε κρίσιμο στοιχείο της απόδοσης του δικτύου, ειδικά σε περιόδους υψηλού φόρτου. Οι λειτουργίες αυτές αφορούν και το uplink και το downlink. Η μέγιστη απόδοση των παραπάνω λειτουργιών επιτυγχάνεται όταν ο μηχανισμός της προσαρμογής του ρυθμού δεδομένων λαμβάνει υπόψη και την κατάσταση του καναλιού (Channel-Dependent), επιλέγοντας να αναθέσει περισσότερους πόρους στους χρήστες που παρουσιάζουν καλύτερη κατάσταση καναλιού, γεγονός από το οποίο προέρχεται η ονομασία Channel-Dependent Scheduling and Rate Adaptation.

Inter-Cell Interference Coordination (ICIC): Το LTE σχεδιάστηκε να λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας ανά κελί, που σημαίνει πως οι ίδιοι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε γειτονικά κελιά. Ειδικά για αυτό, τα βασικά κανάλια ελέγχου έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν απροβλημάτιστα ακόμα και με σχετικά χαμηλό Signal-to-Interference ratio (SIR), σενάριο πιθανό σε περιβάλλοντα με βαθμό επαναχρησιμοποίησης συχνότητας 1.

Από την πλευρά του παρόχου, η δυνατότητα πρόσβασης σε ολόκληρο το φάσμα από κάθε κελί προσφέρει μεν, τη δυνατότητα για μεγαλύτερη απόδοση συνολικά, ίσως οδηγήσει δε, σε μεγάλες διακυμάνσεις στο SIR, και κατά συνέπεια και στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης, με τους χρήστες στα όρια της κυψέλης να αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα. Με γνώμονα τη βελτίωση της απόδοσης των τελευταίων, μπορεί να υπάρξει συντονισμός των πόρων μεταξύ των κελιών, αποφεύγοντας τη ταυτόχρονη χρήση φάσματος από τερματικά στα άκρα γειτονικών κυψελών ώστε να αποφευχθούν ισχυρά φαινόμενα παρεμβολών. Οι προδιαγραφές του LTE-A επιτρέπουν τρεις τύπους συντονισμού: το στατικό, το ημι-στατικό και το δυναμικό. Ο στατικός κατανέμει τους πόρους μία φορά βάση παρελθόντων παρατηρήσεων, και δεν υφίσταται ανακατανομή. Ο ημιστατικός εξετάζει περιοδικά για μεγάλες αλλαγές στις συνθήκες φόρτου, ώστε να αλλάξει, αν θεωρηθεί ωφέλιμο, τον υφιστάμενο καταμερισμό. Η περίοδος είναι της τάξης των ωρών. Τέλος, στον δυναμικό συντονισμό, οι eNodeBs επικοινωνούν συνεχώς προκειμένου να προσαρμόζονται σε νέες συνθήκες κάθε λίγα λεπτά. Η επικοινωνία για τον συντονισμό μεταξύ των eNodeB γίνεται μέσω της X2 διασύνδεσης.

Οι μέθοδοι αυτές εκφράζονται με τον όρο ICIC. Καθώς το ICIC αποτελεί σημαντική παράμετρος για την αποφυγή των παρεμβολών, περιγράφεται πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Hybrid ARQ with Soft Combining: η λειτουργία Fast hybrid ARQ με soft combining χρησιμοποιείται στο LTE προκειμένου να επιτρέψει στο τερματικό την γρήγορη αίτηση αναμετάδοσης λανθασμένα λαμβανόμενων blocks και να παρέχει ένα εργαλείο για την προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων. Οι αναμεταδόσεις μπορεί να αιτηθούν άμεσα μετά από κάθε μετάδοση πακέτου, ελαχιστοποιώντας έτσι την επίδραση στην επίδοση του χρήστη από λανθασμένα λαμβανόμενα πακέτα. Για τη soft combining στρατηγική, χρησιμοποιείται αυξανόμενος πλεονασμός, και ο δέκτης αποθηκεύει προσωρινά τα μαλακά bits ώστε να εκτελέσει soft combining μεταξύ των αποπειρών μετάδοσης.

Μετάδοση πολλαπλών κεραιών: Τεχνικές μετάδοσης με πολλαπλές κεραιές θεωρούνται το σύνολο των τεχνικών που στηρίζονται στη χρήση ενός αριθμού κεραιών στον δέκτη ή/και στον μεταδότη, σε συνδυασμό με την απαραίτητη επεξεργασία σήματος που κάτι τέτοιο επιφέρει. Η τεχνολογία αυτή εξυπηρετεί τη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος, είτε βελτιώνοντας τη χωρητικότητα, είτε την κάλυψη, είτε το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε έναν χρήστη.

Από την πρώτη του έκδοση, το LTE, υποστήριζε αρκετές τεχνικές μετάδοσης με πολλές κεραιές. Η χρήση των τεχνικών αυτών άλλωστε, ήταν που επέτρεψε και την κάλυψη των στόχων του LTE και του IMT-Advanced για το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης του συστήματος. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη βελτίωση άλλων παραμέτρων της απόδοσης του συστήματος:

α) Diversity. Πολλαπλές κεραιές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του diversity. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης, μπορεί να συλλεχθεί αυξημένη ενέργεια και

να μειωθεί το fading, ενώ οφέλη παρουσιάζονται και σε περιπτώσεις όπου η λήψη περιορίζεται από ισχυρές παρεμβολές.

β) SINR. Το SINR βελτιώνεται μέσω των διάφορων τεχνικών beam-forming, που γίνονται εφικτές μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών μετάδοσης στο σταθμό βάσης. Η βελτίωση του SINR με τη σειρά του, βελτιώνει τη χωρητικότητα και την κάλυψη του συστήματος.

γ) Ρυθμός μετάδοσης. Η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), γνωστή και ως MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output), γίνεται εφικτή με τη χρήση πολλαπλών κεραιών και στο δέκτη και στον πομπό, και επιφέρει αύξηση στους ρυθμούς μετάδοσης, όποτε το επιτρέπουν οι συνθήκες καναλιού. Εναλλακτικά, συνδυάζοντας ιδιότητες του σχήματος με κατάλληλη επεξεργασία παρεμβολών, πολλαπλά τερματικά μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας ίδιους πόρους συχνοτήτων, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης. Αυτό αναφέρεται ως multi-user MIMO.

Γενικά, οι διαφορετικές τεχνικές πολλαπλών κεραιών είναι ωφέλιμες σε διαφορετικά σενάρια η κάθε μία. Για παράδειγμα, σε σχετικά χαμηλό SIR, όπως σε συνθήκες υψηλού φόρτου στα όρια της κυψέλης, η χωρική πολυπλεξία παρέχει σχετικά περιορισμένα οφέλη. Αντίθετα, η χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό μπορεί να αυξήσει το SINR μέσω του beam-forming.

Από την άλλη, σε περιπτώσεις που το SINR είναι υψηλό, ο ρυθμός μετάδοσης περιορίζεται από το διαθέσιμο φάσμα και όχι από τη δύναμη του σήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χωρική πολυπλεξία κρίνεται ιδανική για να εκμεταλλευτεί πλήρως τις καλές συνθήκες καναλιού. Η επιλογή της εκάστοτε τεχνικής γίνεται από το σταθμό βάσης, επιλέγοντας κάθε φορά το καταλληλότερο σχήμα μετάδοσης. Με την έκδοση 8, υποστηριζόταν χωρική πολυπλεξία μέχρι και 4 στρωμάτων. Οι μετέπειτα εκδόσεις επέτρεψαν περισσότερο πολύπλοκα σχήματα, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Ευέλικτη χρήση φάσματος: Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE είναι η μεγάλη δυνατότητα ευέλικτης χρήσης του φάσματος. Ο στόχος αυτού ήταν να επιτρέψει την εγκατάσταση του LTE RAN σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως άλλες παραμέτρους αμφίδρομης επικοινωνίας και διαφορετικά μεγέθη διαθέσιμου φάσματος. Το LTE λειτουργεί σε διάφορα εύρη φάσματος από 1.4 MHz ως και 20 MHz και σε συνδυασμό με την ανεξάρτητη κατανομή των resource blocks, επιδεικνύει σημαντική ευελιξία και ελευθερία.

2.5.2. Έκδοση 9

Η έκδοση 9 εισήγαγε νέα χαρακτηριστικά στην τεχνολογία LTE. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η υποστήριξη για Multicast και Broadcast, το positioning και το Dual Layer Beam-Forming.

Multicast and Broadcast: Οι υπηρεσίες Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS) υποστηρίζουν μετάδοση broadcast και multicast σε κυψελωτά συστήματα. Με τις υπηρεσίες αυτές τα ίδια δεδομένα μεταδίδονται σε πολλαπλούς χρήστες σε μια περιοχή που τυπικά αποτελείται από αρκετά κελιά. Σε κάθε από αυτά τα κελιά, κατανέμονται πόροι απαραίτητοι για μετάδοση σημείου προς πολλά σημεία, και όλοι οι χρήστες-συνδρομητές της συγκεκριμένης MBMS υπηρεσίας λαμβάνουν το ίδιο σήμα.

Βαρύνουσα σημασία στην παροχή MBMS υπηρεσιών, έχει η καλή κάλυψη και η μικρή κατανάλωση ισχύος των τερματικών. Το πρώτο είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί στο MBMS δεν μπορεί να γίνει προσαρμογή σύνδεσης (link adaptation) σε ξεχωριστούς χρήστες, γεγονός που σημαίνει ότι ο ρυθμός μετάδοσης εξαρτάται από την δυνατότητα λήψης του χειρότερου χρήστη.

Όταν οι μεταδόσεις από τα διαφορετικά κελιά είναι συγχρονισμένα, το τερματικό μπορεί να θεωρήσει ότι η πηγή του σήματος είναι μοναδική. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται MBMS Single-Frequency Network (MBSFN) και έχει σημαντικά οφέλη. Πρώτον, μπορεί να προσφέρει αυξημένη ποιότητα σήματος, ειδικά στο όρια των κελιών που συμμετέχουν στο σχήμα, αφού το τερματικό συνδυάζει τα πολλαπλά σήματα. Δεύτερον, οδηγεί σε μειωμένες παρεμβολές σε ευάλωτες περιοχές. Τρίτον, προσφέρει αυξημένο diversity, αφού η ίδια πληροφορία προέρχεται από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Συνολικά, αυτό επιτρέπει σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα μετάδοσης multicast/broadcast σε περιοχές όπως τα όρια των κυψελών, που είναι και οι περιοχές που βρίσκονται οι χρήστες με τη χειρότερη σύνδεση, άρα είναι και αυτοί που καθορίζουν την ποιότητα μετάδοσης multicast/broadcast συνολικά.

Η αποδοτική κατανάλωση των τερματικών βασίζεται στο γεγονός πως η μετάδοση αποτελείται περισσότερο από μικρές εκρήξεις μετάδοσης δεδομένων παρά από μεγάλης διάρκειας μεταδόσεις χαμηλού ρυθμού. Αυτό επιτρέπει στα τερματικά να ενεργοποιούνται σποραδικά για τη λήψη δεδομένων, με μακρά διαστήματα λειτουργίας μικρής κατανάλωσης (λειτουργία Discontinues Reception ή DRX).

Positioning: Το positioning αναφέρεται στη λειτουργική δυνατότητα του RAN να εκτιμήσει την τοποθεσία των τερματικών. Κάτι τέτοιο, μπορεί να γίνει ούτως ή άλλως με την εγκατάσταση ενός δέκτη σήματος GPS στο τερματικό. Αν και αυτό είναι αρκετά συνηθισμένο, κάποια τερματικά μπορεί να μη έχουν αυτό το χαρακτηριστικό. Για αυτήν την περίπτωση, στην έκδοση 9 εισήχθη μέθοδος για την εύρεση τοποθεσίας μέσω του RAN. Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση σημάτων αναφοράς που μεταδίδονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και από διαφορετικές κυψέλες, επιτρέποντας την εκτίμηση της θέσης του τερματικού.

Dual-Layer Beam-Forming: Στην έκδοση 9, εμπλουτίστηκε η υποστήριξη συνδυασμού χωρικής πολυπλεξίας με το beam-forming. Αν και η υποστήριξη υπήρχε από την έκδοση 8, περιοριζόταν από το δυσχερές precoding. Η νέα έκδοση επέτρεψε καλύτερο precoding, βελτιώνοντας την δυνατότητα παράταξης διάφορων σχημάτων πολλαπλών κεραιών.

2.5.3. Έκδοση 10

Η έκδοση 10 (LTE-A) ήταν η πρώτη που κάλυψε τις απαιτήσεις των προδιαγραφών IMT-Advanced με τη βοήθεια νέων ή βελτιωμένων τεχνολογιών. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η προσαύξηση των φορέων, το relaying, η ενισχυμένη τεχνολογία πολλαπλών κεραιών, και η υποστήριξη ετερογενών παρατάξεων.

Carrier aggregation: Η πρώτη έκδοση του LTE παρείχε μεγάλη υποστήριξη για διαφορετικές κατανομές φάσματος, με μέγιστο εύρος φάσματος τα 20 MHz. Στην έκδοση 10, το εύρος φάσματος διευρύνθηκε με τη μέθοδο carrier aggregation, βάσει της οποίας πολλαπλοί φορείς συνδυάζονται και χρησιμοποιούνται μαζί για μετάδοση από ένα τερματικό. Το LTE-A υποστηρίζει τον συνδυασμό μέχρι και 5 φορέων, φτάνοντας έτσι το μέγιστο φάσμα που μπορεί να καταναμεθεί σε έναν χρήστη στα 100 MHz, αυξάνοντας σημαντικά το μέγιστο επιτεύξιμο

ρυθμό μετάδοσης. Κάθε τερματικό έκδοσης 8 ή 9 που δεν υποστηρίζει τη λειτουργία αυτή, απλά χρησιμοποιεί έναν από τους φορείς, εξασφαλίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη συμβατότητα με προηγούμενες εκδόσεις.

Οι φορείς που συνδυάζονται δεν απαιτείται να είναι διαδοχικοί στη πεδίο της συχνότητας, επιτρέποντας έτσι την εκμετάλλευση ενδεχόμενου απομονωμένου φάσματος. Αυτό απαλλάσσει τους παρόχους από την ανάγκη να αποκτήσουν ένα μεγάλο μέρος διαδοχικού φάσματος, και τους επιτρέπει να προσφέρουν υψηλές ταχύτητες στους συνδρομητές συνδυάζοντας τα μέρη του φάσματος που ήδη κατέχουν.

Το LTE-A υποστηρίζει τρεις τρόπους συνδυασμού φορέων. Ο πρώτος αφορά το συνδυασμό διαδοχικών φορέων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ο δεύτερος επιτρέπει το συνδυασμό μη διαδοχικών φορέων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Τέλος, ο τρίτος υποστηρίζει το συνδυασμό φορέων που βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες. Αν και παρόμοιας λειτουργίας, η περιπλοκότητα υλοποίησης κάθε περίπτωσης είναι σημαντικά διαφορετική με την τρίτη περίπτωση να απαιτεί εξαιρετικά προηγμένα τερματικά.

Relaying: Το relaying είναι η προσέγγιση βάση της οποίας ένα τερματικό επικοινωνεί με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης, ο οποίος είναι ασύρματα συνδεδεμένος με το βασικό κελί χρησιμοποιώντας την ασύρματη διασύνδεση του LTE. Από την οπτική του τερματικού, ο ενδιάμεσος κόμβος εμφανίζεται σαν ένα κανονικό κελί, γεγονός που απλοποιεί την υλοποίηση του τερματικού, και βοηθά την επίτευξη συμβατότητας με τερματικά έκδοσης 8 ή 9. Ουσιαστικά, ο ενδιάμεσος κόμβος είναι ένας σταθμός βάσης χαμηλότερης ισχύος που επιτρέπει την βελτίωση της κάλυψης σε μέρη που διαφορετικά το σήμα θα ήταν ασθενές, όπως εσωτερικοί χώροι, απομακρυσμένες περιοχές κλπ.

Ενισχυμένη μετάδοση πολλαπλών κεραιών: Στην έκδοση 10, η χωρική πολυπλεξία στο downlink επεκτείνεται ώστε να υποστηρίζει οχτώ στρώματα μετάδοσης. Παράλληλα, εισάγεται μια ενισχυμένη δομή για σήματα αναφοράς, ώστε να βελτιωθεί η υποστήριξη των διάφορων προσεγγίσεων beam-forming. Τα παραπάνω καθιστούν δυνατή τη μετάδοση σε ρυθμούς έως και 3 Gbit/s ενώ η φασματική απόδοση φτάνει τα 30 bit/s/Hz. Αντίστοιχα στο uplink, υποστηρίχθηκε η πολυπλεξία μέχρι και τεσσάρων στρωμάτων. Αποτελείται από ένα σύστημα βασισμένο σε κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση υπό τον έλεγχο του σταθμού βάσης, γεγονός που επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί και για μετάδοση beam-forming στο uplink. Τα παραπάνω έχουν αποτέλεσμα επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης 1.5 Gbit/s και φασματική απόδοση 15 bit/s/Hz.

Ετερογενείς παρατάξεις : Η ετερογενής παράταξη αναφέρεται σε οποιαδήποτε παράταξη περιλαμβάνει ένα σύνολο κελιών με διαφορετικά επίπεδα στην ισχύ μετάδοσης, λειτουργώντας μερικώς ή μη στο ίδιο σύνολο συχνοτήτων και με επικαλυπτόμενες περιοχές κάλυψης. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι η εναπόθεση small cells (femtocells, picocells) μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός macrocell. Αναλυτικότερα, τα femtocells περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.6. Διαδικασία προτυποποίησης LTE-A

Υπεύθυνος για τον καθορισμό των προδιαγραφών για το LTE-A είναι αποκλειστικά ο οργανισμός 3GPP. Ο οργανισμός αυτός παράγει προδιαγραφές όχι μόνο για το LTE αλλά και για κινητά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, εξυπηρετώντας περισσότερες από 5 δισεκατομμύρια

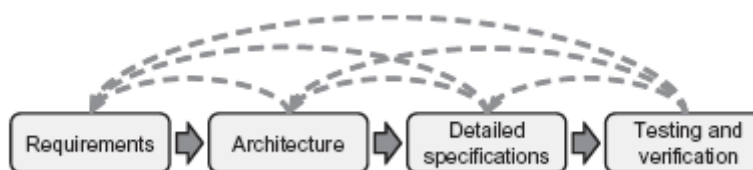
συνδέσεις. Για το λόγο αυτό έχει θεσπίσει σαφείς κανονισμούς ως προς τη διαδικασία της προτυποποίησης όπως και αυστηρή δομή στην ανάθεση των αρμοδιοτήτων.

Η διαδικασία προτυποποίησης είναι συνεχής διαδικασία, εξελίσσοντας αδιάκοπα τα υφιστάμενα πρότυπα ώστε να καλύψουν νέες ανάγκες για υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Τα στάδια της διαδικασίας (Εικόνα 8) αποτελούνται από:

- α) τον αρχικό καθορισμό των απαιτήσεων,
- β) την αρχιτεκτονική, όπου αποφασίζονται οι δομικές μονάδες και οι διασυνδέσεις,
- γ) τον λεπτομερή καθορισμό όλων των στοιχείων, και τέλος
- δ) τη δοκιμαστική περίοδο και επαλήθευση.

Τα στάδια αυτά μπορεί να είναι διαδοχικά, αλλά και με φάσεις επικάλυψης όταν κρίνεται απαραίτητο. Παραδείγματος χάριν, αλλαγές στις τεχνικές λεπτομέρειες μπορεί να αποδειχτούν αναγκαίες μέσω της δοκιμαστικής διαδικασίας. Η τελευταία κάποιες φορές δε θεωρείται μέρος της διαδικασίας προτυποποίησης παρόλα αυτά γίνεται παράλληλα με άλλα στάδια και η συνεισφορά της στη τελική μορφή του προτύπου είναι ακρογωνιαία. Η διαδικασία θεωρείται λήξασα όταν από τη δοκιμαστική διαδικασία έχουν προκύψει σταθερά αποτελέσματα, οπότε είναι δυνατό να αρχίσει και η διαδικασία υλοποίησης.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή που το πρότυπο ολοκληρώνεται μέχρι την εμπορική εκμετάλλευσή του είναι περίπου ένα με δύο χρόνια, αν και αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως αν πρόκειται για νέο πρότυπο ή αποτελεί επέκταση προϋπάρχοντος.



Εικόνα 8. Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE/LTE-A.

Η δομή του 3GPP είναι αυστηρά καθορισμένη. Αποτελείται από τους οργανισμούς προτυποποίησης της Ευρώπης (ETSI), της Ιαπωνίας (ARIB - Association of Radio Industries and Businesses, TTC - Telecommunication Technology Committee), της Κορέας (Telecommunications Technology Association - TTA), της Κίνας (CCSA - China Communications Standards Association), και της Β. Αμερικής (ATIS - Alliance for Telecommunications Industry Solutions). Η οργανωτική δομή του 3GPP αποτελείται από τέσσερις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification Groups - TSGs), κάθε μία με αρμοδιότητες πάνω σε διαφορετικά στοιχεία του δικτύου, όπως δείχνει η Εικόνα 9.

Το TSG RAN είναι η ομάδα υπεύθυνη για την ανάπτυξη του LTE/LTE-Advanced, και αποτελεί το σημαντικότερο μέρος της ανάπτυξης της τεχνολογίας. Είναι η ομάδα που ανέπτυξε και τα WCDMA, HSPA. Η ομάδα χωρίζεται με τη σειρά της σε πέντε ομάδες εργασίας (Working Groups - WGs):

1. RAN WG1, υπεύθυνο για τις προδιαγραφές του φυσικού στρώματος,
2. RAN WG2, υπεύθυνο για την ανάπτυξη προδιαγραφών της ασύρματης διασύνδεσης των στρωμάτων 2 και 3.

3. RAN WG3, υπεύθυνο για τις διασυνδέσεις μεταξύ σταθερών κόμβων στο RAN και μεταξύ του RAN και του CN.

4. RAN WG4, υπεύθυνο για τις προδιαγραφές επίδοσης των ραδιοσυχνοτήτων (RF) και της διαχείρισης των πόρων (Radio Resource Management - RRM).

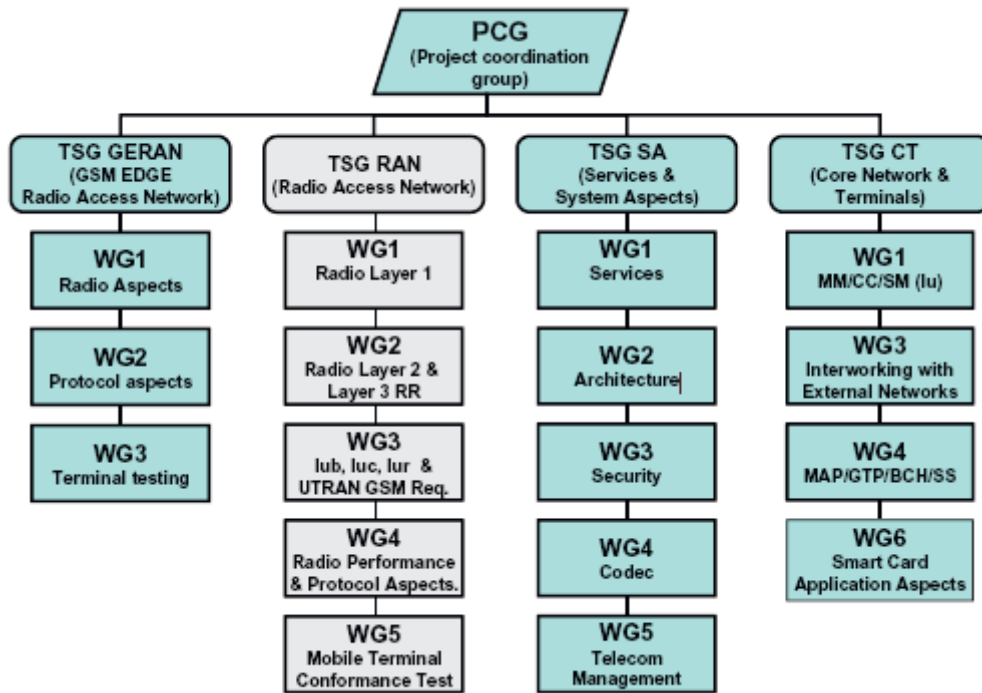
5. RAN WG 5, υπεύθυνο για τη συμμόρφωση των τερματικών με τις προδιαγραφές.

Ο στόχος της ίδρυσης του 3GPP εξαρχής, ήταν να παράγει πρότυπα παγκόσμιας αποδοχής για τρίτης γενιάς κινητά συστήματα. Στην πορεία προστέθηκε και η διατήρηση και ανάπτυξη των προδιαγραφών GSM/EDGE. Πλέον είναι ο αποκλειστικός υπεύθυνος για την ανάπτυξη, διατήρηση και έγκριση των προδιαγραφών για τα UTRA, E-UTRA και GSM/EDGE συστήματα. Με το πέρας του σταδίου έγκρισης, λαμβάνει χώρα η μετατροπή των προδιαγραφών σε πρότυπα, κατάλληλα προσαρμοσμένα για κάθε γεωγραφική περιοχή.

Αξίζει να σημειωθεί πως, αν και ανεξάρτητη, η 3GPP λαμβάνει υπόψη τις συστάσεις της ITU, καθώς και τους περιορισμούς που μπορεί να επιβάλλει μια συγκεκριμένη γεωγραφική ζώνη, όπως λειτουργία σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων ή ειδικές συνθήκες ασφάλειας. Οι προδιαγραφές αναπτύσσονται με το σκεπτικό της απροβλημάτιστης παγκόσμιας περιαγωγής και την εύκολη διακίνηση των τερματικών. Αυτό, δυστυχώς, σημαίνει πως πολλές, τοπικά επιβαλλόμενες προδιαγραφές μετατρέπονται σε καθολικές προδιαγραφές αφού ένα τερματικό πρέπει να καλύπτει τις αυστηρότερες των προδιαγραφών που ενδεχομένως συναντήσει για να εξασφαλιστεί η απροβλημάτιστη περιαγωγή.

Οι προδιαγραφές κάθε έκδοσης δύναται να ενημερωθούν μετά από κάθε TSG συνάντηση, που διοργανώνεται τέσσερις φορές το χρόνο. Τα επίσημα έγγραφα χωρίζονται σε εκδόσεις, με κάθε έκδοση να εμπλουτίζεται με νέα χαρακτηριστικά σε σχέση με την προηγούμενη. Τα χαρακτηριστικά ορίζονται σε Αντικείμενα Εργασίας, που έχουν κανονιστεί από τα TSG.

Τη στιγμή αυτή έχει οριστικοποιηθεί η έκδοση 11, ενώ η έκδοση 12 είναι στο στάδιο της ανάπτυξης με εκτιμώμενη ημερομηνία οριστικοποίησης τον Σεπτέμβριο του 2014.



Εικόνα 9. Η οργανωτική δομή του οργανισμού προτυποποίησης 3GPP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: FEMTOCELLS

FEMTOCELLS

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των femtocells, η ενσωμάτωσή τους σε LTE-A δίκτυα, και οι τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν από την εγκατάστασή τους.

3.1. Εισαγωγή

Στα κυψελοειδή δίκτυα, εκτιμάται ότι τα 2/3 των κλήσεων και πάνω από το 90% των υπηρεσιών δεδομένων συμβαίνουν σε εσωτερικούς χώρους. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά σημαντικό για τους παρόχους κινητής να παρέχουν καλή κάλυψη στο εσωτερικό των κτιρίων, όχι μόνο για υπηρεσίες φωνής, αλλά και βίντεο και άλλες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες καθίστανται όλο και πιο σημαντικές. Ωστόσο, ορισμένες έρευνες δείχνουν ότι το 45% των νοικοκυριών και το 30% των επιχειρήσεων [12], παρουσιάζουν κάποιο πρόβλημα κάλυψης. Η καλή κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους και η υψηλή ποιότητα των υπηρεσιών θα δημιουργήσουν περισσότερα έσοδα για τις επιχειρήσεις, την ενίσχυση της εμπιστοσύνης των συνδρομητών και τη μείωση των αποσυνδέσεων. Από την άλλη πλευρά, η κακή κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους έχει ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα. Ως εκ τούτου, η κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, ιδίως, για τις υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας δεδομένων, είναι μια μεγάλη πρόκληση για τους παρόχους.

Μια τυπική προσέγγιση για την παροχή κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους είναι να χρησιμοποιηθούν macrocells. Αυτή η προσέγγιση, όμως έχει μια σειρά από μειονεκτήματα:

- Προσέγγιση υψηλού κόστους. Για να υπερβεί την απώλεια λόγω των εξωτερικών τοιχωμάτων, θα πρέπει η ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης να αυξηθεί σημαντικά για τον εσωτερικό χρήστη, στερώντας από τους υπόλοιπους χρήστες σημαντικούς πόρους. Η προσέγγιση εγκατάστασης πιο πυκνών υποδομών macrocell σταθμών βάσεων, επίσης χαρακτηρίζεται από μεγάλο κόστος χωρίς τα ανάλογα οφέλη.

- Ένα δίκτυο υψηλής χωρητικότητας χρειάζεται πολλούς εξωτερικούς σταθμούς βάσης, η απόκτηση των οποίων όμως έχει γίνει ιδιαίτερα δύσκολη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

- Οι παρεμβολές και η υψηλή απαιτούμενη κατανάλωση από τους σταθμούς βάσης για τους εσωτερικούς χρήστες καθιστούν λιγότερο ελκυστικό να κατασκευαστεί ένα δίκτυο υψηλής χωρητικότητας με μια τέτοια προσέγγιση. Ενώ, όσο αυξάνεται η πυκνότητα, οι απαιτήσεις για σωστό σχεδιασμό του δικτύου προκειμένου να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα γίνονται εξαιρετικά πολύπλοκες.

- Η διείδυση σε κτίρια σημάτων που λειτουργούν στα 2 GHz ή παραπάνω (όπως συμβαίνει συχνά σε δίκτυα 3G και 4G), είναι αρκετά δύσκολη.

- Η απόδοση του δικτύου (π.χ., ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) σε εσωτερικούς χώρους δεν μπορεί να διασφαλιστεί, ιδίως, στην πλευρά που δεν έχουν οπτική επαφή με τους σταθμούς βάσης. Για να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων, απαιτείται υψηλότερη διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί καλύτερες συνθήκες καναλιού, που μπορεί να επιτευχθούν μόνο σε συνθήκες που είναι κοντά σε σταθμούς βάσης.

Ως εκ τούτου, διαφορετικές λύσεις, όπως picocells ή relaying κόμβοι αποτελούν μια ελκυστική και βιώσιμη επιχειρηματική πρόταση σε περιοχές όπως τα μεγάλα εμπορικά κέντρα, κτίρια γραφείων και μεγάλες εταιρείες. Αυτά τα συστήματα προσφέρονται και εγκαθίστανται από τους παρόχους προσφέροντας καλύτερη κάλυψη, αποφόρτιση κίνησης από το macrocell, ενίσχυση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών και καλύτερες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Με τις λύσεις αυτές, η ορθογωνιότητα στο φάσμα μπορεί να βελτιωθεί, γεγονός που θα οδηγήσει σε υψηλή απόδοση. Επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες καναλιού που επιτρέπει σύστημα υψηλής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών.

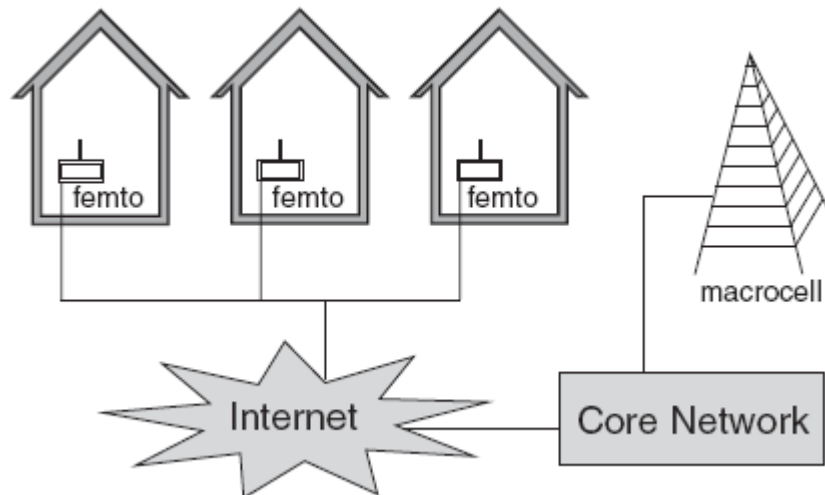
Ακόμη και αν οι προαναφερθείσες λύσεις είναι πιο αποδοτικές από τη χρήση εξωτερικών macrocells για κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, οι λύσεις αυτές εξακολουθούν να είναι σχετικά ακριβές ώστε να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις μικρότερης κλίμακας, όπως μικρά γραφεία και οικιακούς χρήστες (για προσωπικές επικοινωνίες, ψυχαγωγία, κ.λπ.). Αυτή η αγορά δεν έχει τη δυναμική που θα εξασφάλιζε κέρδος στους φορείς εκμετάλλευσης ώστε να αξίζει το αυξημένο κόστος εγκατάστασης ενός picocell. Αντίθετα, η ανάπτυξη των femtocells παρέχει μια καλή ευκαιρία για χαμηλού κόστους εσωτερική λύση για τις προαναφερόμενες περιπτώσεις. Σε αντίθεση με τα picocells, τα femtocells εγκαθίστανται από τους ίδιους τους χρήστες.

Τα femtocells, γνωστά και ως femto σταθμοί βάσης, είναι σημεία πρόσβασης που παρέχουν σύνδεση μεταξύ συσκευών κινητής στο δίκτυο του παρόχου κινητής τηλεφωνίας μέσω της οικιακής DSL, ή άλλης ευρυζωνικής σύνδεσης του ίδιου του χρήστη.

Η έννοια του femtocell για πρώτη φορά μελετήθηκε από τα Bell Lab της Alcatel-Lucent το 1999. Το 2002, η Motorola ανακοίνωσε το πρώτο σταθμό βάσης για οικιακή χρήση. Ωστόσο, δεν ήταν μέχρι το 2005 όταν η έννοια του σταθμού βάσης στο σπίτι, άρχισε να αποκτά ευρύτερη αποδοχή. Το 2006, υιοθετήθηκε ο όρος «femtocell». Τον Φεβρουάριο του 2007, ένας αριθμός εταιρειών παρουσίασε femtocells στο 3GSM World Congress (Βαρκελώνη), ανακοινώνοντας τις πρώτες δοκιμές. Τον Ιούλιο του 2007, το Femto Forum [13] ιδρύθηκε για την προώθηση της τεχνολογίας femtocell και την ανάπτυξή της σε όλο τον κόσμο. Όταν οι προτυποποιήσεις HNodeB (HNB) και HeNodeB (HeNB) εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην έκδοση 8 του LTE, ορίζοντας έτσι την υλοποίηση των femtocells σε περιβάλλον LTE, αποδείκνυε ότι είχε γίνει μια ευρέως αποδεκτή τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης.

3.2. Λειτουργικότητα

Λειτουργικά, η μονάδα femtocell ενσωματώνει την λειτουργικότητα ενός τυπικού σταθμού βάσης. Ένα femtocell μοιάζει με ένα σημείο πρόσβασης Wi-Fi. Εντούτοις, περιέχει επίσης στοιχεία λειτουργικότητας RNC (Radio Network Controller) στην περίπτωση του GSM. Έτσι, δεν απαιτεί την ύπαρξη macrocell δικτύου, απαιτώντας μόνο σύνδεση δεδομένων DSL ή cable με το Internet, μέσω του οποίου συνδέεται με το δίκτυο κορμού κινητής τηλεφωνίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Ένα femtocell φαίνεται σαν ένα σημείο πρόσβασης Wifi (Wifi Access Point). Ωστόσο, στο εσωτερικό, είναι σημαντικά διαφορετικό αφού το πρώτο υλοποιεί τεχνολογίες Wifi (πρότυπα IEEE 802.11b, 802.11g και 802.11n), ενώ το δεύτερο υλοποιεί τεχνολογίες όπως GSM / GPRS / EDGE, UMTS / HSPA / LTE / LTE-A και mobile WiMAX (IEEE 802.16e).



Εικόνα 10. Τα femtocells συνδέονται με το δίκτυο κορμού (CN) διαμέσου της backhaul σύνδεσης του χρήστη.

Οι τεχνολογίες πίσω από τα femtocells είναι τεχνολογίες κινητών δικτύων. Δεδομένου ότι η βασική κινητήρια δύναμη της ανάπτυξης femtocells είναι η ζήτηση για όλο και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε εσωτερικούς χώρους, το ενδιαφέρον για τα femtocells έχει αυξηθεί κατακόρυφα.

Χαρακτηριστικό των femtocells είναι πως εγκαθίστανται από τους χρήστες και όχι από τους διαχειριστές των δικτύων. Για αυτό θα πρέπει να θεωρούνται ως ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης. Για να εξασφαλιστεί η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση στα macrocells και στα γειτονικά femtocells, ένα femtocell πρέπει να είναι σε θέση να ρυθμίσει αυτόματα τις παραμέτρους λειτουργίας του. Η αυτόματη ρύθμιση του femtocell μπορεί να χωριστεί στη φάση αίσθησης του περιβάλλοντος (sensing), που γίνεται συνήθως μέσω σάρωσης και κατά την οποία θα πρέπει να αξιολογηθούν οι συνθήκες της ασύρματης μετάδοσης στο περιβάλλον του femtocell, και στη φάση αυτό-ρύθμισης, στην οποία ρυθμίζονται παράμετροι όπως η ισχύς μετάδοσης στο downlink, κατανομή πόρων κ.λπ. Η αυτόματη ρύθμιση των femtocell είναι το κλειδί για την επιτυχή ανάπτυξη της τεχνολογίας. Πριν την εγκατάσταση των femtocells, οι πάροχοι πρέπει να ελέγξουν τα σενάρια ανάπτυξης femtocell μέσα από δοκιμές και προσομοιώσεις. Ο κύριος σκοπός της προσομοίωσης και των δοκιμών είναι να μάθουμε τον αντίκτυπο της ανάπτυξης femtocell στο macrocell στρώμα καθώς και πώς τα femtocells μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο, όπως θα φανεί και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Σύμφωνα με την ικανότητά τους, τα femtocells μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, δηλαδή της μικρής κλίμακας femtocell, η οποία μπορεί να υποστηρίξει 3-6 ταυτόχρονους χρήστες, και της μεγαλύτερης, η οποία μπορεί να υποστηρίξει 8-16 χρήστες και προορίζεται για τις μεγάλες επιχειρήσεις. Η βασική ιδέα πίσω από τα femtocells είναι η παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Η πιθανότητα όλοι οι συνδρομητές να χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα το femtocell για τέτοιες υπηρεσίες θεωρήθηκε μικρή, και αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος αριθμός υποστήριξης ταυτόχρονων χρηστών. Επιπλέον, ο αριθμός περιορίζεται και από το περιορισμένο εύρος ζώνης του ADSL uplink.

Ο συνδρομητής ενός femtocell είναι ένας χρήστης εγγεγραμμένος σε αυτό. Οι συνδρομητές έτσι ορίζονται ως οι νόμιμοι χρήστες του femtocell, και είναι συνήθως τα κινητά

τερματικά του ιδιοκτήτη του femtocell και συνήθως των τερματικών της στενής οικογένειά τους και φίλων. Τα τερματικά που εξυπηρετούνται από το femtocell, αναφέρονται ως femto UE ή femto χρήστες.

Τα femtocells μπορούν να ταξινομηθούν και με βάση την τεχνολογία για την οποία έχουν σχεδιαστεί: UMTS femtocell, GSM femtocell, WiMAX femtocell, και ούτω καθεξής. Κάθε τύπος απαιτεί διαφορετική υλοποίηση προκειμένου να ενσωματωθεί στο αντίστοιχο δίκτυο. Σε επόμενο υποκεφάλαιο περιγράψουμε αναλυτικά το LTE/LTE-Advanced femtocell.

Τέλος, τα femtocells ταξινομούνται βάσει της λειτουργίας πρόσβασης που υιοθετούν. Υπάρχουν τρεις πιθανές μέθοδοι πρόσβασης, έκαστη με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα femtocells δημόσιας πρόσβασης, ιδιωτικής πρόσβασης και υβριδικής πρόσβασης.

Femtocells δημόσιας πρόσβασης. Σε δίκτυα femtocells, ένας εξωτερικός χρήστης θα μπορούσε να λαμβάνει ισχυρότερο σήμα από ένα κοντινό femtocell από ό,τι από ένα μακρινό macrocell. Με δημόσια πρόσβαση, σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης θα συνδεθεί με το femtocell ανεξάρτητα αν είναι ιδιοκτήτης ή συνδρομητής της υπηρεσίας femtocell. Η μέθοδος αυτή ωφελεί τους χρήστες σε εξωτερικούς χώρους, οι οποίοι είναι σε θέση να κάνουν χρήση των κοντινών femtocells, μειώνοντας έτσι τη συνολική χρήση των πόρων του συστήματος (ισχύς, συχνότητα) και ως εκ τούτου και τις παρεμβολές. Αντίστοιχη κατάσταση ισχύει και μεταξύ γειτονικών femtocells. Υπάρχει η πιθανότητα (για παράδειγμα, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή πολυώροφα κτίρια), η ισχύς του σήματος των γειτονικών femtocells να είναι υψηλότερη από το femtocell του πελάτη. Με τα femtocells δημόσιας πρόσβασης, ο χρήστης απλά θα συνδεθεί στο femtocell με το καλύτερο σήμα.

Ιδιωτικής πρόσβασης femtocells. Στην ιδιωτική πρόσβαση, μόνο μια λίστα εγγεγραμμένων χρηστών – συνδρομητών μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα femtocell. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται Closed Subscriber Group (CSG). Μια τέτοια προσέγγιση όμως, όπως θα δούμε αργότερα, αυξάνει σημαντικά τις παρεμβολές. Για παράδειγμα, περαστικοί χρήστες που λαμβάνουν χαμηλό σήμα που προέρχεται από το macrocell, θα πρέπει να αυξήσουν την ισχύ τους, προκαλώντας μεγαλύτερη παρεμβολή στα γειτονικά femtocells.

Femtocells υβριδικής πρόσβασης. Οι ιδιοκτήτης femtocell έχει πληρώσει και για το femtocell, αλλά και για την ευρυζωνική σύνδεση με το Διαδίκτυο την οποία χρησιμοποιεί το femtocell. Αυτός είναι ο λόγος που η ανοιχτή πρόσβαση δεν είναι επιθυμητή: Θεωρείται άδικο να έχουν όλοι οι χρήστες που περνούν κοντά στο κτίριο του πελάτη το δικαίωμα να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες των femtocells, ενώ μόνο ο ιδιοκτήτης του femtocell να επιβαρύνεται οικονομικά. Έρευνες [14][15] δείχνουν ότι οι πελάτες θα προτιμούσαν femtocells σε μια ιδιωτική λειτουργία πρόσβασης, όπου μόνο λίγοι χρήστες επιτρέπεται να συνδεθούν με το femtocell. Από την άλλη, η λειτουργία κλειστής πρόσβασης δημιουργεί ισχυρές παρεμβολές σε παρακείμενους χρήστες εντός της εμβέλειάς τους. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπως μεγάλες επιχειρήσεις, πολλά femtocells θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για να καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή, καθώς επίσης και πολλούς διαφορετικούς περαστικούς χρήστες, αναδεικνύοντας την ανάγκη για δημόσιας πρόσβασης femtocells σε σενάρια πέραν της οικιακής χρήσης.

Οι αντικρουόμενες αυτές απαιτήσεις οδηγούν στην υλοποίηση femtocell υβριδικής πρόσβασης, δηλαδή femtocells που επιλέγουν μεταξύ λειτουργίας κλειστής και ανοιχτής πρόσβασης ανάλογα τις περιβάλλουσες συνθήκες. Οι μεταβολές μπορεί να γίνονται στο πεδίο του χρόνου, όπου ανάλογα τα επίπεδα απαιτήσεων σε πόρους και τις παρεμβολές στο δίκτυο, το

femtocell θα μετατρέπεται από κλειστή πρόσβασης σε ανοιχτή, αλλά και στο πεδίο της συχνότητας, όπου μη-συνδρομητές θα δικαιούνται πρόσβαση μόνο σε ένα μέρος του διαθέσιμου φάσματος.

Η επιλογή τύπου πρόσβασης πέραν των ανωτέρω, δημιουργεί και ορισμένες ανησυχίες που πρέπει να διευθετηθούν σχετικά με τις κλήσεις έκτακτης ανάγκης: Αν δηλαδή, τα femtocells ανεξαρτήτως λειτουργίας πρόσβασης υποχρεούνται να παρέχουν τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των παρόχων Voice over IP (VoIP) τηλεφωνίας. Αυτός είναι και ο λόγος που σε περιπτώσεις οικιακής χρήσης, ακόμη και αν έχει προτιμηθεί ιδιωτική πρόσβαση, ορισμένοι πόροι θα μπορούσαν να απελευθερώνονται σε λειτουργία δημόσιας πρόσβασης, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η δυνατότητα υπηρεσιών κλήσεων έκτακτης ανάγκης.

Πριν επεκταθούμε λεπτομερώς στα χαρακτηριστικά και τις λεπτομέρειες των femtocells, αξίζει να επισημάνουμε τις κύριες διαφοροποιήσεις τους με τα picocells. Συνοπτικά, ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις κύριες διαφορές μεταξύ picocells και femtocells.

Πίνακας 5. Κύριες διαφορές μεταξύ των picocells και femtocells.

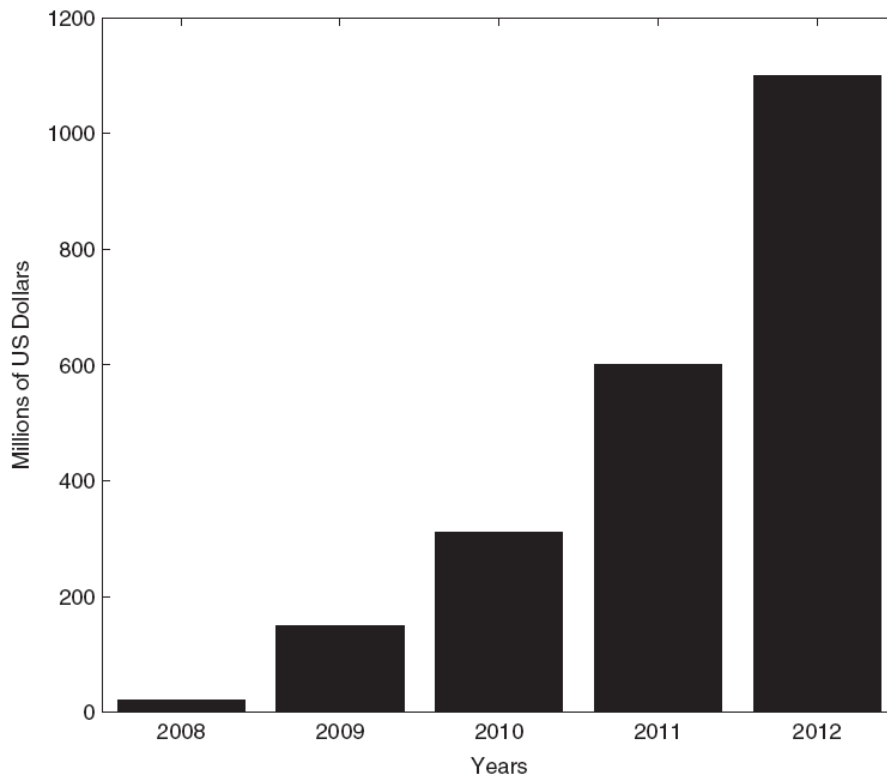
Παράμετρος	Picocells	Femtocells
Εγκατάσταση	Από τον διαχειριστή	Από τον χρήστη
Σύνδεση με το CN	Οπτική ίνα/Ομοαξονικό	ADSL, cable
Κόστος	Μικρό	Πολύ μικρό
Χωρητικότητα	10-50 χρήστες	3-5 χρήστες
Εμβέλεια	<100 m	<30 m

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, μπορούμε να θεωρήσουμε τα femtocells ως μικρά picocells όπου οι ιδιότητές τους έχουν σμικρυνθεί για να μειωθεί το κόστος και να απλοποιηθεί η εγκατάσταση. Πέραν των «συρρικνωμένων» ιδιοτήτων τους (εμβέλεια, ισχύς, χωρητικότητα), παρουσιάζουν και δύο σημαντικές διαφορές όσο αφορά την υλοποίηση, και συγκεκριμένα στη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, και στον τρόπο εγκατάστασης.

Τα femtocells, σε αντίθεση με τα picocells, είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο του παρόχου μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης των χρηστών. Το femtocell είναι ένας αυτόνομος σταθμός βάσης και συνδέεται με το δίκτυο κορμού (CN), χρησιμοποιώντας IP. Για να διατηρηθεί η αυτονομία, το femtocell είναι αυτο-ρυθμιζόμενο σε αντίθεση με το picocell που ρυθμίζεται απευθείας από τον πάροχο. Αυτό υποδηλώνει πως η διασύνδεση μεταξύ του femtocell και του βασικού δικτύου πρέπει να είναι απλή για να αποφευχθεί οποιαδήποτε ανάγκη δράσης από τον πάροχο.

Όσο αφορά την εγκατάσταση, τα femtocells εγκαθίστανται από τους πελάτες μέσα στο σπίτι τους ενώ στην περίπτωση των picocells γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό κατόπιν προσεκτικής σχεδίασης και μελέτης. Αυτό σημαίνει πως η εγκατάσταση για τον χρήστη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη (Plug and Play). Στην ιδανική περίπτωση, ο χρήστης πρέπει μόνο να συνδέσει την παροχή ρεύματος και το femtocell στην ευρυζωνική σύνδεση. Ως εκ τούτου η αυτο-ρύθμιση είναι πολύ σημαντική, καθώς αν έχουν αναπτυχθεί πολλά femtocells, οι επιχειρηματίες δεν μπορούν να αντέξουν οικονομικά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων όλων των femtocells, προκειμένου να μειωθεί η παρεμβολή με τα macrocells. Παρόλα αυτά, αυτό δε σημαίνει ότι τα femtocells δε μπορούν να αναπτυχθούν από τους ίδιους τους παρόχους, επιλέγοντας μια προσέγγιση παρόμοια με τα picocells, οπότε και υιοθετείται η λειτουργία δημόσιας πρόσβασης, και εγκαθίστανται πολλά femtocells για να εξασφαλιστεί η κάλυψη.

3.3. Πλεονεκτήματα



Εικόνα 11. Ανάπτυξη της αγοράς των femtocells τα τελευταία 5 έτη.

Τα femtocells παρουσίασαν αλματώδη ανάπτυξη, και αναμένεται ακόμα μεγαλύτερη τα επόμενα χρόνια [16] (Εικόνα 11 και Εικόνα 12). Η κυριαρχία τους στην αγορά σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις εξαρτάται από πλήθος παραγόντων. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

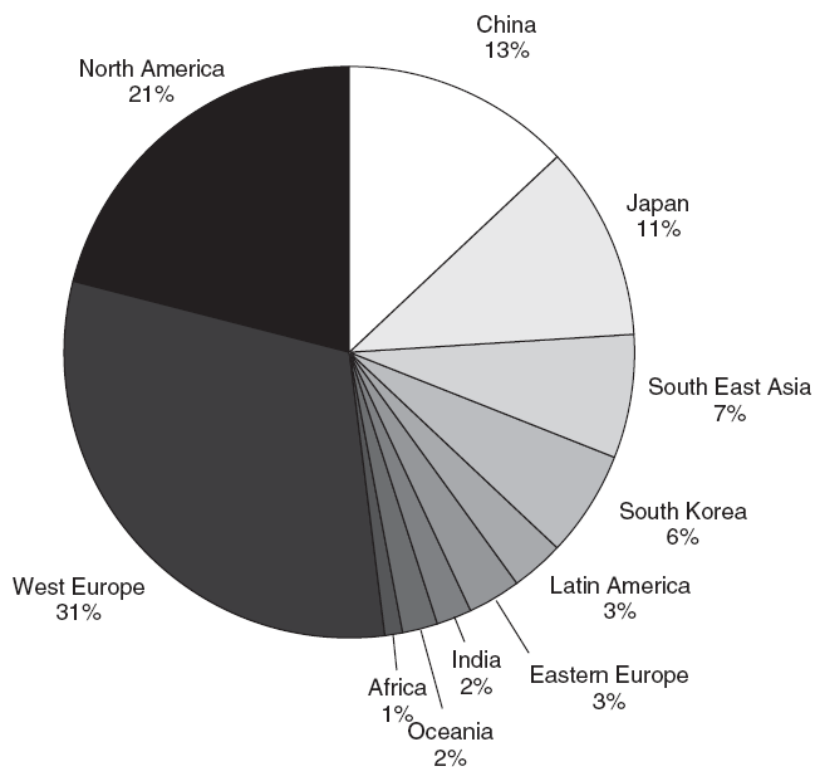
- Παρέχουν κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους όπου τα macrocells δεν μπορούν.
- Απαλλάσσουν φόρτο από το στρώμα macrocell βελτιώνοντας την απόδοσή τους.
- Θεωρώντας καλή απομόνωση, η προσθήκη ενός στρώματος femtocell βελτιώνει σημαντικά την συνολική χωρητικότητα του δικτύου με την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος.

- Μπορούν να προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας στα τερματικά. Οι απώλειες μετάδοσης λόγω τοιχωμάτων (penetration loss) προς το εσωτερικά εγκατεστημένο femtocell είναι πολύ μικρότερες από ότι στην διαδρομή ως τον εξωτερικό σταθμό βάσης του macrocell, και έτσι η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής του UE μειώνεται. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστεί στην προσπάθεια παροχής υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας δεδομένων σε κινητά τερματικά.

- Εφόσον τα femtocells χρειάζεται να ενεργοποιηθούν μόνο όταν οι χρήστες βρίσκονται στο σπίτι ή στην εργασία, η χρήση τους είναι πιο «πράσινη» από τα macrocells. Η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό από το κόστος ενός δικτύου για τους χειριστές. Ένας σταθμός βάσης καταναλώνει πολύ μεγαλύτερη ισχύ από εκείνη που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση και λήψη σημάτων. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες: Πρώτον, η αποτελεσματικότητα των ενισχυτών είναι πολύ χαμηλή. Δεύτερον, ένας σταθμός βάσης απαιτεί ένα αρκετά κοστοβόρο σύστημα κλιματισμού, ώστε να διατηρείται η

σωστή θερμοκρασία. Τρίτον, ένα εφεδρικό σύστημα απαιτείται σε περίπτωση απώλειας ισχύος. Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει στην αύξηση της ανάγκης για πιο «πράσινα» συστήματα, όπως τα femtocells.

- Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας (έως 70-80%) μπορεί να αποφορτιστεί από τα macrocells, λιγότεροι εξωτερικοί σταθμοί βάσης θα χρειαστούν. Η μείωση των macrocell θα οδηγήσει σε μια τεράστια εξοικονόμηση κόστους για τις εταιρείες σε ασύρματα δίκτυα πρόσβασης. Επιπλέον, η μείωση των macrocell απλοποιεί τη μελέτη του χώρου και της διαδικασίας σχεδιασμού των δικτύων. Θα οδηγήσει επίσης σε λιγότερο ενοίκιο που θα πρέπει να καταβληθεί για τη χρήση των χώρων σταθμού βάσης. Στην εγκατάσταση των 3G/4G δικτύων, η απόκτηση χώρου από τους παρόχους για εγκαταστάσεις αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση, ιδίως στις αστικές περιοχές καθώς έχει γίνει όλο και πιο δύσκολο να βρεθούν διαθέσιμοι χώροι για τους σταθμούς βάσης.



Εικόνα 12. Διείσδυση της τεχνολογίας femtocells ανά τον κόσμο.

Τα femtocells μπορούν να βοηθήσουν τους παρόχους να προσφέρουν με οικονομικά βιώσιμο τρόπο, μεγαλύτερης χωρητικότητας δίκτυα και να δημιουργήσουν ένα πιο αποδοτικό σχέδιο αναβάθμισης του δικτύου τους με μειωμένους κινδύνους και οικονομικές επιβαρύνσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα femtocells είναι λύσεις χαμηλού κόστους για εσωτερική κάλυψη σε σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις και πως πλέον οι χρήστες μοιράζονται ένα σημαντικό μέρος της εγκατάστασης (και της συντήρησης) των υποδομών του δικτύου. Επιπλέον, τα femtocells βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα των υπηρεσιών, αυξάνοντας έτσι την εμπιστοσύνη των πελατών και τη μείωση των αποσυνδέσεων, ένα μείζον ζήτημα που μπορεί να κοστίζει στους παρόχους ένα σημαντικό ποσό. Έρευνες δείχνουν ότι η κακή ποιότητα των υπηρεσιών είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για έναν συνδρομητή να αφήσει μια εταιρεία κινητής τηλεφωνίας. Τα femtocells θα βοηθήσουν τους παρόχους κινητών επικοινωνιών να

προωθήσουν τη χρήση υπηρεσιών δεδομένων με την παροχή σύνθετων υπηρεσιών (για παράδειγμα, μέσω σχεδίων ζώνης στο σπίτι και συνδυαστικά πακέτα), το οποίο θα ενισχύσει το μέσο κέρδος ανά χρήστη (ARPU), καθώς έχει αποδειχτεί πως οι υπηρεσίες φωνής μόνο δεν είναι πλέον αρκετές για ένα θετικό ARPU.

Συνολικά, μπορούμε να πούμε πως σε σύγκριση με τα picocells και άλλες εσωτερικές τεχνολογίες, τα femtocells είναι μια λύση χαμηλού κόστους για την αύξηση της κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους και τη βελτίωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Εξυπηρετούν τον ιδιοκτήτη παρέχοντας μια απρόσκοπτη εμπειρία χρήστη σε εσωτερικούς χώρους, στην εργασία, εν κινήσει ή στο σπίτι, και να προσφέρει τη βάση για συγκλίνουσες υπηρεσίες επόμενης γενιάς που συνδυάζουν φωνή, βίντεο και δεδομένα σε μία συσκευή.

Για τους συνδρομητές, όσους δηλαδή βίωναν καθόλου ή κακή κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους στο σπίτι, τα femtocells τους δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τα κινητά τους στο σπίτι για υπηρεσίες φωνής, πολυμέσων, βίντεο και υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Τα femtocells τους προσφέρουν ένα ενιαίο βιβλίο διευθύνσεων και ένα κοινό λογαριασμό χρέωσης για την γραμμή ευρυζωνικών συνδέσεων και τη χρήση κινητού τηλεφώνου. Οι χρήστες μπορούν να επωφεληθούν από υπηρεσίες που εκμεταλλεύονται την ατομικότητα των femtocells και από πακέτα υπηρεσιών που θα είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με το αν οι υπηρεσίες παρέχονταν από περισσότερους από έναν πάροχο. Το femtocell μπορεί να λειτουργήσει επίσης ως εστιακό σημείο για τη σύνδεση όλων των εσωτερικών συσκευών σε ένα διακομιστή στο σπίτι και να λειτουργεί ως πύλη για τη σύνδεση όλων των συσκευών στο Internet.

Όπως περιγράφεται στο [16], οι νέες υπηρεσίες μπορούν να χωριστούν σε δύο είδη εφαρμογών: Femtozone Υπηρεσίες και Υπηρεσίες Connected Home. Οι υπηρεσίες «Femtozone» είναι δικτυακές / φωνητικές υπηρεσίες που ενεργοποιούνται όταν το τηλέφωνο εισέρχεται στην περιοχή κάλυψης του femtocell.. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Λήψη ενός SMS όταν κάποιος εισέρχεται ή εξέρχεται από το σπίτι.
- Ένας εικονικός αριθμός που θα εκπροσωπεί όλα τα άτομα εκείνη τη στιγμή στο σπίτι.

Στις υπηρεσίες «Connected Home», το τηλέφωνο συνδέεται στο LAN μέσω του femtocell, ώστε να μπορεί να έχει πρόσβαση σε ένα σύνολο από υπηρεσίες, όπως για παράδειγμα:

- Το ανέβασμα μουσικής από το κινητό τηλέφωνο στον υπολογιστή,
- Τη χρήση του κινητού τηλεφώνου για τον έλεγχο άλλων συσκευών (π.χ. τηλεόραση).

Τα femtocells μπορούν επίσης να παραδώσουν συγκλίνουσες υπηρεσίες (φωνή, βίντεο και δεδομένα) στο σπίτι και επιτρέπουν στους χρήστες μια απρόσκοπτη εμπειρία τόσο σε εξωτερικά όσο και εσωτερικά περιβάλλοντα με εξατομικευμένες υπηρεσίες. Η χρήση αυτών των υπηρεσιών εξυπηρετείται σημαντικά και από την επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των UEs μέσα από τη χρήση των femtocells δεδομένου ότι η ισχύς εκπομπής του UE μειώνεται σημαντικά. Σημαντική συνέπεια του τελευταίου είναι να μειώνονται και οι ανησυχίες για την υγεία σχετικά με τη χρήση κινητών συσκευών.

Αν και μέχρι στιγμής, έχουμε συζητήσει μόνο τα οφέλη που τα femtocells μπορεί να φέρουν στους παρόχους, η ανάπτυξη των femtocells ενδεχομένως προκαλεί και κάποια προβλήματα στις εταιρείες κινητών δικτύων. Ένα από τα μειονεκτήματα των femtocells για τους παρόχους είναι η δημιουργία παρεμβολών, ο έλεγχος των οποίων γίνεται πιο τυχαίος και πιο δύσκολος. Προκειμένου να βελτιωθεί η συνολική χωρητικότητα του δικτύου και η φασματική

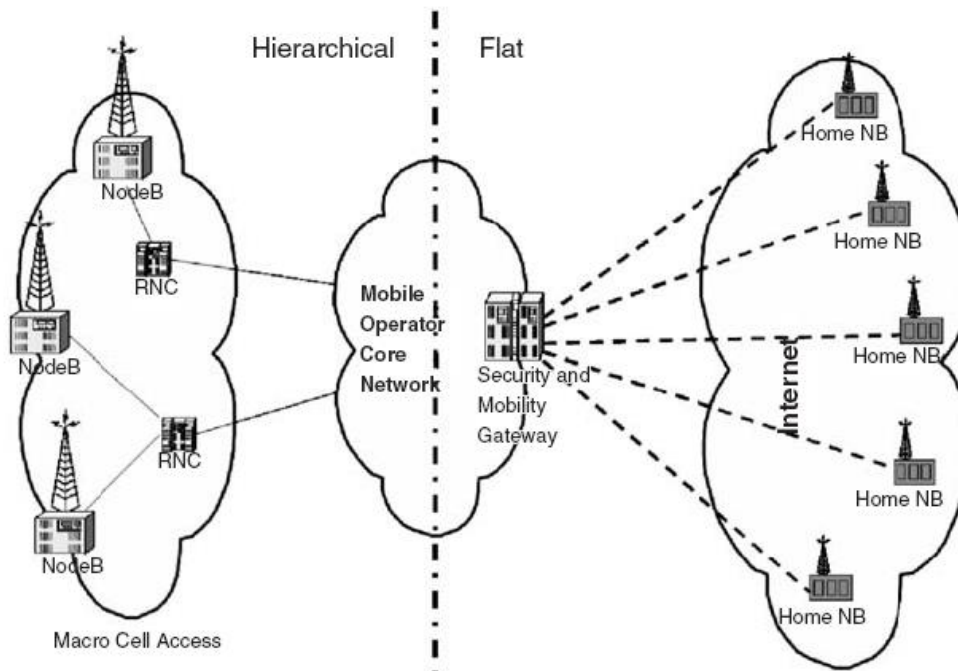
απόδοση, είναι ωφέλιμο για τους παρόχους να παρατάσουν τα macrocells και τα femtocells στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.

Με αυτό τον τρόπο, οι παρεμβολές από femtocells μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην λειτουργία των macrocells, προκαλώντας για παράδειγμα, τρύπες στην περιοχή κάλυψης. Εφόσον οι πάροχοι δεν θα είναι σε θέση να έχουν πρόσβαση στις εγκαταστάσεις των συνδρομητών, η αυτό-ρύθμιση των femtocells καθίσταται πολύ σημαντική, όπως και η δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης και συντήρησης από τους παρόχους. Το θέμα των παρεμβολών που αποτελεί και το θέμα της παρούσης εργασίας, αλλά και οι υπόλοιπες τεχνικές προκλήσεις κατά την εγκατάσταση και λειτουργία των femtocells αναλύονται εκτενέστερα σε επόμενα κεφάλαια.

3.4. Αρχιτεκτονική LTE-A femtocells

Ενώ η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας έχει υιοθετήσει επιτυχώς την τεχνολογία, μια σειρά από βασικές τεχνικές προκλήσεις πρέπει πρώτα να αντιμετωπιστεί. Μια τέτοια πρόκληση ήταν και ο καθορισμός και τυποποίηση της ενσωμάτωσης femtocells σε κινητά δίκτυα παροχής υπηρεσιών. Σε αντίθεση με τα macrocells, τα δίκτυα femtocells απαιτούν από τους παρόχους να ενσωματώσουν εκατοντάδες χιλιάδες χαμηλής δυναμικότητας σταθμούς βάσης στο σπίτι, που μπορεί να μετακινηθούν, προστεθούν, και να αλλαχθούν από τους τελικούς χρήστες ανά πάσα στιγμή. Αυτό εγείρει μια σειρά από σημαντικά ζητήματα για την ενσωμάτωση των femtocells:

1. Είναι επεκτάσιμη;
2. Είναι ασφαλής;
3. Είναι τυποποιημένη;

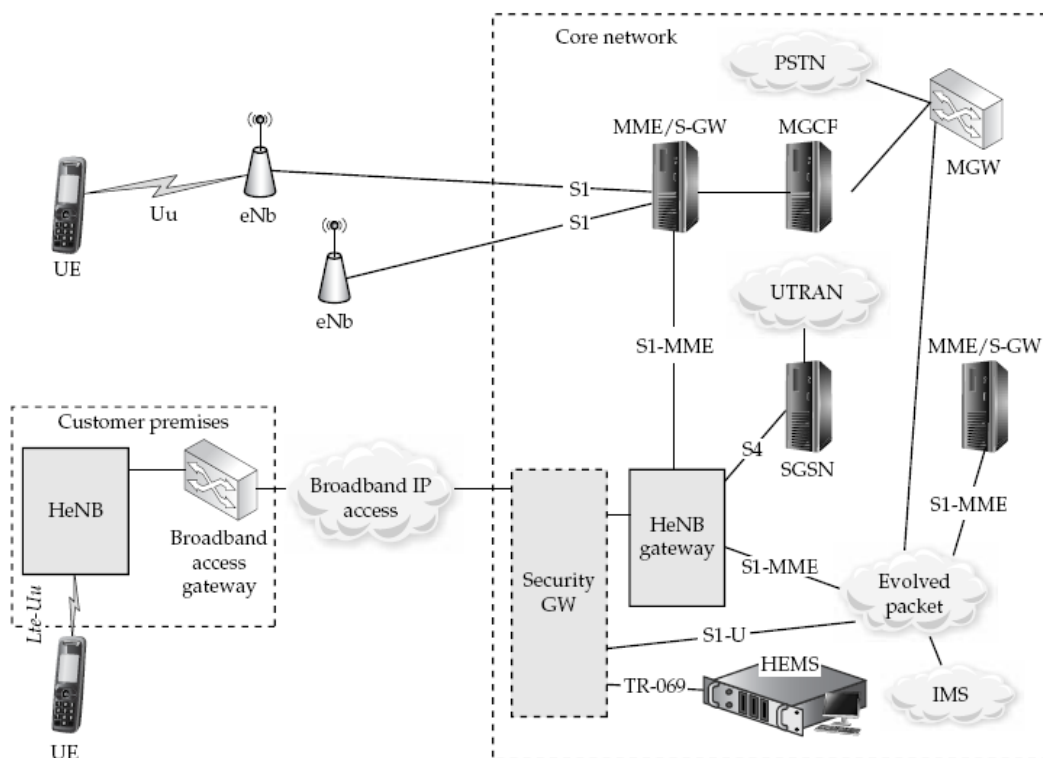


Εικόνα 13. Η ενσωμάτωση των femtocells στην αρχιτεκτονική του δικτύου.

Επειδή η τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει ισχυρές δυνατότητες επεξεργασίας ακόμη και σε χαμηλού κόστους σταθμούς βάσης, οι στοίβες πρωτοκόλλου δικτύου μπορεί να

διαφοροποιηθούν. Επιπλέον, το πρότυπο Internet Protocol (IP) αντικατέστησε γρήγορα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα μετάδοσης τηλεπικοινωνιών. Ο συνδυασμός των παραπάνω καθιστά δυνατή την χρήση δικτύων όπως το Internet ως μεταφορά backhaul στο δίκτυο του παρόχου κινητής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13.

Για το LTE/LTE-A που μας απασχολεί στην παρούσα εργασία, η τυποποίηση για τα femtocells αποτελεί μέρος του αρχικού προτύπου βάσης [18], το οποίο επιτρέπει στα ζητήματα των LTE femtocells να αντιμετωπιστούν παράλληλα με την ανάπτυξη του LTE. Τα femtocells μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην ανάπτυξη των LTE υπηρεσιών από την άποψη ότι η κατανομή των LTE NodeB σταθμών μπορεί να είναι αρκετά λιγότερο πυκνή. Χρησιμοποιώντας μικρά δίκτυα, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να επεκτείνουν την κάλυψη σε οποιαδήποτε θέση όπου η ευρυζωνική πρόσβαση είναι διαθέσιμη. Αυτό αυξάνει σημαντικά την ικανότητα της εταιρείας να παρέχει LTE κάλυψη σε περιοχές που διαφορετικά δεν θα ήταν εφικτό.



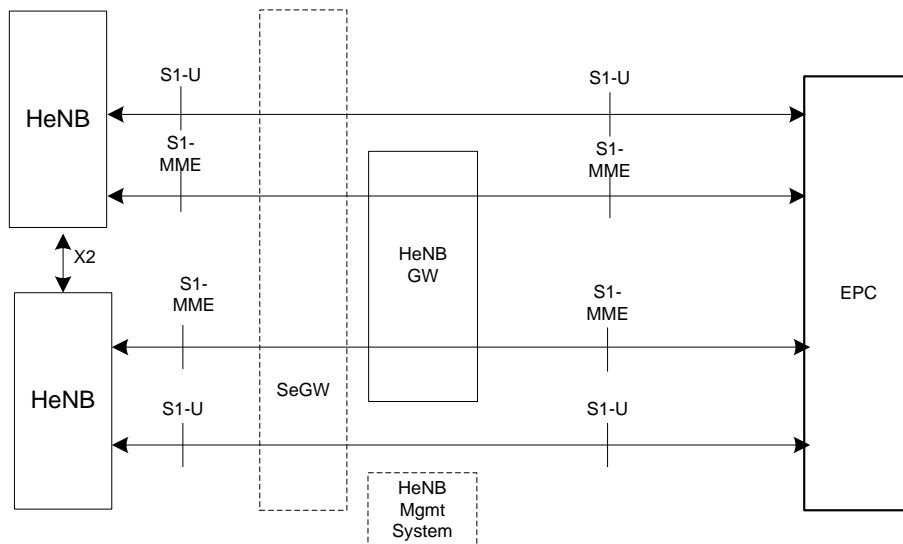
Εικόνα 14. Διάγραμμα ενός LTE δικτύου που περιλαμβάνει ένα δίκτυο femtocell.

Η Εικόνα 14 παρουσιάζει ένα υψηλού επιπέδου διάγραμμα ενός LTE δικτύου που περιλαμβάνει ένα δίκτυο femtocell. Το UE επικοινωνεί ασύρματα με ένα HeNodeB (LTE-A femtocell). Το HeNB αποτελεί μια μικρογραφία του eNodeB παρέχοντας κάλυψη LTE στο σπίτι του πελάτη. Τα HeNB διασυνδέονται με το δίκτυο του παρόχου κινητής μέσω του ευρυζωνικού δικτύου διαμέσου μιας πύλης ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως και σε όλους τους τύπους femtocells. Το δίκτυο κορμού του παρόχου της κινητής τηλεφωνίας αποκτά πρόσβαση στο HeNB που είναι συνδεδεμένο στην συσκευή ευρυζωνικής πρόσβασης μέσω μιας πύλης ασφαλείας. Η πύλη ασφαλείας χρησιμοποιείται για την προστασία του δικτύου κορμού από επιθέσεις. Από την αξιόπιστη πλευρά της πύλης ασφαλείας βρίσκεται η πύλη HeNB GW. Η HeNB GW είναι υπεύθυνη για τη συγκέντρωση της κυκλοφορίας από ένα μεγάλο αριθμό HeNBs και τη διασύνδεσή τους με το κεντρικό δίκτυο EPC. Η διεπαφή S1-MME μεταφέρει δεδομένα χρησιμοποιώντας την LTE S1-

MME διεπαφή. Το HeNB διασυνδέεται με το EPC χρησιμοποιώντας την διεπαφή LTE S1-U διαμέσου της πύλης ασφαλείας.

Η Εικόνα 15 παρουσιάζει τη λογική της αρχιτεκτονικής για τα HeNB. Οι λειτουργικές μονάδες που φαίνονται είναι κοινές με αυτές για το HNB (3G femtocell). Η HeNB GW εμφανίζεται στο MME ως eNB, ενώ η HeNB GW εμφανίζεται στο HeNB ως MME. Η S1 διεπαφή μεταξύ του HeNB και του EPC είναι η ίδια, ανεξάρτητα από το αν το HeNB είναι συνδεδεμένο με το EPC μέσω HeNB GW ή όχι. Η HeNB GW πρέπει να συνδέεται με το EPC με τέτοιο τρόπο ώστε η εισερχόμενη και εξερχόμενη κινητικότητα σε κυψέλες που εξυπηρετούνται από την HeNB GW δεν απαιτούν κατ' ανάγκην μεταπομπή (handover) μεταξύ των MME. Ένα HeNB εξυπηρετεί μόνο ένα κελί.

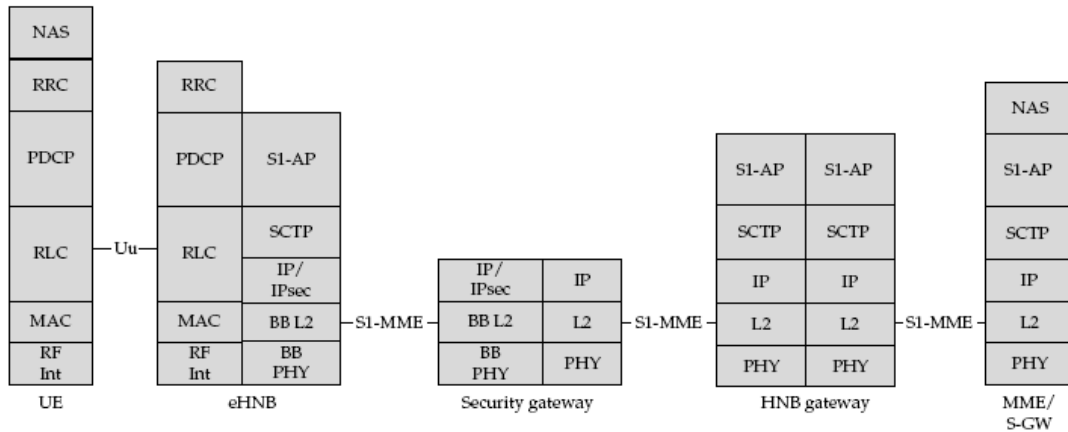
Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται από το HeNB πρέπει να είναι οι ίδιες με εκείνες που υποστηρίζονται από eNodeB (με κάποιες πιθανές εξαιρέσεις) και οι διαδικασίες που τρέχουν μεταξύ HeNB και του EPC θα πρέπει να είναι οι ίδιες με εκείνες μεταξύ eNodeB και του EPC. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι πως βάση των προδιαγραφών επιτρέπεται η επικοινωνία των HeNB μέσω της X2 σηματοδοσίας προκειμένου να συντονίζονται για διαδικασίες κατανομής πόρων, αποφυγής παρεμβολών και μεταπομπών.



Εικόνα 15. Λογικό μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου femtocells
(Πηγή : 3rd Generation Partnership Project)

Όσο αφορά τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας, η Εικόνα 16 δείχνει την στοίβα πρωτοκόλλου ελέγχου που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό δικτύωσης των LTE femtocell. Η στοίβα πρωτοκόλλου χρήστη είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για την σύνδεση με το eNodeB αφού το UE βλέπει το HeNB σαν eNodeB. Στο φυσικό επίπεδο υπάρχει διεπαφή RF.

Πάνω από το στρώμα MAC, τα υψηλότερα στρώματα των πρωτοκόλλων ελέγχου του UE χρησιμοποιούν το Radio Link Control (RLC) υπόστρωμα για να αποκτήσουν πρόσβαση στα διάφορα κανάλια πάνω από τα οποία θα επικοινωνεί με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Το RLC παρέχει παράδοση των μηνυμάτων χωρίς λάθη μέσω μηχανισμών εντοπισμού σφαλμάτων, ταυτοποίησης των μηνυμάτων και αναμετάδοσής τους. Το πρωτόκολλο Packet Data Convergence Protocol (PDCP) εκτελεί συμπίεση επικεφαλίδας, αυξάνει την αξιοπιστία της παράδοσης του πακέτου και παρέχει κρυπτογράφηση και μεταφορά των δεδομένων του πρωτοκόλλου ελέγχου



Εικόνα 16. Η στοίβα πρωτοκόλλου ελέγχου που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό δικτύωσης των LTE femtocells.

Το Radio Resource Control (RRC), όπως υποδηλώνει το όνομα, είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των πόρων που ανατίθενται στα UE. Το RRC εγκαθιστά και απελευθερώνει κανάλια, συμπεριλαμβανομένων των καναλιών σηματοδότησης. Οι μετρήσεις των ραδιοσημάτων ενεργοποιούνται και αναφέρονται στο RRC, επιτρέποντάς του να εκτελεί τη διαχείριση της κινητικότητας. Η διαχείριση της κινητικότητας περιλαμβάνει τη διαπίστωση αν μια κλήση πρέπει να μεταβιβάζεται (handover), την επιλογή της κυψέλης και τη δρομολόγηση των ενημερώσεων. Το RRC υποστηρίζει QoS, μέτρηση σημάτων αναφοράς από τα UE και μεταφορά μηνυμάτων NAS. Το πρωτόκολλο ελέγχου NAS είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση φορέων του EPS (Evolved Packet System), την ταυτοποίηση και τον έλεγχο ασφαλείας. Τα EPS κανάλια bearer χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πολυμέσων, φωνής και δεδομένων. Το πρωτόκολλο Εφαρμογής S1 (S1-AP) είναι υπεύθυνο για τις μεταπομπές, την αναφορά τοποθεσίας, την εξισορρόπηση του φόρτου και τον έλεγχο για υπερφόρτωση.

Το S1-AP πρωτόκολλο λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο Stream Control Transmission Protocol (SCTP). Το SCTP, είναι παρόμοιο με το Transmission Control Protocol (TCP), δηλαδή είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς παρέχοντας αξιόπιστη παράδοση των μηνυμάτων μεταξύ του HeNB και της HNB-GW. Στο στρώμα IP, το IPsec χρησιμοποιείται για λόγους ασφαλείας, δεδομένου ότι οι επικοινωνίες μεταξύ της πύλης HNB-GW και της πύλης ασφαλείας γίνονται πάνω από ένα μη αξιόπιστο δίκτυο IP. Τα Broadband Layer2 (BB L2) και το Physical Layer (BB Phy) εξαρτώνται από το είδος της ευρυζωνικής πρόσβασης που χρησιμοποιείται από το συνδρομητή, όπως οπτική ίνα (FTTH), καλωδιακή ή DSL.

3.5. Προτυποποίηση LTE-A Femtocells

Πριν την εμπορική εκμετάλλευση μιας τεχνολογίας όπως τα femtocells, η τυποποίηση είναι απαραίτητη. Η προώθηση της τυποποίησης αυτής είναι ένας από τους στόχους του Femto forum. Ως αποτέλεσμα της κοινής εργασίας των Femto Forum, 3GPP, 3GPP2 και Broadband Forum [19][20], που αποτελούν τις κύριες οργανώσεις σχετικά με την προτυποποίηση των τεχνολογιών femto, η προτυποποίηση για το femtocell δημοσιεύεται επίσημα από τον οργανισμό 3GPP. Το νέο πρότυπο αποτελεί μέρος της 3GPP Έκδοσης 10.

Η προτυποποίηση για τα femtocells καλύπτει τέσσερις κύριους τομείς: την αρχιτεκτονική δικτύου, την ασύρματη μετάδοση και θέματα παρεμβολών, θέματα διαχείρισης και θέματα ασφάλειας. Από την άποψη της αρχιτεκτονικής του δικτύου, χρησιμοποιεί υπάρχοντα πρωτόκολλα 3GPP και τα επεκτείνει για να υποστηρίζουν τις ανάγκες των παρατάξεων femtocell. Στην έκδοση 8, ο οργανισμός 3GPP καθόρισε τις βασικές λειτουργίες για την υποστήριξη των HNB και HeNB (ήτοι 3G και 4G (LTE) femtocell, αντίστοιχα), ανανεώνοντάς τις όποτε αυτό κριθεί απαραίτητο. Από την έκδοση 9 και μετά, έχει συμφωνηθεί να ενοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις για HNB και HeNB. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένες βασικές κατηγορίες προδιαγραφών και οι επίσης αναφορές καταγραφής τους.

Έκδοση 8.

- 25.820: Study on 3G Home NodeB/eNodeB
- 33.820: Study on Home (e)NodeB Security
- 22.011, 22.115, 29.002, 29.272, 23.008, 23.003, 23.122, 24.301, 24.801, 24.285, 23.122, 24.008, 24.285: Home NodeB / eNodeB CSG, mobility
- 25.304, 25.306, 25.331, new 25.367, 25.401, 25.410, 25.412, 25.413, 25.414, 25.415, new (25.467, 25.468, 25.469), 25.104, 25.141, new 25.967, 34.108, 34.123-1, 34.123-2, 34.123-3, new (32.581, 32.582, 32.583, 32.584): Support of UTRA HNB, UTRAN Architecture for 3G HNB, FDD Home NodeB RF requirements, OAM&P Type 1 Management Interface

Έκδοση 9.

- 32.821: SON
- 22.220, 22.011: EHNB
- 23.830, 23.401, 23.402, 23.060: Architecture aspects of EHNB
- new 33.320: Security aspects
- 23.122, 24.008, 24.285, 24.301: CT1 aspects
- 32.632, 32.633, 32.635, new (32.771, 32.772, 32.773, 32.775, 32.781, 32.782, 32.783, 32.785): 3G HNB Gateway and LTE HeNB Gateway OAM&P
- 32.581, 32.582, 32.583, 32.584, new (32.591, 32.592, 32.593, 32.594): 3G HNB and LTE HeNB OAM&P Type 1 Interface
- 36.104, 36.141, new TR 36.921: LTE FDD Home eNodeB RF Requirements
- 36.104, 36.141, 36.300, 36.331, 36.413, new TR 36.922: LTE TDD Home eNodeB RF Requirements

Έκδοση 10.

- 22.220: Stage 1 of Extended H(e)NB features
- new 23.832: IMS aspects of Architecture for Home NodeB
- 33.320 : Extended H(e)NB Security features (Stage 2)
- 22.101, 22.220, new TR 23.829, 33.102, 33.107, 33.108, 33.320, 33.401, 32.581, 32.582, 32.584, 32.591, 32.592, 32.642, 32.646, 32.772, 32.782, 32.251: LIPA_SIPTO, Security, Charging, OAM&P
- 25.413, 25.467, 25.469, 36.300, 36.413, 36.423, new 25.471: Mobility enhancement

Όλες οι προδιαγραφές δημοσιεύονται και είναι ελεύθερες στον οποιονδήποτε μέσω του δικτυακού τόπου του οργανισμού 3GPP [21].

3.6. Αυτο-οργανώσιμα δίκτυα

Τα femtocells αναπτύσσονται σε μεγάλους αριθμούς ενώ θεωρητικά, κάθε σπίτι ή εταιρεία θα μπορούσε να έχει εγκαταστήσει από ένα. Ως αποτέλεσμα, τα femtocells εγκαθίστανται από τον πελάτη με παρόμοιο τρόπο που εγκαθιστούν και WiFi δρομολογητές. Πότε και πού ένας πελάτης εγκαθιστά ένα femtocell είναι ένα εντελώς τυχαίο γεγονός. Για να μειωθούν οι λειτουργικές δαπάνες των femtocells απαιτείται τα δίκτυα femtocells να είναι plug-and-play. Για να καλυφθεί αυτή η ανάγκη τα femtocells μπορούν να υποστηρίζουν λειτουργίες αυτό-οργανώσιμων δικτύων (SON - Self-organizing Networks).

Τα macrocells έχουν αναπτυχθεί μετά από εκτεταμένες μετρήσεις και ρυθμίσεις των παραμέτρων από τον πάροχο. Αντίθετα τα SON femtocells πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζονται δυναμικά κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους, ακολουθώντας τις αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντός τους, όπως για παράδειγμα την εγκατάσταση ενός γειτονικού femtocell. Παρακάτω περιγράφονται μερικοί από τους πιθανούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για να επιτρέπουν στα δίκτυα femtocells δυνατότητες SON:

- Κατά τη διαδικασία έναρξης λειτουργίας, ένα femtocell καταγράφει και πιστοποιεί τον εαυτό του με το δίκτυο femtocell και στέλνει την τοποθεσία του στον Femtocell Application Server (FAS). Το FAS μπορεί να στείλει στο femtocell τις αρχικές παραμέτρους ρύθμισης μετάδοσης με βάση την εγγύτητά του με άλλα femtocells και macrocells.

- Μόλις ταυτοποιηθεί το femtocell μπορεί να κατεβάσει αυτόματα την τελευταία έκδοση λογισμικού, το οποίο περιλαμβάνει ενημερώσεις για τη βέλτιστη λειτουργία του.

- Το femtocell θα πρέπει να είναι σε θέση να τρέχει διαγνωστικά τεστ προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν αστοχίες υλικού που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την απόδοσή του.

- Σε τακτά χρονικά διαστήματα, το femtocell μπορεί να εκτελέσει διάφορες μετρήσεις προκειμένου να ανιχνεύσει μεταβολές στην ισχύ μετάδοσης από γειτονικά femtocells ή/και από macro σταθμούς βάσης. Μετά από τη μέτρηση που συνήθως λαμβάνει χώρα μέσω σάρωσης, το femtocell μπορεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους μετάδοσης για την βελτιστοποίηση της απόδοσής του. Αυτές οι αλλαγές θα πρέπει να αναφερθούν πάλι στο FAS.

- Το FAS μπορεί να διατηρήσει μια λίστα των γειτονικών femtocells και macrocells. Σε αυτόν τον κατάλογο περιλαμβάνονται οι ρυθμίσεις της μετάδοσης, όπως η ισχύς εκπομπής και οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται. Όταν συμβούν αλλαγές στο δίκτυο, όπως η εγκατάσταση ενός νέου femtocell, το FAS μπορεί να ζητήσει προσαρμογές σε μία ή περισσότερες παραμέτρους των femtocells, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου.

3.7. Τεχνικά ζητήματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια αυτού του βιβλίου, αναφέρθηκαν κατά καιρούς διάφορα τεχνικά θέματα που σχετίζονται με femtocells, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα των παρεμβολών, η αυτό-οργάνωση κλπ. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα τεχνικά ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη των femtocells και για τα οποία πρέπει να βρεθούν λύσεις. Πριν επεκταθούμε στο ζήτημα των παρεμβολών και την αντιμετώπισή του, η ενότητα αυτή παρουσιάζει συνοπτικά τα προβλήματα αυτά. Τα θέματα που παρουσιάζονται κατωτέρω περιλαμβάνουν τόσο τεχνικές όσο και εμπορικές προκλήσεις:

- Χαμηλού κόστος ακριβής συγχρονισμός των femtocells.

Ο συγχρονισμός είναι αναγκαίος για να μειωθούν οι παρεμβολές. Αν ο χρονισμός δεν είναι αρκετά ακριβής, θα προκύψουν λάθη κατά τη δημιουργία του πλαισίου στο πεδίο του φάσματος, και έτσι θα μπορούσε να παρατηρηθεί μετατόπιση της συχνότητας των υπο-φορέων, καθιστώντας αδύνατο τις μεταπομπές από κυψέλη σε κυψέλη. Επιπλέον, καλή ακρίβεια χρονισμού απαιτείται για την αντιμετώπιση φαινομένων Doppler λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Ως εκ τούτου, μια μεγάλη πρόκληση για τα femtocells, και προϋπόθεση για την επιτυχία τους, είναι η αντιμετώπιση των απαιτήσεων χρονισμού. Πολλές λύσεις έχουν προταθεί για το συγχρονισμό, καθώς ο περιορισμός του χαμηλού κόστους στενεύει τα περιθώρια λύσεων. Πράγματι, το κύριο μειονέκτημα είναι ότι οι ακριβείς ταλαντωτές είναι πολύ ακριβοί, και έχει εκτιμηθεί [22], ότι ο κρύσταλλος αντιπροσωπεύει το ακριβότερο στοιχείο σε ένα femtocell. Για αυτό και άλλες λύσεις αναζητούνται συνεχώς, όπως διαμέσου του Internet, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο συγχρονισμός με μικρό κόστος.

- Ασφάλεια και σωστή ταυτοποίηση.

Οι περισσότεροι υποψήφιοι πελάτες femtocell είναι ιδιαίτερα ανήσυχοι για την προστασία της ιδιωτικότητάς τους. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι η χρήση κλειδιών κρυπτογράφησης Wired Equivalent Privacy (WEP) για το Wi-Fi είναι εύκολο να σπάσει. Στα femtocells, ειδικά εάν χρησιμοποιούνται με δημόσια πρόσβαση, οποιοδήποτε κινητό χρήστη έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με αυτά, καθιστώντας σημαντική την προστασία των ιδιωτικών πληροφοριών του συνδρομητή του femtocell, και την αποφυγή παράνομης χρήσης του femtocell από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Στα δίκτυα femtocell, υπάρχουν τρεις κύριες ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια:

α) Η διαθεσιμότητα του δικτύου και της παροχής υπηρεσιών: εφόσον η σύνδεση μεταξύ του femtocell και του δικτύου κορμού βασίζεται σε IP, υπάρχει κίνδυνος επίθεσης Denial of Service (DoS). Αυτό συμβαίνει όταν για παράδειγμα, ένας κακόβουλος χρήστης συνδέεται με το σύνδεσμο μεταξύ του femtocell και του CN, επιβαρύνοντας την ικανότητα επεξεργασίας του δικτύου, και εμποδίζοντας τη νόμιμη σύνδεση των συνδρομητών με το femtocell τους. Μερικά άλλα παραδείγματα θα μπορούσαν να είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του δικτύου με την αποστολή μη εξουσιοδοτημένων μηνυμάτων στο CN. Τέτοιες επιθέσεις πρέπει να εμποδίζονται, ώστε να εξασφαλιστεί η διαθεσιμότητα του δικτύου προς συνδρομητές.

β) Η πρόληψη της απάτης και της κλοπής των υπηρεσιών: ορισμένες από τις επιθέσεις συμβαίνουν όταν συνδέονται μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες σε femtocell και κάνουν παράνομη χρήση των υπηρεσιών του. Για παράδειγμα, σε CSG λειτουργία, είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι μη-συνδρομητές δε θα έχουν πρόσβαση στο femtocell. Ένα άλλο παράδειγμα θα ήταν ένας χρήστης που ταυτοποιείται ως άλλος συνδρομητής femtocell ώστε να αποφύγει τη χρέωση. Σε αυτήν την περίπτωση, όλες οι κλήσεις θα πρέπει να καταβληθούν λανθασμένα από τον νόμιμο συνδρομητή του femtocell. Για την ασφαλή ταυτοποίηση, δύο αποδοτικές μέθοδοι έχουν προταθεί, έκαστη με διαφορετικά πλεονεκτήματα [23].

γ) Ιδιωτικότητα και εμπιστευτικότητα: εφόσον στα femtocells, τα δεδομένα του χρήστη μεταδίδονται πάνω από το Internet, υπόκεινται στα ίδια ζητήματα ασφάλειας των IP επικοινωνιών. Επιπλέον, τα femtocells αναμένεται να συνδεθούν στο δίκτυο του σπιτιού και να λειτουργήσουν ως πύλες σύνδεσης με διαφορετικές συσκευές. Ως εκ τούτου, καθίσταται

εξαιρετικά σημαντική η προστασία όλων των δεδομένων που είναι προσβάσιμα από το femtocell.

- Η γνώση της γεωγραφικής θέσης των femtocell.

Μια άλλη σημαντική πρόκληση σε σχέση με τα femtocells είναι η δυνατότητα να εκτιμήσουν τη γεωγραφική θέση τους. Η γνώση είναι αναγκαία για διάφορους λόγους όπως για παράδειγμα υπηρεσίες κλήσεων έκτακτης ανάγκης, το προσεκτικότερο σχεδιασμό του δικτύου και καλύτερο έλεγχο πρόσβασης. Σύμφωνα με έρευνες [24], το 80% των ερωτηθέντων δήλωσε ότι ήταν σημαντικό ή πολύ σημαντικό η θέση της κυψέλης τους να μπορεί να εντοπιστεί σε έναν χάρτη. Όσον αφορά τις λύσεις για την εξασφάλιση της θέσης των femtocells, είναι πιθανό ότι η υλοποίηση και η διαδικασία να πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τους κανονισμούς της χώρας όπου τα femtocells έχουν αναπτυχθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ

ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ

Όπως έχουμε δει μέχρι τώρα, η εγκατάσταση των femtocells εισάγει αλλαγές στην τοπολογία των συμβατικών macrocell δικτύων. Η νέα αρχιτεκτονική του δικτύου αποτελείται από δύο σαφώς διαχωρισμένα στρώματα, το στρώμα macrocell και το στρώμα femtocell. Μια τέτοια αρχιτεκτονική του δικτύου ονομάζεται δύο στρώσεων (layers) ή δύο επιπέδων. Το πρώτο στρώμα περιλαμβάνει το πρωταρχικό macrocell δίκτυο, ενώ το δεύτερο ενσωματώνει αρκετά μικρότερα small cells μικρής εμβέλειας, είτε μέσω σχεδιασμού (π.χ. picocells) ή παραταγμένα με τυχαίο τρόπο (π.χ. femtocells). Στην περίπτωση των τελευταίων, εγκαθίστανται εντός της ίδιας γεωγραφικής περιοχής που καλύπτεται από το μεγαλύτερο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (που ονομάζεται επίσης η macrocell ομπρέλα) και είναι πιθανόν να εκμεταλλεύονται το ίδιο φάσμα με αυτό. Ως εκ τούτου, ένα από τα πλεονεκτήματα των small cells σε μια τέτοια δομή του δικτύου είναι η αυξημένη κάλυψη σε περιοχές που δεν καλύπτονται επαρκώς από την macrocell ομπρέλα. Επιπλέον, και δεδομένου ότι τα femtocells χρησιμοποιούνται από μειωμένο αριθμό χρηστών, επιτυγχάνονται και υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων.

Η τοπολογία των δύο στρωμάτων ωστόσο, φέρνει νέα προβλήματα και δημιουργεί νέες προκλήσεις στο σχεδιασμό δικτύων. Όταν πολλοί πομποί εκπέμπουν τα σήματά τους στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και μέσα στην ίδια γεωγραφική θέση, ένα σύστημα λήψης που λειτουργεί σε αυτήν τη ζώνη συχνοτήτων δεν θα είναι σε θέση να διακρίνει τον πομπό που ακούει. Αυτή είναι μια πολύ στοιχειώδης περιγραφή του προβλήματος των παρεμβολών σε συστήματα τηλεπικοινωνιών και αποτελεί μία από τις κύριες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η ανάπτυξη των femtocells. Συστήματα όπως το OFDMA, καλούνται να υιοθετήσουν τεχνικές αποφυγής παρεμβολών και στρατηγικές σχεδιασμού συχνοτήτων για να αντιμετωπίσουν την παρουσία παρεμβολών λόγω της παρουσίας ενός στρώματος femtocell.

Τα femtocells προσφέρουν υψηλότερη απόδοση φάσματος, χωρική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και καλύτερη κάλυψη σε περιοχές που δεν καλύπτονται πλήρως από τα macrocells, όπως σε εσωτερικούς χώρους ή σε τοποθεσίες κοντά στα όρια του macrocell. Ωστόσο, αν η ακύρωση παρεμβολών ή τεχνικές αποφυγής δεν εφαρμόζονται, μπορεί να εμφανιστούν νεκρές ζώνες κατά μήκος της κυψέλης, εμποδίζοντας την υπηρεσία εντός της εμβέλειας ενός femtocell. Επιπλέον, η θέση των τυχαία εγκαταστημένων femtocells υποδηλώνει ότι η τυχειότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση των θεμάτων αυτών, γεγονός που δυσκολεύει την επίλυση του ζητήματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφουμε τα προβλήματα που προκαλούνται από τις παρεμβολές εξαιτίας του στρώματος femtocells, τόσο στο macrocell στρώμα, όσο και σε γειτονικά femtocells, και παρουσιάζουμε τις βασικότερες τεχνικές ακύρωσης ή αποφυγής του φαινομένου.

4.1. Ομοστρωματικές παρεμβολές στο femtocell στρώμα

Ως ομοστρωματικές (co-layer) παρεμβολές αναφέρονται τα ανεπιθύμητα σήματα κατά τη λειτουργία ενός femtocell που προέρχονται από γειτονικά femtocells, μειώνοντας έτσι την

ποιότητα της επικοινωνίας. Η ονομασία co-layer κάνει αναφορά στο γεγονός ότι όλα τα femtocells ανήκουν στο ίδιο στρώμα, σε αντίθεση με άλλα στοιχεία, όπως τους σταθμούς βάσης eNodeBs της κυψέλης, τα οποία ανήκουν στο macrocell επίπεδο. Οι co-layer παρεμβολές εμφανίζονται κυρίως μεταξύ γειτονικών σταθμών λόγω της μικρής απομόνωσης ανάμεσα στα σπίτια και τα διαμερίσματα. Αυτό το πρόβλημα είναι συνεπώς ανεξάρτητο από τη διαταραχή που προκαλείται στο στρώμα macrocell και στην οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

Δεδομένου ότι η ανάπτυξη των femtocells είναι τυχαία, είναι πιθανό αρκετά femtocells να εγκατασταθούν κοντά σε άλλα, για παράδειγμα, οριζόντια σε παρακείμενες πολυκατοικίες ή κάθετα σε πολυώροφα διαμερίσματα, με αποτέλεσμα να παρεμβαίνει το ένα στο άλλο. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ένα femtocell συγκεκριμένης εμβέλειας εξυπηρετεί κάποιους χρήστες. Εάν υπάρχουν πρόσθετα σήματα από κοντινά femtocells με εμβέλεια που περιλαμβάνει ένα κομμάτι της περιοχής κάλυψης του αρχικού femtocell, χρησιμοποιώντας τα ίδια κανάλια συχνοτήτων, τότε η περιοχή κάλυψης αυτή λέγεται ότι υποφέρει από παρεμβολές co-channel και η απόδοση του συστήματος μειώνεται. Επιπλέον, όταν σήματα από διάφορα μικρά δίκτυα είναι παρόντα σε μια δεδομένη θέση, η συνολική παρεμβολή είναι υψηλότερη από την παρεμβολή κάθε femtocell ξεχωριστά.

Αν ο λόγος σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο (Signal to Interference and Noise Ratio - SINR) είναι πολύ μικρός, είναι πιθανό να καταστεί αδύνατο να υπάρξει επικοινωνία μέσω οποιουδήποτε femtocell και μια τέτοια περιοχή θεωρείται μια νεκρή ζώνη. Αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με τη έννοια των οπών κάλυψης, η οποία, σύμφωνα με το [25], είναι περιοχές με χαμηλό SINR λόγω απωλειών κατά τη διαδρομή. Η υποβάθμιση της επικοινωνίας ποικίλλει μεταξύ των διάφορων συστημάτων λόγω των διαφορετικών τους επιδόσεων και της διαφορετικής ευρωστίας τους απέναντι σε φαινόμενα παρεμβολών. Εφόσον τα femtocells μπορούν να αναπτυχθούν με φιλοσοφία κλειστής πρόσβασης (CSG), ανοικτής πρόσβασης ή με υβριδικό τρόπο λειτουργίας πρόσβασης, η έκταση του φαινομένου των παρεμβολών θα εξαρτάται και από τη μέθοδο πρόσβασης. Όταν πρόκειται για ανοικτής πρόσβασης femtocells, οι χρήστες μπορούν να κυκλοφορούν ελεύθερα μεταξύ των femtocells ανάλογα από ποιο λαμβάνουν το ισχυρότερο σήμα. Αντίθετα, προβλήματα δημιουργούνται όταν υιοθετείται προσέγγιση κλειστής ή υβριδικής πρόσβασης.

Μια ακόμα παράμετρος για το είδος των παρεμβολών είναι και η πηγή αυτών. Στα femtocells δίκτυα, υπάρχουν δύο πιθανές πηγές ικανές να δημιουργήσουν co-layer παρεμβολές σε άλλα femtocells: το femtocell (downlink) και οι ίδιοι οι χρήστες (uplink). Σε Time Division Duplex (TDD) συστήματα και ανάλογα με το ποια είναι η πηγή του σήματος παρεμβολής, οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την αντιμετώπιση των παρεμβολών διαφέρουν. Εάν όλα τα femtocells μέσα στην ίδια περιοχή είναι συγχρονισμένα (δηλαδή η περίοδος downlink αρχίζει γι' αυτούς ταυτόχρονα στο χρόνο), οι θύτες παρεμβολών για ένα χρήστη femtocell είναι τα γειτονικά femtocells κατά τη διάρκεια του downlink. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταδόσεις που προέρχονται από ένα femtocell θα προκαλέσουν παρεμβολές σε UEs των γειτονικών femtocells στο downlink και μόνο. Το ίδιο ισχύει και για το uplink. Στην περίπτωση που συγχρονίζονται οι περίοδοι uplink των κοντινών femtocells, οι χρήστες των femtocells θα είναι πηγές των παρεμβολών και ως εκ τούτου, οι μεταδόσεις που προέρχονται από ένα χρήστη femtocell θα ανιχνεύονται ως παρέμβαση στο uplink των γειτονικών femtocells.

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τα στοιχεία δικτύου που παίζουν το ρόλο των θυτών σε φαινόμενα παρεμβολών.

Πίνακας 6. Πιθανές πηγές παρεμβολών κατά περίπτωση.

	Co-layer	Cross-layer
Uplink	Femto χρήστες	Οποιοδήποτε UE
Downlink	Femto σταθμοί βάσης	Femto και Macro σταθμοί βάσης

Στην περίπτωση που δεν υπήρχε συγχρονισμός μεταξύ των femtocells, η πηγή των παρεμβολών στο TDD θα ήταν ακαθόριστη. Οι περίοδοι ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης των διαφορετικών femtocells θα επικαλύπτονταν και θα δημιουργούνταν ετερογενείς πηγές παρεμβολών (femtocells και UEs). Σε αυτή την περίπτωση, οι παρεμβολές γίνονται δυσκολότερο να εντοπιστούν ως προς την προέλευση και να αποφευχθούν. Ο ακριβής συγχρονισμός αποτελεί επομένως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των TDD femtocells έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η εξάλειψη των παρεμβολών. Ωστόσο, ο συγχρονισμός των femtocells με την απαιτούμενη ακρίβεια όπως προαναφέρθηκε δεν είναι ένα ασήμαντο έργο και πολλές λύσεις/προτάσεις μπορούν να ανευρεθούν στην βιβλιογραφία, κάτι όμως που είναι πέρα των σκοπών της παρούσας εργασίας.

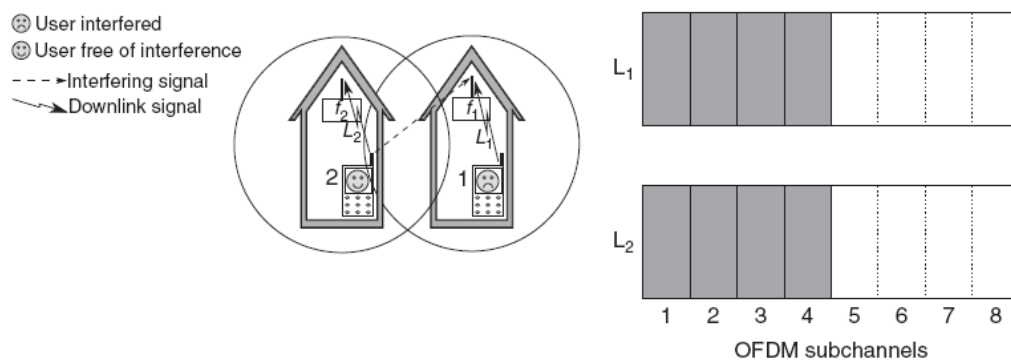
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως δεδομένου ότι οι macro σταθμοί βάσης ανήκουν στο ίδιο στρώμα δικτύου (το στρώμα macrocell), παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών macrocells θεωρούνται επίσης co-layer παρεμβολές. Ωστόσο, η ανάπτυξη των macrocells έχει σχεδιαστεί προσεκτικά από τον πάροχο/ιδιοκτήτη του δικτύου, με τις παρεμβολές να αντιμετωπίζονται μέσω προσεκτικά μελετημένης τοπολογίας, επιλογής συχνότητας, κατανομής πόρων κλπ.

Αυτό το πρόβλημα είναι συνεπώς ανεξάρτητο από την ανάπτυξη των femtocells. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της δομής του συστήματος μετάδοσης OFDMA το οποίο εξετάζουμε, και συγκεκριμένα λόγω της ευελιξίας στην κατανομή του φάσματος που υιοθετεί, ορισμένες τεχνικές αποφυγής παρεμβολών από τα femtocells εκμεταλλεύονται ορισμένα χαρακτηριστικά του στρώματος macrocell, τα οποία δημιουργήθηκαν για την αποφυγή co-layer παρεμβολών στο macrocell στρώμα. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα περιγραφούν στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Παρακάτω περιγράφονται οι επιπτώσεις των co-layer παρεμβολών στις περιπτώσεις downlink και uplink.

Στις co-layer παρεμβολές στο uplink, τα femtocell UEs είναι οι θύτες, δηλαδή οι πηγές παρεμβολής. Από την άλλη πλευρά, τα γειτονικά femtocells είναι τα θύματα. Στο uplink OFDMA σε LTE femtocells, είναι πιθανό κάποια κανάλια ή κάποιο διαφορετικό μέρος του φάσματος να υπόκειται σε παρεμβολές και το υπόλοιπο να είναι ελεύθερο. Αυτό διευκολύνει την παραμετροποίηση του femtocell αφού δεν είναι απαραίτητο να ελέγξει ολόκληρο το φάσμα για την εξυπηρέτηση ενός χρήστη (τουλάχιστον σε φυσιολογικές απαιτήσεις QoS). Ως εκ τούτου, υπόκειται στα femtocells να καθορίσουν ποια κανάλια υφίστανται παρεμβολές και ποια όχι.

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 17 φαίνεται ένα σενάριο στο οποίο ο χρήστης 2, εμπίπτει στην κάλυψη τομέα τόσο του femtocell που τον εξυπηρετεί (f_2) όσο και εκείνης ενός γειτονικού femtocell (f_1). Σε αυτήν την κατάσταση, τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από το χρήστη 2 για να συνδεθεί με το f_2 θα πρέπει να ανιχνεύονται ως ακατάλληλα να χρησιμοποιηθούν από το f_1 λόγω παρεμβολών. Επιπλέον, το femtocell f_1 έχει επίσης ένα χρήστη συνδεδεμένο με αυτό (χρήστης 1). Ωστόσο, δεδομένου ότι ο χρήστης 1 δεν βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του χρήστη 2, δεν υπάρχει τρόπος για τον χρήστη 1 να γνωρίζει ποια είναι τα κανάλια που υφίστανται παρεμβολές. Η ευθύνη για την κατανομή των πόρων για τον χρήστη 1 θα πρέπει ως εκ τούτου να επαφίεται στο femtocell.

Σε αντίθεση με συστήματα όπως το CDMA, όπου οι μεταδόσεις καταλαμβάνουν το σύνολο της ζώνης συχνοτήτων, στην περίπτωση του OFDMA η ύπαρξη των καναλιών και η ευελιξία στη χρήση τους καθιστά δυνατή τη μείωση των παρεμβολών και στο πεδίο των συχνοτήτων, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερες πιθανότητες για την αποφυγή παρεμβολών, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.



Εικόνα 17. Ο χρήστης 1 δεν μπορεί να γνωρίζει ποιοι υπο-φορείς χρησιμοποιούνται ήδη, αν δεν ενημερωθεί από το femtocell.

Η περίπτωση των παρεμβολών στο uplink είναι αρκετά διαφορετική από του downlink. Αυτό συμβαίνει επειδή οι downlink παρεμβολές επηρεάζουν μόνο ένα χρήστη θύμα, ενώ οι παρεμβολές στο uplink καθιστούν το συγκεκριμένο κομμάτι του φάσματος άχρηστο σε όλους τους χρήστες του femtocell.

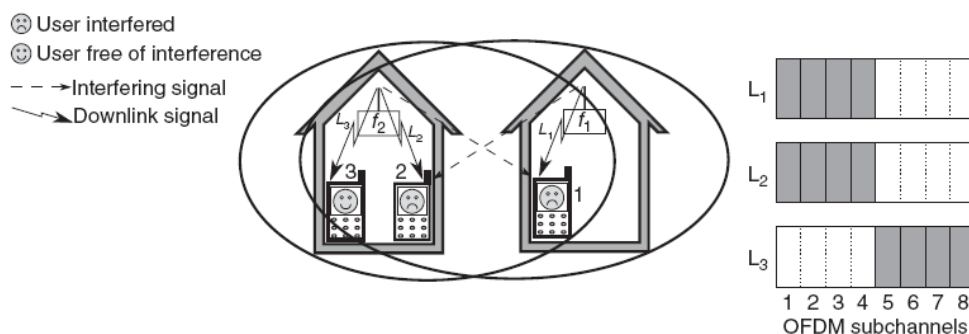
Στο downlink όσο αφορά τις co-layer παρεμβολές, τα femtocells είναι οι θύτες ή αλλιώς οι πηγές παρεμβολής, ενώ τα UEs των γειτονικών femtocells είναι τα θύματα. Εφόσον τα femtocells μπορεί να παραταχθούν σε κοντινή απόσταση το ένα με το άλλο, είναι πολύ πιθανό να παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο μέσα από τα παράθυρα, τις πόρτες και τους κακώς μονωμένους τοίχους. Η ύπαρξη σημάτων από πολλά femtocells εντός της ίδιας περιοχής συμβάλουν στην αύξηση των παρεμβολών οδηγώντας πιθανώς το θόρυβο σε επίπεδα όπου η συνδεσιμότητα καθίσταται αδύνατη.

Για να αποφευχθούν οι παρεμβολές από femtocells στο downlink σε UEs των γύρω femtocells, η πρώτη σύσταση του 3GPP [26], είναι τα femtocells να ρυθμίζουν πολύ προσεκτικά τις παραμέτρους μετάδοσης ισχύος με χρήση προσαρμοστικών τεχνικών ελέγχου ισχύος. Αυτό είναι απαραίτητο ιδιαίτερα σε CSG femtocells όπου τα UEs δεν εξυπηρετούνται από το ισχυρότερο femtocell, αλλά από εκείνο στο οποίο έχουν εγγραφεί. Όπως και στην περίπτωση uplink, η downlink ισχύς εκπομπής μπορεί να αποφασιστεί από κάθε femtocell, με βάση τη λαμβανόμενη ισχύ από τα γειτονικά femtocells. Εφόσον περιοχές με ισχυρές παρεμβολές

δημιουργούνται κυρίως στην παρουσία αρκετών femtocell σημάτων ταυτόχρονα, αρκετές τεχνικές έχουν προταθεί για την αποφυγή των παρεμβολών όπως θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

Μία σοβαρή περίπτωση co-layer παρεμβολών στο downlink συμβαίνει όταν ένας femtocell χρήστης βρίσκεται σε περιοχή εντός της εμβέλειας του δικού του femtocell, και το σήμα που προέρχεται από αυτό δεν είναι αρκετά υψηλό σε σύγκριση με την παρεμβολή που προέρχεται από τα γύρω femtocell. Το γεγονός αυτό μπορεί να διαταράξει τις downlink συνδέσεις. Ωστόσο, σε OFDMA συστήματα, πέραν της διαχείρισης ισχύος, η κατανομή των υπο-φορέων σε κάθε femtocell παίζει καθοριστικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα της παρεμβολής. Η ύπαρξη περιοχών με υψηλά φαινόμενα παρεμβολών εξαρτάται από την πληρότητα ή διαθεσιμότητα του φάσματος στην περιοχή αυτή. Δύο χρήστες femtocells μπορεί να βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική θέση και μόνο ο ένας να υφίσταται παρεμβολές από τα γύρω femtocells, δηλαδή να υπόκεινται σε παρεμβολές μόνο μερικά OFDMA υπο-κανάλια.

Για να φανεί αυτό, στην Εικόνα 18 φαίνονται δυο χρήστες 2 και 3 που επιθυμούν να λαμβάνουν downlink δεδομένα από το αντίστοιχο femtocell (f2 στην εικόνα). Το femtocell f2 κατανέμει τα κανάλια 1 έως 4 και 5 έως 8 στους χρήστες 2 και 3 αντίστοιχα. Σε αυτό το παράδειγμα, και οι δύο χρήστες βρίσκονται σε περιοχή ισχυρών παρεμβολών που προέρχονται από το γειτονικό f1 femtocell. Ωστόσο, το f1 απαιτεί μόνο τα υπο-κανάλια 1-4 για την σύνδεση με τον χρήστη που εξυπηρετεί (χρήστη 1). Ως εκ τούτου, μόνον οι χρήστες στα υπο-κανάλια 1 έως 4 θα υφίσταντο παρεμβολές, ενώ ο χρήστης 3 θα μπορεί να επικοινωνεί απροβλημάτιστα. Παρατηρούμε ότι ο χρήστης 1 στο παράδειγμα αυτό βρίσκεται επίσης σε περιοχή ισχυρών παρεμβολών που προέρχονται από το f2 και υφίσταται παρεμβολές λόγω της κατάληψης των υπο-καναλιών 1 έως 4. Η κατανομή των πόρων συχνότητας, συνεπώς είναι εξαιρετικά σημαντικό θέμα σε LTE (OFDMA) femtocells. Επιπλέον, το πεδίο του χρόνου παρέχει μια πρόσθετη διάσταση για την διαχείριση των υπο-καναλιών. Η κατανομή των πόρων έτσι αποκτά βαρύνουσα σημασία και για αυτό αποτελεί μία από τις πλέον βασικές τεχνολογίες για την εύρυθμη λειτουργία των OFDMA femtocells.



Εικόνα 18. Χωρίς την σωστή κατανομή των πόρων στο πεδίο της συχνότητας, μπορεί να προκύψουν ισχυρές παρεμβολές.

4.2. Διαστρωματικές παρεμβολές

Σε ετερογενή δίκτυα δύο επιπέδων, ένα σήμα θεωρείται ότι δημιουργεί διαστρωματικές (cross-layer) παρεμβολές εάν τα συστήματα του θύτη (πηγή παρεμβολών) και τα συστήματα των

θυμάτων (δέκτης των παρεμβολών) ανήκουν σε διαφορετικά στρώματα του δικτύου. Για παράδειγμα, η παραμόρφωση που προκαλείται από ένα femtocell που μεταδίδει (μέλος του στρώματος femtocell) στο downlink ενός ή περισσότερων macrocell χρηστών (μέλη του στρώματος macrocell) είναι μια σαφής περίπτωση cross-layer παρεμβολής. Ομοίως, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως παρεμβολή cross-layer, η παραμόρφωση που προκαλείται από ένα χρήστη macrocell (μέλος του στρώματος macrocell) στο uplink από ένα κοντινό femtocell (μέλος του στρώματος femtocell). Οι cross-layer παρεμβολές οφείλονται στο γεγονός ότι τόσο τα femtocells όσο και τα macrocells δύναται να χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Εκτός αυτού, και λόγω της προσαρμογής της ισχύος μετάδοσης, ενδεχόμενη αιφνίδια υψηλή ισχύς εκπομπής μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση περιοχών υψηλών παρεμβολών, μειώνοντας έτσι τη σκοπιμότητα αυτών των δικτύων.

Τα κύρια προβλήματα που προκαλούνται από την παρουσία των cross-layer παρεμβολών προκύπτουν όταν η περιοχή κάλυψης των απομονωμένων femtocells «εισβάλλει» στα γειτονικά σπίτια, έχοντας υψηλότερα επίπεδα ισχύος από το macrocell. Αν τα femtocells επρόκειτο να αναπτυχθούν στην ίδια ζώνη με το macrocell στρώμα (co-channel ανάπτυξη), οι χρήστες μέσα στα σπίτια που επιχειρούν να χρησιμοποιήσουν το macrocell, θα υποφέρουν από σοβαρές παρεμβολές και δεν θα είναι σε θέση να συνδεθούν. Γίνεται κατανοητό ότι όσο υψηλότερη είναι η πυκνότητα παράταξης των femtocells τόσο πιο εκτεταμένες θα είναι οι περιοχές για τις οποίες οι υπηρεσίες macrocell θα είναι περιορισμένες.

Όπως έχουμε δει, η τεχνολογία OFDMA επιτρέπει τη διάσπαση φάσματος για την αντιμετώπιση των cross-layer παρεμβολών. Η διάσπαση φάσματος προκύπτει διαιρώντας τη ζώνη συχνοτήτων σε δύο μέρη αναθέτοντας από ένα μέρος στο στρώμα macrocell και στο στρώμα femtocell για αποκλειστική χρήση [26]. Η ακριβής υλοποίηση του διαχωρισμού θα περιγραφεί στη συνέχεια, όπως και οι συνθήκες κατά τις οποίες η προσέγγιση διαμέρισης του φάσματος συνιστάται. Με τον διαχωρισμό αφαιρούνται σχεδόν εντελώς οι cross-layer παρεμβολές. Εντούτοις, όταν οι δύο ζώνες είναι γειτονικές στο πεδίο συχνοτήτων, το παρακείμενο κανάλι μπορεί επίσης να εισαγάγει παρεμβολές [28], γεγονός που ίσως επηρεάσει το σχεδιασμό των ορίων ισχύος της μετάδοσης, έτσι ώστε ο λόγος Adjacent Channel Interference Rejection (ACIR) να ελαχιστοποιηθεί. Το ACIR ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ισχύος που μεταδίδεται από τον θύτη προς τη συνολική ισχύ των παρεμβολών που επηρεάζουν το θύμα και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (4.1)$$

όπου ACLR είναι ο λόγος Adjacent Channel Leakage Ratio που μετρά την αναλογία του μέσου όρου της ισχύος που αποστέλλεται σε γειτονικά κανάλια από τον πομπό εξαιτίας ατελών φίλτρων, προς το μέσο όρο ισχύος που πραγματικά αποστέλλεται στο κανάλι. Επιπλέον, το ACS (Adjacent Channel Selectivity) εκφράζει το λόγο της λαμβανόμενης εξασθένησης στο κανάλι, προς την εξασθένηση στο γειτονικό κανάλι. Ακόμη και σε παρατάξεις διαιρεμένου φάσματος, το επιτεύξιμο ACIR είναι περιορισμένο. Ως εκ τούτου, η δύναμη του femtocell και των UEs πρέπει να ρυθμίζονται ώστε να περιορίζονται οι επιπτώσεις στο macrocell. Πάντως, η επίπτωση των

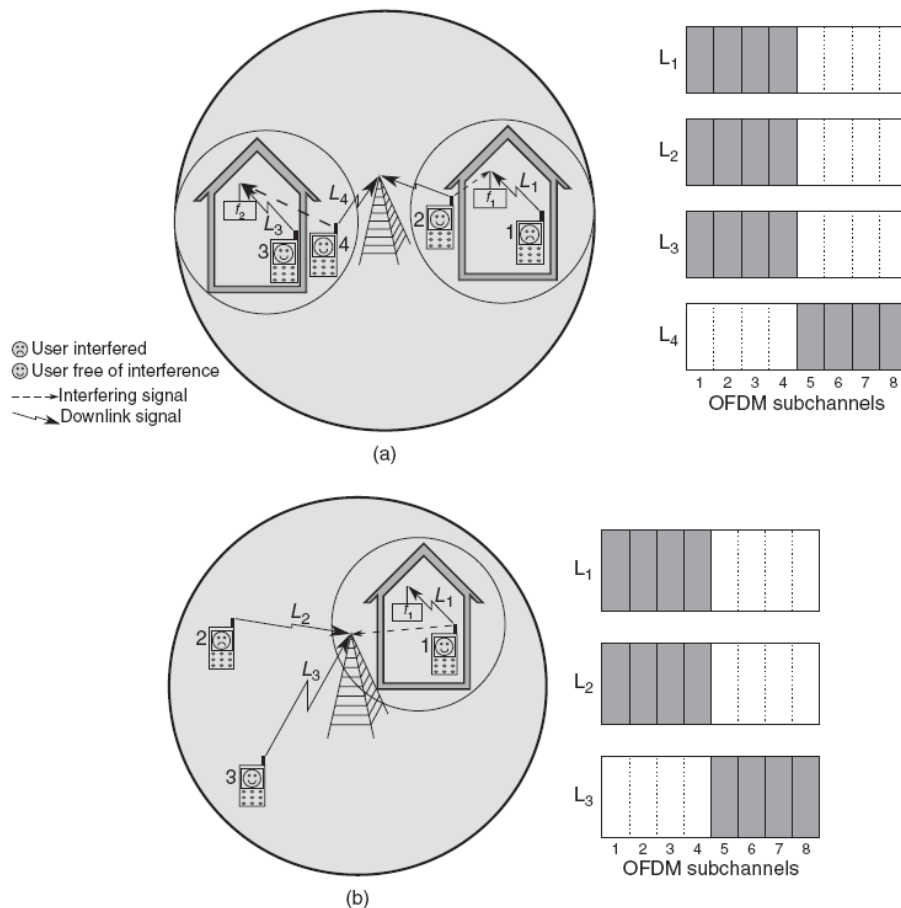
παρεμβολών από παρακείμενα κανάλια, θεωρούνται συγκριτικά ελάχιστα, και για αυτό στη ανάλυση της απόδοσης του δικτύου συνήθως αγνοούνται.

Αν και τα OFDMA συστήματα αποτελούν μια ελκυστική λύση, καθώς επιτρέπουν αποτελεσματική κατανομή των πόρων στο πεδίο συχνοτήτων για το σκοπό της αποφυγής παρεμβολών, εμφανίζουν ευαισθησία σε άλλου είδους προβλήματα, όπως θέματα συγχρονισμού και συχνότητας. Παρεμβολές που προέρχονται από άλλα στοιχεία του δικτύου (και co-layer και cross-layer) μπορούν να εισάγουν παρεμβολές σε επίπεδο φορέων λόγω μετατοπίσεων της συχνότητας. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στην απώλεια της ορθογωνιότητας μεταξύ των υπο-φορέων, με κίνδυνο να μειωθεί δραματικά η απόδοση του συστήματος.

Τέλος, και όπως με την περίπτωση των παρεμβολών co-layer, πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγχρονισμός μεταξύ των στρωμάτων κατά μήκος του δικτύου είναι εξαιρετικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι τα femtocells και τα macrocells δεν υπερβαίνουν τις περιόδους μετάδοσης που τους αναλογούν. Ένας από τους κύριους σκοπούς του συγχρονισμού είναι συνεπώς να διευκολύνει την διαχείριση των φαινομένων των παρεμβολών. Σε επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι προσεγγίσεις στο πρόβλημα των παρεμβολών cross-layer που αφορούν τα θέματα και τις προτεινόμενες λύσεις για OFDMA συστήματα.

Όπως και στην περίπτωση των co-layer παρεμβολών, διαχωρίζουμε τις παρεμβολές που επηρεάζουν το uplink από τις περιπτώσεις που επιδρούν στο downlink. Όσο αφορά το uplink, και μέσω της διαμέρισης φάσματος που αναφέρθηκε νωρίτερα, στην περίπτωση που υιοθετείται η αποκλειστική χρήση καναλιού για τα femtocells, είναι δυνατόν το διαθέσιμο φάσμα να διαιρείται ακριβώς στα όρια μεταξύ δύο OFDMA υπο-καναλιών. Κατά αυτόν τον τρόπο, ένας ακέραιος αριθμός υπο καναλιών εκχωρείται σε κάθε επίπεδο του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή οι cross-layer παρεμβολές είναι σχεδόν ανύπαρκτες, με τη μόνη πηγή παρεμβολής να προέρχεται από τα γειτονικά κανάλια. Το πρόβλημα ανακύπτει όταν τα femtocells έχουν αναπτυχθεί σε co-channel λειτουργία με τα macrocells, όπου δύο σενάρια παρεμβολής μπορεί να συμβούν στο uplink.

Τα δύο σενάρια είναι παρεμβολές στο femtocell και παρεμβολές στο macro BS. Όταν τα femtocells βρίσκονται κοντά στα όρια ενός macrocell, το macrocell μπορεί να ζητήσει σε κοντινά macrocell UEs να αυξήσουν την ισχύ εκπομπής τους, λόγω της μεγάλης απόστασης από το macro σταθμό βάσης. Εάν δεν χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα OFDMA κανάλια, αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει uplink παρεμβολές με το femtocell. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 19 (α), ο macro χρήστης 2 μεταδίδει με μεγάλη ισχύ στα ίδια υπο-κανάλια με τον femtocell χρήστη 1. Η απομόνωση που παρέχουν οι τοίχοι του σπιτιού πιθανόν να είναι ανεπαρκής σε αυτή την περίπτωση, προκαλώντας την απώλεια σύνδεσης uplink του χρήστη 1. Σε αυτή την περίπτωση, η κατάλληλη κατανομή των υπο-καναλιών OFDMA χαλαρώνει τους περιορισμούς ενέργειας που επιβάλλονται στους χρήστες. Είναι επομένως σημαντικό ότι τα femtocells (ιδίως εκείνα που βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη macrocell, όπως τα όρια της κυψέλης) να κατανέμουν τα υπο-κανάλια για το uplink, λαμβάνοντας υπόψη τη φασματική διαθεσιμότητα όπως απεικονίζεται στην εικόνα.

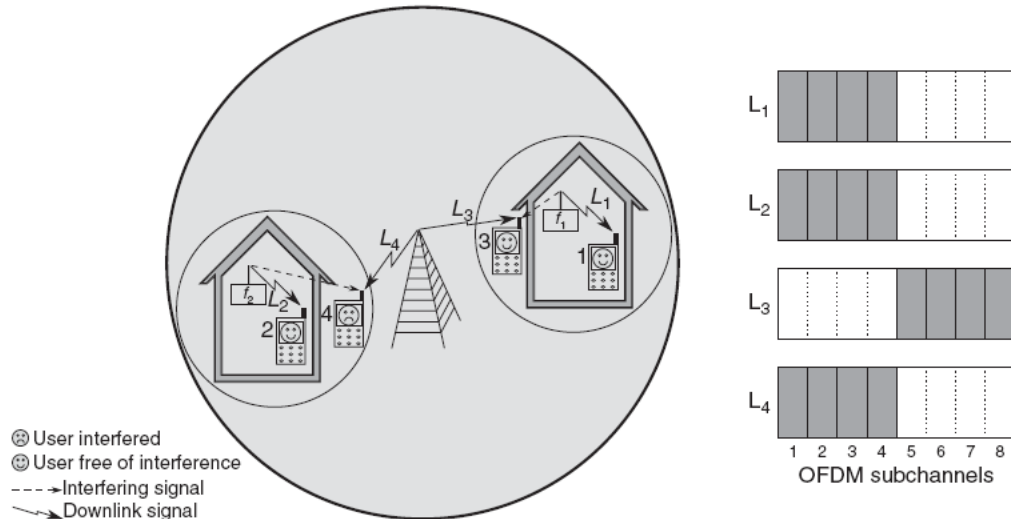


Εικόνα 19. Σενάρια διαστρωματικών παρεμβολών.

Ο δεύτερος τύπος παρεμβολής στο uplink συμβαίνει όταν τα femtocells βρίσκονται πολύ κοντά σε macro BS (παρεμβολή στο macro BS). Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 19 (β), όπου ο femto χρήστης 1 απαιτείται να μεταδώσει σε υψηλή ισχύ. Εάν η εν λόγω μετάδοση φτάσει στο MBS, τα υπο-κανάλια που καταλαμβάνονται από το femtocell χρήστη 1 καθίστανται άχρηστα για τα υπόλοιπα macrocell UEs. Προκειμένου να διασφαλιστεί η υπερίσχυση των macrocell πόρων, η αύξηση της ισχύος που μπορεί να ζητήσει ένα femtocell στους χρήστες του πρέπει να οριοθετείται. Στην περίπτωση του OFDMA, αυτό μπορεί να γίνει δυναμικά και εξαρτάται από την πληρότητα/διαθεσιμότητα των υπο-καναλιών OFDMA σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Στην Εικόνα 20, απεικονίζεται περίπτωση παρεμβολών στο downlink. Συγκεκριμένα, ο χρήστης 1 λαμβάνει δεδομένα στο σπίτι του από το femtocell τους (f1) μέσω της σύνδεσης L1. Για να εξασφαλιστεί η ποιότητα των υπηρεσιών, το f1 διαθέτει τα υπο-κανάλια 1 έως 4 στο downlink L1. Εντωμεταξύ, ο macrocell χρήστης 3 περνά από τη μπροστινή πόρτα του χρήστη 1, με αποτέλεσμα να βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του f1. Αν αυτό είχε συμβεί στην περίπτωση ενός δικτύου CDMA δύο στρωμάτων, ο χρήστης 3 θα είχε βιώσει αμέσως μια ξαφνική αύξηση του επιπέδου θορύβου με απροσδιόριστες συνέπειες για την επικοινωνία. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης 3 λαμβάνει δεδομένα από το macrocell μέσω του συνδέσμου L3, στο οποίο έχουν διατεθεί τα υπο-κανάλια 5-8 από το macrocell. Δεδομένου ότι αυτά τα υπο-κανάλια δεν χρησιμοποιούνται από το femtocell f1, ο χρήστης 3 είναι απαλλαγμένος από παρεμβολές και η επικοινωνία δεν θα επηρεαστεί. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει πάντα. Η Εικόνα 20 παρουσιάζει επίσης και τη περίπτωση κατά την οποία στον macrocell χρήστη 4 κατανέμονται

OFDMA υπο-κανάλια που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από ένα κοντινό femtocell (το F2 σε αυτή την περίπτωση). Ο χρήστης 4 σε αυτή την περίπτωση θα υφίσταται σε μεγάλο βαθμό παρεμβολές. Παρατηρώντας την εικόνα, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο femtocell χρήστης 2 θα υποφέρει επίσης από παρεμβολές, λόγω της χρησιμοποίησης των υπο-καναλιών 1-4 από το macrocell. Ωστόσο, οι εξωτερικοί τοίχοι του σπιτιού εξασθενούν συνήθως επαρκώς το macrocell σήμα, και σε συνδυασμό με τη μικρή απόσταση από το femtocell επιτρέπουν αρκετά υψηλό SINR για το χρήστη 2. Συνεπώς, οι downlink cross-layer παρεμβολές δεν αποτελούν εξαιρετικό πρόβλημα για τους χρήστες femtocell, αφού αν υπάρχει ισχυρό σήμα macrocell, δεν υπάρχει και σημαντικός λόγος για την εγκατάσταση ενός femtocell εξαρχής.



Εικόνα 20. Η κύρια πηγή των παρεμβολών στο downlink είναι τα femtocells προς τους χρήστες macrocell.

4.3. Ομοστροφματικές παρεμβολές στο macrocell στρώμα

Όπως σημειώθηκε στο κεφάλαιο 2, το LTE σχεδιάστηκε να λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας ανά κελί. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει η πιθανότητα δύο χρήστες σε κοντινή απόσταση να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους. Καθώς μέσα στο κελί υπάρχει η ορθογωνιότητα, και το παραπάνω σενάριο συμβαίνει μόνο σε χρήστες σε γειτονικά κελιά, κύρια θύματα των co-layer αυτών παρεμβολών είναι οι macro χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης.

Οι ομοστροφματικές (co-layer) παρεμβολές προσομοιάζουν τις αντίστοιχες μεταξύ των femtocells, αφού ουσιαστικά πρόκειται πάλι για χρήστες σε co-channel λειτουργία. Τα σενάρια δηλαδή που αφορούν τα femtocells σχετικά με την κατανομή των υπο-καναλιών, και την πιθανότητα παρεμβολής έχουν εφαρμογή και στο macrocell στρώμα. Η κύρια διαφορά έγκειται στη δυνατότητα καλύτερης προετοιμασίας των macrocell BS, μέσω καλύτερου σχεδιασμού, ελέγχου παραμέτρων και ευκολότερης κεντρικής διαχείρισης πόρων. Σε επίπεδο macrocell η κατανομή πόρων μπορεί να γίνει συντονισμένα προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές.

Η λειτουργία ICIC στην οποία αναφερθήκαμε συνοπτικά στο κεφάλαιο 2 βασίζεται στον συντονισμό των πόρων μέσω κεντρικής διαχείρισης, ώστε να ανατίθεται φάσμα στους χρήστες κατά τέτοιο τρόπο που θα ακυρώνει ή ελαττώνει τις παρεμβολές μεταξύ των γειτονικών κελιών. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι διαμέρισης των πόρων στο πεδίο της συχνότητας, με το καθένα να

προσδίδει διαφορετική προτεραιότητα στην απόδοση του δικτύου. Η απόδοση των σχημάτων ICIC σε επίπεδο macrocell σε μη-ετερογενή δίκτυα είναι πέρα των σκοπών της παρούσης εργασίας, και για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης ενθαρρύνεται να απευθυνθεί στο [22]. Καθώς όμως, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η αποφυγή των διαστρωματικών παρεμβολών βασίζεται μεταξύ άλλων και στην χρήση φάσματος από τα femtocells που είναι διαθέσιμο, είναι σημαντικό τα femtocells να αντιλαμβάνονται τα σχήματα κατανομής συχνοτήτων στην περιοχή της εγκατάστασής τους.

Τα κυριότερα σχήματα του ICIC σε επίπεδο macrocell, περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα 4.5.1, όπως και τεχνικές αποφυγής παρεμβολών που αφορούν παρατάξεις femtocells σε ICIC-συντονισμένα δίκτυα.

4.4. Ανίχνευση και ακύρωση παρεμβολών

4.4.1. Ορισμός

Ο όρος Ακύρωση Παρεμβολών (Interference Cancellation - IC) αναφέρεται σε οποιαδήποτε μέθοδο χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των παρεμβολών στα συστήματα μετάδοσης. Το ενδιαφέρον σε αυτές τις τεχνικές στα δίκτυα femtocells προέρχεται από την αναπόφευκτη παρουσία co-channel παρεμβολών (δηλαδή παρεμβολών που οφείλονται στην χρήση του ίδιου καναλιού από θύτη και θύμα και σε αντίθεση με τις παρεμβολές εξαιτίας χρήσης παρακείμενων καναλιών) και την ανάγκη για συστήματα λήψης που μπορούν να λειτουργούν υπό την παρουσία υψηλού επιπέδου παρεμβολών. Ουσιαστικά, οποιαδήποτε μέθοδος που επιτρέπει σε ένα δέκτη να λειτουργεί με υψηλότερα επίπεδα co-channel παρεμβολών μπορεί να θεωρηθεί μια τεχνική εξουδετέρωσης παρεμβολών [29]. Οι πηγές των παρεμβολών μπορεί να είναι femtocells και macrocells, καθώς και femtocell και macrocell χρήστες όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι η πηγή παρεμβολής υποδηλώνει ως έναν βαθμό την καταλληλότερη διαδικασία για την ακύρωσή τους.

Αξίζει να επισημάνουμε ότι οι όροι co-channel παρεμβολές και co-layer παρεμβολές δεν θα πρέπει να συγχέονται. Οι πρώτες αναφέρονται στο γεγονός ότι το σήμα θύτης μοιράζεται τη ζώνη συχνοτήτων με το επιθυμητό σήμα. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο υποδηλώνει ότι το επίπεδο του θύτη είναι το ίδιο με εκείνο του συστήματος του θύματος. Παρά το γεγονός ότι σε femtocells δίκτυα οι co-layer παρεμβολές είναι συνήθως co-channel (οι παρεμβολές λόγω χρήσης παρακείμενου καναλιού θεωρούνται συνήθως αμελητέες), το αντίθετο δεν ισχύει απαραίτητα.

Οι περισσότερες τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών κάνουν υποθέσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά του σήματος παρεμβολής, όπως, για παράδειγμα, τη γωνία της άφιξης. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές συνήθως απαιτούν τη χρήση συστοιχιών κεραιών στο σύστημα λήψης, προκειμένου να γίνει αυτό εφικτό. Εφόσον τα femtocells στοχεύουν στη βελτίωση της κάλυψης της κινητής τηλεφωνίας, και η χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης σε κινητά τερματικά είναι ακόμα περιορισμένη, οι τεχνικές μοναδικής κεραίας ακύρωσης παρεμβολών (Single Antenna Interference Cancellation - SAIC) προτιμώνται, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι downlink παρεμβολές. Καθώς η έρευνα πάνω στη διαχείριση παρεμβολών είναι σημαντική και συνεχής,

πολλές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και πλήθος παραλλαγών έχουν προταθεί. Παρακάτω παρουσιάζουμε τις σημαντικότερες κατηγορίες όπως έχουν ταξινομηθεί και προταθεί από την 3GPP [4].

Προτού αναφερθούμε στις τεχνικές όμως, πρέπει να σημειώσουμε τις λειτουργίες που επιτρέπουν στα femtocells να υιοθετούν τις τεχνικές αυτές. Καθώς οι περισσότερες τεχνικές λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες του περιβάλλοντος, θα αναφέρουμε συνοπτικά ποιες παραμέτρους χρησιμοποιούν τα femtocells ώστε να ανιχνεύσουν το περιβάλλον και να προσαρμόσουν ανάλογα τις λειτουργίες τους.

4.4.2. Μέθοδοι ανίχνευσης παρεμβολών

Ένα femtocell μπορεί να εκτελέσει διάφορους τύπους μετρήσεων ώστε να αποκτήσει επαρκείς πληροφορίες για τον περιορισμό των παρεμβολών αλλά και πληροφορίες απαραίτητες ώστε η κάλυψη υπηρεσιών του femtocell να μπορεί να διατηρηθεί. Ανάλογα με τον τύπο μέτρησης, μερικές από αυτές τις μετρήσεις πιθανόν να συλλέγονται μέσω των συνδεδεμένων σε femtocell UEs ή μέσω ενός δέκτη εντός του femtocell. Όταν η λειτουργία γίνεται στο femtocell ονομάζεται Network Listen Mode (NLM), Radio Environment Measurement (REM) ή " femtocell Sniffer". Αυτές οι μετρήσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτό-ρύθμισης του femtocell. Οι μετρήσεις που μπορεί να εκτελεστούν χωρίζονται σε μετρήσεις που μπορεί να γίνουν σε όλα τα κελιά, που αφορούν μόνο τα περιβάλλοντα κελιά, μετρήσεις που αφορούν το στρώμα macrocell και μετρήσεις σε σχέση με άλλα femtocells.

Ένας βασικός τύπος μέτρησης είναι η λαμβανόμενη ισχύς των παρεμβολών (Received Interference Power ή RIP). Η μέτρηση γίνεται από το femtocell, που υπολογίζει τις παρεμβολές στο uplink που προέρχονται από macrocell χρήστες εις βάρος του femtocell. Μια τιμή RIP υψηλότερη από μια προκαθορισμένη τιμή, θα μπορούσε να σημαίνει πως τουλάχιστον ένας macrocell χρήστης είναι κοντά στο femtocell και η ισχύς μετάδοσής του δημιουργεί ισχυρές παρεμβολές στο femtocell.

Αυτή η τιμή μέτρησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής (path loss) μεταξύ του femtocell και του macrocell χρήστη υποθέτοντας ότι μόνο ένα macro τερματικό δημιουργεί το μεγαλύτερο μέρος της παρεμβολής. Είναι επίσης σημαντικό για το femtocell να μπορεί να διακρίνει μεταξύ της uplink παρεμβολής από το macro UE από σήματα των femtocell χρηστών ώστε να βελτιώσει την ακρίβεια της μέτρησης παρεμβολών. Ένας ακόμη τύπος μέτρησης είναι η μέτρηση Co-channel Reference Signal Received Power (RSRP). Αυτή μπορεί να εκτελεστεί από το femtocell, τον femtocell ή τον macrocell χρήστη και υπολογίζει ανάλογα την downlink παρεμβολή από το femtocell στα MUEs, τις παρεμβολές στο uplink από το femto UE στο macro στρώμα, τις uplink παρεμβολές από τα τους macro χρήστες στο femtocell, τις downlink παρεμβολές στα femtocells από τα γειτονικά femtocells και τις uplink παρεμβολές από τους femto χρήστες προς τα γειτονικά femtocells.

Πέραν των παραπάνω, υπάρχει η δυνατότητα τα femtocells μέσω του σήματος αναφοράς cell-specific reference signal (CRS), μετρούμενο σε dBm, να διαπιστώνουν αν βρίσκονται κοντά σε macrocell που μπορεί να τα επισκιάσει, ή αν είναι κοντά στα όρια του macrocell. Έκτος των παραπάνω, που χρησιμεύουν κυρίως για την παραμετροποίηση προς αποφυγή των παρεμβολών, και άλλες μετρήσεις όπως η αναγνώριση του cell ID των γειτονικών

κελιών, ή η μέτρηση των απωλειών διαδρομής από τους femtocell χρήστες ως το σταθμό βάσης του macrocell ή ως το femtocell, είναι πιθανές και χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό λειτουργίας μεταξύ των σταθμών βάσης των δύο στρωμάτων.

4.5. Τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών

Λόγω της σπουδαιότητας του προβλήματος των παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα, το ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω στις τεχνικές αντιμετώπισής τους είναι μεγάλο, και οι προτάσεις πολλές. Παρακάτω, περιγράφουμε αναλυτικά τις κατηγορίες τεχνικών που προτείνει ο οργανισμός 3GPP μέσω των προδιαγραφών που ορίζει για τα femtocells σε περιβάλλον LTE-A, και αφορούν κυρίως τον διαμερισμό στο πεδίο των συχνοτήτων και τον έλεγχο ισχύος των σταθμών βάσης. Επιπλέον, παρουσιάζουμε λεπτομερώς τους αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του προσομοιωτή και ακολουθούν τις ανωτέρω προδιαγραφές. Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στις τεχνικές που αφορούν το downlink των χρηστών, καθώς η επίτευξη υψηλών ρυθμών δεδομένων των χρηστών αποτελεί την κύρια μέριμνα της σχεδίασης δικτύου και αφετέρου, η ευελιξία της τεχνολογίας OFDMA που υλοποιείται στο downlink, επιτρέπει τον μεγάλο αριθμό διαθέσιμων τεχνικών.

4.5.1. Διαμερισμός συχνότητας.

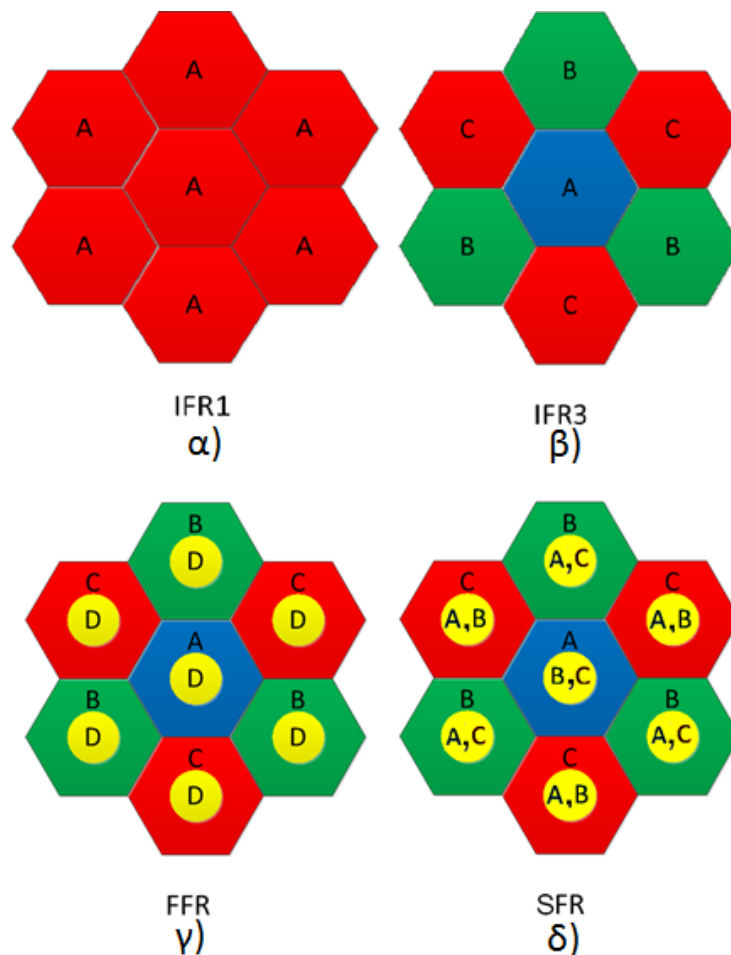
Ο διαμερισμός συχνοτήτων μεταξύ του macrocell και των femtocells μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό των παρεμβολών από femtocell σε macrocell. Το femtocell μπορεί να πάρει τις πληροφορίες διαμέρισης συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το γειτονικό macrocell μέσω διαδικασιών μέτρησης που εκτελούνται στο femtocell. Εναλλακτικά, ένα στατικό ή ημι-στατικό σχέδιο μπορεί να υιοθετηθεί κατά το οποίο μια προκαθορισμένη διαμέριση και κατανομή των συχνοτήτων έχει προσδιοριστεί από την κεντρική διαχείριση των macrocell. Για παράδειγμα, μπορεί τα macrocell να έχουν προγραμματιστεί να κατανέμουν resource blocks στους χρήστες τους με βάση την τοποθεσία τους. Όταν ένα femtocell προσδιορίζει τη θέση του, θα ξέρει βάσει της συμφωνίας ποια μπλοκ συχνοτήτων προορίζονται για χρήση από ένα κοντινό macro UE και ποια είναι διαθέσιμα.

Καθώς τα σενάρια αυτά εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, και πιο συγκεκριμένα, η προσαρμοζόμενη συμπεριφορά των femtocells σε macrocells με προκαθορισμένη κατανομή συχνοτήτων, θα αναφέρουμε ορισμένα σχήματα σε επίπεδο macrocell, τα οποία επηρεάζουν στη συνέχεια την απόδοση των τεχνικών αποφυγής παρεμβολών στο ετερογενές δίκτυο.

Η κατανομή στο στρώμα των macrocells είναι ευκολότερη γιατί γίνεται κεντρικά. Καθώς η περιοχή κάλυψης των κυψέλων είναι μεγάλη, παρουσιάζονται μεγάλες διαβαθμίσεις κατά μήκος των κελιών. Τις μεγαλύτερες συνέπειες του γεγονότος αυτού, τις δέχονται οι χρήστες που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, από τη μία το σήμα που λαμβάνουν είναι ασθενές εξαιτίας της απόστασής του από τον macro σταθμό βάσης, από την άλλη δέχονται co-layer παρεμβολές από τα γειτονικά macrocells. Μια τεχνική διαχείρισης του προβλήματος προτείνει τον καταμερισμό του φάσματος, όπως ακριβώς γίνεται και για την αποφυγή των διαστρωματικών παρεμβολών (cross-layer). Με την ανάθεση μέρους φάσματος

αποκλειστικά στους μη προνομιούχους χρήστες, θωρακίζεται η πρόσβαση των χρηστών στις macro υπηρεσίες.

Η έρευνα για την επιλογή του καταλληλότερου σχήματος διαμερισμού και κατανομής του φάσματος είναι μεγάλη, και πλήθος προτάσεων έχουν κατατεθεί από την ακαδημαϊκή κοινότητα. Η πλειοψηφία εξ αυτών μπορεί να θεωρηθούν παραλλαγές τριών κύριων προσεγγίσεων: του σχήματος Integer Frequency Reuse (IFR), του Fractional Frequency Reuse (FFR) και του Soft Frequency Reuse (SFR).



Εικόνα 21. Τα σημαντικότερα σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας

Το IFR είναι η απλούστερη μορφή διαχωρισμού και ανάθεσης φάσματος. Σε αυτήν, το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε τρία μέρη και κάθε κυψέλη αποκτά το δικαίωμα να χρησιμοποιήσει μόνο το ένα από τα τρία κλάσματα του φάσματος. Η ανάθεση γεωγραφικά γίνεται με τρόπο που εξασφαλίζει ότι δύο όμορες κυψέλες δε θα έχουν πρόσβαση στο ίδιο μέρος φάσματος (Εικόνα 21β). Ως εκ τούτου, οι co-layer παρεμβολές μεταξύ των macrocells εξαλείφονται. Αν και εξαιρετικά αποτελεσματικό ως τεχνική ακύρωσης παρεμβολών, το σχήμα IFR πάσχει από την έλλειψη αποδοτικής εκμετάλλευσης του πολύτιμου φάσματος, καθώς σε ολόκληρη την επιφάνεια των κελιών τα δύο τρίτα του φάσματος μένουν ανεκμετάλλευτα.

Μία περισσότερο περίπλοκη προσέγγιση σχήματος καταμερισμού φάσματος αποτελεί το FFR. Με βάση την προσέγγιση αυτή, το φάσμα διαιρείται σε τέσσερα μέρη και η κυψέλη σε δύο περιοχές: την κυκλική περιοχή γύρω από τον σταθμό βάσης (εσωτερική), και την υπόλοιπη

κυψέλη που περιλαμβάνει τα όρια του κελιού (εξωτερική). Ένα μέρος του φάσματος ανατίθεται προς χρήση για χρήστες που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή οποιασδήποτε κυψέλης. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η φασματική απόδοση του σχήματος. Τα υπόλοιπα μέρη ανατίθενται προς εκμετάλλευση από τις εξωτερικές περιοχές των κυψελών, με τρόπο που προσομοιάζει την κατανομή στο IFR. Η Εικόνα 21γ απεικονίζει γραφικά τον καταμερισμό των περιοχών συχνοτήτων ανά περιοχή.

Η τρίτη προσέγγιση επιδιώκει ακόμα μεγαλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος. Το SFR ακολουθεί την τακτική του FFR στον γεωγραφικό διαχωρισμό της κυψέλης (εσωτερική και εξωτερική περιοχή), καθώς και στην ανάθεση τμήματος φάσματος στις εξωτερικές περιοχές. Σε αυτό που διαφοροποιείται από το FFR, είναι πως δεν αφιερώνει αποκλειστικά μέρος φάσματος στους χρήστες της εσωτερικής περιοχής των κελιών. Αντίθετα, εκείνοι έχουν πρόσβαση στην περιοχή συχνοτήτων που έχουν διατεθεί στους χρήστες της εξωτερικής περιοχής των γειτονικών κελιών. Η Εικόνα 21δ διαφωτίζει τον καταμερισμό των συχνοτήτων ανά περιοχή. Όπως είναι φυσικό, η προσέγγιση αυτή, αν και επιτυγχάνει καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος, είναι περισσότερο ευάλωτη σε φαινόμενα παρεμβολών, λόγω της πιθανότητας συνύπαρξης κοντινών σχετικά χρηστών στο ίδιο μέρος του φάσματος.

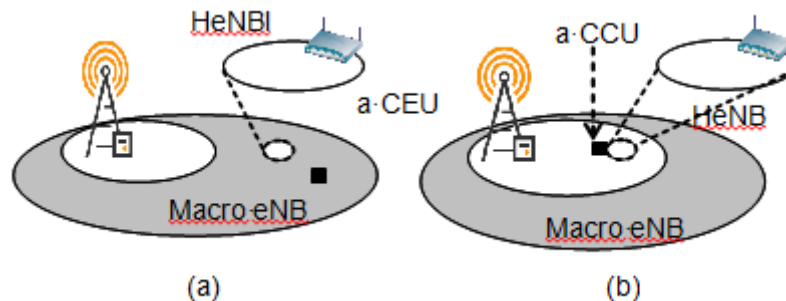
Για την βελτίωση του σχήματος SFR είναι σύνηθες να εφαρμόζεται παράλληλα έλεγχος ισχύος. Ο διαχωρισμός των περιοχών και των συχνοτήτων, επιτρέπει την εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων ισχύος μετάδοσης ανά περιοχή και συχνότητα. Η προσέγγιση που ακολουθείται είναι οι συχνότητες που ανατίθενται στους χρήστες της εξωτερικής περιοχής (cell-edge user - CEU) και θεωρούνται μη προνομιούχοι να μεταδίδονται με μεγαλύτερη ισχύ, από τις αντίστοιχες για τους κεντρικούς χρήστες (cell-center user - CCU), οι οποίοι ούτως ή άλλως έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες υψηλής ποιότητας σήματος. Θεωρώντας ότι P_{int} συμβολίζει την ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης όταν ο χρήστης είναι CCU και P_{ext} όταν πρόκειται για χρήστη CEU, ο λόγος b των επιπέδων ισχύος όπως ορίζεται στην παρακάτω εξίσωση ποικίλει:

$$b = \frac{P_{ext}}{P_{int}} \quad (4.2)$$

με το λόγο b να παίρνει συνήθως τιμές από 1 έως 6 [30]. Κάθε τιμή παρουσιάζει διαφορετικές επιδόσεις, με την τιμή $b = 2$ να αποδεικνύεται η πιο συμβιβαστική μεταξύ των επιλογών [30]. Ως εκ τούτου, και εφόσον εξυπηρετεί τους σκοπούς της σύγκρισης μεταξύ των σχημάτων, υιοθετήθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, σε σενάρια που ο χρήστης επιλέξει το σχήμα SFR στον εξομοιωτή.

Αν και η επιλογή του ακριβούς σχήματος ICIC σε επίπεδο macrocell είναι συνήθως ανεξάρτητη από την παρουσία άλλων μικρότερων σταθμών βάσης στο δίκτυο (λόγω της τυχαιότητας της εγκατάστασης των τελευταίων), μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα υπόλοιπα στρώματα προς όφελος της λειτουργίας τους και του δικτύου γενικότερα. Με τη γνώση της διαμέρισης των πόρων στο πεδίο των συχνοτήτων [31], για παράδειγμα σε FFR, το femtocell γνωρίζοντας ποιο σύνολο των πόρων επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί για τους χρήστες macrocell που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης, και ποιοι πόροι αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για macrocell χρήστες στα όρια της κυψέλης, μπορεί να συντονίσει τη μετάδοση του έτσι ώστε να αποφύγει τις παρεμβολές σε κοντινούς macro UE χρονοπρογραμματίζοντας με υψηλή

προτεραιότητα υπο-κανάλια που δεν χρησιμοποιούνται από κοντινούς macro χρήστες. Για παράδειγμα, αν το femtocell βρίσκεται στην άκρη του macrocell, το femtocell θα αναθέσει resource blocks που χρησιμοποιούνται από τους macro CCU για downlink μετάδοση. Αν αντίθετα, το femtocell βρίσκεται στο κέντρο του macrocell, το femtocell θα αναθέσει στους χρήστες του resource blocks που χρησιμοποιούνται από macro CEU για downlink (Εικόνα 22).



Εικόνα 22. Τα femtocells χρησιμοποιούν το ανεκμετάλλετο φάσμα στο σημείο εγκατάστασής τους, αν ο διαμερισμός έχει γεωγραφικά χαρακτηριστικά.
Πηγή: 3GPP

Επιπλέον, για να ελαχιστοποιηθεί η αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ femtocell και των γύρω κελιών, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι RSRP μετρήσεις, οι πληροφορίες από τον μηχανισμό επιλογής του κυρίαρχου σταθμού βάσης (cell re-selection priority - CRP) και τα RRC μηνύματα των γειτονικών κυψελών, ώστε να επιλέξουν δυναμικά το φορέα συχνότητας που θα λειτουργήσουν [32][33].

Ο αρχικός σκοπός των πληροφοριών CRP είναι να επιλέξουν για τους χρήστες το σωστό κελί με βάση την προτεραιότητα κάθε φορέα. Για την αποφυγή παρεμβολών, οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το femtocell για να επιλέξει την κατάλληλη συχνότητα λειτουργίας του, αποκωδικοποιώντας τα RRC μηνύματα από γειτονικές κυψέλες κατά την κανονική λειτουργία ή στην διαδικασία αυτο-ρύθμισης. Την ίδια στιγμή, το femtocell θα πρέπει να μετρά και τα RSRP των γειτονικών κυψελών προκειμένου να κάνει σωστή επιλογή. Επιπλέον, αν η πληροφορία προτεραιότητας των γειτονικών κυψελών αλλάξει κάποια στιγμή αφού το femtocell έχει ήδη ρυθμιστεί, το femtocell πρέπει περιοδικά να ενημερώνει τις πληροφορίες προτεραιότητας, να μετρά τα σήματα RSRP και να ρυθμίζει τη συχνότητα λειτουργίας του, αν αυτό κριθεί απαραίτητο).

Τα σχήματα επιλογής συχνότητας εφαρμόζονται πιο αποτελεσματικά σε femtocells λειτουργίας CSG για την αποφυγή των παρεμβολών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν οφέλη στη χρήση του και στην περίπτωση που τα femtocell λειτουργούν με πολιτική ανοικτής ή υβριδικής λειτουργίας πρόσβασης.

Ως τώρα οι τεχνικές κάλυπταν την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ femtocell και macrocell. Όπως έχουμε αναφέρει όμως υπάρχουν και οι co-layer παρεμβολές μεταξύ των femtocells. Όταν ένα femtocell ενεργοποιείται, «ακούει» τα σήματα μετάδοσης αναφοράς και τα κανάλια ελέγχου των γειτονικών femtocells, καθορίζει το αναγνωριστικό κυψέλης κάθε γειτονικού femtocell και μετρά τις απώλειες διαδρομής από το καθένα από αυτά. Επιπλέον, το femtocell μπορεί επίσης να λαμβάνει τυχόν αναφορές των μετρήσεων από τους χρήστες. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, το femtocell μπορεί να χρησιμοποιήσει μερική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

(FFR) για να διασφαλίσει την ορθογωνιότητα των πόρων και να αυξήσει έτσι τη συνολική απόδοση του δικτύου, όπως θα φανεί και από τα πειραματικά αποτελέσματα.

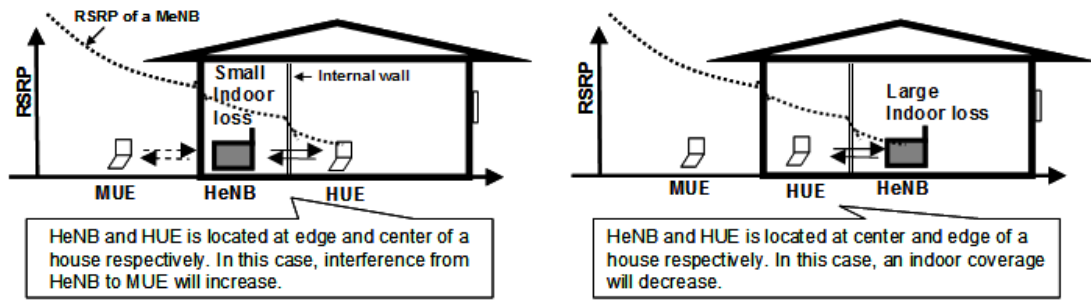
Ο συντονισμός μεταξύ των femtocells για την κατανομή των συχνοτήτων, μπορεί να γίνει είτε κατανεμημένα, ή μέσω κεντρικής διαχείρισης. Με την κεντρική διαχείριση, ο έλεγχος γίνεται κάπου κεντρικά όπου ανάλογα του φορτίου και της κατάστασης καναλιού για κάθε femtocell, αποφασίζεται η βέλτιστη κατανομή των πόρων στα femtocells. Η επικοινωνία μεταξύ των femtocell και του κεντρικού συντονιστή γίνεται μέσω S1 σηματοδοσίας. Η επιβάρυνση στο φόρτο του δικτύου λόγω της σηματοδοσίας μπορεί να γίνει σημαντική όταν ο αριθμός των femtocell αυξηθεί αρκετά ή όταν οι συνθήκες καναλιού και οι αιτήσεις για πόρους παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Αντίθετα, στην κατανεμημένη προσέγγιση, κάθε femtocell, βάση των πληροφοριών που συλλέγει, μπορεί να διαπιστώσει αν υπάρχει σύγκρουση ανάμεσα σε αυτό και ένα κοντινό femtocell, αν για παράδειγμα η διαφορά μεταξύ ενός σήματος παρεμβολής και του σήματος μετάδοσης ξεπερνά κάποιο κατώφλι. Με τον εντοπισμό των συγκρούσεων αυτών, το πρόβλημα διαμερισμού συχνοτήτων μετατρέπεται σε πρόβλημα χρωματισμού γράφου, το οποίο μπορεί να λυθεί με κατανεμημένο τρόπο και μικρή περιπλοκότητα. Ενδεικτικοί αλγόριθμοι και οι επιδόσεις τους μπορεί να βρεθούν στα [34],[35],[36],[37], για περιπτώσεις FDD και TDD, και σενάρια full ή non-full buffer.

4.5.2. Έλεγχος ισχύος

Όπως έχουμε αναφέρει, τα femtocells θέτουν τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης μετρώντας τις περιβάλλουσες συνθήκες RF, προκειμένου να αποφύγουν τις παρεμβολές σε macrocell χρήστες, αλλά και να διατηρήσουν καλή κάλυψη για τους χρήστες του femtocell. Παρόλα αυτά, μπορεί να υπάρξει μεγάλη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων από τα femtocells και τις συνθήκες που πραγματικά υφίστανται οι χρήστες. Ακόμα και σε εσωτερικούς χώρους τα femtocells και οι χρήστες μπορεί να μετρήσουν αρκετά διαφορετικές συνθήκες, είτε μεταξύ διαφορετικών δωματίων, ορόφων κλπ.

Ένα παράδειγμα της σημαντικής αυτής διαφοράς φαίνεται στην Εικόνα 23. Στα αριστερά, απεικονίζεται το σενάριο όπου ένα femtocell και ένας femto χρήστης βρίσκεται στην άκρη και το κέντρο του σπιτιού, αντίστοιχα, και ένας macro χρήστης βρίσκεται πολύ κοντά. Η άκρη και το κέντρο του σπιτιού θεωρούμε ότι είναι απομονωμένα από ένα εσωτερικό τοίχωμα. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς εκπομπής του femtocell έχει οριστεί σε μια σχετικά υψηλή τιμή επειδή η στάθμη σήματος από το macro σταθμό βάσης (RSRP) είναι σχετικά υψηλή. Ως αποτέλεσμα, οι παρεμβολές στο macro τερματικό θα αυξηθούν σημαντικά και η εμβέλεια του femtocell θα αυξηθεί χωρίς κάτι τέτοιο να είναι απαραίτητο. Από την άλλη πλευρά, στην εικόνα στα δεξιά απεικονίζεται το σενάριο όπου ένα femtocell και ένας χρήστης του βρίσκεται στο κέντρο και την άκρη ενός σπιτιού, αντιστοίχως, και ένας macrocell χρήστης βρίσκεται κοντά στο σπίτι. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς εκπομπής του femtocell τίθεται σε μια σχετικά χαμηλότερη τιμή επειδή η στάθμη σήματος από το macrocell είναι σχετικά χαμηλή. Ως αποτέλεσμα, η εσωτερική κάλυψη του femtocell μειώνεται σημαντικά, ενώ και οι παρεμβολές στο macro UE θα μειωθούν. Σε αυτά τα σενάρια, είναι απαραίτητο για το femtocell να εξετάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων των χρηστών του προκειμένου να καθορίσει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης.



Εικόνα 23. Η ανίχνευση των συνθηκών μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε λανθασμένα συμπεράσματα. Είτε στην αναίτια αύξηση της ισχύς του femtocell (αριστερά), είτε στην μείωσή της με αρνητικές επιπτώσεις στην εμβέλεια κάλυψης.

Πηγή: 3GPP

Προκειμένου να βελτιωθούν τα ανωτέρω προβλήματα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις από τους femto χρήστες για τη βελτιστοποίηση της ισχύς εκπομπής των femtocells μετά την αρχική παραμετροποίηση. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε co-channel παρατάξεις και μπορεί να προσφέρει καλύτερη προστασία στους macro χρήστες διατηρώντας παράλληλα καλή κάλυψη του femtocell.

Κάθε femtocell πρέπει αρχικά να θέσει την ισχύ εκπομπής βάσει των μετρήσεων των RF συνθηκών του macrocell όπως το RSRP. Στη συνέχεια οι femto χρήστες θα πρέπει να μετρούν το επίπεδο ποιότητας του σήματος αναφοράς από το femtocells, όπως το RSRP ή το RSRQ και να αναφέρουν αυτήν την τιμή στο femtocell. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων, το femtocell θα πρέπει να βελτιώσει την ισχύ εκπομπής, έτσι ώστε οι επόμενες αναφερόμενες τιμές μέτρησης να είναι κοντά σε μια προκαθορισμένη και συμφωνημένη τιμή. Αν συνδέονται πολλοί χρήστες με το femtocell, τότε θα πρέπει η μικρότερη τιμή των αναφερόμενων αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις κάθε χρήστη να φτάσει την τιμή-στόχο.

Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να βελτιώσει το πρόβλημα που απεικονίστηκε ανωτέρω. Στην εικόνα αριστερά το femtocell θα μειώσει την ισχύ εκπομπής και η παρεμβολή στο χρήστη του macrocell θα μετριαστεί, επειδή το αποτέλεσμα της μέτρησης από το femto UE δείχνει ικανοποιητική ποιότητα οπότε θεωρείται προτιμότερο να μειώσει την ισχύ μετάδοσης. Στο σχήμα δεξιά το femtocell θα αυξήσει την ισχύ εκπομπής και η εσωτερική κάλυψη θα πρέπει να διευρυνθεί, διότι το αποτέλεσμα της μέτρησης του femto UE δείχνει κακή ποιότητα οπότε κρίνεται προτιμότερο να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής.

Πάνω στην λογική της περιοδικής καταμέτρησης μιας μετρικής ποιότητας υπηρεσιών, και την αντίστοιχη ρύθμιση της ισχύος έχουν προταθεί πλήθος αλγορίθμων. Ενδεικτική μέθοδος αποτελεί ο αλγόριθμος που βασίζεται στην μέτρηση του SINR σε συγκεκριμένη απόσταση από το femto σταθμό βάσης. Κάθε femtocell αναπροσαρμόζει την ισχύ μετάδοσής του περιοδικά για να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή SINR σε μια καθορισμένη ακτίνα από το femto BS. Αν $SINR_t$ και $SINR_c$ δηλώνουν την τιμή-στόχο και την τρέχουσα τιμή SINR, αντιστοίχως, ένας πολύ γνωστός και σταθερός αλγόριθμος [38][39], ο οποίος συγκλίνει στην ελάχιστη ισχύς μετάδοσης που απαιτείται για να επιτευχθεί το $SINR_t$ δίνεται από:

$$P(k + 1) = \frac{SINR_t}{SINR_c} P(k) \quad (4.3)$$

όπου $P(k + 1)$ δηλώνει το επίπεδο ισχύος του femtocell στην k -οστή επανάληψη. Ο παραπάνω αλγόριθμος εγγυάται την αποτελεσματικότητά του όσο οι απαιτήσεις παραμένουν εφικτές. Αν κάτι τέτοιο δεν ισχύει και δεν υπάρχει εφικτή λύση, ο αλγόριθμος οδηγεί την ισχύ του femtocell σε ατέρμονη αύξηση. Για την αποφυγή της εκδοχής αυτής, θεσπίζονται προκαθορισμένες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές. Ο αλγόριθμος σταματά όταν είτε έχει συγκλίνει σε ένα αποδεκτό βαθμό ή έχει φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.

Καθώς το επίκεντρο της παρούσης εργασίας είναι οι παρεμβολές, που εκφράζονται επαρκώς μέσα από τη μετρική SINR, και το μοντέλο για τον υπολογισμό της απόδοσης του δικτύου που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5 το επιτρέπει, υιοθετούμε την παραπάνω προσέγγιση για ενσωμάτωση στον εξομοιωτή μας, αναφερόμενοι σε αυτήν ως μέθοδο σταθερού SINR.

Αν και η προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη μετρήσεις από τους χρήστες είναι ακριβής, η επιβάρυνση του φόρτου λόγω σηματοδότησης, η αδυναμία όλων των τερματικών για ακριβείς μετρήσεις και η αυξημένη πολυπλοκότητα του σχήματος, κάνουν απλούστερες προσεγγίσεις προτιμητέες. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται στις μετρήσεις από το macro σταθμό βάσης, αλλά και από την εκτίμηση των απωλειών διαδρομής. Στην πρώτη περίπτωση οι παρεμβολές αποφεύγονται με τη ρύθμιση της ισχύς μετάδοσης του femtocell στο downlink με βάση μετρήσεις που αφορούν την συνολική λαμβανόμενη παρεμβολή, το δεχόμενο CRS από το κυρίαρχο macrocell κλπ. Στη δεύτερη περίπτωση το femtocell ρυθμίζει την ισχύ μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες διαδρομής μεταξύ του femtocell και ενός εξωτερικού γειτονικού macrocell, περιλαμβάνοντας τις απώλειες διάδοσης λόγω διείσδυσης (penetration loss). Ως αποτέλεσμα, όταν το femtocell βρίσκεται κοντά στα όρια του macrocell, η ισχύς μετάδοσης θα μειώνεται ώστε να μην παρεμβάλλεται στην ασθενή σύνδεση του macro UE με το macrocell.

Ένα παράδειγμα τέτοιου αλγορίθμου εμφανίζεται στο [40]. Το femtocell χρησιμοποιεί τις απώλειες από το κοντινότερο macrocell προκειμένου να εξασφαλίσει σταθερή εμβέλεια για τους femto χρήστες. Κάθε femtocell θέτει την ισχύ μετάδοσης σε μια τιμή που κατά μέσο όρο είναι ίση με την ισχύ που λαμβάνει από το πλησιέστερο macrocell σε μία συγκεκριμένη απόσταση από το femtocell r . Και σε αυτήν την περίπτωση τίθεται μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για την ισχύ P_{max} , ανεξάρτητα αν η εμβέλεια του femtocell έχει επιτευχθεί. Η ισχύς μετάδοσης του femto BS μπορεί να υπολογιστεί σε dB, βάση της :

$$P_f = \min(P_m + G_\theta - PL_m(d) + PL_f(r), P_{max}) \quad (4.4)$$

Όπου $PL_f(r)$ είναι οι απώλειες διαδρομής στο σημείο σε απόσταση r από το femtocell και P_m είναι η ισχύς μετάδοσης του macro σταθμού βάσης της κυψέλης που είναι εγκατεστημένο το femtocell. Το G_θ είναι το κέρδος κεραίας στην κατεύθυνση του femtocell και το $PL_m(d)$ συμβολίζει τις μέσες απώλειες διαδρομής από το macrocell στην απόσταση d του femtocell (χωρίς να λαμβάνονται απώλειες λόγω τοίχων). Με την παραπάνω προσέγγιση, επιτυγχάνεται σταθερή εμβέλεια για το femtocell ανεξαρτήτως της απόστασής του από το macrocell, αφού ένα μακρινό από το κέντρο της κυψέλης femtocell που θα ανιχνεύει ασθενές macro σήμα, θα μειώνει την ισχύς μετάδοσης, ενώ ένα κοντινό θα την αυξάνει.

Η παραπάνω μέθοδος υλοποιημένη στον προσομοιωτή θα αναφέρεται από δω και στο εξής ως μέθοδος ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.

Αξίζει τέλος, να αναφέρουμε μια κατηγορία τεχνικών αποφυγής παρεμβολών που χρησιμοποιεί μετρήσεις που στηρίζονται στην ανίχνευση μέσω Global Positioning System (GPS). Οι τεχνικές αυτές συνήθως παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια, αλλά έχουν το πλεονέκτημα πως το GPS είναι μια τεχνολογία ώριμη, φθηνή και ήδη ευρέως διαδεδομένη. Η πληροφορία που μπορεί να αποκομισθεί με τη μέθοδο αυτή, περιλαμβάνει δύο σκέλη. Το πρώτο είναι ο αριθμός των ανιχνευμένων δορυφόρων και το δεύτερο η ποιότητα λήψης από αυτούς. Ο τρόπος που το femtocell μπορεί να διαχειριστεί την πληροφορία αυτή ποικίλει. Για παράδειγμα, φτωχή ποιότητα λήψης μπορεί να σημαίνει πως το femtocell είναι απομονωμένο και περιβάλλεται από εξωτερικούς σταθμούς. Αυτό σημαίνει λιγότερες παρεμβολές σε εξωτερικούς macro χρήστες, άρα και μεγαλύτερη επιτρεπτή ισχύς μετάδοσης ώστε να καλύψει το εσωτερικό του κτιρίου. Από την άλλη, δυνατή δορυφορική ανίχνευση σημαίνει πως το femtocell είναι εκτεθειμένο και πιθανώς να προκαλέσει παρεμβολές σε κοντινά macrocell τερματικά. Φυσικά, η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να συνδυαστεί με μετρήσεις προερχόμενες από τον σταθμό βάσης του macrocell ώστε περισσότερες πληροφορίες να μπορούν να αξιοποιηθούν για την καλύτερη ρύθμιση του femtocell.

4.5.3. Άλλες μέθοδοι

Πέραν των μεθόδων ελέγχου ισχύος και διαμέρισης συχνοτήτων, υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι για την αποφυγή και εξάλειψη των παρεμβολών. Μία από αυτές είναι και η αλλαγή του CSG ID ενός femtocell κλειστής πρόσβασης δυναμικά, μεταξύ του προκαθορισμένου κατά την εγκατάστασή του CSG ID, και ενός ειδικού CSG ID, που ορίζεται από τον διαχειριστή του συστήματος. Όταν γίνεται η αλλαγή του CSG ID στο ειδικό CSG ID, το μέχρι πρότινος κλειστής πρόσβασης femtocell γίνεται προσβάσιμο σε κάθε περαστικό UE εντός εμβέλειας, εξαλείφοντας τις παρεμβολές προς το macrocell στρώμα.

Με τη δυναμική αλλαγή του CSG ID με συντονισμένο τρόπο, μπορεί να διασφαλιστεί πως ο αριθμός των femtocells κλειστής πρόσβασης που λειτουργούν με το αρχικό CSG ID, δεν ξεπερνά ένα προκαθορισμένο πάνω όριο σε κάθε χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό, ενδεχόμενη μεγάλη αύξηση του αριθμού των femtocells δε θα σημαίνει αύξηση των συνολικών παρεμβολών κατά μήκος της κυψέλης, αφού οι αριθμός των femtocells-θυτών, παραμένει σταθερός. Περεταίρω παραμετροποιήσεις και παραλλαγές του μηχανισμού περιλαμβάνουν διαφορετικά όρια ανά macrocell, ανά κατάσταση φόρτου του δικτύου, ενεργοποίηση συγκεκριμένες ώρες κλπ. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να είναι κατανομημένος ή να λαμβάνει χώρα μέσω κεντρικού ελέγχου.

Τέλος, μια ακόμα μέθοδος αποφυγής παρεμβολών, είναι ο περιορισμός των πόρων μετάδοσης του femtocell, όταν υπάρχει κοντά UE το οποίο υφίσταται παρεμβολές. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι οι περιορισμοί στη μετάδοση του femtocell τίθενται μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο, δηλαδή ξεχωριστά για κάθε χρήστη. Για να βρεθεί αν υπάρχουν UEs θύματα στην εμβέλεια ενός femtocell, υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη η απόφαση παίρνεται στο macrocell ή στο femtocell, βασισμένα στις αναφορές μετρήσεων από τα UE. Στη δεύτερη η απόφαση λαμβάνεται από το femtocell βασισμένο στην ανίχνευση μεταδόσεων uplink από ενδεχόμενα UEs θύματα. Αν και μια τέτοια προσέγγιση έχει ιδανικά αποτελέσματα καθώς

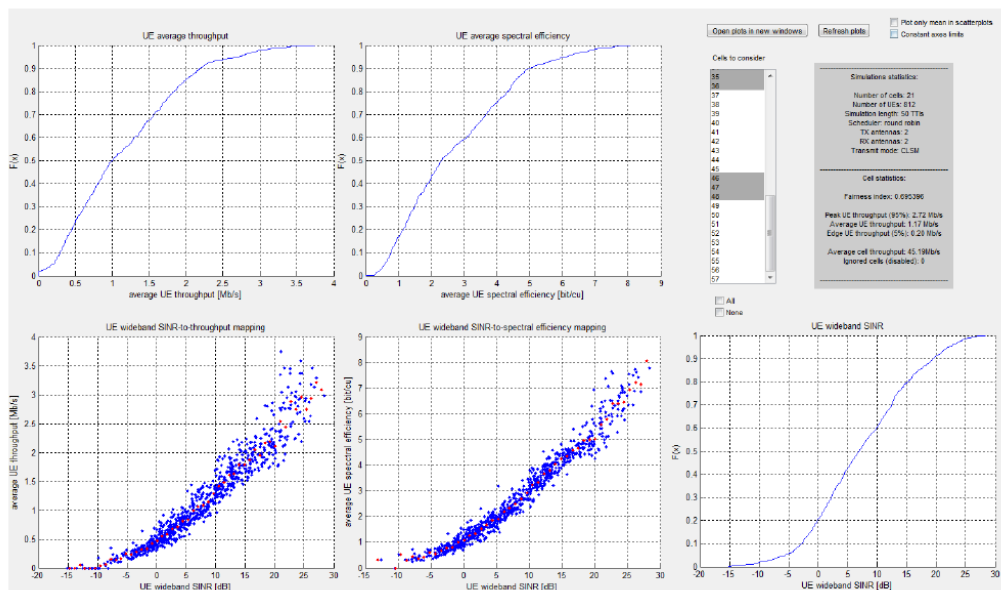
προσαρμόζεται ακριβώς σε κάθε χρήση, η πολυπλοκότητα του συστήματος και η επιβάρυνση στη σηματοδοσία αποτελούν παράγοντες που δυσχεραίνουν την υλοποίησή της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

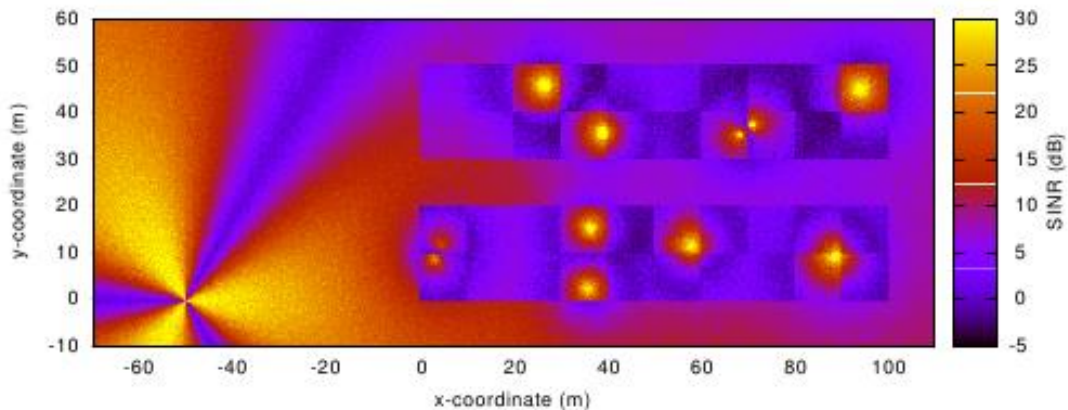
Η επιτυχία της τεχνολογίας femtocells και η πολυπλοκότητα της διαμόρφωσης εγκατάστασής τους, μαζί με το μεγάλο αριθμό των παραμέτρων που επηρεάζουν την τελική απόδοση των διαφορετικών στρωμάτων των ετερογενών δικτύων, έχουν οδηγήσει στη δημιουργία πολλών διαθέσιμων προσομοιωτών. Ωστόσο, η πλειονότητα αυτών προορίζονται για εμπορική χρήση.

Δύο γνωστά περιβάλλοντα που είναι διαθέσιμα δωρεάν είναι οι εξομοιωτές του πανεπιστημίου της Βιέννης [41] και ο εξομοιωτής LTE-EPC [42]. Το πρώτο προσφέρει LTE - A link και system level προσομοιώσεις για downlink και uplink, ενώ επιτρέπει την παραμετροποίηση ρυθμίσεων, όπως τον αριθμό των χρηστών και το μοντέλο του καναλιού. Οι μετρικές που εξάγει για την εκτίμηση της απόδοσης είναι ο ρυθμός δεδομένων, το SINR, το BER και τη μέση φασματική απόδοση. Αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνει είναι η ενσωμάτωση σεναρίων πολλαπλών κεραιών, και στοιχειώδη ελευθερία στην επιλογή του χρονοπρογραμματισμού. Η εξαγωγή αποτελεσμάτων γίνεται είτε μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων, είτε μέσω γραφικών παραστάσεων των μετρικών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Ο εξομοιωτής είναι υλοποιημένος σε περιβάλλον MATLAB.



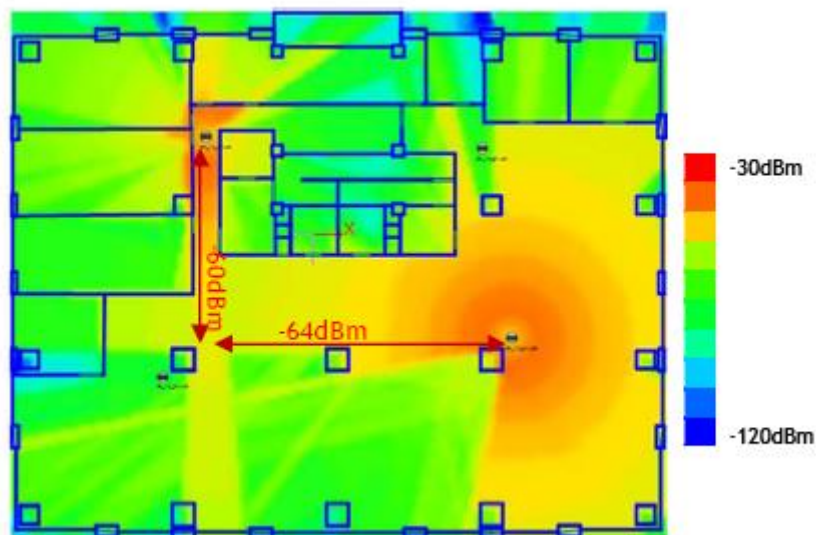
Εικόνα 24. Παράδειγμα εξαγόμενων αποτελεσμάτων στον LTE εξομοιωτή του πανεπιστημίου της Βιέννης.

Το δεύτερο εργαλείο καλύπτει διάφορες πτυχές των LTE δικτύων, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, της υποστήριξης ετερογενών περιβάλλοντων, την κινητικότητα των χρηστών ενώ υλοποιεί και τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων (δυστυχώς όχι του συνόλου των μεθόδων που εξετάζουμε εδώ). Αξίζει να σημειωθεί πως ο εξομοιωτής είναι ανοιχτού κώδικα υλοποιημένος σε ns-3, ενώ προσφέρει σημαντική ελευθερία στις παραμέτρους. Κύριο μειονέκτημα είναι η απαιτούμενη εξοικείωση με το περιβάλλον εξομοίωσης ns-3, και η αυξημένη περιπλοκότητα στη χρήση, που ίσως αποτρέψει κάποιους χρήστες. Η Εικόνα 25 παρουσιάζει ένα παράδειγμα χρήσης της γραφικής αναπαράστασης του εξομοιωτή, σε σενάριο ετερογενούς δικτύου.



Εικόνα 25. Παράδειγμα χρήσης του εξομοιωτή LTE-EPC.

Για λόγους πληρότητας, σημειώνουμε και ένα παράδειγμα εμπορικού εξομοιωτή με δυνατότητες πρόβλεψης της απόδοσης femtocell-macrocell δικτύων. Ένα ισχυρό και επιτυχημένο εργαλείο που διατίθεται εμπορικά είναι το iBuildNet[®] από την εταιρία Ranplan (<http://www.ranplan.co.uk/>). Ένα δείγμα χρήσης του εξομοιωτή φαίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26. Παράδειγμα χρήσης του εμπορικού εξομοιωτή iBuildNet[®].

Ως εμπορικό εργαλείο, προσφέρει πλήθος επιλογών και τεράστια ελευθερία σχεδίασης, όπως η ακριβής αναπαράσταση ενός χώρου ή μιας περιοχής, τρισδιάστατη απεικόνιση, αυτόματους μηχανισμούς βελτιστοποίησης κλπ. Εξαιτίας του όγκου των χαρακτηριστικών και υπηρεσιών που προσφέρει, απευθύνεται κυρίως σε διαχειριστές ασύρματων συστημάτων, οι οποίοι δικαιολογούν το υψηλό κόστος απόκτησής του, μέσω της εξοικονόμησης στη λειτουργία του δικτύου, που η χρήση του μπορεί να επιφέρει.

Πέραν των εργαλείων προσομοίωσης, υπάρχει επίσης μεγάλος όγκος επιμέρους αποτελεσμάτων σχετικά με την απόδοση και προσομοίωση συγκεκριμένων σεναρίων. Η τεχνική έκθεση [43] από το 3GPP παρέχει μια εκτενή ανάλυση των διαφόρων σεναρίων παρεμβολών (ομοστροφιακές και διαστροφιακές), θεωρώντας ανοικτής και κλειστής πρόσβασης WCDMA femtocells. Η μελέτη που παρουσιάζεται στο [44] εξετάζει την αποφυγή παρεμβολών όταν femtocells έχουν αναπτυχθεί σε WiMAX δίκτυα. Συγκεκριμένα, αναπτύσσει και προτείνει ένα

περιβάλλον εξομοίωσης, με το οποίο καταλήγει πως υπάρχουν σημαντικά οφέλη στη χωρητικότητα του συστήματος, με την υιοθέτηση δυναμικής ανάθεσης συχνοτήτων σε σχέση με άλλες στρατηγικές.

Σε κυψελοειδή δίκτυα UMTS, και για σενάρια παρεμβολών μεταξύ macrocells και femtocells ανοιχτής πρόσβασης επικεντρώθηκε η εργασία [40]. Το σημαντικότερο συμπέρασμα της ανάλυσης ήταν ότι τα προβλήματα παρεμβολών για συνυπάρχοντες macrocell και femtocell σταθμούς βάσης, δεν θα εμφανίζονται σε αυτήν την περίπτωση, παρά μόνο εάν κάποιος ταχύτατα κινούμενος macro χρήστης που περνάει κοντά από ένα femtocell, δεν προλάβει να μεταπεμφθεί σε αυτό. Μια παρουσίαση των ζητημάτων των παρεμβολών σε σενάρια femtocells πάνω από OFDMA τεχνολογίες γίνεται στο [45], όπου παρουσιάζονται επιγραμματικά οι κύριες προσεγγίσεις αντιμετώπισής τους και περιγράφονται οι τεχνικές προκλήσεις που εμπεριέχονται στη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη των femtocells.

Όσο αφορά την έρευνα σχετικά με τις διαθέσιμες επιλογές διαχείρισης παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα, είναι επίσης εκτεταμένη. Η μελέτη στο [46] παρουσιάζει μια επισκόπηση των γενικών προσεγγίσεων όσον αφορά τη διαχείριση παρεμβολών σε αυτο-ρυθμιζόμενα femtocells. Πέραν της προσέγγισης του ελέγχου ισχύος και της εισαγωγής σε μεθόδους διαμέρισης φάσματος, η παρουσίαση καλύπτει και θέματα που άπτονται των προαπαιτούμενων μηχανισμών για την επιτυχία των παραπάνω μεθόδων, όπως ο συγχρονισμός των femtocells, οι μηχανισμοί αυτορρύθμισης κλπ. Η μελέτη δεν μπαίνει σε λεπτομέρειες υλοποίησης των μηχανισμών, αλλά αποτελεί μια καλή εισαγωγή στο ζήτημα αυτό. Αντίθετα, στη [40], προτείνεται η μέθοδος ελέγχου ισχύος που αναλύσαμε στην ενότητα 4.5.2 και εξασφαλίζει σταθερή ακτίνα κάλυψης των femtocell ανεξάρτητα της θέσης τους στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται, λαμβάνοντας υπόψη την απώλεια διαδρομής του macrocell σήματος και την ισχύ του σήματος που έλαβε από το femtocell.

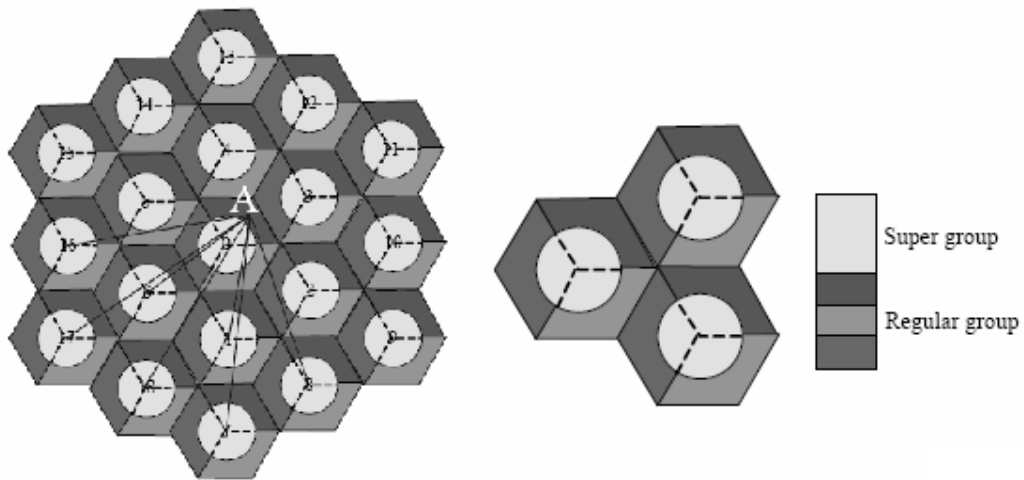
Άλλες μέθοδοι ελέγχου ισχύος που προσαρμόζουν το SINR του femtocell, και εμφανίζονται σε διάφορες δημοσιεύσεις, όπως η [47], σχετίζονται με την θεωρία παιγνίων μη συνεργασίας. Η προσαρμογή επιβάλλει σε femtocells που προκαλούν τις ισχυρότερες παρεμβολές να φθάσουν την ελάχιστη τιμή για το SINR, ενώ σε femtocells που προκαλούν μικρότερες διαστρωματικές παρεμβολές επιτρέπονται υψηλότερα περιθώρια στο επιτεύξιμο SINR. Αυτό είναι παρόμοιο με το σύστημα που παρουσιάζεται στο [48], όπου ένας καταναμημένος αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιεί ελαστικούς περιορισμούς στις τιμές στόχους για το SINR ανάλογα με την κίνηση, και τους χαλαρώνει ή αυστηροποιεί ανάλογα με την επιτευξιμότητα του συστήματος. Ένας άλλος αλγόριθμος που επιδιώκει τη βέλτιστη λύση παρουσιάζεται στο [49] και προτείνει μια παρόμοια μέθοδο, όταν το ζητούμενο σύστημα δεν είναι επιτεύξιμο. Πιο συγκεκριμένα, μετατρέπει τις QoS απαιτήσεις σε ελάχιστες τιμές SINR, και προτείνει έναν καταναμημένο επαναληπτικό αλγόριθμο, με αποτελέσματα κοντά στα βέλτιστα, όταν οι στόχοι για τις τιμές SINR δεν είναι εφικτοί.

Πέρα από την απόδοση των επιμέρους χρηστών συνδεδεμένων στα femtocells, ο έλεγχος ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την επίτευξη βέλτιστης κάλυψης. Το τελευταίο μπορεί να γίνει κυρίως μέσω κεντρικού συντονισμού ανάμεσα στα femtocells. Οι συγγραφείς της εργασίας [50], προτείνουν μια μέθοδο τέτοιου τύπου, βάση της οποίας η ισχύ μετάδοσης των femtocells ρυθμίζεται σε σχέση με τον αριθμό των μεταπομπών και του αριθμού των χρηστών σε εσωτερικούς χώρους, ώστε να αποφευχθούν οι τρύπες κάλυψης που δημιουργεί η μείωση της

ισχύς του femtocell που επιλέγεται όταν υπάρχουν πολλαπλοί κινούμενοι περαστικοί χρήστες. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται και ο φόρτος στο κεντρικό δίκτυο που οφειλόταν στην αυξημένη σηματοδοσία.

Για τον γεωγραφικό σχεδιασμό του δικτύου femtocell και τον προγραμματισμό κάλυψης, πολλές εργασίες υπάρχουν, όπως η [51], η οποία προτείνει ένα μηχανισμό κάλυψης για ετερογενή δίκτυα σε LTE περιβάλλοντα στα οποία έχουν εναποτεθεί πυκνές συστοιχίες femtocells, αλλά και η [52], η οποία προτείνει τη μείωση των περιττών μεταπομπών μέσα από μια διαδικασία πρόβλεψης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα πρόβλεψης της θέσης των κελιών με τρόπο που μειώνει το φόρτο που απαιτείται για την δημιουργία της λίστας των γειτονικών κελιών (neighbor list), καθώς και ένα σύστημα πρόβλεψης για τη μείωση των μεταπομπών βασισμένο στη θεωρία παιγνίων, που λαμβάνει υπόψη το ρυθμό μετάδοσης, τις παρεμβολές και τις τοποθεσίες των σταθμών βάσης.

Οι μέθοδοι κατανομής συχνοτήτων ως μέσο περιορισμού των παρεμβολών έχουν επίσης ερευνηθεί και συνεχίζουν να αποτελούν αντικείμενο έρευνας. Μια παραλλαγή του FFR σχήματος παρουσιάζεται στη [53] πετυχαίνοντας μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και λιγότερες παρεμβολές από το παραδοσιακό σχήμα. Η Εικόνα 27 απεικονίζει το σχήμα αυτό, που ουσιαστικά αποτελεί συνδυασμό της FFR τεχνικής, προσαρμοσμένο σε περιβάλλον κυψελών διαιρεμένων σε τρεις τομείς (3-sectoring). Το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερη χωρητικότητα και μειωμένες co-channel παρεμβολές, γεγονός που συνεισφέρει στο μεγαλύτερο επιτεύξιμο ρυθμό δεδομένων στα κελιά.



Εικόνα 27. Δομή του σχήματος κατανομής συχνοτήτων βασισμένου στο FFR και το διαχωρισμό της κυψέλης σε τομείς.

Μια μέθοδος βελτιστοποίησης των FR παραμέτρων παρουσιάζεται στη [54], βασισμένη στη δυναμική μεταβολή του χωρικού διαχωρισμού της κυψέλης και της ανάθεσης συχνοτήτων, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς εξετάζουν και συγκρίνουν την απόδοση των ICIC σχημάτων κατανομής συχνοτήτων IFR, FFR και SFR, χωρίς όμως την παρουσία small cells. Παράλληλα, στην περίπτωση του SFR, FFR προτείνεται ένας αλγόριθμος που αναζητά τον βέλτιστο διαχωρισμό των ζωνών συχνοτήτων βάση των απαιτήσεων των χρηστών εκείνη τη στιγμή στο σύστημα, ενώ εκτελεί παρόμοια αναζήτηση για το χωρικό διαχωρισμό των κυψελών σε κεντρική και ακριτική περιοχή προκειμένου τη βέλτιστη απόδοση ανάλογα με τη θέση των χρηστών. Οι μετρικές τις οποίες

βελτιστοποιεί είναι είτε η συνολική χωρητικότητα του δικτύου, είτε η εξισορρόπηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας σε όλους τους χρήστες της κυψέλης.

Οι συγγραφείς της [55] αξιολογούν τις παρεμβολές σε ετερογενή δίκτυα macrocell-femtocell, παρέχοντας αποτελέσματα προσομοίωσης για co-channel λειτουργία και υβριδικών σχημάτων κατανομής συχνοτήτων, αλλά αφορούν δίκτυα βασισμένα στο πρότυπο WCDMA. Η εργασία [56] εξετάζει μια ευρεία κατηγορία ζητημάτων πάνω στη διαχείριση παρεμβολών σε ετερογενή συστήματα εστιάζοντας στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης της απόφασης κατανομής των διαθέσιμων πόρων βασισμένοι στο μοντέλο μεγιστοποίησης της χρησιμότητας (utility maximization model). Η εργασία προτείνει ένα επαναληπτικό αλγόριθμο διάδοσης πεποίησης προκειμένου να υπερκεραστεί η μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα της βελτιστοποίησης. Το αποτέλεσμα είναι υπολογιστικά απλοί και κατανεμημένοι αλγόριθμοι με χαμηλή επιβάρυνση στο δίκτυο, που παρουσιάζουν ικανοποιητικές επιδόσεις σε λίγες επαναλήψεις σε σενάρια δυναμικού συντονισμού παρεμβολών.

Με τη συνύπαρξη femtocells και macrocells σε περιβάλλον SFR ασχολείται η τεχνική αναφορά στο [57]. Σε αυτήν εξετάζεται η βελτίωση που επιφέρει στο σύστημα η προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης των femtocells στο macrocell σχήμα SFR. Η προσέγγιση που εξετάζεται είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας (χωρικός διαχωρισμός και έλεγχος ισχύος), αλλά χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ελαστικότητα επιτρέποντας επικαλύψεις στη χρήση συχνότητας από τα δύο στρώματα, με το ένα εξ αυτών να έχει πρόσβαση χαμηλής προτεραιότητας. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται για δίκτυο 19 κυψελών και βαθμό διείσδυσης femtocells 0,2 (δηλαδή η πιθανότητα ένα σπίτι να έχει femtocell εγκαταστημένο και σε λειτουργία είναι 20%), δείχνουν βελτίωση κοντά στο 10% στην απόδοση του συστήματος για την απλή μορφή του σχήματος, και λίγο παραπάνω όταν εισάγεται και ο έλεγχος ισχύος.

Μεγαλύτερο βάρος στον έλεγχο ισχύος σε συνδυασμό με περιβάλλον FR δίνεται στην εργασία [58]. Σε αυτήν οι συγγραφείς επικεντρώνονται στην εύρεση της βέλτιστης ρύθμισης ισχύος των femtocells όταν αναπτύσσονται πάνω από OFDMA macrocell συστήματα που χρησιμοποιούν FFR. Ο χωρικός διαχωρισμός των κελιών γίνεται με τρόπο ώστε η εσωτερική και εξωτερική περιοχή να έχουν το ίδιο εμβαδόν, ενώ η ανάπτυξη των femtocells θεωρείται ομοιόμορφη. Η βελτιστοποίηση γίνεται με γνώμονα τη βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος, με τις προσομοιώσεις να αναδεικνύουν την έντονη σχέση της μείωσης των παρεμβολών με τη φασματική απόδοση, και τη σημασία του ελέγχου ισχύος.

Μια εργασία που επικεντρώνεται αποκλειστικά στην ύπαρξη co-tier παρεμβολών σε επίπεδο femtocells είναι η [59]. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα σχήμα συντονισμένης εκχώρησης φάσματος μεταξύ LTE femtocells που απευθύνεται σε σενάρια ιδιαίτερα πυκνής εγκατάστασης, όπως σε κτίρια επιχειρήσεων. Το προτεινόμενο σύστημα χωρίζεται σε δύο ξεχωριστές διαδικασίες. Η πρώτη λειτουργεί αυτόνομα και έχει αρμοδιότητα την βέλτιστη επιλογή υποκαναλιών που θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά από το femtocell για την επίτευξη της βασικής σύνδεσης. Η δεύτερη περιλαμβάνει τη συνεργασία για την βέλτιστη κατανομή του κοινού φάσματος με στόχο την υψηλή χωρητικότητα. Τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής είναι πως μπορεί να λειτουργήσει και κατανεμημένα αλλά και μέσω κεντρικής διαχείρισης, ενώ επιδεικνύει υψηλό επίπεδο κλιμάκωσης, χαρακτηριστικό αναγκαίο για τα σενάρια που εξετάζονται (κτίρια επιχειρήσεων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας και προκειμένου να εξερευνήσουμε τη συμπεριφορά και αντιμετώπιση του φαινομένου των παρεμβολών σε LTE-A συστήματα σχεδιάσαμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης παραμετροποιήσιμων ετερογενών τοπολογιών δύο επιπέδων, macrocell και femtocells. Καθώς η τεχνολογία LTE-A είναι σχετικά πρόσφατη, δεν υπάρχει πληθώρα εξομοιωτών που να επιτρέπουν τη δημιουργία και την εξέταση δικτύων βασισμένων στην τεχνολογία αυτή. Ακόμα περισσότερο, απουσιάζουν εξομοιωτές που να υποστηρίζουν την εναπόθεση femtocells, με έμφαση στην εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στις co-layer και cross-layer παρεμβολές. Επιπλέον, καθώς ο σκοπός της εργασίας περιλάμβανε την εξέταση ενός σημαντικού αριθμού διαφορετικών τεχνικών και σεναρίων προκειμένου να σχηματιστεί μια σφαιρική εικόνα πάνω στο πεδίο έρευνας, έπρεπε το εργαλείο που θα χρησιμοποιούνταν να μπορεί να αναπαράγει το σύνολο των σεναρίων αυτών και με ικανοποιητική ακρίβεια, ώστε να εξαχθούν ασφαλή και συγκριτικά συμπεράσματα. Έπρεπε, επίσης, να επιτρέπει μεγάλη παραμετροποίηση πάνω στη δημιουργία των τοπολογιών και των ρυθμίσεων του δικτύου.

Δυστυχώς, ο μικρός αριθμός εργαλείων που καλύπτουν τις ανωτέρω απαιτήσεις δεν είναι διαθέσιμος δωρεάν. Λόγω του μεγάλου απαιτούμενου όγκου εργασίας προκειμένου να ενσωματώσουν τις πολλαπλές λειτουργίες και διαδικασίες ενός δικτύου κινητής, επιλέγουν το δρόμο της εμπορικής εκμετάλλευσης. Αν και αυτή η προσέγγιση είναι κατανοητή, η χρήση των εργαλείων αυτών για εξειδικευμένη χρήση (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση), με αντίτιμο που αντιστοιχεί σε λειτουργίες που θα μας ήταν αχρείαστες, αποδεικνύεται μη αποδοτική.

Τέλος, σημαντικό κίνητρο στη δημιουργία περιβάλλοντος προσομοίωσης από την αρχή, αποτέλεσε και η επιθυμία τα αποτελέσματα να απεικονίζονται με γραφική δισδιάστατη απεικόνιση. Το φαινόμενο των παρεμβολών χαρακτηρίζεται από μεγάλες διαβαθμίσεις σε σχέση με την τοποθεσία κατά μήκος του κελιού, αλλά και σε σχέση με άλλες δομικές μονάδες του δικτύου, όπως σταθμοί βάσης και άλλοι χρήστες. Επιπλέον, η γραφική απεικόνιση εξυπηρετεί την ευκολότερη κατανόηση του φαινομένου, καθώς και τη σχεδιαστική ελευθερία στη δημιουργία του καθορισμένου από τον χρήστη, σεναρίου προς εξέταση.

Οι ελεύθερες διαθέσιμες επιλογές προσομοιωτών δεν κάλυπταν τους σκοπούς της εργασίας, οδηγώντας στην δημιουργία από μέρους μας ενός ειδικά σχεδιασμένου εργαλείου προσομοίωσης, με εξειδικευμένη λειτουργικότητα και υποβοηθούμενο από ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον διασύνδεσης χρήστη. Το εργαλείο, προσφέρει πλήθος παραμετροποιήσιμων επιλογών, ώστε πέραν των ολοκληρωμένων συμπερασμάτων πάνω στο αντικείμενο που ερευνούμε, διαθέτοντας ελεύθερα τον κώδικα στην ακαδημαϊκή κοινότητα να καλύψει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και σεναρίων για το χρήστη που επιθυμεί ένα εργαλείο προσομοίωσης εκτίμησης της απόδοσης του προσωπικού του σχεδιασμένου δικτύου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το περιβάλλον χρήστη, το μοντέλο και η αρχιτεκτονική στην οποία βασίστηκε το εργαλείο, ενώ περιγράφεται και η λειτουργικότητα και οι δυνατότητες που προσφέρει και οι οποίες θα χρησιμεύσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στο φαινόμενο παρεμβολών σε ετερογενή συστήματα.

6.1. Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη

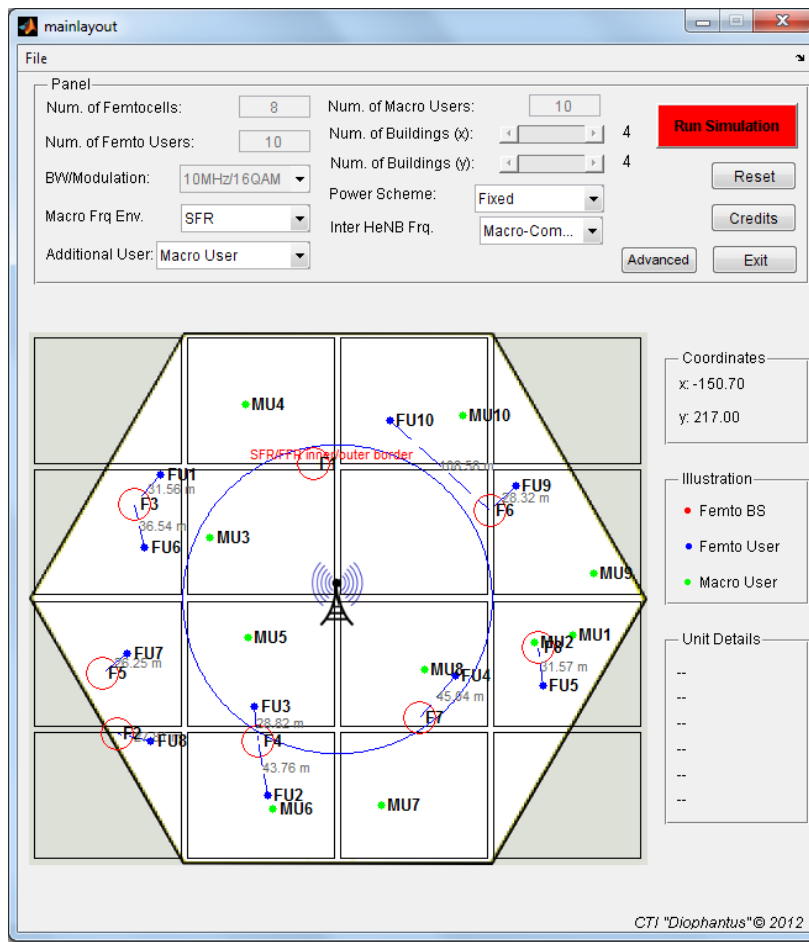
Για τη διασύνδεση με το χρήστη, υιοθετήθηκε μια φιλική προς το χρήστη προσέγγιση, σχεδιάζοντας το γραφικό περιβάλλον, με το οποίο ο χρήστης θα επιδρά όπως θα επιδρούσε με οποιαδήποτε εφαρμογή. Ο χρήστης αποκλειστικά εισάγει τις παραμέτρους που θα καθορίσουν το δίκτυο και τα χαρακτηριστικά του μέσα από τη συμπλήρωση πεδίων και point-and-click ενεργειών όπου χρειάζεται. Το γραφικό περιβάλλον διασύνδεσης, αν και όχι απαραίτητο για την ολοκλήρωση του λειτουργικού σκοπού για τον οποίο δημιουργήθηκε το εργαλείο, επιλέχθηκε για τρεις σημαντικούς λόγους:

α) Το εργαλείο πέραν της λειτουργικής χρήσης του για να καλύψει τις ανάγκες της παρούσης εργασίας, προσφέρεται ελεύθερα στην ακαδημαϊκή κοινότητα. Καθώς η χρηστικότητα του προσομοιωτή μπορεί να εξυπηρετήσει κάποιον που δεν έχει ιδιαίτερες γνώσεις πάνω στη τεχνολογία LTE-A ή σε άλλες πλευρές της σχεδίασης δικτύων, και απλά αποζητά την μέτρηση της απόδοσης της τοπολογίας που τον ενδιαφέρει, το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον αποτελεί σημαντική διευκόλυνση. Στο πνεύμα των παραπάνω, αποφασίστηκε και ο διαχωρισμός των εξειδικευμένων ρυθμίσεων από το κεντρικό μενού, και η εμφάνισή του μόνο κατά απαίτηση του χρήστη, όπως θα φανεί και παρακάτω.

β) Η λειτουργία point and click στη δημιουργία της τοπολογίας, πάνω στη δισδιάστατη απεικόνιση του macrocell, επιτρέπει υψηλή ελευθερία και ευελιξία στο χρήστη για τη δημιουργία του δικτύου που επιθυμεί. Αντίθετα με τη λογική της αυτόματης παραγωγής και εναπόθεσης σταθμών βάσης και χρηστών, προσφέρεται πλήρης έλεγχος στον χρήστη προκειμένου να καθορίσει επακριβώς την τοποθεσία κάθε μονάδας της τοπολογίας. Η δυνατότητα αυτή είναι συνδεδεμένη και με τη δισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, που εξυπηρετεί την εύκολη, γρήγορη κατανόηση των αποτελεσμάτων και βοηθά την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση του δικτύου σε σχέση με την απλή παράθεση των μετρικών του δικτύου με τις οποίες πιθανόν να μην είναι εξοικειωμένος ο χρήστης. Φυσικά, οι μετρικές αυτές εύκολα μπορεί να εξαχθούν, όταν αυτό απαιτηθεί.

γ) Η δισδιάστατη απεικόνιση σε συνδυασμό με την άμεση γραφική διασύνδεση, μετατρέπει τον προσομοιωτή σε εργαλείο σχεδίασης δικτύου. Η παραπάνω προσέγγιση, πέραν της εκτίμησης της απόδοσης μιας τοπολογίας, εξυπηρετεί την εξεύρεση καλύτερης τοπολογίας και των κατάλληλων παραμέτρων του δικτύου.

Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται η εναρκτήρια μορφή της διασύνδεσης, στην οποία έχουν ήδη εισαχθεί από τον χρήστη οι θέσεις των femtocells και των UEs, ο τύπος διαμόρφωσης, το εύρος φάσματος κλπ. Πιο συγκεκριμένα, με την έναρξη της εφαρμογής, ο χρήστης καλείται να εισάγει τις απαιτούμενες παραμέτρους του δικτύου, και να ορίσει την τοπολογία του δικτύου. Η τελευταία απαιτεί τον καθορισμό των εγκατεστημένων femtocells, τον αριθμό των macro και femto UEs, και την πυκνότητα των κτιρίων.

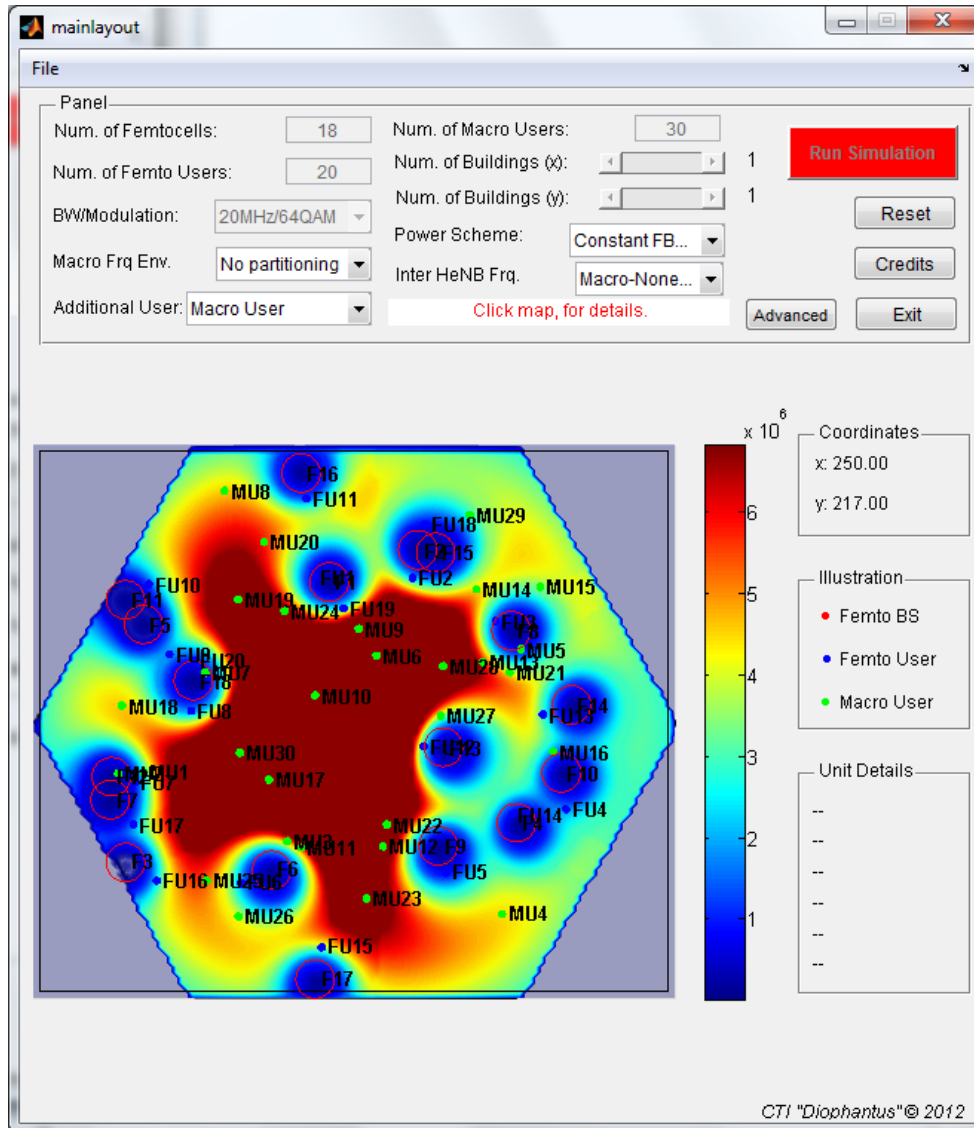


Εικόνα 28. Η γραφική διασύνδεση χρήστη του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο στάδιο των ρυθμίσεων.

Οι παράμετροι του δικτύου καλύπτουν τον τύπο διαμόρφωσης, την επιλογή του διαθέσιμου εύρους φάσματος, την επιλογή του σχήματος κατανομής συχνοτήτων και τον αλγόριθμο ελέγχου ισχύος, ευθυγραμμισμένα πάντα με τις προδιαγραφές του LTE-A. Πατώντας το κουμπί «Advanced», εμφανίζονται περισσότερο εξειδικευμένες επιλογές, στις οποίες ένας έμπειρος χρήστης μπορεί να επέμβει κατά το δοκούν. Σε αυτές περιλαμβάνονται ρυθμίσεις για το πλάτος του δρόμου, την επιθυμητή εμβέλεια των femtocells, τις τιμές των απωλειών λόγω διείσδυσης κλπ. Αναλυτικά οι ρυθμίσεις και η σημασία τους περιγράφονται στο τέλος του κεφαλαίου.

Από τη στιγμή που η εισαγωγή των στοιχείων στο σύστημα έχει ολοκληρωθεί, ο χρήστης δίνει εντολή στον εξομοιωτή να ξεκινήσει τους υπολογισμούς. Το εργαλείο δημιουργεί την τοπολογία του χρήστη βάση των εισαγμένων δεδομένων, εφαρμόζει τα επίπεδα ισχύος που ζητήθηκαν και κατανέμει τα resource blocks στους χρήστες βάση του σχήματος κατανομής συχνοτήτων που επιλέχθηκε. Όταν καθοριστεί το δίκτυο, και οι πόροι, υπολογίζονται κατά σειρά οι μετρικές επίδοσης του δικτύου, για κάθε σημείο του macrocell. Οι μετρικές περιλαμβάνουν το επιτεύξιμο SINR, την χωρητικότητα και το ρυθμό δεδομένων που θα απολάμβανε θεωρητικά ένα UE στα σημεία αυτά. Όπως θα περιγραφεί παρακάτω, οι μετρήσεις λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες διαδρομών που εξαρτώνται από την εκάστοτε τοπολογία και τη γεωγραφική θέση του χρήστη.

Όταν η διαδικασία των υπολογισμών έχει ολοκληρωθεί, ο χάρτης χρωματίζεται κλιμακωτά βάση των ευρημάτων. Στην Εικόνα 29 φαίνεται ένα παράδειγμα όπου η εκτίμηση της απόδοσης του δικτύου έχει ολοκληρωθεί και εμφανίζεται γραφικά στο χρήστη. Το συγκεκριμένο παράδειγμα αφορά ένα macro UE και το θεωρητικό μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που θα απολάμβανε σε κάθε σημείο της κυψέλης.



Εικόνα 29. Η γραφική διασύνδεση χρήστη του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο στάδιο της απεικόνισης της επίδοσης του δικτύου.

Με την ολοκλήρωση του πειράματος, ο χρήστης καλείται αν επιθυμεί, να εφαρμόσει διαφορετική τεχνική διαχείρισης παρεμβολών στην ίδια τοπολογία, όσο αφορά την μέθοδο κατανομής συχνοτήτων ή τον έλεγχο ισχύος. Αυτό διευκολύνει την σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών, κρατώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους του δικτύου σταθερές, αλλά εξυπηρετεί και τον χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων.

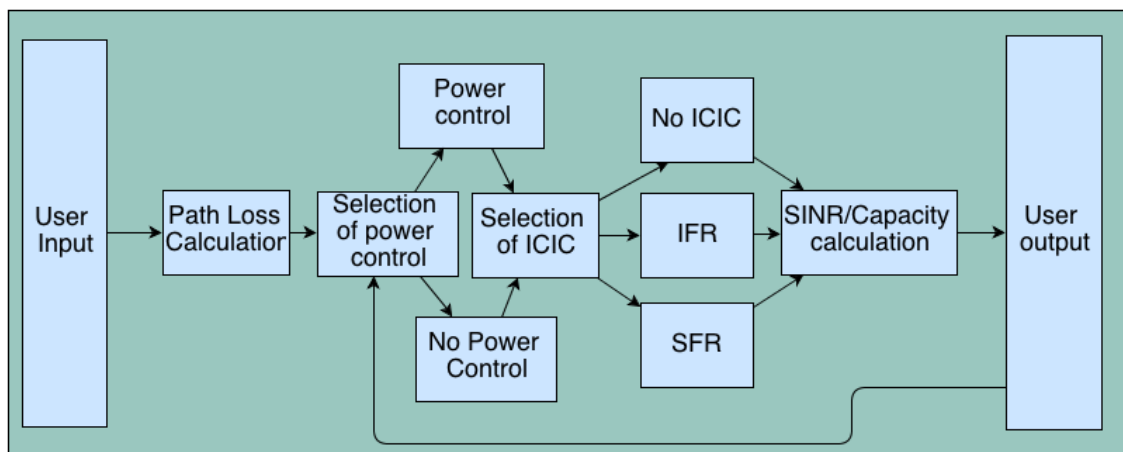
Ο εξομοιωτής σχεδιάστηκε σε περιβάλλον MATLAB, και είναι διαθέσιμος για οποιαδήποτε χρήση και μετατροπή μέσα από τον διαδικτυακό τόπο [5].

6.2. Αρχιτεκτονική

Στην σχεδίαση του περιβάλλοντος προσομοίωσης, δόθηκε βαρύτητα στην χρηστικότητα, την λειτουργικότητα και την ευελιξία. Στην επιλογή της αρχιτεκτονικής του συστήματος επιδιώχθηκε η επεκτασιμότητα, η ταχύτητα υπολογισμών, και η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών.

Καθώς σε ένα εργαλείο προσομοίωσης (όπως και σε κάθε πρόγραμμα λογισμικού), μπορεί να παραστεί η ανάγκη προσθήκης λειτουργιών και κατάργησης ή ανανέωσης υπαρχόντων, είναι σημαντικό η δομή του συστήματος να επιτρέπει κάτι τέτοιο. Ο μεγάλος αριθμός των τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών και η διαρκής ανανέωση και εξέλιξη της τεχνολογίας LTE-A μέσω προσθήκης λειτουργιών και διαδικασιών, καθιστά σημαντική την υποστήριξη επεκτασιμότητας του εξομοιωτή. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε η υλοποίηση του εξομοιωτή να αποτελείται από ανεξάρτητες δομικές μονάδες που θα επιτρέπουν την εύκολη επέκταση, μετατροπή και ανανέωσή του.

Η Εικόνα 30 παρουσιάζει το λειτουργικό διάγραμμα του προσομοιωτή. Κάθε βήμα αποτελεί ανεξάρτητη μονάδα με συγκεκριμένη διασύνδεση ούτως ώστε να μην επηρεάζεται το υπόλοιπο σύστημα από την μετατροπή/αλλαγή ενός στοιχείου.



Εικόνα 30. Η δομική αρχιτεκτονική του εξομοιωτή.

Πέραν της ανάγκης για δομική ευελιξία, σημαντικό μέρος της επιτυχίας ενός εργαλείου εξομοίωσης είναι και η ταχύτητα υπολογισμών. Το έργο της εκτίμησης της απόδοσης του δικτύου σε κάθε σημείο της κυψέλης είναι επίπονο και ογκώδες υπολογιστικά. Για αυτό η ταχύτητα εξαγωγής αποτελεσμάτων κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντική. Προς αυτήν την κατεύθυνση, απομονώθηκε η λειτουργία της εκτίμησης των απωλειών διαδρομής για κάθε σημείο, αφού αποτελούσε σημαντικό μέρος του απαιτούμενου χρόνου των υπολογισμών. Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται για μελλοντική χρήση. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επαναχρησιμοποίηση ευρημάτων σε πλήθος σεναρίων, γεγονός που μειώνει δραματικά τον χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων. Το παράδειγμα αυτό δόθηκε προκειμένου να γίνει κατανοητή η προσέγγιση και η βελτιστοποίηση που ακολουθήθηκε στην επιλογή της αρχιτεκτονικής του συστήματος με γνώμονα την επιτάχυνση της διαδικασίας.

Τέλος, ρόλο στην επιλογή της δομής του εργαλείου έπαιξε και η επιθυμία για εύκολη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών ακύρωσης/διαχείρισης παρεμβολών. Καθώς η σύγκριση αυτή αποτελεί και τον πρωταρχικό στόχο του προσομοιωτή, κρίθηκε αναγκαία ο

σχεδιασμός της διαδικασίας να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε η εξαγωγή αποτελεσμάτων μεταξύ ήδη υπολογισμένων τοπολογιών να γίνεται αυτόματα, προς όφελος της άμεσης αντιπαραβολής τους.

6.3. Μοντέλο ανάλυσης

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει την ανάλυση που υπολογίζει τις παρεμβολές και την απόδοση σε κάθε σημείο του LTE-A ετερογενούς δικτύου. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη μοντέλα απωλειών διαδρομής και διείσδυσης προκειμένου να εκτιμηθεί το SINR και επομένως οι παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες.

Θεωρούμε καταρχήν, ένα macrocell ακτίνας 250 m, στο οποίο γίνεται εναπόθεση αριθμού femtocells. Για τους παρακάτω υπολογισμούς, λαμβάνουμε υπόψη πως η κυψέλη δέχεται παρεμβολές από 12 γειτονικά macrocell. Θεωρούμε πως οι παρεμβολές από περισσότερο μακρινούς σταθμούς βάσης είναι αμελητέες. Επιπλέον, υιοθετούμε μοντέλα που αντικατοπτρίζουν σενάρια εφαρμόσιμα σε αστικό περιβάλλον, για την επιλογή των κατάλληλων μοντέλων, όπως για τον υπολογισμό των απωλειών.

Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση των παρεμβολών σε ένα σήμα από ενδεχόμενους κοντινούς σταθμούς βάσης, γίνεται μετρώντας την επίδραση που έχουν στο SINR ενός χρήστη. Πριν τον υπολογισμό του SINR, πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε τις απώλειες διαδρομής μεταξύ του σταθμού βάσης του macrocell και του UE, αλλά και μεταξύ του femto σταθμού βάσης και των χρηστών. Για την πρώτη περίπτωση και για έναν macro εξωτερικό χρήστη σε αστική περιοχή, οι απώλειες μπορεί να προσδιοριστούν ως [60]:

$$PL(db) = 15,3 + 37,6 \log_{10} R \quad (5.1)$$

Ενώ για την περίπτωση ενός εσωτερικού macro UE, αντίστοιχα δίνεται από:

$$PL(db) = 15,3 + 37,6 \log_{10} R + L_{ow} \quad (5.2)$$

Όπου το R είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη σε μέτρα και L_{ow} είναι οι απώλειες διείσδυσης ενός εξωτερικού τοίχου. Οι απώλειες μεταξύ ενός femto BS και ενός UE υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση [60]:

$$PL(db) = 38,46 + 20 \log_{10} R \quad (5.3)$$

Όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του femto BS και του χρήστη.

Τέλος, θεωρούμε την περίπτωση ενός εξωτερικού χρήστη femto συνδεδεμένου σε ένα εσωτερικά τοποθετημένο femtocell. Για το σενάριο αυτό, πρέπει να λάβουμε υπόψη και τις απώλειες λόγω του εξωτερικού ενδιάμεσου τοιχώματος [60]:

$$PL(db) = 38,46 + 20 \log_{10} R + L_{ow} \quad (5.4)$$

Για την εκτίμηση του SINR ενός macro χρήστη m στον υπο-φορέα k , όταν ο χρήστης δέχεται παρεμβολές από γειτονικά macrocells και κοντινά femtocells, ακολουθούμε την ανάλυση όπως εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση [53]:

$$SINR_{m,k} = \frac{P_{M,k}G_{m,M,k}}{N_0\Delta_f + \sum_{M'} P_{M',k}G_{m,M',k} + \sum_F P_{F,k}G_{m,F,k}} \quad (5.5)$$

Όπου $P_{M,k}$ και $P_{M',k}$ είναι η ισχύς μετάδοσης του macrocell M που εξυπηρετεί τον χρήστη, και του γειτονικού macrocell M' αντίστοιχα, στον υπο-φορέα k . Το $G_{m,M,k}$ δηλώνει το κέρδος καναλιού μεταξύ του macro χρήστη και του macrocell M στον υπο-φορέα k . Το αντίστοιχο κέρδος από τα γειτονικά macrocells εκφράζονται με $G_{m,M',k}$. Παρομοίως, $P_{F,k}$ είναι η ισχύς μετάδοσης του κοντινού femtocell F στον υπο-φορέα k , και $G_{m,F,k}$ είναι το κέρδος μεταξύ του macro UE και του femtocell. Το N_0 αντιπροσωπεύει τον λευκό θόρυβο και το Δ_f την απόσταση μεταξύ των υπο-φορέων. Στην περίπτωση ενός femto χρήστη f στον υπο-φορέα k που υφίσταται παρεμβολές από όλα τα macrocells και τα γειτονικά femtocells, το SINR του μπορεί να βρεθεί αντιστοίχως με τη βοήθεια της:

$$SINR_{f,k} = \frac{P_{f,k}G_{f,F,k}}{N_0\Delta_f + \sum_{F'} P_{F',k}G_{f,F',k} + \sum_M P_{M,k}G_{f,M,k}} \quad (5.6)$$

Για τον υπολογισμό του κέρδους καναλιού G , το οποίο κυρίως καθορίζεται από τις απώλειες, που είναι όπως είδαμε διαφορετικές για εξωτερικά και εσωτερικά σενάρια, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$G = 10^{-PL/10} \quad (5.7)$$

Έχοντας υπολογίσει το SINR, μπορούμε να εκτιμήσουμε τον συνεπακόλουθο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών. Καταρχήν, η χωρητικότητα ενός χρήστη macrocell m σε έναν υπο-φορέα k μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη εξίσωση [61]:

$$C_{m,k} = \Delta f \cdot \log_2(1 + aSINR_{m,k}) \quad (5.8)$$

Όπου a είναι σταθερά για το ζητούμενο Bit Error Rate (BER), και ορίζεται ως $a = -1.5 / \ln(5BER)$. Για την ανάλυσή μας το BER τίθεται ίσο με 10^{-6} .

Τέλος, έχοντας υπολογίσει το $C_{m,k}$ ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης του macrocell M μπορεί να εκτιμηθεί βάση της:

$$T_M = \sum_m \sum_k \beta_{m,k} C_{m,k} \quad (5.9)$$

όπου το $\beta_{m,k}$ αντιπροσωπεύει την ανάθεση του υπο-φορέα σε macro χρήστες. Όταν $\beta_{m,k} = 1$ σημαίνει ότι ο υποφορέας k ανατέθηκε στον χρήστη m . Διαφορετικά, $\beta_{m,k} = 0$. Όπως έχουμε ήδη πει, κάθε στιγμή στο macrocell, ένας υπο-φορέας ανατίθεται μόνο σε έναν macro χρήστη, προκειμένου να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα.

6.4. Δυνατότητες

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες κατηγορίες τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών. Σε αυτήν την ενότητα περιγράψουμε τις δυνατότητες του προσομοιωτή στην αναπαράσταση των τεχνικών αυτών, την ενσωμάτωσή τους σε πιθανά σενάρια, καθώς και τις δυνατότητες που προσφέρει σε επίπεδο τοπολογίας.

Όπως έχουμε αναφέρει, και φαίνεται στην απεικόνιση της διασύνδεσης χρήστη, η γραφική απεικόνιση επικεντρώνεται σε ένα macrocell. Πέραν αυτού, η δομή της τοπολογίας του δικτύου όσο αφορά τον αριθμό και τη θέση των εγκαταστημένων femtocells, καθώς και τον αριθμό και τη θέση των χρηστών macro και femto στην κυψέλη, επαφίεται εξολοκλήρου στον χρήστη. Σημαντικό μέρος στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος, (όπως είδαμε και στην ενότητα με το μοντέλο των απωλειών μετάδοσης), παίζει και η παρεμβολή εξωτερικών τοίχων μεταξύ του χρήστη και του σταθμού βάσης που τον εξυπηρετεί. Ως εκ τούτου, κρίθηκε σημαντικό να δοθεί στον χρήστη η δυνατότητα να επιλέγει την πυκνότητα κτιρίων της περιοχής, ούτως ώστε να αποτυπώνονται ρεαλιστικότερα τα σενάρια στον προσομοιωτή.

Μετά τον καθορισμό της τοπολογίας, ο χρήστης καλείται να επιλέξει τις ρυθμίσεις που επιθυμεί και αφορούν την μετάδοση. Σε αυτές περιλαμβάνεται το διαθέσιμο φάσμα, ο τύπος διαμόρφωσης, η ισχύς μετάδοσης κλπ. Το σύνολο των διαθέσιμων επιλογών, στον καθορισμό του δικτύου, η περιγραφή τους και η προεπιλεγμένη τιμή τους παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

Όταν το δίκτυο έχει καλώς οριστεί, σειρά έχει η υιοθέτηση ή μη, τεχνικών ακύρωσης παρεμβολών. Οι τεχνικές αυτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη είναι ο έλεγχος ισχύος των femtocells. Η δεύτερη είναι η δυνατότητα διαμέρισης συχνοτήτων στο macrocell στρώμα. Την τρίτη κατηγορία αποτελεί η κατανομή συχνοτήτων ανάμεσα σε γειτονικά femtocells. Φυσικά, σε κάθε κατηγορία δίνεται η δυνατότητα της μη υιοθέτησης κάποιου σχήματος ακύρωσης παρεμβολών. Το σενάριο αυτό αποτελεί την χειρότερη περίπτωση σε επίπεδο παρεμβολών και εμφανίζεται στις εικόνες των πειραμάτων για λόγους σύγκρισης.

Όσο αφορά τον έλεγχο ισχύος των femto σταθμών βάσης, οι διαθέσιμες επιλογές είναι τρεις. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται στην ανάγκη κάλυψης των χρηστών femto, αλλά και στον περιορισμό τους όταν αυτό δυσχεραίνει την ομαλή λειτουργία των macro χρηστών. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 4 οι συνηθέστεροι αλγόριθμοι που συναντώνται επικεντρώνονται είτε στην διατήρηση σταθερής εμβέλειας, είτε στην επίτευξη ενός ελάχιστου κατωφλίου απόδοσης των femto χρηστών. Η πρώτη λοιπόν επιλογή ελέγχου ισχύος, είναι ο αλγόριθμος σταθερής εμβέλειας μέσω της μέτρησης των απωλειών διαδρομής σήματος, τόσο από τον σταθμό βάσης femto όσο και από το macro BS. Κατά αυτόν τον τρόπο, όταν το femtocell εγκαθίσταται σε περιοχή όπου το macrocell σήμα είναι ασθενές (π.χ. απομακρυσμένη περιοχή), μειώνει την ισχύ μετάδοσής του. Αντίθετα, σε περιοχές κοντά στο macrocell σταθμό βάσης αυξάνει την ισχύ του προκειμένου οι χρήστες του να μένουν εντός εμβέλειας. Αναλυτικά, το μοντέλο που ακολουθείται δίνεται στο κεφάλαιο 4 και συγκεκριμένα στην Εξ. 4.4 (Ενότητα 4.5.1).

Η δεύτερη επιλογή βασίζεται στην διατήρηση σταθερής απόδοσης για ένα femto UE, που βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από femtocell. Η μετρική της απόδοσης που χρησιμοποιούμε είναι το SINR, και τόσο η απόσταση του χρήστη, όσο και η τιμή-κατώφλι για το SINR μπορούν να ρυθμιστούν κατά το δοκούν από τον χρήστη. Η επίτευξη και διατήρηση της

τιμής αυτής γίνεται μέσω αλγόριθμου σύγκλισης, που ακολουθεί την μέτρηση της τρέχουσας τιμής. Λεπτομέρειες για τον αλγόριθμο δίνονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 και συγκεκριμένα στην Εξ. 4.3. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονίσουμε ότι και στις δύο προαναφερόμενες μεθόδους ελέγχου ισχύος, είναι πιθανό οι απαιτήσεις σε διατήρηση της εμβέλειας ή της επίτευξης συγκεκριμένου SINR να μην είναι εφικτές. Για το λόγο αυτό, και προκειμένου να αποφεύγεται η αδιάκοπη αύξηση της ισχύος του femtocell, ορίζεται μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ισχύος μετάδοσης. Τέλος, η τρίτη επιλογή στη διάθεση του χρήστη είναι η απουσία οποιασδήποτε μορφής ελέγχου της ισχύος μετάδοσης. Σε αυτήν την προσέγγιση, όλοι οι σταθμοί βάσης του femtocell εκπέμπουν με την ίδια ισχύ, ανεξάρτητα της θέσης τους σε σχέση με την υπόλοιπη τοπολογία του δικτύου.

Όσο αφορά τα σχήματα κατανομής συχνοτήτων, ο χρήστης αρχικά πρέπει να επιλέξει το σχήμα που εφαρμόζεται σε επίπεδο macrocell. Σε περίπτωση που ο χρήστης αποφασίσει να ενεργοποιήσει σχήματα κατανομής συχνοτήτων, οι επιλογές που δίνονται είναι η εφαρμογή είτε IFR, FFR ή SFR. Η περιγραφή των σχημάτων αυτών δίνεται αναλυτικά στην ενότητα 4.5.1. Η εφαρμογή τους είναι στατική, που σημαίνει πως δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου ή με τις απαιτήσεις. Αυτό αποφασίστηκε καθώς εξετάζουμε σενάρια υψηλού φόρτου (full buffer), και ως εκ τούτου ο χρονοπρογραμματισμός ή αλλαγές σε επίπεδο κατανομής resource blocks θα ήταν ανούσιος. Η ακτίνα που ορίζει τον διαχωρισμό της κυψέλης σε εσωτερική και εξωτερική περιοχή στα σχήματα FFR, SFR μπορεί να αλλάξει κατά επιλογή του χρήστη.

Αφού αποφασιστεί η εφαρμογή ενδεχόμενου σχήματος, μπορεί να γίνει το ίδιο με το στρώμα των femtocells. Αν δεν ενεργοποιηθεί κάποια επιλογή, το σύστημα θεωρεί πως οι femto σταθμοί βάσης έχουν δικαίωμα να μεταδίδουν κατά μήκος όλου του φάσματος. Αν ο χρήστης έχει επιλέξει κάποιο σχήμα ICIC στο επίπεδο του macrocell, δίνεται η δυνατότητα να επιβάλει στα femtocells να μεταδίδουν σε περιοχές του φάσματος που δε χρησιμοποιούνται από γειτονικούς χρήστες. Στην περίπτωση του IFR, αυτό σημαίνει πως στους femto χρήστες θα ανατεθούν τα resource blocks που χρησιμοποιούν τα γειτονικά κελιά της κυψέλης στο οποίο έχει εγκατασταθεί το femtocell. Στην περίπτωση του FFR, αν το femtocell είναι τοποθετημένο στην εσωτερική περιοχή της κυψέλης, θα χρησιμοποιεί τις συχνότητες που έχουν ανατεθεί στους macro χρήστες της εξωτερικής περιοχής και αντίστοιχα. Ανάλογη θα είναι και η συμπεριφορά του femtocell, αν στο macrocell στρώμα έχει επιλεγεί SFR.

Τέλος, όποιο και αν είναι το φάσμα που έχει διατεθεί στα femtocells, ο χρήστης έχει δικαίωμα να επιβάλει διαμέριση συχνότητας ανάμεσα στα femtocells προκειμένου να αποφύγει τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών femtocells (co-layer παρεμβολές). Η διαμέριση, αν τελικά αποφασιστεί, λαμβάνει χώρα με το femtocell να ανιχνεύει στην περιοχή εμβέλειάς του για femto σταθμούς βάσης. Αν βρεθεί οποιοσδήποτε αριθμός από femtocells, το σύστημα διαμερίζει το διαθέσιμο φάσμα σε ισάριθμα μέρη, και αναθέτει κάθε μερίδιο σε κάθε femtocell. Η λειτουργία αυτή προσιδιάζει τη λειτουργία sniffing ή sensing που συζητήθηκε νωρίτερα, και που συνήθως λαμβάνει χώρα κατά την αυτό-ρύθμιση του femtocell.

6.5. Παραμετροποίηση

Έχουμε ήδη αναφέρει ορισμένες από τις παραμέτρους που μπορεί ελεύθερα ο χρήστης να ρυθμίσει προκειμένου να δημιουργήσει την δική του τοπολογία. Πέραν της ευελιξίας στη

σχεδίαση του δικτύου, επιτρέπουν κυρίως να εξεταστούν διαφορετικά σενάρια και οι αντίστοιχες παρεμβολές, καθώς το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και παρουσιάζει εξάρτηση από πολλαπλούς παράγοντες. Επιπλέον, επιτρέπει να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα επαληθεύοντας τα ευρήματα και υπό διαφορετικές συνθήκες. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται το σύνολο των παραμέτρων, η περιγραφή καθώς και η προεπιλεγμένη τιμή που χρησιμοποιείται αν δεν επέμβει σε αυτήν ο χρήστης. Όταν στο πεδίο της προεπιλεγμένης τιμής εμφανίζονται περισσότερες της μίας τιμές, σημαίνει πως αυτές αντιπροσωπεύουν τις διαθέσιμες επιλογές, και ο χρήστης οφείλει να επιλέξει μία εξ αυτών.

Πίνακας 7. Οι δυνατότητες παραμετροποίησης του εξομοιωτή και οι προεπιλεγμένες τιμές.

Παράμετρος	Περιγραφή	Προεπιλεγμένη τιμή					
		1.4	3	5	10	15	20
Εύρος φάσματος (MHz)	Η επιλογή του διαθέσιμου φάσματος βάση των LTE-A προδιαγραφών						
Διαμόρφωση	Διαθέσιμοι τύποι διαμόρφωσης	QPSK		16QAM		64QAM	
Macrocell ICIC	Σχήματα κατανομής συχνοτήτων στο macrocell στρώμα	None	IFR	FFR	SFR		
Femtocell ICIC	Σχήματα κατανομής συχνοτήτων στο femtocell στρώμα	None		FFR			
		Διαθέσιμο φάσμα (Συμπληρωματικό του macro ICIC)					
Έλεγχος ισχύος	Μέθοδος ελέγχου ισχύος femtocell	Σταθ.	Σταθ. SINR	Σταθ. εμβέλειας			
MBS ισχύς μετάδοσης	Ισχύς μετάδοσης του macrocell σταθμού βάσης	46 dBm					
FBS ισχύς μετάδοσης	Ισχύς μετάδοσης του femtocell σταθμού βάσης	11 dBm					
Εμβέλεια femtocell	Η επιδιωκόμενη εμβέλεια του FBS κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας	8 m					
Μέγιστη FBS ισχύς μετάδοσης	Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς μετάδοσης του femtocell σταθμού βάσης	18 dBm					

Noise power density	Λευκός θόρυβος	174 dBm/Hz
SINR τιμή-στόχος	Η τιμή του SINR που επιδιώκεται για τους femto χρήστες κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερού SINR	4 dB
Εμβέλεια τιμή-στόχος	Η εμβέλεια στην οποία ζητείται το SINR που επιδιώκεται για τους femto χρήστες κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερού SINR	10 m
Απώλειες εξωτερικού τοίχου	Οι απώλειες που οφείλονται όταν το σήμα διαπερνά εξωτερικό τοίχο	15 dB
Απώλειες εσωτερικού τοίχου	Οι απώλειες που οφείλονται όταν το σήμα διαπερνά εσωτερικό τοίχο	7 dB
Ακτίνα FFR/SFR	Η ακτίνα που διαχωρίζει την κυψέλη σε κεντρική (cell-center) και ακριτική (cell-edge) περιοχή	150 m
Αριθμός femtocells	Αριθμός των εγκατεστημένων femtocells σε μία κυψέλη	Στην κρίση του χρήστη
Αριθμός χρηστών femtocell	Αριθμός των χρηστών συνδεδεμένων σε femtocells σε μία κυψέλη	Στην κρίση του χρήστη
Αριθμός χρηστών macrocell	Αριθμός χρηστών που εξυπηρετούνται από το macrocell	Στην κρίση του χρήστη
Πυκνότητα κτιρίων	Η πυκνότητα των κτιρίων στην κυψέλη με αντίκτυπο στις εκτιμώμενες απώλειες διαδρομής	Στην κρίση του χρήστη

Πλάτος δρόμου	Το πλάτος του δρόμου με αντίκτυπο στις εκτιμώμενες απώλειες διαδρομής	Στην κρίση του χρήστη
----------------------	---	-----------------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης κατά την εφαρμογή των διαφορετικών τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στην ίδια τοπολογία και με τις ίδιες ρυθμίσεις, προκειμένου να διευκολυνθεί η σύγκριση. Η σύγκριση αφορά τη μέση απόδοση ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, την επίδοση των ακριτικών χρηστών, τη φασματική απόδοση αλλά και την κατανάλωση ενέργειας.

Οφείλουμε να αναφέρουμε πως αν και τα αποτελέσματα της σύγκρισης φανερώνουν χρήσιμα και ευσταθή συμπεράσματα σχετικά με τις τάσεις και την συμπεριφορά του δικτύου, οι ακριβείς τιμές είναι στενά εξαρτημένες με τις παραμέτρους εισόδου και ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό με τις εκάστοτε ρυθμίσεις, όπως η τιμή-στόχου SINR, η επιθυμητή ακτίνα των femtocells ή η προεπιλεγμένη ισχύς εκπομπής των femto BS. Με αυτόν τον τρόπο, τα ακόλουθα αφενός επιδεικνύουν τις δυνατότητες του προσομοιωτή, αφετέρου εξερευνούν τη γενική συμπεριφορά των ετερογενών δικτύων, αναδεικνύουν τους συμβιβασμούς μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών ακύρωσης παρεμβολών και την καταλληλότητα του καθενός. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, για τις τιμές που αφορούν τις συνθήκες μετάδοσης και περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές όπως αναφέρονται στον Πίνακα 7 ώστε τα αποτελέσματα να αντιπροσωπεύουν συνήθη σενάρια. Οι ρυθμίσεις που επαφίενται στην κρίση του χρήστη αναφέρονται αναλυτικά πριν από κάθε απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Ο χρήστης ενθαρρύνεται να πειραματιστεί με τις ρυθμίσεις για την ανάλυση των προσωπικών του συγκεκριμένων τοπολογιών.

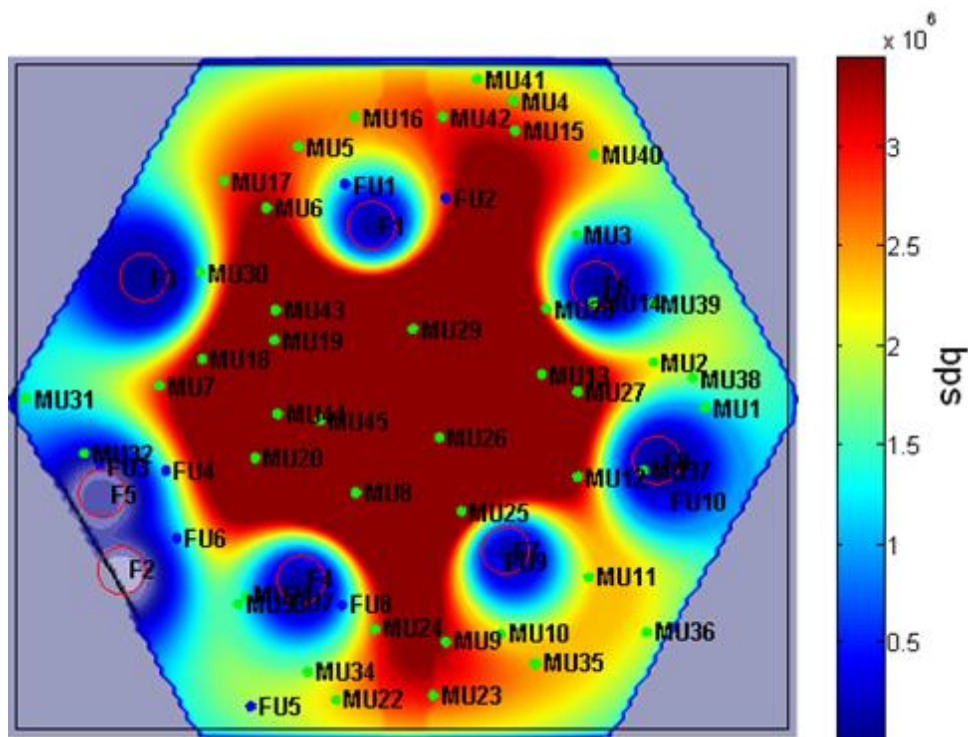
7.1. Έλεγχος ισχύος

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας σε σύγκριση με την απουσία ελέγχου. Ο Πίνακας 8 περιέχει τις παραμέτρους της τοπολογίας και της μετάδοσης. Στο πείραμα της εικόνας, εφαρμόζεται σταθερή τιμή στην ισχύ μετάδοσης των femto σταθμών βάσης, και ο μέγιστος θεωρητικά διαθέσιμος ρυθμός δεδομένος ενός πιθανού macro χρήστη εμφανίζεται για όλα τα σημεία της τοπολογίας.

Πίνακας 8. Ρυθμίσεις τοπολογίας και μετάδοσης.

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός femtocells	8
Αριθμός femto χρηστών	11
Αριθμός macro χρηστών	45
Carrier frequency	2000 MHz
Διαμόρφωση	16 QAM
Διαθέσιμο φάσμα	10 MHz
FBS ισχύς μετάδοσης	11 dBm

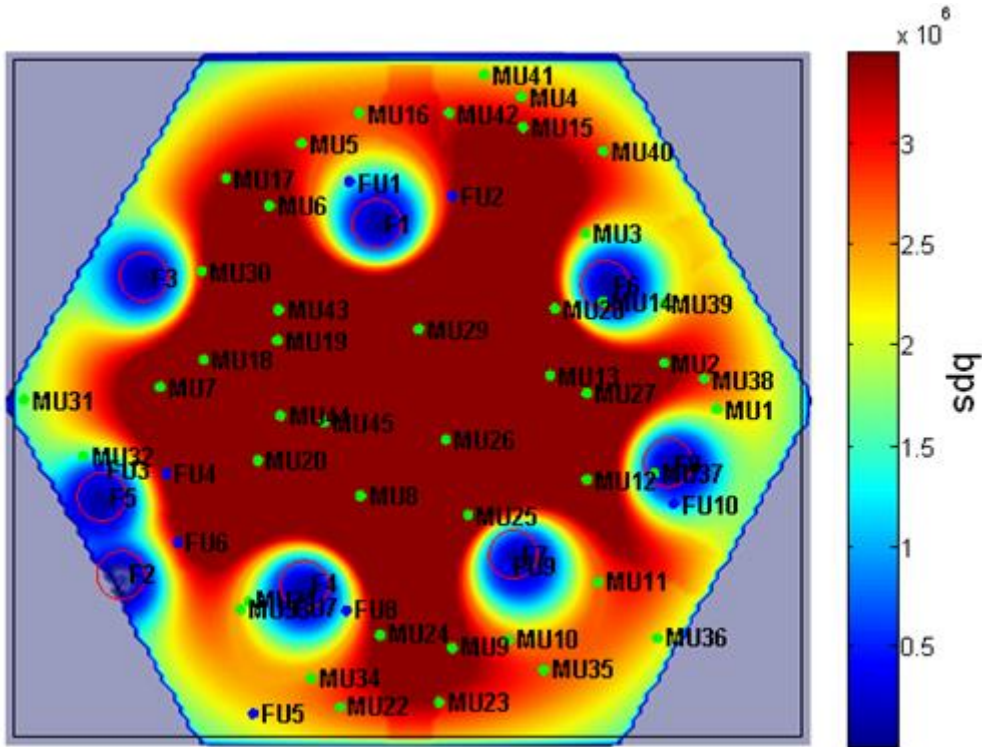
Η προσέγγιση αυτή αποδεικνύεται ακατάλληλη, ιδιαίτερα για τις περιοχές γύρω από τα απομακρυσμένα femtocells. Σε αυτές τις περιοχές, η λαμβανόμενη ισχύς από το macrocell υφίσταται σημαντική εξασθένηση λόγω των απωλειών διαδρομής. Χωρίς την απαιτούμενη προσαρμογή, η ισχύς μετάδοσης των femtocells κυριαρχεί με αποτέλεσμα την δραματική αύξηση της εμβέλειας του femtocell. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αρνητικό για δύο λόγους. Πρώτον, όπως φαίνεται στην εικόνα, η ισχύς του σήματος του femtocell καλύπτει μια μεγάλη περιοχή σχετικά, που ξεπερνά κατά πολύ τα όρια του κτιρίου στο οποίο εγκαθίσταται. Αυτό σημαίνει πως η πιθανότητα ύπαρξης macro χρηστών στην εμβέλεια του femtocell που θα υφίστανται ισχυρές παρεμβολές αυξάνεται σημαντικά. Δεύτερον, ο πρωταρχικός σκοπός εγκατάστασης femtocells είναι η παροχή υπηρεσιών σε μικρό αριθμό ατόμων εντός της οικίας τους, ή του εργασιακού χώρου τους. Η πιθανότητα οι συγκεκριμένοι χρήστες να βρίσκονται εκτός των χώρων αυτών για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι ελάχιστη. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της εμβέλειας δεν προσφέρει ουσιαστικό όφελος, αντίθετα πρόκειται για σπατάλη ενέργειας.



Εικόνα 31. Γραφική απεικόνιση του ρυθμού δεδομένων για την περίπτωση σταθερών επιπέδων ισχύος μετάδοσης των femtocells.

Στην Εικόνα 32 αντίθετα, η ισχύς των femtocells καταστέλλεται προς όφελος των επιδόσεων των macro χρηστών, και υπολογίζοντας τις απώλειες από το macrocell, επιτυγχάνει σταθερή ακτίνα κάλυψης για τους femto χρήστες του, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Ως αποτέλεσμα, ο λόγος της έντασης του σήματος από το macrocell και το femtocell είναι ανεξάρτητος από την σχετική θέση του femto BS σε σχέση με το macrocell και εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση του femtocell από το συνδεδεμένο με αυτό UE. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως ένα femto BS πλησίον του macro BS πιθανόν να χρειαστεί να αυξήσει την ισχύ μετάδοσης προκειμένου να εξασφαλίσει κάλυψη για τους χρήστες του, ενώ απομονωμένα ή απομακρυσμένα femtocells ίσως χρειαστεί να την ελαττώσουν προς όφελος των γειτονικών macro χρηστών. Φυσικά, δεδομένου ότι πρέπει να θεσπιστεί ένα ανώτατο όριο για την ισχύ

μετάδοσης του femtocell, η κυριαρχία του από έναν πολύ κοντινό macro σταθμό βάσης δεν μπορεί να αποφευχθεί, όπως γίνεται εμφανές και από την εικόνα. Σε αυτήν την περίπτωση η εμβέλεια του femtocell υποχρεωτικά μειώνεται, και οι χρήστες του femtocell που δεν καλύπτονται πλέον, εξυπηρετούνται από το macrocell.



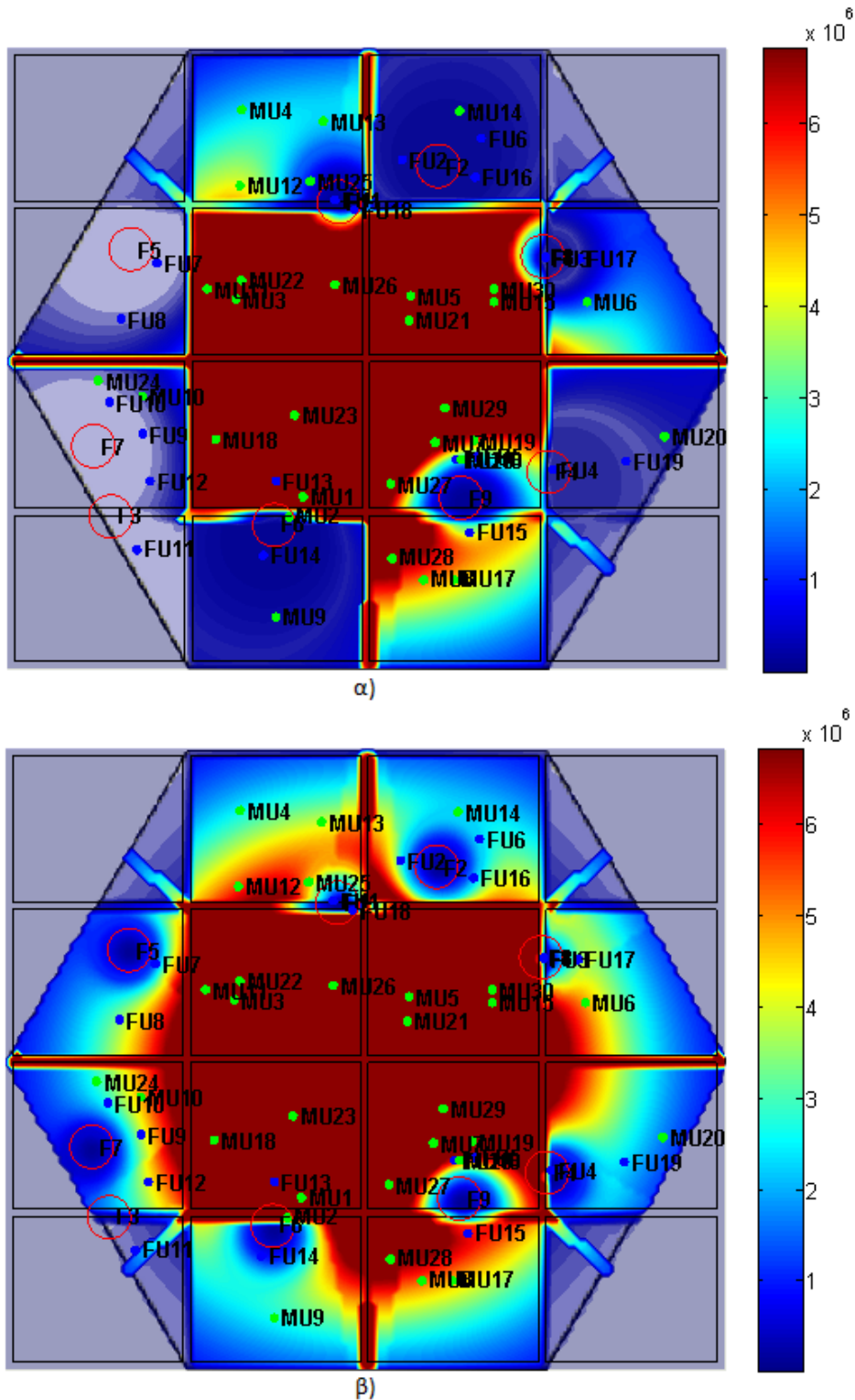
Εικόνα 32. Χάρτης του ρυθμού δεδομένων κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.

Η κατάσταση μπορεί να γίνει ακόμη χειρότερη σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου (που αποτελεί άλλωστε και το πιθανότερο σενάριο εγκατάστασης femtocell). Το σήμα από το macrocell εξασθενεί περαιτέρω λόγω των αυξημένων απωλειών που οφείλονται στα εξωτερικά τοιχώματα. Χωρίς την κατάλληλη διαμόρφωση των σταθμών femto, η απόδοση ενός macro χρήστη μπορεί να φτάσει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.

Πίνακας 9. Ρυθμίσεις τοπολογίας και μετάδοσης.

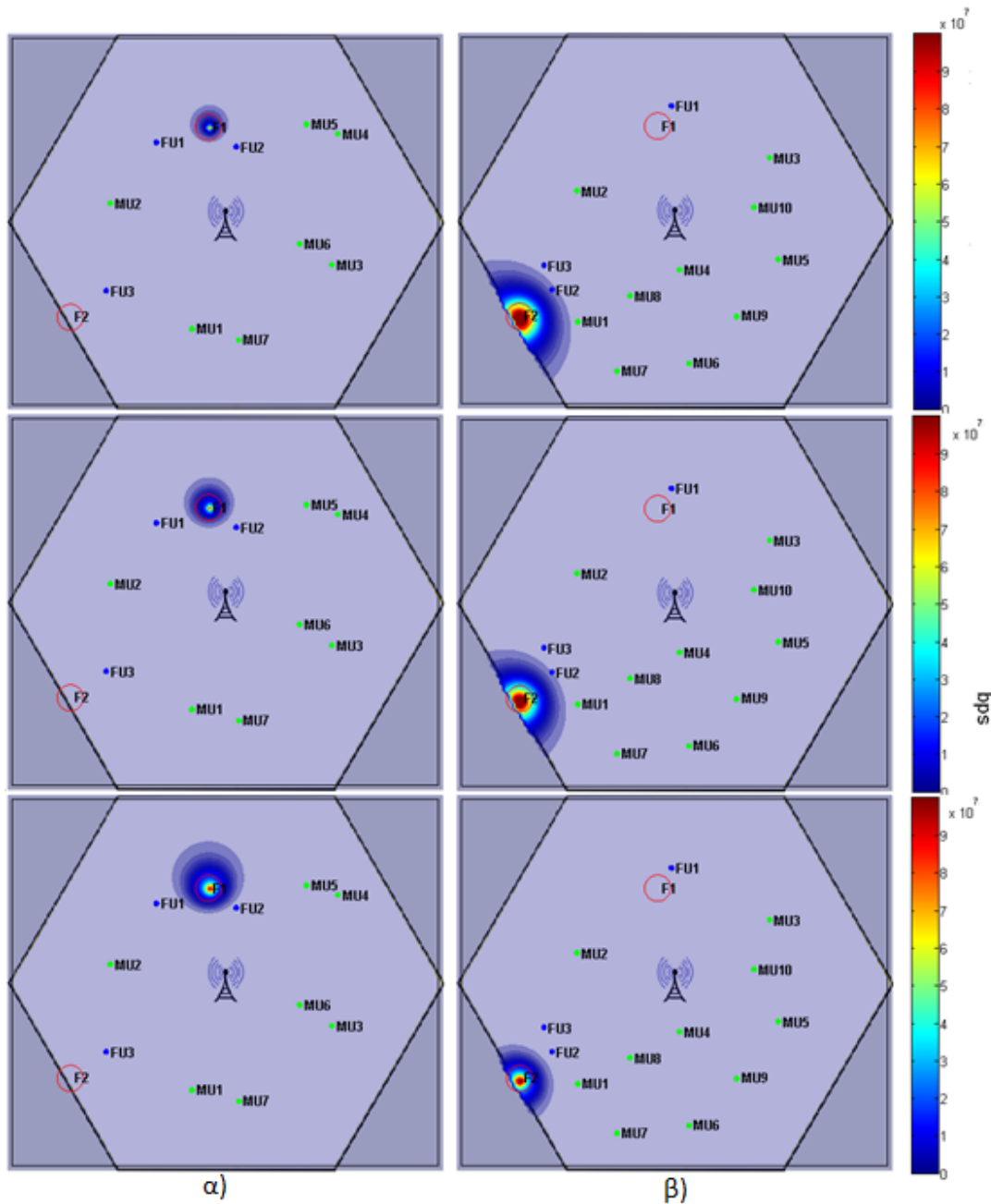
Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός femtocells	20
Αριθμός femto χρηστών	30
Αριθμός macro χρηστών	40
Διαμόρφωση	16 QAM
Διαθέσιμο φάσμα	10 MHz
FBS ισχύς μετάδοσης	11 dBm

Ενδεικτικά, και για την τοπολογία που περιγράφει ο Πίνακας 9, η χρήση του ελέγχου ισχύος αποδεικνύεται κρίσιμη για την δυνατότητα σύνδεσης macro χρηστών που βρίσκονται σε εσωτερικό χώρο στο οποίο έχει εγκατασταθεί femto σταθμός βάσης όπως σαφώς καταδεικνύεται στην Εικόνα 33.



Εικόνα 33. Γραφική απεικόνιση του ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε εσωτερικό περιβάλλον α) για σταθερά επίπεδα ισχύος μετάδοσης των femtocells β) κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.

Στην Εικόνα 34, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο ελέγχου ισχύος σταθερού SINR. Η προοδευτική προσαρμογή των επιπέδων ισχύος των femto BS απεικονίζεται μέσω της προκύπτουσας επίδοσης (ρυθμός δεδομένων) ενός χρήστη συνδεδεμένου στο femtocell σε κάθε διαδοχική επανάληψη.



Εικόνα 34. Διαδοχική προσαρμογή των επιπέδων ισχύος των femtocells, κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου σταθερού SINR.

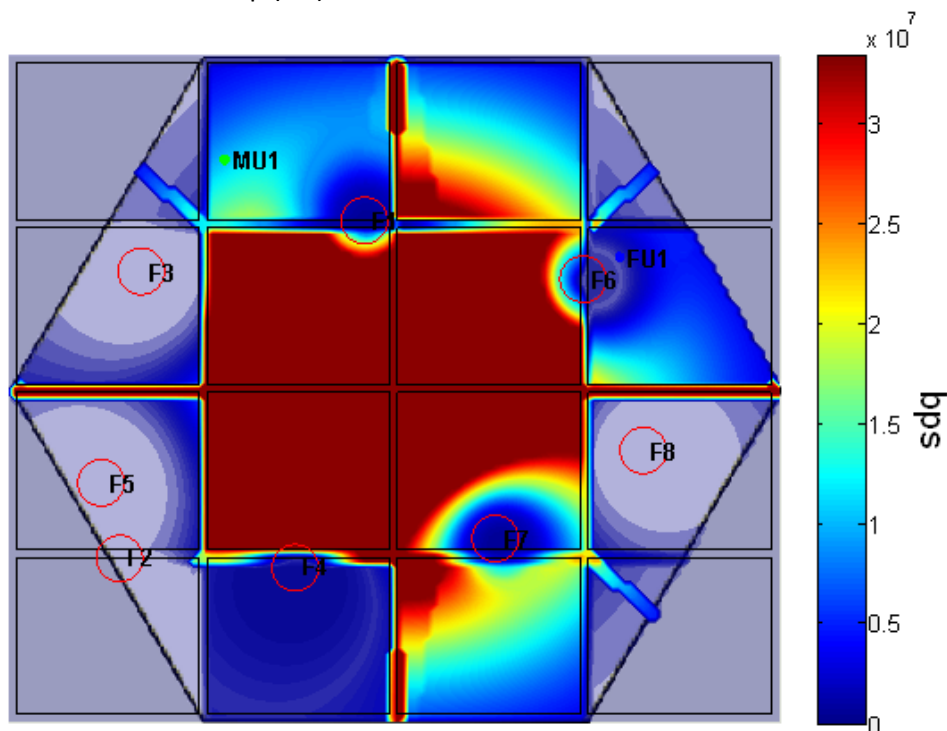
Δεδομένου ότι η αρχική διαμόρφωση αποδεικνύεται ακατάλληλη για τα femtocells, λόγω α) του αυξημένου αριθμού femto UE στο πρώτο παράδειγμα (Εικόνα 34α), και β) την απόσταση από το macro σταθμό βάσης (Εικόνα 34β), η διαδικασία ενεργοποιείται. Για την πρώτη περίπτωση που εμφανίζεται στα αριστερά, τα επίπεδα ισχύος προσαρμόζονται προς τα πάνω προκειμένου να ικανοποιήσουν την αυξημένη ζήτηση. Στη δεύτερη περίπτωση που εμφανίζεται στα δεξιά, τα επίπεδα ενέργειας πρέπει να ρυθμιστούν προς τα κάτω προκειμένου το εξασθενημένο σήμα που λαμβάνουν οι macro χρήστες, να μην επιβαρύνεται περαιτέρω από την επίδραση των femtocell χωρίς λόγο. Με αυτό το παράδειγμα γίνονται εμφανή τα πλεονεκτήματα της αυτό-ρύθμισης, επιδρώντας σε κάθε femtocell ξεχωριστά. Κατά την τρίτη επανάληψη, ο αλγόριθμος πληροί τις απαιτήσεις για το SINR και η διαδικασία σταματά μέχρι το femtocell να

ανιχνεύσει αλλαγές στο περιβάλλον του και απαιτηθεί αναπροσαρμογή. Και πάλι, επιβάλλεται μέγιστη τιμή επιτρεπόμενης ισχύος μετάδοσης των femtocells, ακόμα και αν αυτό σημαίνει ότι η επίδοση-στόχος δεν έχει επιτευχθεί.

7.2. Καταμερισμός φάσματος

Σε αυτήν την ενότητα εφαρμόζουμε τις τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών, που πέραν του ελέγχου ισχύος, περιλαμβάνουν καταμερισμό φάσματος. Η προσομοίωση αφορά σενάρια όπου femtocells είχαν αναπτυχθεί σε περιοχές όπου σχήματα IFR, FFR, SFR έχουν χρησιμοποιηθεί, όπως αυτά περιγράφονται στο κεφάλαιο 4. Τα femtocells ήταν είτε ικανά να εφαρμόσουν έλεγχο ισχύος, ή σε θέση να αισθανθούν το περιβάλλον τους (sensing), και να ρυθμίσουν τις παραμέτρους της μετάδοσης ανάλογα. Το τελευταίο σημαίνει ότι στην περίπτωση των FFR, SFR, τα εγκατεστημένα femto BS, χρησιμοποιούν τις συχνότητες που δε χρησιμοποιούνται από τους macro χρήστες στην ίδια περιοχή. Η εναπόθεση femtocells στην κυψέλη ήταν τυχαία, με μικρή βαρύτητα στα όρια του macrocell αντανακλώντας την ανάγκη για καλύτερες υπηρεσίες στις απομακρυσμένες περιοχές λόγω χαμηλής ποιότητας λαμβανόμενων υπηρεσιών.

Το σενάριο στο οποίο τα femtocells μεταδίδουν σε ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων και στην προεπιλεγμένη ισχύ μετάδοσης, προσομοιώνεται και απεικονίζεται στην Εικόνα 35. Ο χάρτης δείχνει ξεκάθαρα τις τεράστιες διαβαθμίσεις στην ποιότητα των υπηρεσιών που λαμβάνει ένα macro UE κατά μήκος του macrocell.

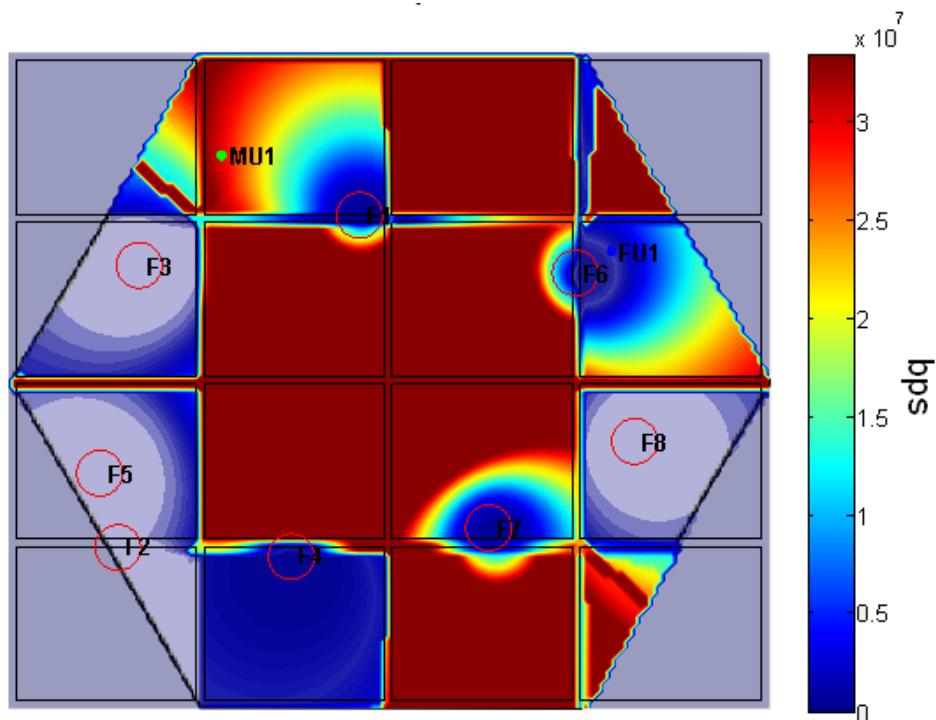


Εικόνα 35. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε co-channel παράταξη με τα femtocells και απουσία σχήματος ελέγχου ισχύος.

Στο εσωτερικό κτιρίου στα όρια της κυψέλης και σχετικά κοντά σε femto BS, οι macro χρήστες αδυνατούν να αποκτήσουν πρόσβαση στις macrocell υπηρεσίες. Στην περίπτωση αυτή,

οι παρεμβολές που υφίστανται είναι δύο ειδών: co-layer και cross-layer. Οι μεν πρώτες παρουσιάζονται λόγω της γειννιάσής τους με τα παρακείμενα macrocell, οι δε δεύτερες προέρχονται από την μετάδοση του femto BS στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων.

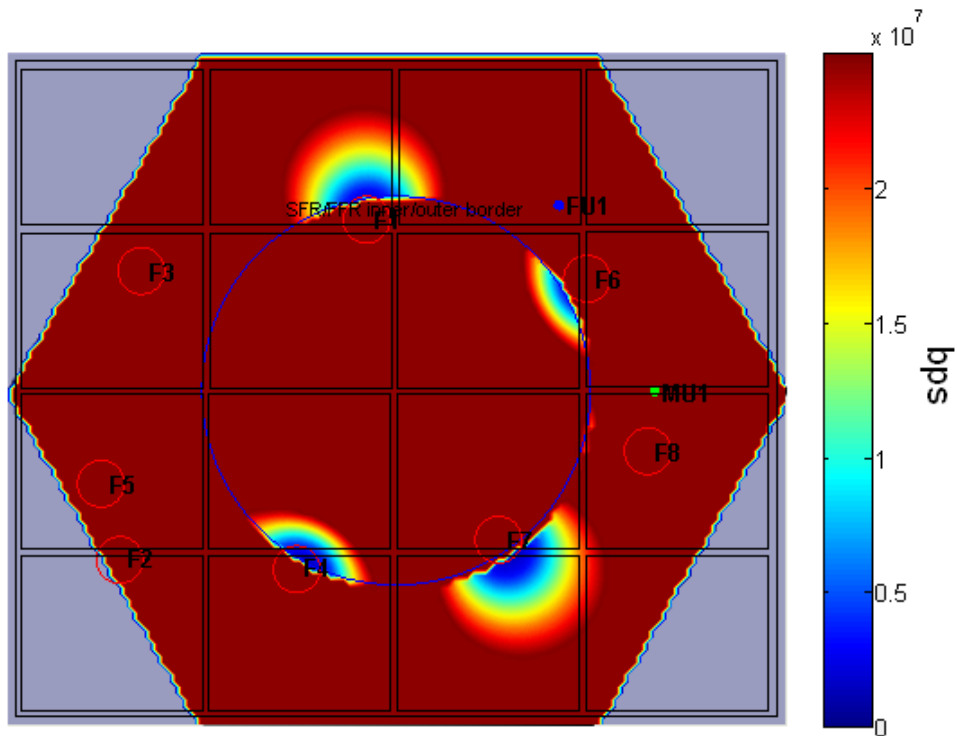
Για την αποφυγή των ομοστροφιακών παρεμβολών από τα γειτονικά macrocells, εφαρμόζουμε το σχήμα διαμέρισης συχνοτήτων IFR. Καθώς αν τα femtocells χρησιμοποιούν συμπληρωματικά το φάσμα, τότε δεν υπάρχει περιοχή με co-channel παρεμβολές και η απεικόνιση δεν έχει κάποιο νόημα. Αντίθετα, επιλέγουμε να παρουσιάσουμε την περίπτωση κατά την οποία τα femtocells δεν προσαρμόζονται στο σχήμα, αλλά μεταδίδουν κατά μήκος ολόκληρου του φάσματος (Εικόνα 36). Όπως είναι φανερό, σε ακριτικές περιοχές, χωρίς την παρουσία femto BS, η απόδοση από την εφαρμογή του IFR βελτιώνεται αισθητά. Αντίθετα, σε περιοχές εμβέλειας femtocell, ο συνδυασμός της διαίρεσης του διαθέσιμου εύρους ζώνης που επιβάλλει το IFR, με την παρουσία των femtocells κατά μήκος ολόκληρου του εύρους ζώνης, οδηγούν σε υποβάθμιση του SINR σε βαθμό η μετάδοση των απαραίτητων καναλιών ελέγχου να καθίσταται αδύνατη για μεγάλες περιοχές της κυψέλης. Αυτό ισχύει για όλα τα σχήματα καταμερισμού συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των FFR, SFR.



Εικόνα 36. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήση σε co-channel παράταξη με τα femtocells και IFR στο macrocell στρώμα.

Η Εικόνα 37 απεικονίζει την περίπτωση FFR συντονισμού σε επίπεδο macrocell, με προσαρμογή των femtocells στο πεδίο των συχνοτήτων. Η κατάσταση για τους ακριτικούς χρήστες είναι σαφώς βελτιωμένη, καθώς μέρος του φάσματος ανατίθεται αποκλειστικά σε αυτούς, οδηγώντας σε απουσία τόσο των ομοστροφιακών όσο και των διαστρωματικών παρεμβολών. Οι μόνες παρεμβολές αυτού του σεναρίου προέρχονται από femtocells που βρίσκονται κοντά στη συνοριακή γραμμή που διακρίνει την κυψέλη σε εσωτερική/εξωτερική περιοχή, και η εμβέλειά τους υπερβαίνει την αντίπερα περιοχή.

Θα πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι η παραπάνω βελτίωση με την χρησιμοποίηση μεθόδων επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, συμβαίνει ταυτόχρονα, σε βάρος της συνολικής απόδοσης δεδομένου ότι χρήστες σε μη προβληματικές (αρχικά) περιοχές, αναγκάζονται να λειτουργούν πλέον σε ένα κλάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιούσαν, με σοβαρή υποβάθμιση στην απόδοσή τους. Η χαμένη φασματική απόδοση μπορεί να αναπληρωθεί μερικώς από την αυξημένη εγκατάσταση femtocells στην περιοχή αυτή, που θα λειτουργούν στο ανεκμετάλλευτο φάσμα. Την ίδια στιγμή, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των femto BS (άρα και αύξηση των παρεμβολών), τόσο ελαττώνεται το χάσμα μεταξύ της απώλειας της μέσης απόδοσης και του οφέλους από τον καταμερισμό του φάσματος. Ο παραπάνω συμβιβασμός ως προς την πυκνότητα εγκατάστασης femtocells στην κυψέλη, διερευνάται στην επόμενη ενότητα.

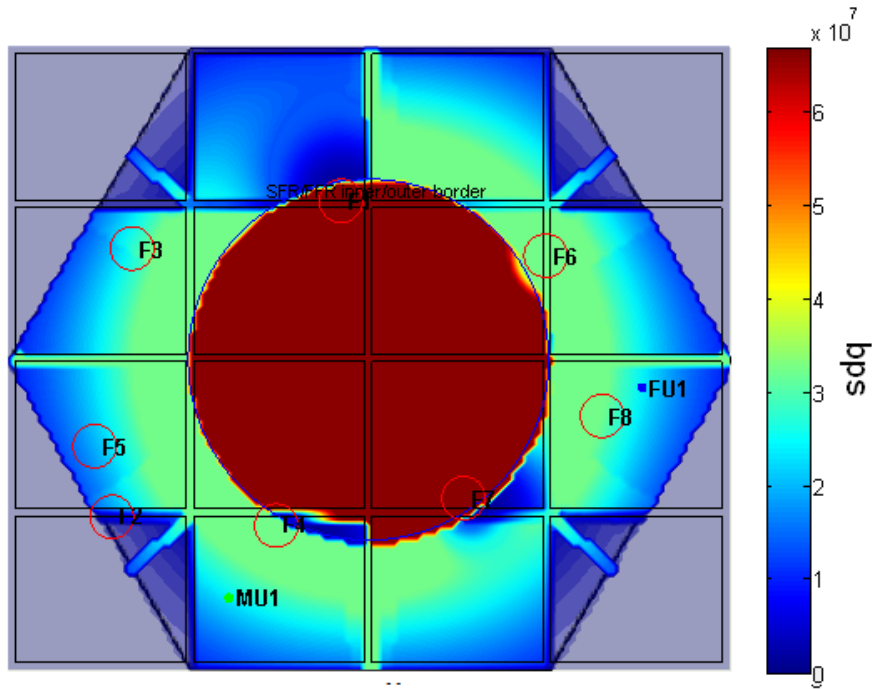


Εικόνα 37. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε FFR περιβάλλον και femtocells σε διαφορετικές συχνότητες.

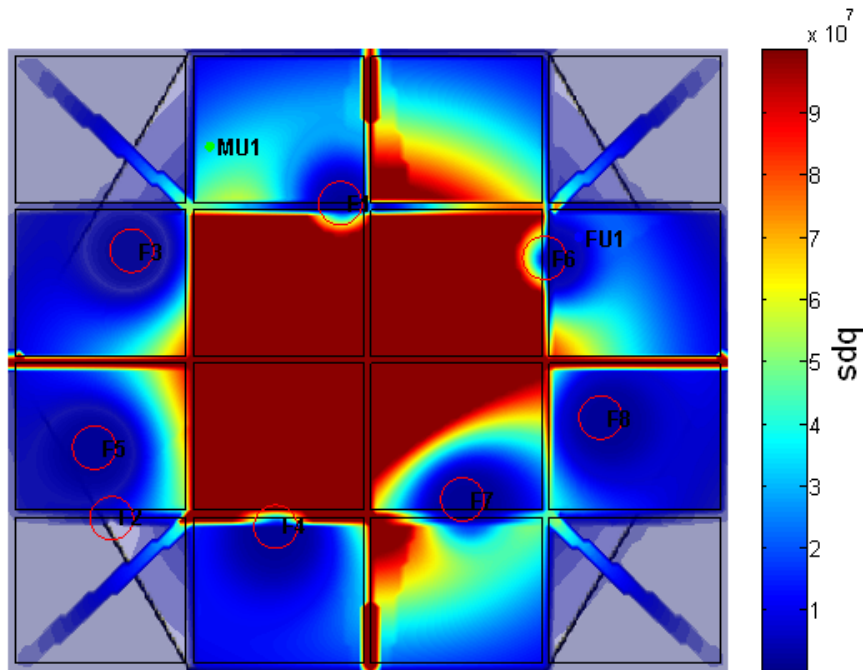
Στο SFR, παρόμοια με το FFR, ο διαχωρισμός της περιοχής της κυψέλης και του φάσματος προσφέρει προστασία στους χρήστες-θύματα των παρεμβολών. Όπως γίνεται εμφανές από την γεωγραφική απεικόνιση (Εικόνα 38), οι κύριες διαφορές με το FFR είναι δύο.

Η πρώτη αφορά την αύξηση των παρεμβολών. Δεδομένου ότι επιτρέπεται η πρόσβαση σε μεγαλύτερο κλάσμα του φάσματος από χρήστες της εξωτερικής περιοχής, η απόσταση μεταξύ χρηστών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες στις οποίες γειτονικό macrocell εκπέμπει, μειώνεται σε σχέση με την περίπτωση του FFR. Οι παρεμβολές επηρεάζουν κυρίως τους ακριτικούς χρήστες.

Η δεύτερη αφορά την εφαρμογή μεγαλύτερων επιπέδων στις συχνότητες των ακριτικών περιοχών σε σχέση με των κεντρικών χρηστών, και σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο κομμάτι φάσματος που τους έχει ανατεθεί, ($1/3$ σε σύγκριση με το $1/4$ του FFR), η απόδοσή τους σχετικά εξισορροπείται.



Εικόνα 38. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε SFR περιβάλλον και femtocells σε διαφορετικές συχνότητες.

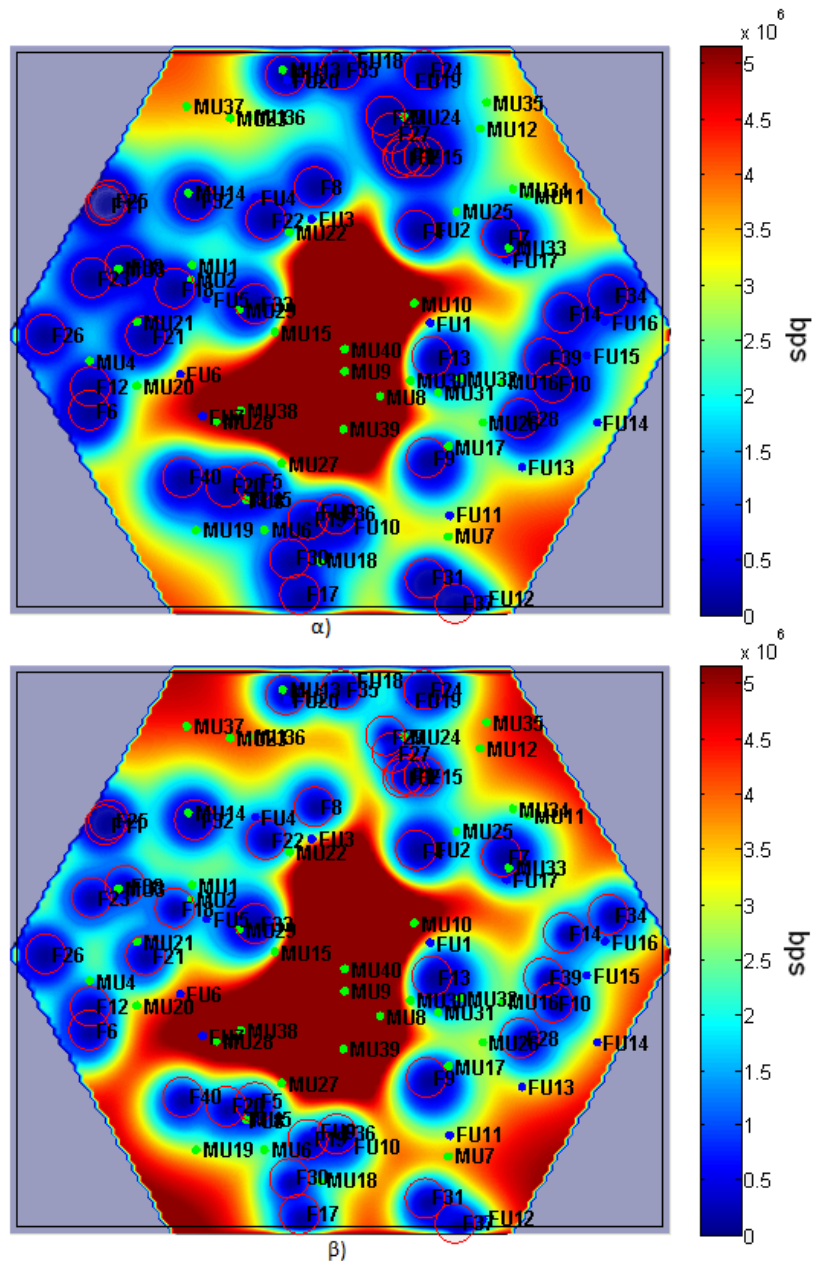


Εικόνα 39. Χάρτης ρυθμού δεδομένων macro χρήστη σε co-channel παράταξη με τα femtocells και εφαρμογή ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν τις ομοστροφικές και διαστροφικές παρεμβολές με θύματα τους macrocell χρήστες, και για λόγους σύγκρισης παρουσιάζουμε την εφαρμογή του αλγορίθμου ισχύος σταθερής εμβέλειας για το ίδιο σενάριο και τοπολογία (Εικόνα 39). Ο έλεγχος ισχύος παρέχει μερική προστασία στα macro UE, μέσω της προσαρμογής της ισχύος εκπομπής των femtocells σε σχέση με την λαμβανόμενη ισχύ από το macrocell. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τον έλεγχο ισχύος ένα εξαιρετικό εργαλείο που μπορεί να συνδυαστεί με άλλα συστήματα ακύρωσης παρεμβολών. Σε

αντίθεση με τις τεχνικές διαμερισμού όμως, η πιθανότητα ένας macro χρήστης να δέχεται παρεμβολές που του εμποδίζουν την πρόσβαση δεν εξαλείφεται, απλά μειώνεται, όπως φαίνεται και από την εικόνα στις περιοχές γύρω από τους femto BS. Αυτό εξετάζεται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τον έλεγχο ισχύος ένα εξαιρετικό εργαλείο που μπορεί να συνδυαστεί με άλλα συστήματα ακύρωσης παρεμβολών.

Όσο αφορά τους χρήστες που εξυπηρετούνται από τα femtocells, όπως έχουμε πει, η ύπαρξη διαστρωματικών παρεμβολών από το macro BS δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, αφού ελεύθερα μπορεί να συνδεθεί σε αυτό, αν το σήμα που δέχεται από το macrocell είναι ισχυρότερο. Αντίθετα, προβλήματα μπορεί να προκύψουν από την παρουσία γειτονικών femtocells με επικαλυπτόμενες περιοχές κάλυψης, στις οποίες μπορεί να βρεθεί κάποιος χρήστης.



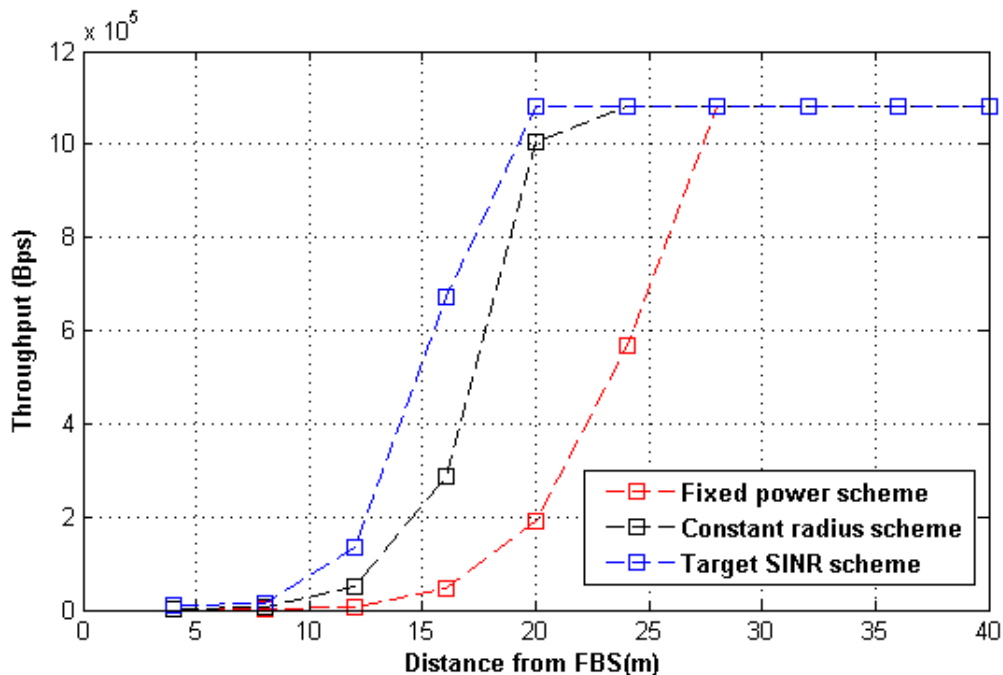
Εικόνα 40. Χάρτης ρυθμού δεδομένων για έναν macro χρήστη σε σενάριο εφαρμογής ελέγχου ισχύος α) πριν και β) μετά την εφαρμογή σχήματος καταμερισμού φάσματος μεταξύ γειτονικών femtocells.

Η Εικόνα 40 παρουσιάζει το σενάριο από τη μεριά ενός macro χρήστη, κατά το οποίο έχει εφαρμοστεί έλεγχος ισχύος στα femtocells, προκειμένου η μετάδοσή τους να είναι ανεξάρτητη της θέσης τους ως προς το macro BS, και ταυτόχρονα υιοθετείται πολιτική δυναμικού καταμερισμού φάσματος, όταν τα femtocells ανιχνεύουν την ύπαρξη έτερου femto BS σε κοντινή απόσταση. Η εικόνα αναπαριστά την οπτική γωνία του macro χρήστη καθώς, με την αποκλειστική ανάθεση του φάσματος, οι παρεμβολές μεταξύ των femtocells παύουν να υφίστανται, ενώ ταυτόχρονα ανακουφίζεται το macrocell στρώμα από την ύπαρξη των συσσωρευμένων παρεμβολών που προκαλούν οι πυκνές συστοιχίες femtocells. Όπως θα φανεί και στην επόμενη ενότητα, τα οφέλη από την προσέγγιση αυτή είναι πολλαπλά και σημαντικά.

7.3. Αξιολόγηση τεχνικών

7.3.1. Αλγόριθμοι ισχύος

Στην Εικόνα 41 γίνεται καταρχήν σύγκριση των επιδόσεων των διαφορετικών αλγορίθμων ελέγχου ισχύος. Συγκεκριμένα απεικονίζεται ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για έναν εσωτερικό macro χρήστη που κινείται απομακρυνόμενος από το femto σταθμό βάσης και προς το macro BS. Στο παράδειγμα αυτό, η απόσταση από το macro σταθμό βάσης είναι σημαντική (> 200 m), οδηγώντας στην διακύβευση των macrocell υπηρεσιών εντός της εμβέλειας του femtocell (< 20m) στην περίπτωση σταθερής ισχύος μετάδοσης.

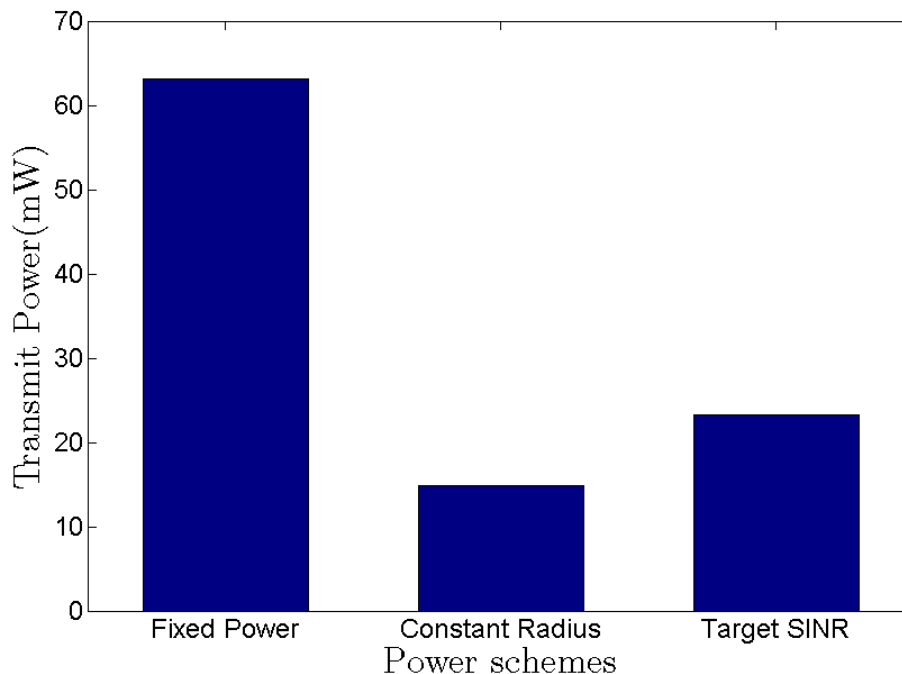


Εικόνα 41. Σύγκριση των σχημάτων ελέγχου ισχύος, για διαφορετική απόσταση ενός macro χρήστη εντός της εμβέλειας femto BS.

Η κατάσταση βελτιώνεται σημαντικά όταν ενεργοποιείται ο αλγόριθμος σταθερής εμβέλειας, και ακόμη περισσότερο στο σχήμα σταθερού SINR, επιτυγχάνοντας 7 και 17 φορές καλύτερη απόδοση από ό, τι στην πρώτη περίπτωση, αντιστοίχως, σε ακτίνα 12 m από το femtocell. Επιπλέον, σε απόσταση μεγαλύτερη από τα 20 m από το femto BS, τα δύο συστήματα

έχουν ήδη επιτύχει το μέγιστο διαθέσιμο ρυθμό, ενώ η πρώτη περίπτωση συνεχίζει να επιδεικνύει κακή απόδοση. Ενώ η επιλογή του σεναρίου ενός macro χρήστη σε εσωτερικό χώρο και αρκετά απομακρυσμένο από το macro BS δείχνει ακραία, είναι ακριβώς το είδος των περιστάσεων που θα ωφεληθούν κυρίως από τη χρήση των femtocells, καθιστώντας το σενάριο αρκετά αντιπροσωπευτικό.

Επιπλέον, η μέση ισχύς εκπομπής των femtocells για τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις απεικονίζεται στην Εικόνα 42. Τα αποτελέσματα αφορούν ένα σενάριο εγκατάστασης 10 femto σταθμών βάσης τυχαία τοποθετημένων μέσα στο macrocell. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι εμφανής στο γράφημα, φθάνοντας περίπου 76% και 64% μείωση στην μετάδοση ισχύος για τα δύο συστήματα προσαρμοζόμενης μετάδοσης αντίστοιχα, με τη διαφορά μεταξύ των δύο να αποδίδεται στην παρουσία ενός ζεύγους κοντινών femtocells. Η διαφορά σε σχέση με την απουσία κάποιου σχήματος ελέγχου ισχύος, θα μπορούσε να είναι ακόμη υψηλότερη, λαμβάνοντας υπόψη ότι η θέση των femtocells δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά τείνει να προτιμάται σε περιοχές με αδύναμο σήμα macrocell.



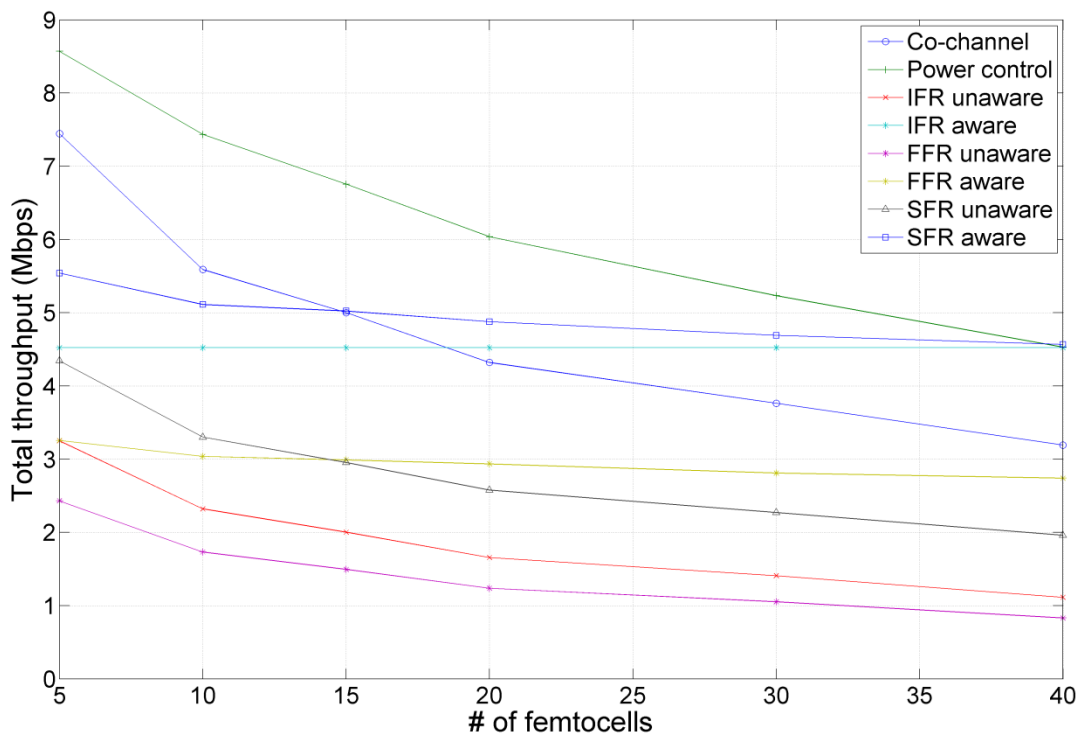
Εικόνα 42. Μέση ισχύς μετάδοσης 10 femtocells τυχαία εγκατεστημένων εντός του macrocell.

7.3.2. Αλγόριθμοι ισχύος και καταμερισμού φάσματος – Απόδοση μέσου χρήστη

Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται μια συγκεντρωτική σύγκριση των επιδόσεων κάθε τεχνικής. Αντίθετα με τη σύγκριση μεταξύ των σχημάτων ελέγχου ισχύος, όπου η διαφορά στις επιδόσεις τους δεν επηρεαζόταν σημαντικά από τον αριθμό των εγκατεστημένων femtocells, αυτό δεν ισχύει στη σύγκριση όλων των σχημάτων. Ως εκ τούτου, προσομοιώσαμε και εκτιμήσαμε το συνολικό ρυθμό δεδομένων κάθε σχήματος για διαφορετικούς βαθμούς πυκνότητας femto σταθμών βάσης. Σημειώνουμε πως επιλέξαμε τον αλγόριθμο σταθερής εμβέλειας, προκειμένου να εκπροσωπήσει την εφαρμογή ελέγχου ισχύος σε σχέση με τα

σχήματα καταμερισμού συχνοτήτων, αφού η σύγκριση με τον έτερο αλγόριθμο (σταθερού SINR) οδήγησε σε σχετικά παρόμοια απόδοση.

Εξετάζοντας την εικόνα, καταρχήν, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι η εφαρμογή ελέγχου ισχύος προσφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα από την άποψη της βέλτιστης συνολικής απόδοσης του συστήματος. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι όλοι οι χρήστες έχουν πρόσβαση στο σύνολο του φάσματος, και δεν υφίσταται κανένας περιορισμός που συνήθως ευνοεί τους μη προνομιούχους χρήστες έναντι της συνολικής μέσης απόδοσης. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των femtocells αυξάνεται, τα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων μειώνονται συνεχώς, μέχρι που εξαλείφονται πλήρως για την περίπτωση όπου η πυκνότητα των femtocells ξεπερνά τα 40 ανά κυψέλη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός πως όσο η πυκνότητα αυξάνεται, τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα ένας macro χρήστης να βρίσκεται στην εμβέλεια ενός co-channel femtocell, ακόμα και μετά την εφαρμογή προσαρμοσμένης ισχύος μετάδοσης.



Εικόνα 43. Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για έναν macro χρήστη.

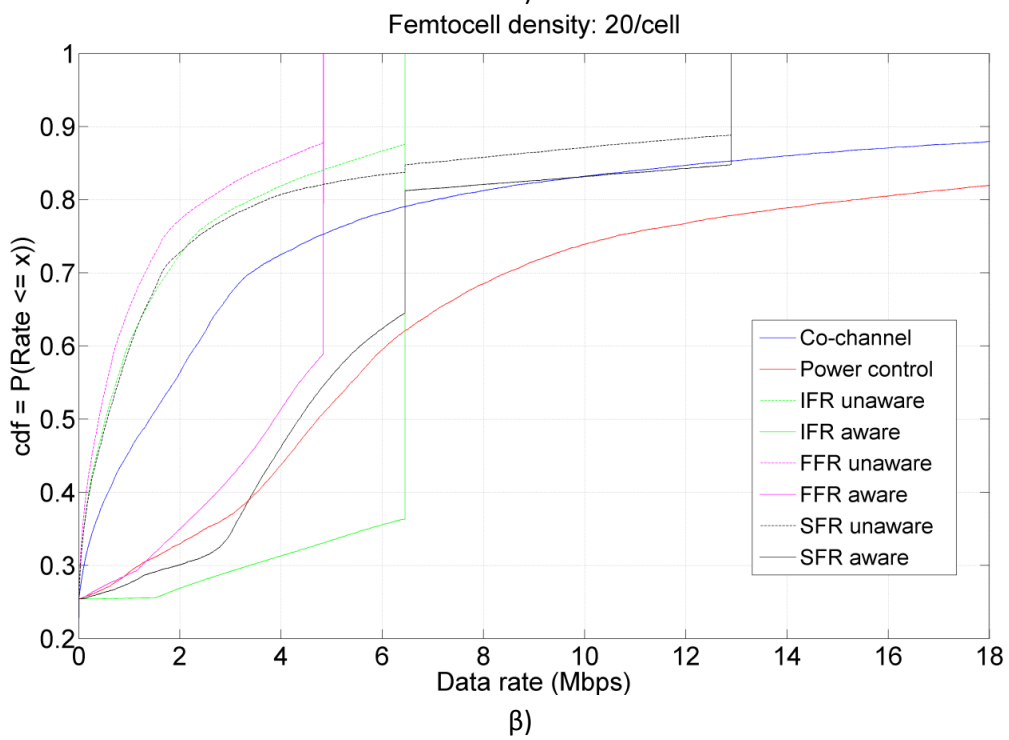
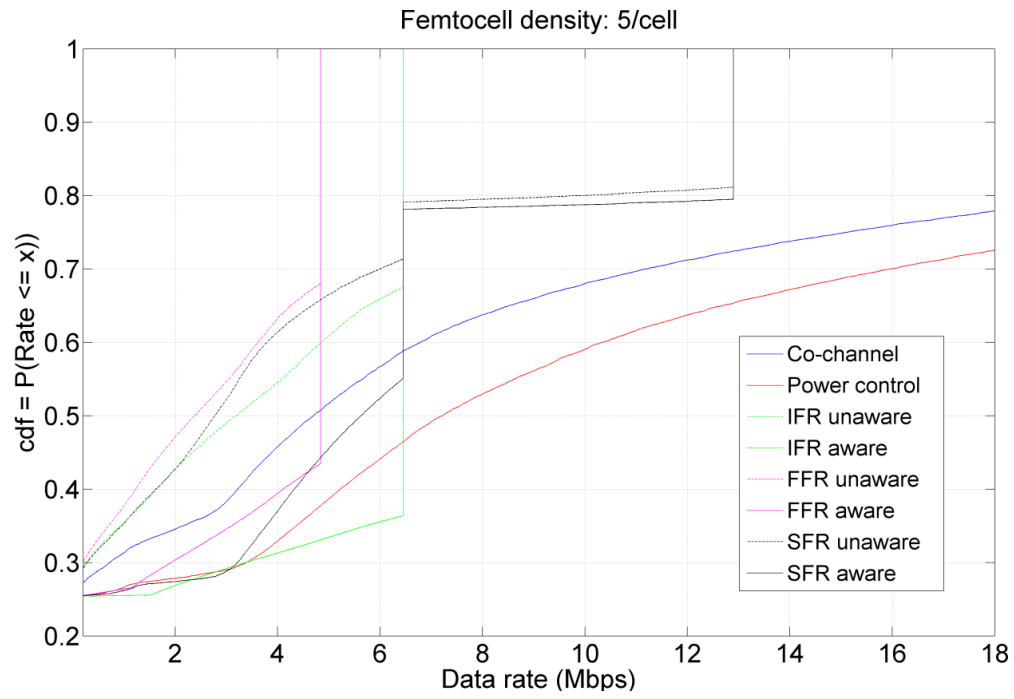
Ένα σημαντικό εύρημα είναι ότι η απουσία εφαρμογής οποιασδήποτε τεχνικής αποφυγής παρεμβολών, έχει χειρότερα αποτελέσματα από τις μεθόδους κατανομής συχνοτήτων για αριθμό femtocells πάνω από 15. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι σημαίνει ότι το κόστος της μικρότερης αξιοποίησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης από τα macrocell, αντισταθμίζεται γρήγορα ακόμη και ως προς τη συνολική απόδοση, όταν μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη femtocells έχει λάβει χώρα. Κατά αυτόν τον τρόπο διατηρείται η φασματική απόδοση του συστήματος. Το τελευταίο αναδεικνύει τη σημασία των femtocells, και πώς σε συνδυασμό με τεχνικές καταμερισμού φάσματος σε επίπεδο macrocell, προσφέρει ισχυρά οφέλη στους διαχειριστές δικτύου σε δύο κρίσιμα επίπεδα: αφενός η μεγάλη ανάπτυξη femtocells αντισταθμίζει την μείωση της φασματικής απόδοσης εξαιτίας των σχημάτων ICIC. Αφετέρου, αντισταθμίζεται η μείωση της συνολικής μέσης απόδοσης του δικτύου, και μάλιστα χωρίς να υπολογίζεται η αποφόρτιση του macro στρώματος μέσω της ευρυζωνικής σύνδεσης του χρήστη.

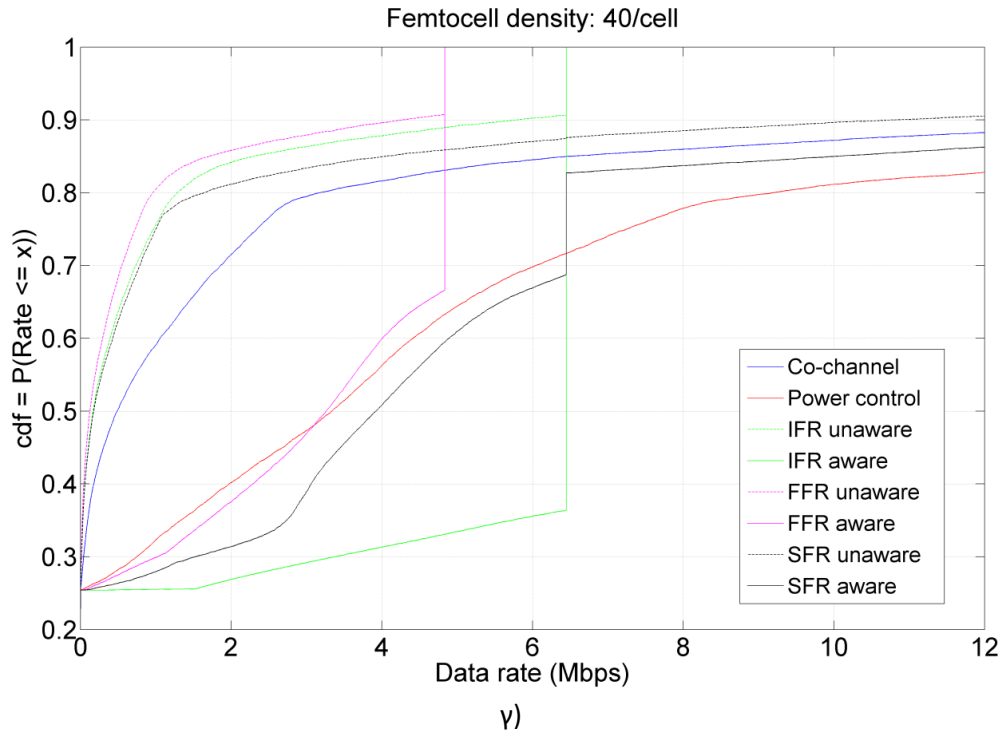
Στην εικόνα παρατηρούνται και σημαντικές διαβαθμίσεις των σχημάτων διαμέρισης φάσματος. Η υλοποίηση FFR που σχεδιάστηκε αποδεικνύεται σαφώς κατώτερη των υπολοίπων μεθόδων. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερης τάξης διαίρεση του φάσματος, αφού κάθε περιοχή έχει πρόσβαση μόλις στο ένα τέταρτο του διαθέσιμων συχνοτήτων, σε αντίθεση με τα IFR, SFR που μπορούν να εκμεταλλευτούν τουλάχιστον το ένα τρίτο. Για τον ίδιο λόγο, το IFR υπολείπεται ελάχιστα του SFR, αν και με την αύξηση του αριθμού των εγκατεστημένων femtocells η διαφορά μειώνεται. Η μικρή αυτή μείωση που παρατηρείται για το SFR, αποδίδεται στο γεγονός πως αυξάνεται η πιθανότητα τα femto BS να βρίσκονται κοντά στα όρια της εσωτερικής με την εξωτερική περιοχή, όπου δύναται να επηρεάσουν την απέναντι περιοχή, οδηγώντας σε αύξηση των παρεμβολών. Μια τελευταία παρατήρηση σχετικά με την εκτίμηση της απόδοσης είναι οι καταστροφικές συνέπειες των femtocells που αδυνατούν να αντιληφθούν το RF περιβάλλον τους, ώστε να προσαρμοστούν σε περιβάλλον macrocell ICIC, με αποτέλεσμα την πρόκληση παρεμβολών σε ήδη αδύναμα σήματα λόγω του μικρότερου διαθέσιμου φάσματος. Ως εκ τούτου, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό, ο διαχειριστής του δικτύου να θέτει αυστηρές προδιαγραφές ως προς την εγκατάσταση των femtocells, αν έχει υιοθετηθεί ICIC macrocell περιβάλλον.

Αν και η μέση απόδοση του δικτύου αποτελεί σημαντική μετρική, εξίσου κρίσιμη για την απόδοση ενός δικτύου (και επακόλουθα για την ικανοποίηση των χρηστών) αποτελεί και η κατανομή των προσφερόμενων υπηρεσιών κατά μήκος ολόκληρης της κυψέλης. Όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 2, η ανάγκη αποφυγής τεράστιων διαβαθμίσεων μεταξύ των χρηστών καταγράφηκε και μέσα από τις απαιτήσεις IMT-Advanced θεσπίζοντας ελάχιστη φασματική απόδοση για διαφορετικές περιοχές της κυψέλης.

Η Εικόνα 44 παρουσιάζει την εμπειρική CDF του ρυθμού δεδομένων όταν διαδοχικά 5, 30 και 40 femtocells έχουν διασκορπιστεί ομοιόμορφα στην κυψέλη. Η εικόνα αναδεικνύει την κατανομή της απόδοσης κατά μήκος της κυψέλης, για τις διαφορετικές πυκνότητες femtocells. Από την εικόνα προκύπτει και όπως αναμενόταν, πως για το μεγαλύτερο ποσοστό των χρηστών, ο έλεγχος ισχύος προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, ενώ και η απλή co-channel λειτουργία αποδίδει ικανοποιητικά. Παρόλα αυτά, σε μεγάλης κλίμακας femtocells παρατάξεις, ακόμα και αν ο μέσος ρυθμός δεδομένων παραμένει μεγαλύτερος ή συγκρίσιμος από τα άλλα σχήματα, ένας μεγάλος αριθμός χρηστών αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα σύνδεσης. Ενώ στα σχήματα διαμέρισης, η αποκλειστική ανάθεση φασμάτων σε αυτά τους εξασφαλίζει απροβλημάτιστη λειτουργία, ο έλεγχος ισχύος αδυνατεί να τους παρέχει την απαραίτητη προστασία από παρεμβολές.

Την μεγαλύτερη ευρωστία σε παρεμβολές προς τους μη προνομιούχους χρήστες, παρέχει το IFR, λόγω της αυστηρής ανάθεσης αποκλειστικού φάσματος σε χρήστες, ενώ η απόδοση των FFR, SFR κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Η δίκαιη κατανομή των πόρων, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τους παρόχους, καθώς σε έντονα ανισομερείς καταστάσεις, οι μη προνομιούχοι χρήστες εύκολα θα μεταπηδήσουν σε άλλο πάροχο.





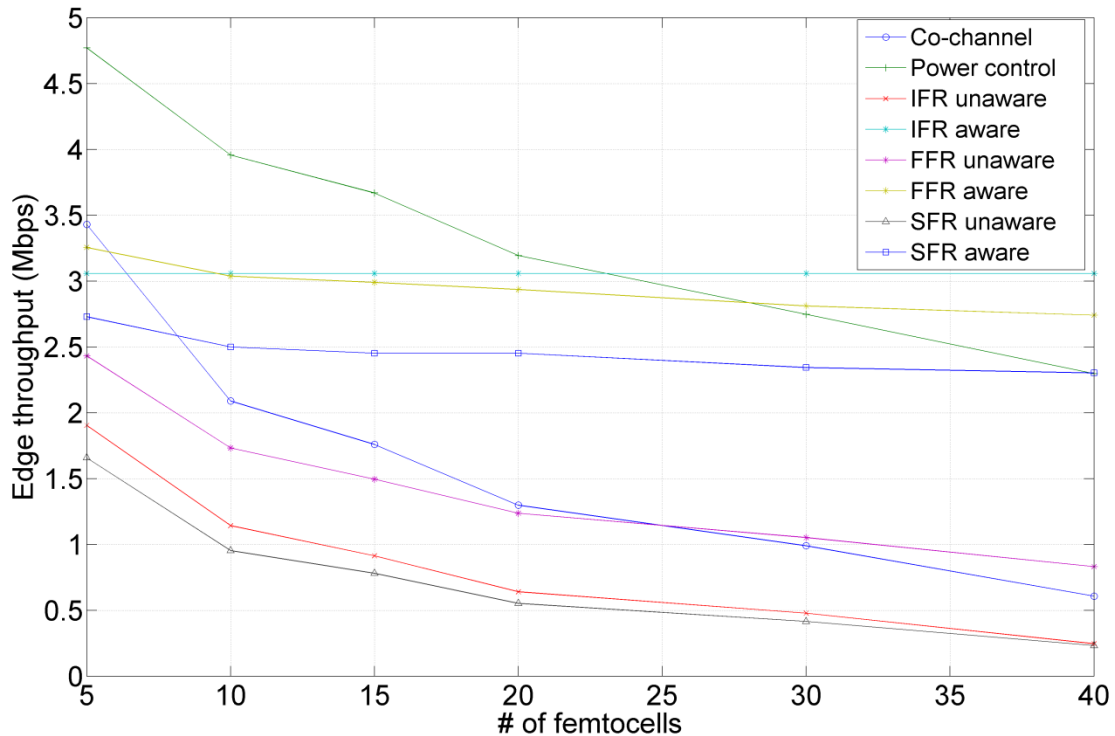
Εικόνα 44. Εμπειρική CDF ρυθμού δεδομένων για κάθε σχήμα και διαφορετικές πυκνότητες παράταξης femtocells α) 5, β) 20 και γ) 40 FBS/κελί).

7.3.1. Αλγόριθμοι ισχύος και καταμερισμού φάσματος – Απόδοση ακριτικού χρήστη

Επικεντρώνοντας στους μη προνομιούχους χρήστες, η απόδοση των οποίων αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για το δίκτυο συνολικά, εξετάζουμε συγκεκριμένα τους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης. Οι περιοχές αυτές αναδεικνύουν μια αντίφαση στην ανάπτυξη ετερογενών δικτύων με CSG femtocells. Οι χρήστες που υποφέρουν περισσότερο από τις cross-layer παρεμβολές (πηγή παρεμβολών τα femtocells) είναι εκείνοι που λαμβάνουν ασθενές σήμα από το στρώμα macrocell. Για τον ίδιο λόγο, όμως, στις περιοχές αυτές αναμένεται πυκνότερη παράταξη από femto BSs. Η παροχή λύσης δηλαδή σε ένα μέρος των χρηστών ώστε να υπερκεραστεί το ασθενές macrocell σήμα αποτελεί την αιτία δυσχερέστερης πρόσβασης στους παρακείμενους.

Η Εικόνα 45 απεικονίζει το μέσο ρυθμό δεδομένων ενός ακριτικού χρήστη σε απόσταση από το macro σταθμό βάσης μεγαλύτερη των 120 m, υπό την εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών ακύρωσης παρεμβολών. Αν και οι τάσεις είναι παρόμοιες με την εικόνα της συνολικής απόδοσης της κυψέλης (Εικόνα 43), τα σημεία καταλληλότητας ως προς την πυκνότητα των femtocells έχουν μετατοπιστεί. Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι μέθοδοι κατανομής συχνοτήτων (IFR, SFR, FFR) δείχνουν βελτιωμένη απόδοση παρά την περιορισμένη χρησιμοποίηση του φάσματος καθώς η ακύρωση των inter-cell παρεμβολών μεταξύ των macrocells είναι πιο σημαντική στις περιοχές αυτές. Ως εκ τούτου, παρά την διαίρεση του φάσματος, οι επιδόσεις τους ξεπερνούν την co-channel εφαρμογή του ελέγχου ισχύος, όταν η πυκνότητα εγκατάστασης femtocells είναι μόλις 22 femtocells/κυψέλη και άνω, και ξεπερνά την περίπτωση όπου κανένα μέτρο διαχείρισης

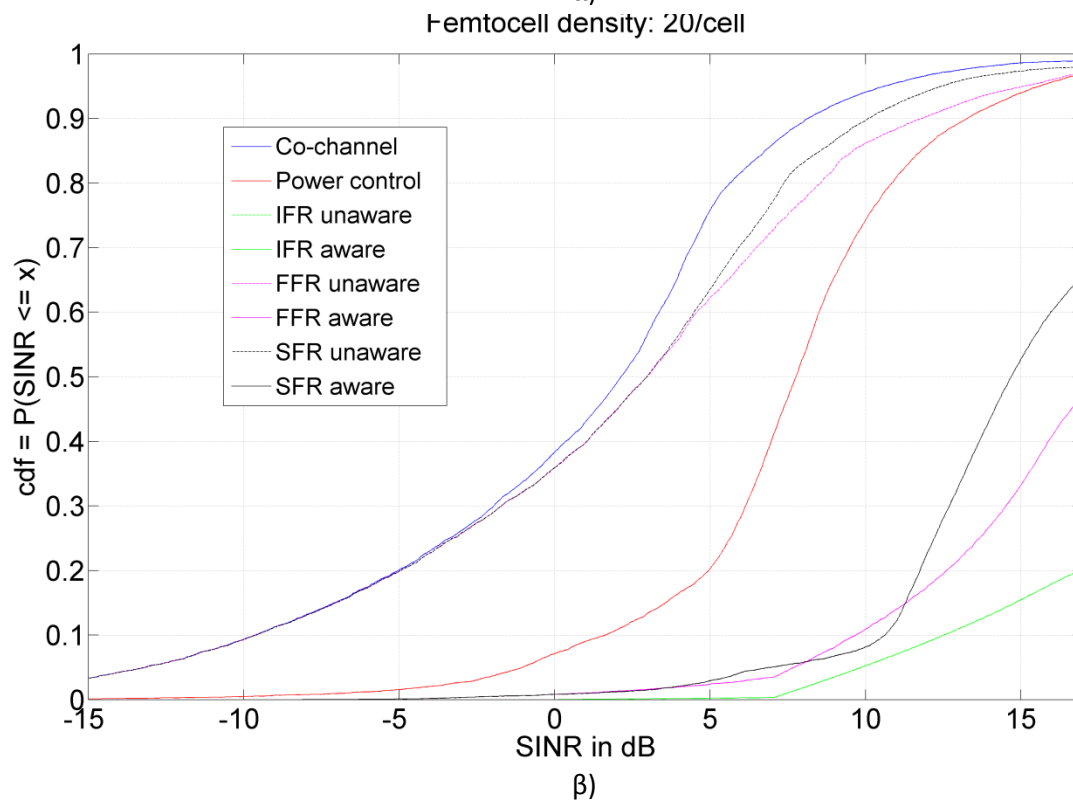
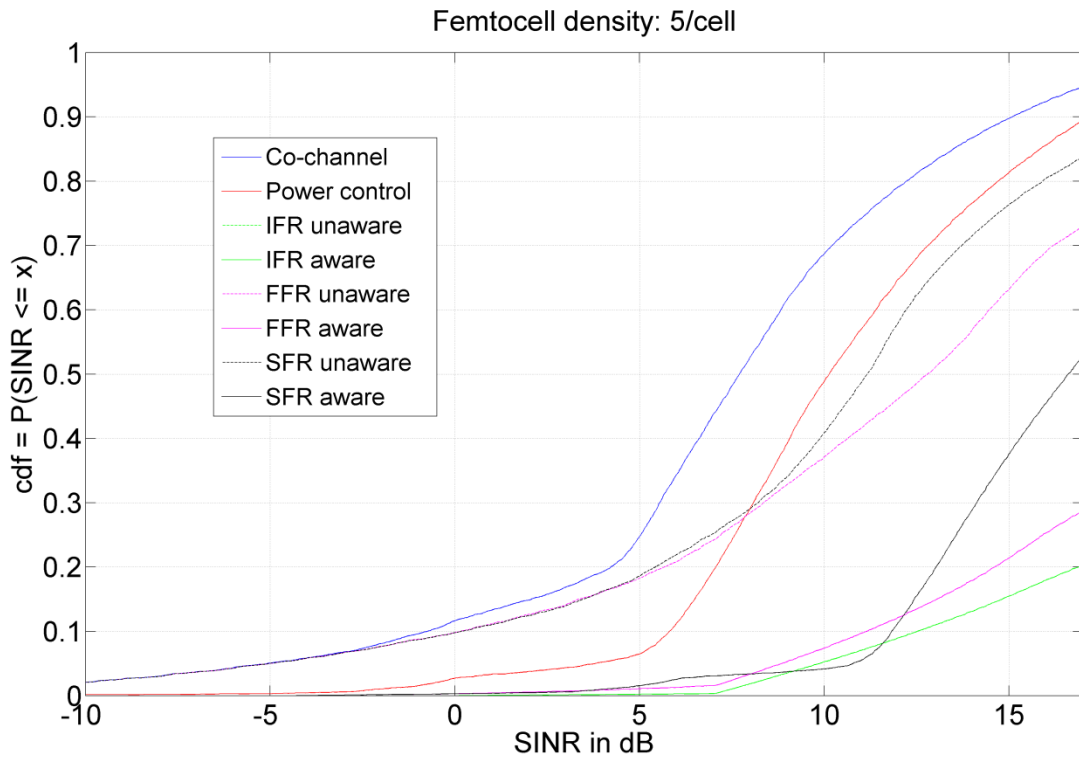
παρεμβολών δεν εφαρμόζεται ήδη για την περίπτωση όπου πάνω από 15 femtocells έχουν αναπτυχθεί. Αξίζει να σημειωθεί η αναβαθμισμένη επίδοση της FFR προσέγγισης σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους κατανομής συχνοτήτων, αφού αποδεικνύεται ανώτερο του SFR, και συγκρίσιμο με το IFR.

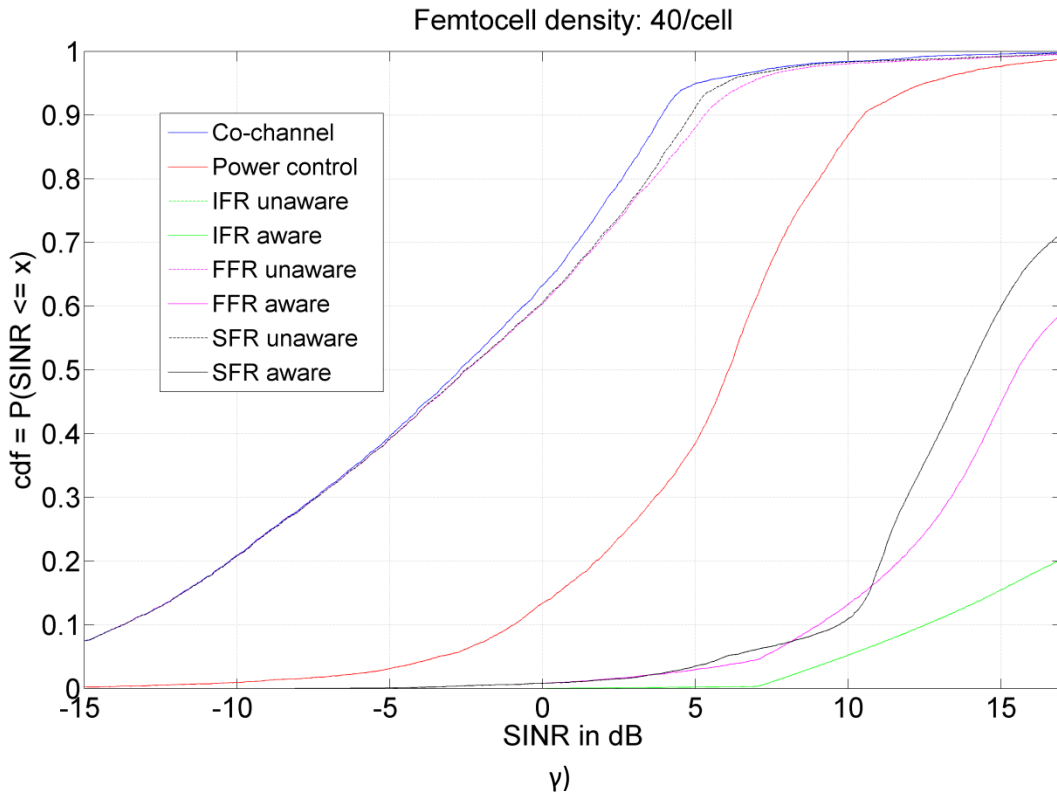


Εικόνα 45. Μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για έναν macro χρήστη στα όρια της κυψέλης.

Η Εικόνα 46 απεικονίζει την εμπειρική CDF για το SINR των χρηστών αυτών, στην περίπτωση όπου 5, 20 και 40 femtocells έχουν διασκορπιστεί κατά μήκος του macrocell. Αν και η επίτευξη ικανοποιητικού SINR καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης του χρήστη, υπάρχει ένα κατώφλι για το SINR, κάτω από το οποίο δεν μπορούν να μεταδοθούν ούτε τα απαραίτητα κανάλια εγκαθίδρυσης της σύνδεσης, με αποτέλεσμα την αδυναμία του χρήστη να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο.

Όπως δείχνουν οι εικόνες, για το μεγαλύτερο ποσοστό των χρηστών, η εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου διαχείρισης παρεμβολών είναι απαραίτητη, ακόμα και για μεσαίας κλίμακας παράταξη femtocells. Το ίδιο ισχύει και για τον έλεγχο ισχύος σε μεγάλης τάξης διείσδυση των femtocells, αφού ο μεγάλος αριθμός των femto BSs σε συνδυασμό με την λειτουργία στο ίδιο φάσμα, δημιουργεί εκτεταμένες περιοχές χωρίς επαρκή macro κάλυψη.





Εικόνα 46. Εμπειρική CDF του ρυθμού δεδομένων για macro χρήστες στα όρια της κυψέλης για πυκνότητα femtocells α) 5, β) 20 και γ) 40 ανά κυψέλη.

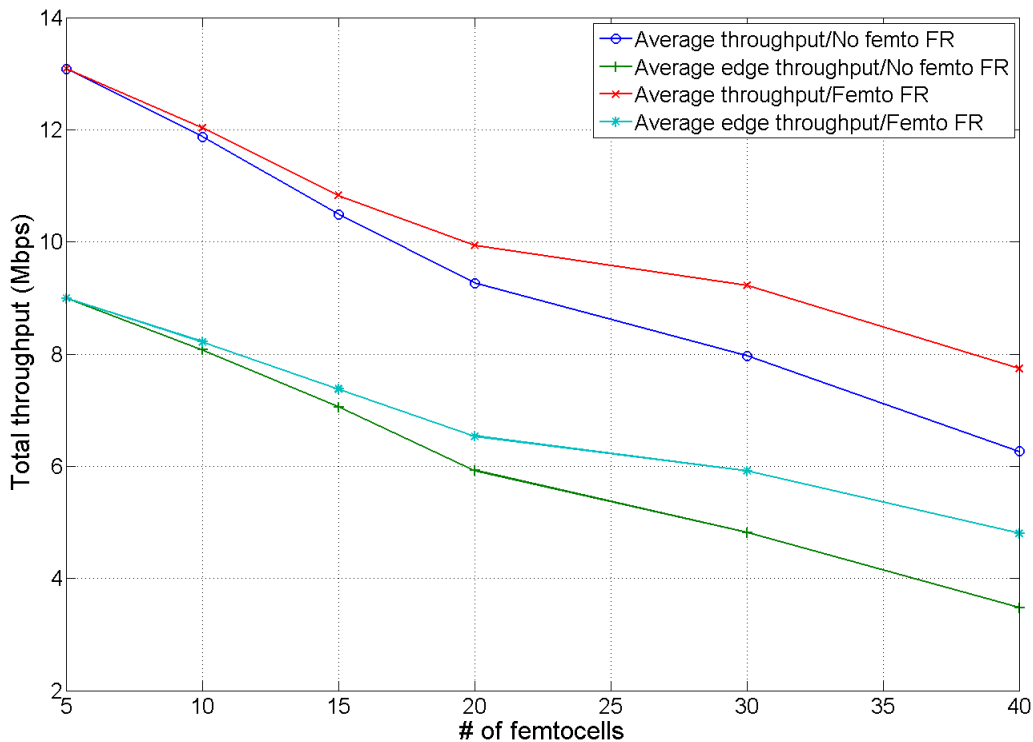
Μέσα από τις παραπάνω εικόνες, φαίνονται οι σχέσεις αλληλεξάρτησης ανάμεσα στις διαφορετικές μετρικές του δικτύου, όπως η φασματική απόδοση, η υψηλότερη δυνατή τιμή ρυθμού δεδομένων, η μέση απόδοση και η απόδοση του χειρότερου χρήστη, και πως η επιδίωξη βελτίωσης ενός εξ αυτών, μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις υπόλοιπες. Μέσα από τις εικόνες αυτές λοιπόν, αποκαλύπτονται με ξεκάθαρο τρόπο τα αντικρουόμενα οφέλη και οι συμβιβασμοί που εμπερικλείουν οι διαφορετικές διαθέσιμοι μέθοδοι στην αντιμετώπιση του φαινομένου των παρεμβολών.

Τα παραπάνω ευρήματα αποτελούν πυξίδα για το σχεδιασμό των σύγχρονων δικτύων και αναδεικνύουν την δυναμικότητα της αξιοποίησης του καταμερισμού συχνοτήτων σε συνδυασμό με την χρησιμοποίηση femtocells. Με την προσέγγιση αυτή, η απόδοση των macro χρηστών μένει ανεπηρέαστη από την παρουσία femtocells, ενώ η συνολική απόδοση του συστήματος αυξάνεται λόγω της αποφόρτισης του macrocell και της εκμετάλλευσης της ευρυζωνικής σύνδεσης των χρηστών. Αντιθέτως, μολονότι ο έλεγχος ισχύος παρέχει στιβαρότητα για ένα μικρό αριθμό των femtocells, οι επιδόσεις επιδεινώνονται σημαντικά όταν ο αριθμός των femtocells ξεπερνά τα παραπάνω κατώφλια. Μικρές παραλλαγές στα κρίσιμα σημεία που ορίζουν την καταλληλότητα του εκάστοτε σχήματος λόγω διαφορετικής τοπολογίας ή ρυθμίσεων αναμένονται, και η χρήση του εργαλείου για εξειδικευμένη πρόβλεψη συγκεκριμένων δικτύων ενθαρρύνεται. Παρόλα αυτά, οι διαφορές αποδεικνύονται μικρές, ούτως ώστε τα συμπεράσματά μας να θεωρούνται αξιόπιστα και να μπορούν να γενικευθούν με ασφάλεια.

7.3.2. Αλγόριθμος καταμερισμού φάσματος μεταξύ femto BSs

Τέλος, στρέφουμε την προσοχή μας στη διαχείριση ομοστροφιακών παρεμβολών σε επίπεδο femtocells, και την δυναμική εφαρμογή καταμερισμού συχνοτήτων, όταν femtocells ανιχνεύουν άλλα femtocells σε κοντινή απόσταση. Σε αυτήν την περίπτωση, η αναζήτηση των ακριβών παραμέτρων και συνθηκών που μια τέτοια προσέγγιση ωφελεί τους femto χρήστες δεν έχει νόημα καθώς είναι έντονα εξαρτημένη από τις εκάστοτε συνθήκες. Αντίθετα με το στατικό χαρακτήρα της διαμέρισης στο macrocell επίπεδο, η δυναμική πολιτική στα femtocells επιτρέπει την βέλτιστη προσαρμογή σε παραμέτρους όπως η πυκνότητα και η ισχύς μετάδοσης των όμορων femtocells, η επιθυμητή ακτίνα κάλυψης, ο αριθμός των συνδεδεμένων femto χρηστών σε αυτό κλπ., με αποτέλεσμα η επιλογή της υιοθέτησης ή όχι της τεχνικής να αποτελεί συνάρτηση των παραμέτρων του συγκεκριμένου σεναρίου.

Αντίθετα, ενδιαφέρον έχει ο αντίκτυπος της εφαρμογής αυτής στο macrocell επίπεδο. Πέραν της αποφυγής των ομοστροφιακών παρεμβολών, η τεχνική αυτή ανακουφίζει το macro στρώμα από τις συσσωρευμένες παρεμβολές που προκαλούν πυκνές συστοιχίες εγκατεστημένων femtocells. Η πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων συστοιχιών, (άρα και τα οφέλη αυτής της προσέγγισης) γίνεται φυσικά μεγαλύτερη όσο αυξάνεται και η πυκνότητα εγκατάστασης των femtocells ανά κυψέλη όπως δείχνει και η Εικόνα 47.



Εικόνα 47. Απόδοση ενός μέσου και ενός ακριτικού macro χρήστη, πριν και μετά την εφαρμογή διαμέρισης συχνότητας μεταξύ γειτονικών femto BS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διερευνήθηκε το φαινόμενο των παρεμβολών σε ετερογενή κινητά δίκτυα. Η έρευνα που διεξήχθη αφορά δίκτυα που βασίζονται στην τεχνολογία τέταρτης γενιάς LTE-Advanced και όπου συνυπάρχουν macrocells με παρατάξεις femto σταθμών βάσης. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμήθηκαν τεχνικές διαχείρισης και ακύρωσης των διασπρωματικών και ομοσπρωματικών παρεμβολών μέσω της εκμετάλλευσης της δυνατότητας καταμερισμού φάσματος, και μεθόδων ελέγχου ισχύος όπως προδιαγράφονται και προτείνονται στα πλαίσια της LTE-A τεχνολογίας.

Αρχικά, έγινε περιγραφή του προβλήματος. Κατηγοριοποιήθηκαν οι παρεμβολές και παρουσιάστηκαν τα πιθανά σενάρια κατά τα οποία μπορεί να εκδηλωθεί το φαινόμενο. Αυτό έγινε για την καλύτερη κατανόηση των διαθέσιμων εργαλείων για την διαχείριση του προβλήματος. Στη συνέχεια περιγράφηκαν επεξηγηματικά οι προτεινόμενες τεχνικές ακύρωσης των παρεμβολών αυτών, βάση των επίσημων προδιαγραφών που δημοσιεύει ο οργανισμός 3GPP σχετικά με την παράταξη femtocells σε LTE-A περιβάλλον.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε το περιβάλλον προσομοίωσης που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας. Η αρχιτεκτονική, οι δυνατότητες, οι λειτουργίες και το μοντέλο στο οποίο βασίστηκε η ανάλυση και εκτίμηση των προαναφερόμενων τεχνικών παρουσιάστηκε. Με την αρωγή του ανωτέρω εργαλείου, προσομοιώθηκαν χαρακτηριστικά σενάρια παρατάξεων femtocells-macrocells, τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίστηκαν γραφικά μέσω του προσομοιωτή και παρουσιάστηκαν.

Τα παραπάνω αποτελέσματα αναλύθηκαν διεξοδικώς προκειμένου να εκτιμηθούν όλες οι τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών ως προς την απόδοση του δικτύου, και να αξιολογηθούν ως προς το μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την φασματική απόδοση και την απόδοση των χρηστών στα όρια της κυψέλης. Η εφαρμογή των τεχνικών σε πλήρως παραμετροποιήσιμο περιβάλλον προσομοίωσης επέτρεψε τη σύγκριση των διαθέσιμων τεχνικών, και την ανάδειξη της καταλληλότητας του καθενός.

Συγκεκριμένα, στην αξιολόγηση αναλύθηκαν δύο αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος, βασισμένοι είτε στην διατήρηση σταθερής εμβέλειας του femtocell, είτε σταθερού SINR, καθώς και τεχνικές καταμερισμού πόρων στο πεδίο συχνοτήτων, κατά το οποίο τα femtocells λειτουργούσαν σε συμπληρωματικές συχνότητες από αυτές των macro χρηστών όταν ανίχνευαν ICIC σχήματα σε επίπεδο macrocell, και δη IFR, FFR ή SFR.

Αποδείχτηκε πως σε σενάρια παράταξης μικρού αριθμού femtocells, (όπως αραιοκατοικημένες περιοχές), είναι προτιμητέο να μη θυσιάσει η φασματική απόδοση του δικτύου με διαμέριση της συχνότητας. Αντίθετα, προτείνεται η εφαρμογή ενός εκ των διαθέσιμων επιλογών ελέγχου ισχύος μέσα από τις διαδικασίες αυτο-ρύθμισης των femtocells. Όταν ο αριθμός των femtocells αυξάνεται, η φασματική απόδοση αναπληρώνεται μέσω της αυξημένης εκμετάλλευσης του αχρησιμοποίητου φάσματος από τα femtocells. Στην ίδια περίπτωση, ο απλός έλεγχος ισχύος αδυνατεί να περιορίσει τις περιοχές όπου macro χρήστες βρίσκονται υπό την εμβέλεια των femtocells, και ως εκ τούτου η απόδοσή του υπολείπεται των υπόλοιπων τεχνικών.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προέκυψαν και κατά την εξέταση της απόδοσης των χρηστών στα όρια της κυψέλης, αν και η μεγαλύτερη ευαισθησία τους σε co-channel παρεμβολές, προκάλεσε μια αυξημένη συγκριτικά προτίμηση προς τα σχήματα αποκλειστικής ανάθεσης φάσματος.

Όσο αφορά την σύγκριση μεταξύ των σχημάτων διαμέρισης, η επίδοσή τους κυμάνθηκε σε παρόμοια πλαίσια. Αυτό αποδεικνύεται ιδιαίτερα σημαντικό υπέρ της διάταξης SFR, αφού με τη μεγαλύτερη φασματική απόδοση, και με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας χάρη στον ταυτόχρονο έλεγχο ισχύος, επέδειξε συμπεριφορά που υπολείπετο ελάχιστα από τα αντίστοιχα σχήματα, αποτελώντας ελκυστικό συμβιβασμό ανάμεσα στην μέση απόδοση του δικτύου, και την απόδοση του χειρότερου χρήστη.

Τέλος, σημαντική συνεισφορά στην απόδοση του συστήματος, επέδειξε και η εφαρμογή διαμέρισης φάσματος μεταξύ κοντινών εγκατεστημένων femtocells. Η δυναμική ανάθεση συχνοτήτων προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης, αποδείχτηκε ότι ωφελεί όχι μόνο την ακύρωση παρεμβολών σε επίπεδο femtocells, αλλά και σε επίπεδο macrocell, ανακουφίζοντας το σύστημα από συσσωρευμένες παρεμβολές προερχόμενων από πυκνές συστοιχίες femtocells. Επιπλέον, αναδείχτηκαν τα σημαντικά οφέλη που μπορεί να προκύψουν από τον συνδυασμό των τεχνικών ελέγχου ισχύος και διαμέρισης φάσματος, που εφαρμόστηκε στην περίπτωση αυτή.

Τα κύρια συμπεράσματα της παραπάνω διαδικασίας ανέδειξαν τους συμβιβασμούς (trade-offs) και τα αντικρουόμενα κίνητρα που συμπεριλαμβάνονται στον σχεδιασμό και οργάνωση ενός ετερογενούς δικτύου σε σενάρια μεγάλου φόρτου, όπου η κατανομή πόρων καθίσταται εξαιρετικά κρίσιμος παράγοντας της επιτυχίας του δικτύου. Επιβεβαιώθηκε επίσης η τάση που αναμένεται στα κινητά δίκτυα και αφορά την εκμετάλλευση της διαμέρισης πόρων στο πεδίο της συχνότητας (επιτρεπόμενο από την τεχνολογία OFDMA) σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ετερογενών δικτύων.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε πως η παρούσα εργασία προσπάθησε να διερευνήσει ποσοτικά και ποιοτικά τους προβληματισμούς που υπάρχουν στην σύγχρονη σχεδίαση ως προς τους συμβιβασμούς στις διάφορες εκφάνσεις απόδοσης του δικτύου και έδωσε επιπλέον έναυσμα στην ανάλυση και την διερεύνησή τους.

Τέλος, αποτελεί προτροπή μας προς κάθε ενδιαφερόμενο σε θέματα απόδοσης ετερογενών δικτύων, να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες του προσομοιωτή κατά το δοκούν, προκειμένου να εξερευνήσει εξειδικευμένα σενάρια τοπολογιών, ρυθμίσεων και τεχνικών και να εξαγάγει τα δικά του συμπεράσματα. Ο κώδικας διατίθεται ελεύθερα μέσω του [5], για οποιαδήποτε χρήση, μετατροπή, προσθήκη ή βελτίωση του προσομοιωτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε ορισμένα πιθανά ερευνητικά βήματα που θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη συνέχεια της παρούσης εργασίας. Η τεχνολογία LTE-A αποτελεί πεδίο με εξαιρετικό ενδιαφέρον και αναμένεται να κυριαρχήσει στην αγορά για τα επόμενα χρόνια. Από την άλλη η δημιουργία ετερογενών δικτύων έχει κερδίσει σημαντικό έδαφος και θεωρείται ως ένα από τα απαραίτητα συστατικά των μελλοντικών κινητών δικτύων. Τα παραπάνω δίνουν το έναυσμα για την επέκταση της δουλειάς αυτής, όσο αφορά τις επιδόσεις ετερογενών δικτύων σε περιβάλλον LTE-A.

Οι πιθανές προεκτάσεις αφορούν είτε την επέκταση των δυνατοτήτων του προσομοιωτή ώστε να συμπεριληφθούν ήδη υπάρχουσες λειτουργίες, τεχνικές και χαρακτηριστικά, είτε την επέκτασή του προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά καινοτόμων τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών συγκριτικά με τις υπάρχουσες.

Είδαμε στο κεφάλαιο 2 πως το LTE-A επιτρέπει λειτουργίες πολλαπλών κεραιών (MIMO) και προσαύξησης των φορέων (carrier aggregation). Αν και οι λειτουργίες βρίσκονται σε πρώιμο επίπεδο αφού τα περισσότερα σύγχρονα δίκτυα και τερματικά δεν τις υποστηρίζουν, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον πως μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποφυγή των παρεμβολών. Το MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση του SINR ενός χρήστη, ενώ το carrier aggregation μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί ως καταμερισμός φάσματος.

Μια ακόμα επέκταση του εξομοιωτή θα μπορούσε να είναι η εισαγωγή σχημάτων ημιστατικών ή δυναμικών που θα προσαρμόζονται στην κίνηση και το φόρτο των χρηστών. Τα σχήματα αυτά προσομοιάζουν την διασύνδεση X2 μεταξύ των σταθμών βάσης προκειμένου να συντονίσουν την μετάδοσή τους. Εφαρμόζοντας μοντέλα κίνησης αστικού περιβάλλοντος, τόσο τα macrocells όσο και τα femtocells θα χρησιμοποιούσαν τα νέα δεδομένα για την βέλτιστη προσαρμογή της μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσαν να προστεθούν και να εκτιμηθούν και τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών που δραστηριοποιούνται και στο πεδίο του χρόνου, πέρα από το πεδίο της συχνότητας.

Μια πολλά υποσχόμενη τέτοια τεχνική που απολαμβάνει και επισήμως το ενδιαφέρον στην ανάπτυξη του LTE-A είναι και η χρήση των Almost Blank Subframes (ABS). Τα ABS είναι υποπλαίσια (sub-frames) που περιέχουν μόνο μερικά απαραίτητα σήματα με χαμηλή ισχύ, όπως PSS/SSS, PBCH, και SIB1, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με το τερματικά προηγούμενων εκδόσεων (8/9). Τα υπο-πλαίσια αυτά χρονοπρογραμματίζονται από τον σταθμό βάσης που αποτελεί την πηγή της παρεμβολής, προκειμένου στη διάρκειά της το κελί-θύμα να χρονοπρογραμματίσει χρήστες που υπέφεραν από την παρεμβολή αυτή. Στην περίπτωση ετερογενούς δικτύου femto-macro, το CSG femtocell προγραμματίζει ABS σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές, δίνοντας την ευκαιρία στο macrocell να εξυπηρετήσει macro χρήστες που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του femtocell.

Πέραν της χρήσης ABS, υπάρχει πληθώρα σημαντικών τεχνικών διαχείρισης παρεμβολών, που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στον προσομοιωτή, ούτως ώστε να εκτιμηθεί η απόδοσή τους συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η μέθοδος adaptive SFR, παραλλαγές στο FFR κλπ.

Τέλος, πιθανή προέκταση της δουλειάς με ερευνητικό ενδιαφέρον αποτελεί η ενσωμάτωση σταθμών βάσης picocell. Σε αυτήν την περίπτωση, ο σταθμός βάσης που είναι συνήθως η πηγή παρεμβολών είναι το macro BS. Αντίθετα, θύματα είναι οι χρήστες του picocell, ειδικά εκείνοι που βρίσκονται στα όρια της εμβέλειας του picocell, και εξυπηρετούνται από αυτό εξαιτίας του Cell Range Expansion (CRE). Κατά το CRE, προκειμένου να αποφορτιστεί το macrocell στρώμα, η εξυπηρέτηση ορισμένων χρηστών ανατίθεται στο picocell, ακόμα και αν η ισχύς που δέχονται από το macrocell είναι μεγαλύτερη. Ως εκ τούτου, η διαχείριση των παρεμβολών για τους χρήστες αυτούς αποτελεί κρίσιμο παράγοντα.

Για οποιαδήποτε μετατροπή, επέκταση, αφαίρεση ή προσθήκη, ο προσομοιωτής είναι ελεύθερα διαθέσιμος μέσω του [5].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

1. Bouras, C., Diles, G., Kokkinos, V., & Papazois, A. (2012). *Power Management over Co-channel Femtocells in LTE-A Systems*. In Proceedings of Wireless Days 2012 (poster paper), Dublin, Ireland, pp. 1-3.

Περίληψη: Η χρήση των femtocells αποτελεί μια ελκυστική λύση δεδομένου ότι επιτυγχάνει καλύτερη κάλυψη και χωρητικότητα, καθώς και χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Ωστόσο, η επίδοση τους διακυβεύεται από τις διαστρωματικές (cross-layer) παρεμβολές με τις υφιστάμενες υποδομές macrocell, ή μεταξύ των γειτονικών femtocells, ειδικά στην περίπτωση ομοζωνικής παράταξης. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί αυτό, είναι η ρύθμιση της ισχύος εκπομπής του κάθε σταθμού βάσης femto προς όφελος της συνολικής απόδοσης. Προς αυτή την κατεύθυνση, υλοποιήσαμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης που προσομοιώνει παρατάξεις femtocells σε LTE-Advanced (LTE-A) macrocell συστήματα. Το εργαλείο επιτρέπει τη διαχείριση ισχύος σε καθορισμένες από τον χρήστη femtocell παρατάξεις, όπου αποφασίζονται τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης με βάση τρία διαφορετικά σχήματα ελέγχου ισχύος. Η προκύπτουσα απόδοση παρουσιάζεται για κάθε σημείο του macrocell σε ένα φιλικό προς το χρήστη γραφικό περιβάλλον διασύνδεσης. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζουμε το περιβάλλον αυτό και συζητάμε τα αποτελέσματα.

2. Bouras, C., Diles, G., Kokkinos, V., & Papazois, A. (2013). Evaluation of Femtocells Interference Mitigation Techniques over ICIC Coordinated LTE-A Networks. In Proceedings of Wireless Days 2013 (poster paper), Valencia, Spain, (to appear)

Περίληψη: Τα femtocells προσφέρουν μια ελκυστική λύση για την βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της κάλυψη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας τοπικά, ωστόσο, φαινόμενα παρεμβολών μπορεί να δημιουργηθούν όταν παρατάσσονται σε κοντινή απόσταση με μη εγγεγραμμένους σε αυτά macrocell χρήστες. Ο έλεγχος ισχύος και η διαχείριση του φάσματος αποτελούν τους σημαντικότερους τρόπους για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Σε αυτήν την εργασία, παρέχουμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης ικανό να προσομοιώσει τη συμπεριφορά εγκατεστημένων femtocells σε Long Term Evolution –Advanced (LTE-A) δίκτυα. Με τη βοήθεια του εργαλείου, αξιολογούμε κύριες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών με εφαρμογή σε δίκτυα femtocells, όταν βρίσκονται σε macrocell περιβάλλοντα συντονισμένα με Inter-Cell Interference Cancellation (ICIC) τεχνικές.

3. Bilios, D., Bouras, C., Diles, G., Kokkinos, V., & Papazois, A. (2013). Evaluating ICIC Performance in LTE-A Systems. In Proceedings of 10th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Ilmenau, Germany.

Περίληψη: Η τεχνολογία Long Term Evolution – Advanced (LTE-A) ενσωματώνει μεθόδους Inter-Cell Interference Cancellation (ICIC), προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση εξομαλύνοντας τις παρεμβολές. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν τεχνικές κατανομής συχνοτήτων που επιτρέπουν παρακαείμενες κυψέλες και femtocells σε

ετερογενή δίκτυα, να μοιράζονται συντονισμένα και να επαναχρησιμοποιούν τους διαθέσιμους φασματικούς πόρους, προκειμένου να αποφευχθεί η υποβάθμιση της απόδοσης λόγω παρεμβολών σε ακριτικούς χρήστες. Σε αυτήν την εργασία, αξιολογούμε την απόδοση των ICIC μεθόδων σε LTE-A συστήματα χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο προσομοίωσης που ενσωματώνει διάφορες τεχνικές επαναχρησιμοποίησης συχνότητας και παρέχοντας μια φιλική προς τον χρήστη γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων. Καθορίζονται, επίσης, οι βέλτιστες ρυθμίσεις επαναχρησιμοποίησης συχνότητας για το τρέχον δίκτυο, με βάση μετρικές συνολικής απόδοσης και δείκτες δίκαιης παροχής υπηρεσιών.

Υπόλοιπες Δημοσιεύσεις.

4. Bouras, C., Diles, G., & Kokkinos, V. (2013). Impact of broadband public infrastructures and services on SEE countries' economy. In Proceedings of 4th Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS 2013) (short paper), Trento, Italy, (to appear).

Περίληψη: Η ευρυζωνικότητα αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την αύξηση της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να μετρήσει τη συσσωρευτική επίδραση και την αποδοτικότητα των δημόσιων υποδομών και υπηρεσιών ευρυζωνικότητας στην οικονομία των περιοχών της Νοτιοανατολικής Ευρώπης (NAE) σχετικά με την οικονομία. Προς αυτή την κατεύθυνση, επικεντρωνόμαστε στην αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ της ευρυζωνικότητας και των δεικτών ανάπτυξης και απασχόλησης κάθε χώρας. Επιπλέον, εκτιμούμε την εξοικονόμηση δαπανών που επιτυγχάνεται με την εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών υπηρεσιών, και προβλέπουμε την εξοικονόμηση κόστους που θα γίνει εφικτή με την αύξηση της χρήσης των ηλεκτρονικών υπηρεσιών τα επόμενα χρόνια. Τα αποτελέσματα της ανάλυσής μας δείχνουν ότι η ευρυζωνικότητα μπορεί να έχει θετικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη και την απασχόληση και ότι η εξοικονόμηση δαπανών είναι σημαντική.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] The International Telecommunication Union, Statistics, <http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2013.pdf> (February 2013).
- [2] M.C. Necker, "Local Interference Coordination in Cellular OFDMA Networks" IEEE 66th Vehicular Technology Conference, 2007. VTC 2007. Fall 2007.
- [3] Femtocell Market Update and Latest News from Femto Forum. http://www.ict-befemto.eu/fileadmin/documents/publications/workshop_2011/FF_saunders_future_network_and_mobile_summit_warsaw_june_11.pdf
- [4] 3GPP TR 36.921. 'Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis'. 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2012.
- [5] Femtocell Power Management and ICIC Simulator II (FePIS II)." [Online]. Available: <http://ru6.cti.gr/ru6/freqSim4.zip>.
- [6] ITU-R, International mobile telecommunications-2000 (IMT-2000), Recommendation ITU-R M.687-2, February 1997.
- [7] ITU-R, Principles for the process of development of IMT-advanced, Resolution ITU-R 57, October 2007.
- [8] ITU-R, Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000, Recommendation ITU-R M.1645, June 2003.
- [9] 3GPP TR 36.913. Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 11).
- [10] M. Olsson, S. Sultana, S. Rommer, L. Frid, C. Mulligan, SAE and the Evolved Packet Core – Driving the Mobile Broadband Revolution, Academic Press, 2009.
- [11] 3GPP Technical Specification 29.060, 'General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) across the Gn and Gp interface', www.3gpp.org.
- [12] J. Cullen, 'Radioframe presentation,' in *Femtocell Europe 2008*, London, UK, June 2008.
- [13] 'Femtoforum,' <http://www.femtoforum.org>.
- [14] M. Latham, 'Consumer attitudes to femtocell enabled in-home services – insights from a European survey,' in *Femtocells Europe 2008*, London, UK, June 2008

- [15] S. Carlaw, 'lpr and the potential effect on femtocell markets,' in *FemtoCells Europe*. ABIresearch, 2008.
- [16] S. Carlaw, 'lpr and the potential effect on femtocell markets,' in *FemtoCells Europe*. ABIresearch, 2008.
- [17] Ip.access, 'Oyster 3g: The access point,' <http://www.ipaccess.com/femtocells/oyster3G.php>, 2007.
- [18] 3GPP-TS 36.300 Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; March, 2012
- [19] 3GPP2, <http://www.3gpp2.org>.
- [20] Broadband Forum, <http://www.broadband-forum.org>.
- [21] 3GPP, Features and contents of each Release,' <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/FeatureListFrameSet.htm>
- [22] D. Chambers, 'Crystal Frequency Oscillators in Femtocells,' <http://www.thinkfemtocell.com>, October 2007.
- [23] 'Challenges in Deployment of UMTS/HSPA Femtocell,' Aricent White Paper, February 2008.
- [24] 'Connecting when it counts: the role of femtocells in emergency calls,' Intrado Technical Report, 2008.
- [25] S.-F. Su, The UMTS Air-Interface in RF Engineering: Design and Operation of UMTS Network. McGraw- Hill Professional, May 2007.
- [26] 3GPP, '3G Home NodeB Study Item Technical Report,' 3rd Generation Partnership Project – Technical Specification Group Radio Access Networks, Valbonne (France), Tech. Rep. 8.2.0, Sep. 2008.
- [27] M. Fan, M. Yavuz, S. Nanda, Y. Tokgoz, and F. Meshkati, 'Interference Management in Femto Cell Deployment,' in 3GPP2 Femto Workshop, Oct. 2007.
- [28] Ericsson, 'Simulation results for Home NodeB uplink performance in case of adjacent channel deployment within the block of flats scenario,' 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio), Sorrento (Italy), Tech. Rep. R4-080152, Feb. 2008.

- [29] M. Beach, et al., 'A Study into the Application of Interference Cancellation Techniques,' Ofcom, Tech. Rep., Apr. 2006, Report No: 72/06/R/038/U.
- [30] T. Novlan, J. Andrews, I. Sohn, R. Ganti, and A. Ghosh, "Comparison of fractional frequency reuse approaches in the OFDMA cellular downlink in Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE, dec. 2010, pp. 1 – 5.
- [31] R4-093349, Femtocell and Macrocell interference coordination based on SFR, Motorola.
- [32] R4-093556, "HeNB Downlink Interference Avoidance with Adaptive Frequency Selection", NEC.
- [33] R4-094248, "HeNB Adaptive Frequency Selection", NEC.
- [34] R4-091907, "Frequency Reuse Results with Mixed Traffic", Qualcomm Europe.
- [35] R4-091906, "Frequency reuse results with full buffer", Qualcomm Europe, May 2009.
- [36] R4-094851, "Utility Messages for HeNB ICIC", Qualcomm Europe
- [37] R4-092872, "Downlink interference coordination between HeNBs", CMCC, August 2009.
- [38] G. Foschini and Z. Miljanic, "A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, no. 4, pp. 641–646, 1993.
- [39] M. Xiao, N. Shroff, and E. Chong, "Utility-based power control in cellular wireless systems," in 12th IEEE Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies 2001, (INFOCOM'01.), vol. 1, 2001, pp. 412–421 vol.1.
- [40] H. Claussen, "Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure," in IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007 (PIMRC'07), 2007.
- [41] Mehlfuhrer, J. Ikuno, M. Simko, S. Schwarz, M. Wrulich and M. Rupp "The vienna LTE simulators - enabling reproducibility in wireless communications research," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2011, no. 1 - 13, 2011.
- [42] F. Capozzi, G. Piro, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda. "A system-level simulation framework for LTE femtocells," in 5th International ICST Conference on

- Simulation Tools and Techniques, ser. SIMUTOOLS '12, ICST, Brussels, Belgium, 2012, pp. 211–213.
- [43] 3GPP TS 25.967, “Home Node B Radio Frequency (RF) Requirements (FDD) (Release 9),” 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2009.
- [44] D. Lopez-Perez *et al.*, “Interference Avoidance and Dynamic Frequency Planning for WiMAX Femtocells Networks,” *IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Nov. 2008.
- [45] “Interference Management In OFDMA Femtocells”, White paper, <http://femtoforum.org>
- [46] D. Lopez-Perez, A. Valcarce, G. de la Roche, and J. Zhang, “Ofdma femtocells: A roadmap on interference avoidance,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 9, pp. 41–48, 2009.
- [47] S. Koskie and Z. Gajic, “A nash game algorithm for sir-based power control in 3g wireless cdma networks,” *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 13, no. 5, pp. 1017 – 1026, oct. 2005.
- [48] M. Xiao, N. Shroff, and E. Chong, “Utility-based power control in cellular wireless systems,” in *12th IEEE Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies 2001, (INFOCOM'01.)*, vol. 1, 2001, pp. 412–421 vol.1.
- [49] Stańczak Sławomir, Feistel Angela, Wiczánowski Marcin, Boche Holger. “Utility-based power control with QoS support”, *Wireless Networks 2010*, iss 6, vol. 16, pp. 1691-1705, doi:10.1007/s11276-009-0222-x, Springer US.
- [50] H. Claussen, L. Ho, and L. Samuel. “Self-optimization of coverage for femtocell deployments,” in *Wireless Telecommunications Symposium 2008 (WTS'08)*, 2008, pp. 278–285.
- [51] Y. Lei and Y. Zhang. “Efficient location management mechanism for overlay lte macro and femto cells,” in *IEEE International Conference on Communications Technology and Applications 2009 (ICCTA'09)*, 2009, pp. 420–424.
- [52] Sung NakWoon, Pham Ngoc-Thai, Yoon Hyunsoo, Lee Sookjin and Hwang WonJooC. “Base station association schemes to reduce unnecessary handovers using location awareness in femtocell networks”, *Wireless Networks (23 August 2012)*, pp. 1-13, doi:10.1007/s11276-012-0498-0, Springer US.

- [53] H. Lei, L. Zhang, X. Zhang, and D. Yang, "A novel multi-cell ofdma system structure using fractional frequency reuse," in IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007 (PIMRC'07), 2007.
- [54] Bilios D, Bouras C. Diles G., Kokkinos V., Papazois A. «Evaluating ICIC Performance in LTE-A Systems», The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems, Germany, August 27-30, 2013.
- [55] I. Guvenc, M.-R. Jeong, F. Watanabe, and H. Inamura. "A hybrid frequency assignment for femtocells and coverage area analysis for co-channel operation," IEEE Communications Letters, vol. 12, no. 12, pp.880–882, 2008.
- [56] Rangan, S.; Madan, R., "Belief Propagation Methods for Intercell Interference Coordination in Femtocell Networks," Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.30, no.3, pp.631,640, April 2012
- [57] R4-093349, "Femtocell and macrocell interference coordination based on sfr," Motorola, Tech. Rep.
- [58] J. Y. Lee, S. J. Bae, Y. M. Kwon, and M. Y. Chung, "Interference analysis for femtocell deployment in OFDMA systems based on fractional frequency reuse," Communications Letters, IEEE, vol. 15, no. 4, pp. 425–427, 2011.
- [59] Yi Wu; Hai Jiang; Dongmei Zhang, "A Novel Coordinated Spectrum Assignment Scheme for Densely Deployed Enterprise LTE Femtocells," Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th , vol., no., pp.1,6, 6-9 May 2012.
- [60] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2010.
- [61] P. Lee, T. Lee, J. Jeong, and J. Shin, "Interference management in LTE femtocell systems using fractional frequency reuse," in Advanced Communication Technology (ICACT), 2010 The 12th International Conference on, vol. 2, feb. 2010, pp. 1047 –1051.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ

Εδώ παρουσιάζουμε τμήματα κώδικα της υλοποίησης του εργαλείου προσομοίωσης σε απλοποιημένη μορφή, που αφορούν σημαντικά σημεία των μηχανισμών που υλοποιήθηκαν και θεωρούμε σημαντικά και διαφωτιστικά.

1. Υπολογισμός χωρητικότητας.

```
function [C, SINR, G, PL, numOfWalls, dist, isIndoor] = CapacityMacro_C2(x, y, cellID, handles)

spacing_Df = 15 * 10^3; //Subcarriers spacing
BER = 10^(-6); //Bit Error Rate
alpha = -1.5 / log(5 * BER);
subcarriersPerResBlock = 12;

mode_selection = get(handles.popupmenu6, 'Value'); //get user input for Bandwidth

//Number of available resource blocks
if mode_selection <= 3
    resBlocks = 100;
elseif mode_selection <= 6
    resBlocks = 75;
elseif mode_selection <= 9
    resBlocks = 50;
elseif mode_selection <= 12
    resBlocks = 25;
elseif mode_selection <= 15
    resBlocks = 15;
else
    resBlocks = 6;
end

//Modulation type
if mod(mode_selection, 3) == 0
    bitsPerSymbol = 2;
elseif mod(mode_selection, 3) == 1
    bitsPerSymbol = 4;
else
    bitsPerSymbol = 6;
```

```

end

//Allocating available subcarriers to macro users
subcarriersPerUser = subcarriersPerResBlock * resBlocks / numOfMacrouers;

//SINR calculation function
[SINR, G, PL, numOfWalls, dist, isIndoor] = SINRmacro(x, y, cellID, handles);

//reading the macrocell frequency allocation
subscribers_partition_macro = coordVectors.subscribers_partition_macro;

//Capacity calculation
C1 = subcarriersPerUser * bitsPerSymbol * spacing_Df * subscribers_partition_macro;
C2 = log2(1 + (alpha * SINR));
C = C1.*C2;

```

2. Κατανομή φάσματος σε επίπεδο macrocell

(found in findwalls.m function)

```

//IFR partition
if (get(handles.popupmenu9,'Value') == 2)
    subscribers_partition_macro(l,k) = 1/3;

//FFR partition
elseif (get(handles.popupmenu9,'Value') == 3)
    if dist_from_centre(l,k) > radius_fr
        subscribers_partition_macro(l,k) = 1/4; //outer area
    else
        subscribers_partition_macro(l,k) = 1/4; //inner area
    end

//SFR partition
elseif (get(handles.popupmenu9,'Value') == 4)
    if dist_from_centre(l,k) > (radius_fr)
        subscribers_partition_macro(l,k) = 1/3; //outer area
    else
        subscribers_partition_macro(l,k) = 2/3; //inner area
    end
end
end

```

3. Εφαρμογή αλγορίθμου ελέγχου ισχύος

```

function [Pmacro Pfemto] = power_scheme(handles)

//Read user selection
if (get(handles.popupmenu8,'Value') == 1)
    [Pmacro Pfemto] = power_fixed(handles);
elseif (get(handles.popupmenu8,'Value') == 2)
    [Pmacro Pfemto] = power_adapt_range(handles);
else
    [Pmacro Pfemto] = power_adapt_SINR(handles);
end

//fixed power
function [Pmacro Pfemto] = power_fixed(handles);

for i=1:numOfFemtocells
    Pfemto(i) = Pfemto_default;
end

//constant coverage scheme
function [Pmacro Pfemto] = power_adapt_range(handles);

//coverage area that we want to achieve
R = str2num(get(handles.edit7,'String'));

//path loss from the femto BS
PLf = 38.46 + 20 * log10(R);

for i=1:numOfFemtocells
    // path loss from the macro BS
    [PLm, numOfWorksm, distm, isIndoorm] = PLmac(coordVectors.femt_x(i),
    coordVectors.femt_y(i), 250.0, 217.0, handles);

    //calculate antenna gain
    Gth = Find_angle(handles, coordVectors.femt_x(i), coordVectors.femt_y(i));

    //set femto TX power based on path losses and antenna gain
    Pad = Pmacro_dbm + Gth - PLm + PLf;

```



```

Pfemto(i) = (10^(min(Pad, Pfemto_max_dbm) / 10)) / 1000;

End

//target SINR scheme
function [Pmacro Pfemto] = power_adapt_SINR(handles)

//get target SINR value
target_SINR_dBm = str2num(get(handles.edit12,'String'));
target_SINR = (10^(target_SINR_dBm / 10)) / 1000;

//read the pilot power to start the algorithm
Pfemto_initial = ones(1, numOfFemtocells) *Pfemto_def;

//In the first iteration configure femto BS with the pilot power
if coordVectors.it == 1
    Pfemto= Pfemto_init;

//in the next iterations check SINR current value
else
    currentSINR = findRangeSINR(handles);

//adjust femto TX power based on the algorithm
for i=1:numOfFemtocells
    Pfemto(i) = min((target_SINR/currentSINR(i))*Pfemto_last(i),Pfemto_max);
end
newSINR = findRangeSINR(handles);

// if the algorithm has converged stop
error = (currentSINR - newSINR)/currentSINR;
if error <= 0.05
    exit;
end

//else wait for the next iteration
else
    coordVectors.it = coordVectors.it + 1;
end

```

4. Υπολογισμός απωλειών διαδρομής από το macrocell

```
function [PL, numOfWalls, R, isIndoor] = PLmac(x_user, y_user, x_macrocell, y_macrocell, handles)  
  
//penetration loss for each wall  
penLoss_Low = str2num(get(handles.edit14,'String'));  
  
//απόσταση από το macro BS  
R = calcDist(x_user, y_user, x_macrocell, y_macrocell);  
  
//number of walls between user and the macro BS  
[numOfWalls, isIndoor] = findWalls(x_user, y_user, x_macrocell, y_macrocell, handles);  
  
//path loss calculation  
PL = log10((10^15.3 * (R.^37.6)).* (10.^(penLoss_Low * numOfWalls)));
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV: ΑΚΡΩΝΥΜΑ

ΑΚΡΩΝΥΜΑ

Ακρώνυμο	Επεξήγηση
0G	Zero Generation
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
ABS	Almost Blank Subframes
ACIR	Adjacent Channel Interference Rejection
ACS	Adjacent Channel Selectivity
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARPU	Average Revenue per User
AS	Access Stratum
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
BB L2	Broadband Layer 2
BB Phy	Broadband Physical Layer
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CA	Carrier Aggregation
CCSA	China Communications Standards Association
CCU	Cell-center User
CDMA	Code Division Multiple Access
cdmaOne	Code Division Multiple Access One

CEU	Cell-edge User
CRE	Cell Range Expansion
CRP	Cell Reselection Priority
CRS	Cell-specific Reference Signal
CN	Core Network
CoMP	Coordinated Multi-Point
CSG	Closed Subscriber Group
DFT-S-OFDM	Discrete Fourier Transform-spread-OFDM
D-AMPS	Digital AMPS
DoS	Denial of Service
DRX	Discontinuous Reception
DSL	Digital Subscriber Line
DVB-C	Digital Video Broadcasting – Cable
DVB-H	Digital Video Broadcasting –Handheld
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
eUTRAN	Evolved UTRAN
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FAS	Femtocell Application Server
FBS	Femto Base Station
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency Reuse
FTTH	Fiber To The Home

GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunelling Protocol
HeNB	Home eNodeB
HNB	Home NodeB
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IC	Interference Cancellation
ICIC	Inter-Cell Interference Cancellation
IFR	Integer Frequency Reuser
IMT	International Mobile Telecommunications
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
IMS	IP Multimedia System
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU- Radiocommunication
Kbps	Kilo bits per second
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC	Medium Access Control
MBS	Macro Base Station
MS	Mobile Station
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
Mbps	Mega bits per second
MBSFN	Multicast/Broadcast Single Frequency Network

MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
NAS	Non Access Stratum
NLM	Network Listen Mode
NMT	Nordic Mobile Telephone
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
P-GW	PDN Gateway
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
REM	Radio Environment Measurement
RF	Radiofrequency
RIP	Received Interference Power
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Reference Signal Received Power
S-GW	Serving Gateway
SAE	System Architecture Evolution
SAIC	Single Antenna Interference Cancellation
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access

SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SFN	Single Frequency Network
SFR	Soft Frequency Reuse
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SON	Self Organizing Networks
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-CDMA	Time-division Code Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
TSG	Technical Specification Group
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunications Technology Committee
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UTRAN	UTRA Network
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband CDMA
WEP	Wired Equivalent Privacy
WG	Working Group
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
NAE	Νοτιο-ανατολικής Ευρώπης (NAE)