ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και κατηγοριοποίηση μηχανισμών ελέγχου ισχύος σε LTE/LTE-A δίκτυα με φεμτοκυψέλες

Άγγελος Κ. Δρυλεράκης

Επιβλέπων: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2014

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και κατηγοριοποίηση μηχανισμών ελέγχου ισχύος σε LTE/LTE-A δίκτυα με φεμτοκυψέλες

Άγγελος Κ. Δρυλεράκης

Α.Μ.: Μ1241

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: **Λάζαρος Μεράκος,** Καθηγητής

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στα Long Term Evolution (LTE)/LTE-Advanced (LTE-A) δίκτυα κινητών επικοινωνιών με φεμτοκυψέλες και παρέχει μια ολοκληρωμένη μελέτη τεχνικών ελέγχου ισχύος που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για μείωση των παρεμβολών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναδρομή στα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται η σταδιακή εξέλιξη τους μέχρι και το σύστημα LTE, και παρουσιάζονται τα κυριότερα πρότυπα και τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε γενιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αρχικά, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος LTE-A και οι βασικές της οντότητες. Στη συνέχεια περιγράφεται το φυσικό επίπεδο του LTE-A και παρουσιάζονται οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη ζεύξη, ενώ αναλύονται τα σήματα αναφοράς και οι ακολουθίες συγχρονισμού και αναφέρονται τα φυσικά κανάλια μετάδοσης και ελέγχου

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι τύποι παρεμβολών που προκαλούνται σε ένα ετερογενές LTE/LTE-A δίκτυο και παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνικές διαχείρισης τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτυποποιημένη από την 3GPP (3rd Generation Partnership Project) μέθοδος ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των παρεμβολών σε ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς μια σειρά από λύσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον έλεγχο ισχύος στα LTE δίκτυα.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια κατηγοριοποίηση των υπαρχόντων σχημάτων ελέγχου ισχύος και παρέχονται κάποια συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και τα προβλήματα που παρουσιάζει κάθε κατηγορία.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Έλεγχος ισχύος σε δίκτυα LTE/LTE-A

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: μακροκυψέλη, έλεγχος ισχύος, διαχείριση παρεμβολών, φεμτοκυψέλη, απώλειες διαδρομής

ABSTRACT

This paper focuses on Long Term Evolution (LTE)/LTE-Advanced (LTE-A) mobile networks and provides a comprehensive survey of the power control techniques that have been proposed to reduce the interference in those networks.

The first chapter describes the evolution of the cellular communication networks up to the LTE system, providing the key characteristics of each generation and the standard.

The second chapter presents the architecture and the physical layer characteristics of the LTE-A system. More specifically, we present the multiple access techniques used in the uplink and downlink, we analyze the reference signals and synchronization sequences and we list the physical transport and control channels.

The third chapter analyzes the types of interference caused to a heterogeneous LTE network, and presents the main techniques which are used to mitigate interference.

The fourth chapter presents the standardized power control method used for interference management as proposed by the 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

The fifth chapter presents an extensive range of solutions that have been proposed in the literature for power control in LTE networks.

In the sixth and final chapter we categorize the existing power control schemes and provide some conclusions on the advantages and disadvantages of each category.

SUBJECT AREA: Power control in LTE / LTE-A networks

KEYWORDS: macrocell, power control, interference management, femtocell, path loss

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 9

1.1 Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων κινητών επικοινωνιών 9

1.1.1 Η 1η Γενιά (1G) 9

1.1.2 Η 2η Γενιά (2G) 9

1.1.3 Η Γενιά 2.5G 10

1.1.4 Η 3η Γενιά (3G) 11

1.1.5. Η Γενιά 3.5G 11

1.2 Long Term Evolution 12

1.2.1 Απαιτήσεις τεχνολογίας LTE 13

1.2.2 Απαιτήσεις τεχνολογίας LTE-Advanced 14

2. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ LTE-A 15

2.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος LTE-A 15

2.1.1 Δίκτυο Κορμού 15

2.1.1.1 Packet Data Network Gateway 15

2.1.1.2 Serving Gateway 16

2.1.1.3 Mobility Management Entity 16

2.1.1.4 Policy and Charging Rules Function 16

2.1.1.5 Home Subscription Server 17

2.1.2 Δίκτυο Πρόσβασης 17

2.1.2.1 Evolved NodeB 17

2.1.3 Εξοπλισμός Χρήστη 18

2.2 Φυσικό επίπεδο συστήματος LTE-A 18

2.2.1 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης 18

2.2.2 Παράμετροι φυσικού στρώματος 21

2.2.3 Σήματα αναφοράς 24

2.2.3.1 Σήματα αναφοράς στο downlink 24

2.2.3.2 Σήματα αναφοράς στο uplink 25

2.2.4 Ακολουθίες συχρονισμού 26

2.2.5 Φυσικά Κανάλια 28

2.2.5.1 Φυσικά κανάλια στο downlink 28

2.2.5.1.1 Κανάλια μεταφοράς 28

2.2.5.1.2 Κανάλια ελέγχου 29

2.2.5.2 Φυσικά Κανάλια στο uplink 30

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ 35

3.1 Κυψελωτά δίκτυα με φεμτοκυψέλες 35

3.2 Τύποι παρεμβολών σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων 35
3.2.1 Παρεμβολές ίδιου επιπέδου (co-tier) 36
3.2.2 Παρεμβολές διαφορετικών επιπέδων (cross-tier) 38

3.3 Τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών 39
3.3.1 Εξάλειψη παρεμβολών 39
3.3.2 Αποφυγή παρεμβολών 40
3.3.3 Κατανεμημένες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών 44

4. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 47

4.1 Power Control 47
4.1.1 Physical uplink shared channel 47
4.1.2 Power Headroom 49
4.1.3 Physical uplink control channel 50
4.1.4 Sounding Reference Symbol 51

4.2 Βασικές αρχές ελέγχου ισχύος στην κατωφερή ζευξη 51
4.2.1 Έξυπνος έλεγχος ισχύος με βάση τις μέτρησεις παρεμβολών από το MeNB 52
4.2.2 Έλεγχος ισχύος του HeNB με βάση τις απώλειες διαδρομής μεταξύ HeNB-MUE 53
4.2.3 Downlink power allocation 54

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΛΥΣΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 55

5.1 Λύσεις προσαρμοσμένες στην κατωφερή ζεύξη 56

5.2 Λύσεις προσαρμοσμένες στην ανωφερή ζεύξη 76

6. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 95

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ 97

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ 98

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 101

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Η εξέλιξη των κυψελωτών συστημάτων από το 2G ως το 4G 14
Σχήμα 2: EPS δίκτυο [8] 15
Σχήμα 3: Οι συνδέσεις του eNodeB και οι κύριες λειτουργίες [8] 18
Σχήμα 8: OFDM υπο-φέροντα [10] 19
Σχήμα 9: Το πεδίο συχνοτήτων στο downlink και uplink του LTE [10].....21
Σχήμα 10: Δομή πλαισίου [10].....22
Σχήμα 11: Δομή συμβόλου [10].....22
Σχήμα 12: Resource Block και Resource Element [10] 24
Σχήμα 13: Η θέση των reference symbols σε ένα Resource Block [10].....25
Σχήμα 14: Σήματα αναφοράς αποδιαμόρφωσης και ακρόασης στο uplink [10].....26
Σχήμα 15: Δομή πλαισίου και χρονοθυρίδων του σήματος συγχρονισμού στο πεδίο του χρόνου [10].....27
Σχήμα 16: Δομή πλαισίου του σήματος συγχρονισμού στο πεδίο συχνοτήτων και χρόνου [10].....28
Σχήμα 17: Δομή PBCH καναλιού [10].....29
Σχήμα 18: Περιοχή σηματοδοσίας του καναλιού PDCCH (3 OFDM σύμβολα) [10].....30
Σχήμα 19: Δομή του PUCCH καναλιού [10].....32
Σχήμα 20: Μετάδοση preamble τυχαίας προσπέλασης [10].....33
Σχήμα 21: Preamble τυχαίας προσπέλασης [10].....33
Σχήμα 4: Τύποι παρεμβολών στη κυψελωτή αρχιτεκτονική δύο επιπέδων [9] 36
Σχήμα 5: Ένα σενάριο co-tier παρεμβολών μεταξύ γειτονικών femtocells [9] 37
Σχήμα 6: Ένα σενάριο cross-tier παρεμβολών μεταξύ femtocell και macrocell [9].....38
Σχήμα 7: Τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών [9].....40
Σχήμα 22: Η ρύθμιση ισχύος του HeNB οδηγεί σε αύξηση των παρεμβολών στο MUE [12] 52
Σχήμα 23: Η ρύθμιση ισχύος του HeNB οδηγεί σε μείωση της περιοχής κάλυψης [12].52
Σχήμα 24: Ρύθμισης ισχύος του HeNB [13].....56
Σχήμα 25: ICIC με εξίσωση της macro-υποβάθμισης [16].....61
Σχήμα 26: ICIC με εξίσωση της macro-υποβάθμισης [17].....64
Σχήμα 27: IQX υπόθεση [18].....67
Σχήμα 28: Block διάγραμμα του προτεινόμενου μηχανισμού [19] 69
Σχήμα 29: Ο ψευδο-κώδικας του προτεινόμενου μηχανισμού [19].....70
Σχήμα 30: Ταξινόμηση των χρηστών με βάση τη θέση τους στη κυψέλη [25] 82
Σχήμα 31: Οι πηγές του σφάλματος ανοικτού βρόχου [27].....87
Σχήμα 32: Σενάρια παρεμβολών στο uplink [28] 88
Σχήμα 33: Συνολική δομή της προτεινόμενης μεθόδου [30] 90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι φυσικού στρώματος στο downlink. [10] 23
Πίνακας 2: Τυπικός αριθμός PUCCH περιοχών [10] 32
Πίνακας 3: Επισκόπηση σχημάτων ρύθμισης ισχύος στο downlink 75
Πίνακας 4: Επισκόπηση σχημάτων ρύθμισης ισχύος στο uplink 93
Πίνακας 5: Κατηγοριοποίηση σχημάτων ελέγχου ισχύος 96

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγική αναφορά στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών. Παρουσιάζεται η σταδιακή τους εξέλιξη μέχρι και το σύστημα LTE, περιγράφοντας τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε γενιάς και τα κυριότερα πρότυπα.

1.1 Η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων κινητών επικοινωνιών

1.1.1 Η 1η Γενιά (1G)

Η πρώτη γενιά συστημάτων κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη γενιά δεν αποτέλεσε το ξεκίνημα των κινητών τηλεπικοινωνιών. Αντίθετα από πιο πριν είχαν εμφανιστεί αρκετά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών τα οποία όμως δεν είχαν τα χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων με τον τρόπο που τα εννοούμε σήμερα. Το βασικότερο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η κυψελωτή δομή του δικτύου. Τα πρώιμα αυτά δίκτυα είχαν περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με τα κυψελωτά. Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα ήταν η υποτυπώδης και προβληματική υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών.

Στα κυψελωτά κινητά δίκτυα, η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μικρά κελιά. Με αυτόν τον τρόπο οι ίδιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιούνται πολλές φορές στο ίδιο δίκτυο χωρίς να δημιουργούνται έντονα φαινόμενα παρεμβολής. Επομένως, οι δυνατότητες του δικτύου αυξάνονται σημαντικά. Η πρώτη γενιά χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής μετάδοσης για την κίνηση η οποία ήταν αποκλειστικά φωνή.

Το 1979, τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο κυψελωτό σύστημα στον κόσμο από τη Nippon Telephone and Telegraph (NTT), στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Δύο χρόνια αργότερα ξεκίνησε η εποχή των κυψελωτών δικτύων και στην Ευρώπη. Μεταξύ των διάφορων αναλογικών συστημάτων που αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1980 στην Ευρώπη, τα δύο πιο δημοφιλή συστήματα ήταν το NMT (Nordic Mobile Telephones) και το TACS (Total Access Communication Systems). Όλα αυτά τα συστήματα προσέφεραν δυνατότητες handover και περιαγωγής (roaming), αλλά τα κυψελωτά δίκτυα δεν είχαν την ικανότητα διαλειτουργικότητας μεταξύ των χωρών. Αυτό ήταν ένα από τα αναπόφευκτα μειονεκτήματα των κινητών δικτύων πρώτης γενιάς. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το σύστημα AMPS (Advanced Mobile Phone System) ξεκίνησε να λειτουργεί το 1982. Στο σύστημα εκχωρήθηκε από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) εύρος ζώνης των 40 MHz εντός της ζώνης συχνοτήτων 800-900 MHz του φάσματος. Το AMPS προσέφερε 832 κανάλια, με ρυθμό δεδομένων 10 kbps. Το AMPS όπως και το TACS χρησιμοποιούσαν τις τεχνικές διαμόρφωσης συχνότητας (FM) και πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (FDMA) για τη μετάδοση του σήματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και σήμερα υπάρχουν πολλά δίκτυα πρώτης γενιάς που εξακολουθούν να βρίσκονται σε λειτουργία. Βέβαια, στις χώρες όπου υπάρχει προχωρημένη υποδομή στις τηλεπικοινωνίες τα συστήματα αυτά έχουν εγκαταλειφθεί καθώς θεωρείται ότι σπαταλούν πολύτιμο φάσμα συχνοτήτων το οποίο τα σύγχρονα ψηφιακά κινητά δίκτυα επικοινωνιών εκμεταλλεύονται πιο αποδοτικά [1], [2].

1.1.2 Η 2η Γενιά (2G)

Τα δεύτερης γενιάς (2G) κινητά συστήματα παρουσιάστηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1980 και χρησιμοποιούν ψηφιακή μετάδοση της κίνησης. Αυτή είναι και η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των κινητών συστημάτων πρώτης και δεύτερης γενιάς: ο διαχωρισμός αναλογικού – ψηφιακού. Σε σύγκριση με τα συστήματα πρώτης γενιάς, τα συστήματα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν ψηφιακές τεχνολογίες πολλαπλής

πρόσβασης, όπως το TDMA (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου) και το CDMA (πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα) και προσφέρουν υψηλότερη φασματική απόδοση, καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων, και πιο προηγμένη περιαγωγή. Επιπλέον χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κυψελών με την περιοχή κάλυψης να διαιρείται σε macrocells (κυψέλες μεγάλης έκτασης), microcells (κυψέλες μικρής έκτασης) και picocells (κυψέλες περιορισμένης έκτασης κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα), με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων.

Στην Ευρώπη, αναπτύχθηκε το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications - GSM) για να παρέχει ένα ενιαίο πρότυπο και να επιτρέψει την απρόσκοπτη παροχή υπηρεσιών σε όλη την ήπειρο μέσω διεθνούς περιαγωγής. Το GSM χρησιμοποιεί την τεχνολογία TDMA για να υποστηρίξει πολλαπλούς χρήστες. Τα βασικά συστατικά αυτού του συστήματος είναι το υποσύστημα σταθμού βάσης BSS (Base Station Subsystem) και το υποσύστημα δικτύου και μεταγωγής NSS (Switching Network Subsystem). Στο υποσύστημα BSS ανήκουν ο σταθμός βάσης πομποδέκτη BTS και ο σταθμού βάσης ελέγχου BSC, ενώ στο υποσύστημα NSS ανήκουν το κέντρο MSC (Mobile Switching Centre) και οι βάσεις δεδομένων VLR (Visitor Location Register), HLR (Home Location Register), AC (Authentication Centre) και EIR (Equipment Identity Register). Το GSM είναι ικανό να παρέχει όλες τις βασικές υπηρεσίες με χαμηλές ταχύτητες έως 9.6Kbps, όπως για παράδειγμα το fax.

Το βασικό σύστημα GSM χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz. Όμως υπάρχουν και αρκετά παράγωγα τα οποία χρησιμοποιούν τις ζώνες των 1800 ή 1900 MHz κυρίως λόγω της έλλειψης χωρητικότητας στη ζώνη των 900 MHz. Οι ζώνες των 1800 ή 1900 MHz μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, η περιοχή κάλυψης όμως μειώνεται σε σχέση με τα συστήματα που λειτουργούν στη ζώνη των 900 MHz.

Σημαντική εξέλιξη στο σύστημα GSM ήταν η προσθήκη δύο υπηρεσιών, που ονομάστηκαν Voice Mail Service (VMS) και Short Message Service (SMS). Μάλιστα η υπηρεσία SMS αποδείχθηκε τόσο επιτυχημένη εμπορικά, ώστε σε ορισμένα δίκτυα να κατέχει το σημαντικότερο μέρος της συνολικής κίνησης [1], [2].

1.1.3 Η Γενιά 2.5G

Με τον όρο «γενιά 2.5G» αναφερόμαστε στο ευρύτερο σύνολο των αναβαθμίσεων που έγιναν πάνω στα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς. Οι τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τη γενιά 2.5G είναι: η High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD), η General Packet Radio Services (GPRS) και η Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρουσίασαν οι αρχικές μορφές του GSM ήταν οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης που περιορίζονταν στα 9,6 Kbps. Αργότερα, τέθηκαν οι προδιαγραφές για τα 14,4 Kbps παρόλο που δε χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Η λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία HSCSD. Μέσω αυτής της τεχνολογίας ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερες από μία χρονοθυρίδες (timeslots) για μία σύνδεση μεταφοράς δεδομένων. Συνεπώς, ο ρυθμός μετάδοσης για αυτόν το χρήστη είναι το γινόμενο των χρονοθυρίδων επί το ρυθμό μετάδοσης για μία χρονοθυρίδα. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι σχετικά απλή και φθηνή. Πρόσθετο λογισμικό χρειάζεται να υλοποιηθεί στα κέντρα καθώς και καινούριες φορητές συσκευές που θα υποστηρίζουν την τεχνολογία HSCSD. Το βασικότερο μειονέκτημα ήταν η χρήση μεταγωγής κυκλώματος. Αυτός ο τρόπος μεταγωγής είχε ως αποτέλεσμα τη σπατάλη πόρων του δικτύου αφού οι χρονοθυρίδες δεσμεύονταν ακόμα και όταν η χωρητικότητά τους δεν χρησιμοποιούνταν.

Η επόμενη λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία GPRS. Με αυτήν την τεχνολογία μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης των 150 Kbps στη βέλτιστη περίπτωση. Η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτου. Η μεταγωγή πακέτων είναι μια τεχνική με την οποία οι πληροφορίες (φωνή ή δεδομένα) που πρόκειται να σταλούν χωρίζονται σε πακέτα, λίγων Kbytes το καθένα, τα οποία στη συνέχεια δρομολογούνται από το δίκτυο μεταξύ διαφορετικών προορισμών με βάση τις πληροφορίες διευθύνσεων κάθε πακέτου. Έτσι οι πόροι του δικτύου δεσμεύονται μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή/λήψη δεδομένων. Για να υλοποιηθεί η τεχνολογία GPRS προστέθηκαν στο υπάρχον GSM σύστημα 2 νέοι κόμβοι, οι SGSN (Serving GPRS Support Node) και GGSN (Gateway GPRS Support Node).

Τέλος, η τελευταία αναβάθμιση του GSM προκειμένου να εξελιχθεί σε ένα δίκτυο γενιάς 2.5G είναι το σύστημα EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution). Η κύρια διαφορά με το GSM είναι ότι χρησιμοποιεί μία τεχνική διαμόρφωσης που ονομάζεται Eight-Phase Shift Keying (8PSK). Χρησιμοποιεί την ίδια TDMA δομή πλαισίου, το ίδιο λογικό κανάλι και το ίδιο εύρος ζώνης 200 kHz με τα GSM δίκτυα, αλλά προσφέρει έως και τριπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από το βασικό ρυθμό μετάδοσης του GSM, φτάνοντας έως τα 384 Kbps.

Σε ότι αφορά τις Ηνωμένες Πολιτείες το πρώτο ψηφιακό σύστημα το οποίο εισήχθη στην αγορά το 1991, ήταν το IS-54, και ακολούθησε το IS-95 το 1993. Η δημοπρασία εκ μέρους της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (FCC) ενός νέου τμήματος του φάσματος στη ζώνη των 1900 MHz, επέτρεψε στο GSM1900 να εισέλθει επίσης στην αγορά των ΗΠΑ. Τέλος στην Ιαπωνία, το σύστημα PDC (Personal Digital Cellular) παρουσιάστηκε το 1990 [1], [2].

1.1.4 Η 3η Γενιά (3G)

Η ανάγκη για ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων αλλά και για ένα σύστημα που θα παρέχει υπηρεσίες «οπουδήποτε» και «κάθε στιγμή» οδήγησε στην 3η γενιά κυψελωτών δικτύων. Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα τρίτης γενιάς αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Για την ακρίβεια, ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από οικιακά ασύρματα συστήματα, από άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα καθώς και από δορυφορικά δίκτυα. Επιπλέον, οι παρεχόμενες υπηρεσίες επεκτείνονται σε υπηρεσίες διαδικτύου και σε υπηρεσίες πολυμέσων με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (προβλέπονται ρυθμοί που ξεκινούν από τα 144 Kbps και φτάνουν ακόμα και σε ρυθμούς της τάξης των Mbps). Με τον όρο υπηρεσίες πολυμέσων αναφερόμαστε σε υπηρεσίες κατά τις οποίες υπάρχει συνδυασμός εικόνας, ήχου και κειμένου σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ψηφιακό περιβάλλον. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-ITU) καθόρισε τις απαιτήσεις για τα 3G δίκτυα με το πρότυπο IMT-2000. Η οργάνωση 3GPP (3rd Generation Partnership Project) συνέχισε αυτό το έργο με τον καθορισμό ενός συστήματος που ικανοποιεί το πρότυπο IMT-2000. Στην Ευρώπη αυτό το σύστημα ονομάστηκε UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), ενώ το αντίστοιχο σύστημα στην Αμερική ονομάστηκε CDMA2000. Ως τεχνολογία ασύρματης διεπαφής για το UMTS ορίστηκε το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και τα κύρια συστατικά του συστήματος αποτελούν ο σταθμός βάσης BS ή nodeB, ο ελεγκτής ασύρματης πρόσβασης RNC (Radio Network Controller) και οι κόμβοι SGSN και GGSN [1], [2].

1.1.5. Η Γενιά 3.5G

Με τον όρο 3.5G αναφερόμαστε στη γενιά κινητών δικτύων που βοήθησε στη μετάβαση από τα δίκτυα 3G στα δίκτυα 4G. Στη γενιά 3.5G ανήκει η τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA) που αποτελεί την εξέλιξη της τεχνολογίας UMTS που

κυριάρχησε στις επικοινωνίες τρίτης γενιάς, με στόχο τη διεύρυνση των δυνατοτήτων όσων αφορά την μεταφορά δεδομένων και την κάλυψη των αναγκών των νέων εφαρμογών υψηλών απαιτήσεων.

Δύο είναι τα πρωτόκολλα που αποτελούν την τεχνολογία του προτύπου HSPA, τα HSDPA (Downlink) και HSUPA (Uplink). Αυτά παρέχουν βελτιωμένη απόδοση μέσα από τη χρήση βελτιωμένων σχημάτων κωδικοποίησης αλλά και τον επανακαθορισμό των πρωτοκόλλων με τα οποία οι σταθμοί βάσης και τα τερματικά επικοινωνούν. Τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν σε καλύτερη χρήση του εύρους ζώνης που παρέχεται από το WCDMA. Η τεχνολογία HSPA βελτιώνει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με την επίτευξη ρυθμού 14 Mbps στο downlink και 5,8 Mbps στο uplink. Επιπλέον, μειώνει την καθυστέρηση και αυξάνει τη χωρητικότητα στο downlink κατά πέντε φορές και στο uplink κατά δύο φορές σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα WCDMA. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτυγχάνονται με διάφορους τρόπους όπως είναι:

- Η μετάδοση καταμερισμένου καναλιού που οδηγεί στην αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων ισχύος στο WCDMA.
- Τα μικρότερα διαστήματα TTI (Transmission Time Interval) μεταξύ των μεταδόσεων που εξασφαλίζουν μικρότερη καθυστέρηση και αποτελεσματικότερο εντοπισμό των μεταβολών των συνθηκών του καναλιού.
- Ο γρήγορος χρονοπρογραμματισμός (Fast Scheduling) που εκχωρεί προτεραιότητες στους χρήστες με κριτήριο τις συνθήκες του καναλιού.
- Η ταχύτερη επαναμετάδοση που επιτρέπει περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας.
- Οι διαμορφώσεις τύπου QAM (Quadrature Amplitude Mode) για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων [3].

1.2 Long Term Evolution

Η τεχνολογία LTE (Long Term Evolution) προέκυψε από την ανάγκη που υπήρχε για ένα νέο πρότυπο το οποίο θα ικανοποιούσε τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για ένα δίκτυο επικοινωνιών με υψηλές ταχύτητες, αξιόπιστες συνδέσεις και ποιοτικές υπηρεσίες.

Οι πρώτες συζητήσεις για την εξέλιξη των δικτύων τρίτης γενιάς (3G) ξεκίνησαν το 2004 με μια σειρά από προτάσεις για την εξέλιξη του UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN). Παράλληλα τέθηκαν μια σειρά από απαιτήσεις για το νέο δίκτυο όπως η ανάγκη για μια απλοποιημένη αρχιτεκτονική, η λογική κατανάλωση ισχύος του τερματικού, το μειωμένο κόστος ανά bit και η αυξημένη παροχή υπηρεσιών, που μεταφράζονταν σε περισσότερες υπηρεσίες χαμηλότερου κόστους και ευελιξία στη χρήση των ζωνών συχνοτήτων.

Μετά τις πρώτες εργασίες τέθηκαν οι απαιτήσεις για το νέο πρότυπο και επισημοποιήθηκαν από τη 3GPP. Οι προδιαγραφές που σχετίζονται με το LTE αναγνωρίζονται επίσημα ως το Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) και Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Κάποιες από τις απαιτήσεις που περιγράφονται σε αυτές τις προδιαγραφές αφορούσαν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το latency, τη χωρητικότητα κυψέλης (ως προς τον αριθμό χρηστών), τη φασματική απόδοση και τη γεωγραφική κάλυψη της κυψέλης ενώ άλλες είχαν σχέση με την ευελιξία χρήσης του εύρους ζώνης, τη συνύπαρξη με διαφορετικά πρότυπα και τη μεταφορά σε μία ενιαία E-UTRAN αρχιτεκτονική.

Με βάση αυτές τις προδιαγραφές σχεδιάσθηκε το νέο πρότυπο το οποίο εγκρίθηκε από τη 3GPP το 2008 με την έκδοση Release 8 (Rel. 8). Οι προδιαγραφές του R8 εισήγαγαν

ένα νέο air interface υψηλών επιδόσεων, το οποίο προσφέρει υψηλές ταχύτητες δεδομένων στο χρήστη σε συνδυασμό με χαμηλό latency. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση OFDMA (orthogonal frequency division multiple access) για τη καθοδική ζεύξη και SC-FDMA (single carrier orthogonal frequency division multiple access) για την ανοδική, εφαρμόζονται τεχνικές MIMO (multiple input multiple output) για χωρική πολυπλεξία και υποστηρίζεται η λειτουργία τόσο σε FDD όσο και σε TDD mode.

Όσο αφορά την αρχιτεκτονική του δικτύου, ο όρος LTE αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της ραδιοπρόσβασης και καλείται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), ενώ η εξέλιξη των συστατικών στοιχείων του δικτύου που δεν αποτελούν τη ραδιο-διεπαφή (non-radio aspects) καλύπτονται από τον όρο System Architecture Evolution (SAE) ο οποίος περιλαμβάνει και το Evolved Packet Core (EPC) δίκτυο. Οι δύο αυτοί όροι (LTE και SAE) συνθέτουν το Evolved Packet System (EPS).

Παρ' όλο που το LTE αναφέρεται συχνά ως σύστημα 4ης γενιάς (4G) αυτό δεν ισχύει καθώς δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που έχει ορίσει ο διεθνής οργανισμός ITU-R. Γι' αυτό το λόγο ακολούθησε το 2011 το Release 10 της 3GPP, οι προδιαγραφές του οποίου περιγράφουν την εξέλιξη του LTE, το LTE-Advanced. Οι αναβαθμίσεις του R10 περιλαμβάνουν την αύξηση του μέγιστου αριθμού χρησιμοποιούμενων κεραιών για MIMO μέχρι και 8X8 και την εκμετάλλευση αυξημένου εύρους ζώνης μέχρι και 100MHz με τη λειτουργία Carrier Aggregation [4], [5].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές απαιτήσεις του LTE και του LTE-Advanced.

1.2.1 Απαιτήσεις τεχνολογίας LTE

Το πρότυπο LTE εστιάζει στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων με μεταγωγή πακέτων και οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί είναι:

Εύρος Ζώνης: Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 1.4, 3, 5, 10, 15 και 20 MHz.

Ρυθμοί Μετάδοσης: Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στο downlink και 50 Mbps στο uplink για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz.

Αποδοτικότητα φάσματος: Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος στο downlink σε σχέση με το HSDPA και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερης για το uplink συγκριτικά με το HSUPA.

Καθυστέρηση: Σημαντική μείωση του χρόνου Round-Trip Time (RTT) από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5 ms - 10 ms.

Κινητικότητα: Το σύστημα είναι βελτιστοποιημένο για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών έως 15 km/h, αλλά παρέχεται και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες έως και 350 km/h.

Χωρητικότητα κυψέλης: Δυνατότητα εξυπηρέτησης έως και 200 ενεργών χρηστών ανά κυψέλη στα 5MHz.

Γεωγραφική κάλυψη κυψέλης: Παροχή βέλτιστης εξυπηρέτησης στους χρήστες με μέγεθος κυψέλης έως τα 5 km, ενώ οι χρήστες μπορεί να παρουσιάζουν ανεκτή απόδοση για μέγεθος κυψέλης μέχρι 100 km.

Διαλειτουργικότητα: Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα επικοινωνιών καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN/GSM/EDGE Radio Access Network συστήματα κινητών επικοινωνιών. Επίσης, υποστήριξη δυνατότητας handover από και προς τα συστήματα αυτά [4], [5].

1.2.2 Απαιτήσεις τεχνολογίας LTE-Advanced

Οι βασικότερες απαιτήσεις της τεχνολογίας LTE-A είναι:

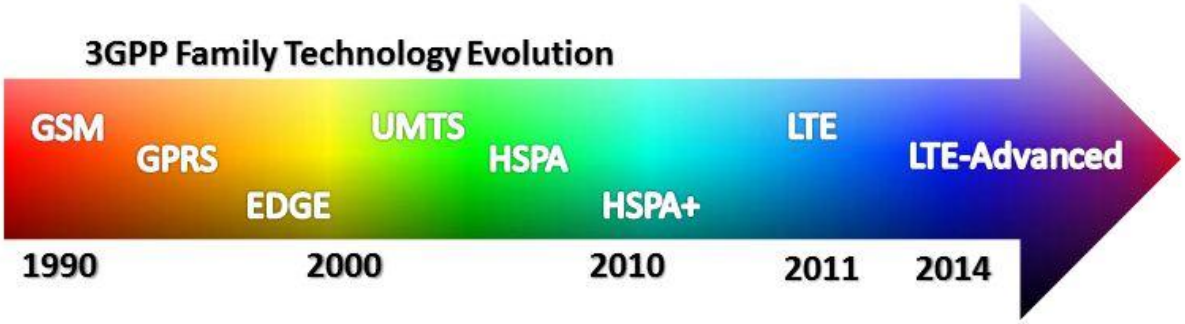
Εύρος Ζώνης: Χρήση φάσματος συνολικού εύρους ζώνης της τάξης των 100 MHz, όπως προκύπτει από τη συνένωση πέντε φέροντων με εύρος ζώνης 20 MHz το καθένα. (λειτουργία carrier aggregation). Τα φέροντα μπορεί να έχουν συνεχόμενες συχνότητες και να βρίσκονται στην ίδια μπάντα συχνοτήτων (intra-band, contiguous), να μην έχουν συνεχόμενες συχνότητες αλλά να βρίσκονται στην ίδια μπάντα συχνοτήτων (intra-band, non contiguous), ή να μην έχουν συνεχόμενες συχνότητες και να μη βρίσκονται και στην ίδια μπάντα συχνοτήτων (inter-band, non contiguous)

Ρυθμοί Μετάδοσης: Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης του 1 Gbps στο downlink και 500 Mbps στο uplink.

Κινητικότητα: Ίδιες απαιτήσεις με το LTE

Χωρητικότητα κυψέλης: Τριπλάσιες απαιτήσεις σε σχέση με το LTE

Γεωγραφική κάλυψη κυψέλης: Ίδιες απαιτήσεις με το LTE [5], [6].



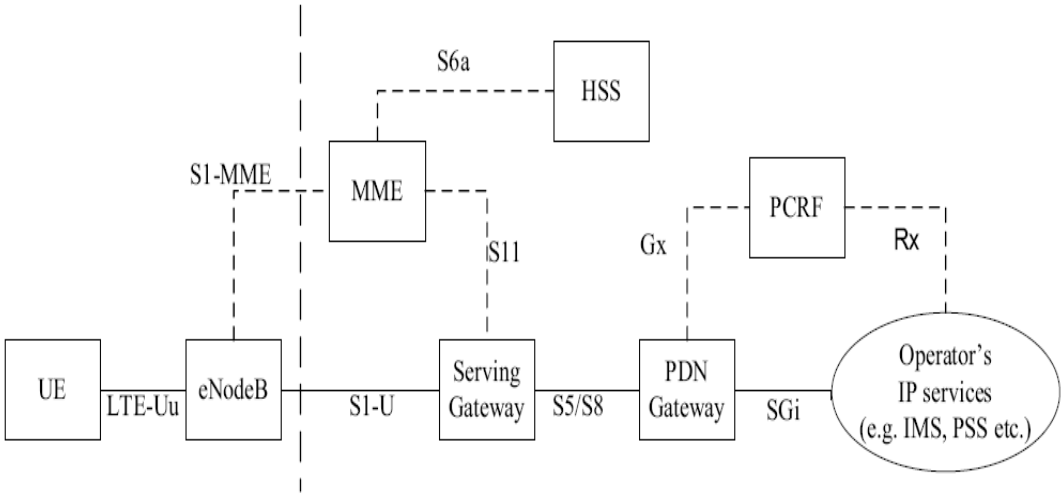
Σχήμα 1: Η εξέλιξη των κυψελωτών συστημάτων από το 2G ως το 4G

2. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ LTE-A

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος LTE-A και οι βασικές της οντότητες. Στη συνέχεια περιγράφεται το φυσικό επίπεδο του LTE-A και παρουσιάζονται οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη ζεύξη, ενώ αναλύονται τα σήματα αναφοράς και οι ακολουθίες συγχρονισμού και αναφέρονται τα φυσικά κανάλια μετάδοσης και ελέγχου.

2.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος LTE-A

Για τα LTE-A δίκτυα, το EPS συνθέτεται από το δίκτυο κορμού (EPC) και το δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, το δίκτυο κορμού αποτελείται από ένα σύνολο λογικών οντοτήτων, ενώ αντίθετα το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται μόνο από τον evolved NodeB (eNodeB), ο οποίος συνδέεται με τους UEs. Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται και οι απαιτούμενες διεπαφές για τη διασύνδεση των διαφόρων οντοτήτων.



Σχήμα 2: EPS δίκτυο [8]

2.1.1 Δίκτυο Κορμού

Οι βασικές οντότητες του δικτύου κορμού (Core Network) είναι οι εξής:

2.1.1.1 Packet Data Network Gateway

Η P-GW είναι ένα είδος δρομολογητή που παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης του UE με εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων λειτουργώντας ως σημείο εισόδου και εξόδου της κυκλοφορίας για τον UE. Ένας UE μπορεί να έχει ταυτόχρονη σύνδεση με περισσότερες από μια P-GW για την πρόσβαση σε πολλαπλά Packet Data Networks (PDNs). Επίσης, είναι υπεύθυνη για την εκχώρηση των IP διευθύνσεων στους UEs, τις οποίες τις χρησιμοποιούν για να επικοινωνήσουν με άλλους IP hosts σε εξωτερικά δίκτυα. Φιλτράρει τα IP πακέτα που καταφθάνουν από εξωτερικά δίκτυα, κατατάσσοντας τα σε κατηγορίες και αναθέτοντας τους διαφορετικά bearers. Λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και non-3GPP δικτύων όπως είναι το WIMAX. Τέλος, περιλαμβάνει το PCEF (Policy Control Enforcement Function), που είναι υπεύθυνο για την επιβολή συγκεκριμένης πολιτικής και λειτουργιών χρέωσης και τον έλεγχο των ροών δεδομένων των υπηρεσιών [7], [8].

2.1.1.2 Serving Gateway

Η Serving Gateway (S-GW) δρομολογεί και προωθεί τα πακέτα δεδομένων του χρήστη. Για τερματικά σε κατάσταση αδράνειας, η S-GW ολοκληρώνει τη διαδικασία συσσώρευσης στοιχείων του UE (παράμετροι της υπηρεσίας του bearer, πληροφορίες δρομολόγησης, αντίγραφα της κίνησης του χρήστη σε περίπτωση νόμιμης συνακρόασης) και ενεργοποιεί τη διαδικασία του paging όταν λάβει πακέτα δεδομένων για το UE.

Η S-GW ενεργεί επίσης ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα των χρηστών μεταξύ LTE και άλλων 3GPP τεχνολογιών ή σε περίπτωση που οι χρήστες διασχίζουν περιοχές που εξυπηρετούνται από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, εξασφαλίζοντας ότι διατηρείται η διαδρομή των δεδομένων. Σε αυτές τις περιπτώσεις το MME δίνει εντολή στη S-GW να αλλάξει τη σύνδεση από τον ένα eNB στον άλλο. Επίσης, αν υπάρχει ανάγκη μπορεί να ζητήσει από τη S-GW να παρέχει πόρους για τη διαβίβαση των δεδομένων από τον αρχικό eNB στον επόμενο.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μόνο μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με ένα περιορισμένο σύνολο από eNBs και MMEs που ελέγχουν αυτή την περιοχή. Θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, αφού η P-GW δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, ενώ η S-GW μπορεί να μεταφερθεί [7], [8].

2.1.1.3 Mobility Management Entity

Το MME είναι ο βασικός κόμβος ελέγχου για την πρόσβαση στο LTE δίκτυο. Είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση της κατάστασης του UE, το tracking των χρηστών και τη διαδικασία του paging (τηλεειδοποίησης) συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων. Εμπλέκεται στη διαδικασία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των bearers, στην επιλογή του S-GW για ένα UE και στη διαδικασία του handover μεταξύ περιοχών του LTE δικτύου, που περιλαμβάνει τον επανεντοπισμό κόμβων κεντρικών δικτύων (core network, CN).

Επίσης, είναι υπεύθυνο για την ταυτοποίηση των χρηστών (μέσω αλληλεπίδρασης με το HSS), τη δημιουργία και την κατανομή προσωρινών ταυτοτήτων στους UEs. Ελέγχει την έγκριση της δικτυακής σύνδεσης του UE στο PLMN (Public Land Mobile Network) και επιβάλλει περιορισμούς περιαγωγής. Το MME είναι το σημείο τερματισμού του δικτύου για κρυπτογράφηση και την προστασία της ακεραιότητας της NAS σηματοδοσίας και αναλαμβάνει την διαχείριση του κλειδιού ασφαλείας. Επίσης παρέχει τη control plane λειτουργία για την κινητικότητα μεταξύ των δικτύων LTE και 2G/3G μέσω της S3 διεπαφής. Τέλος υποστηρίζει τη λειτουργία νόμιμης συνακρόασης (lawful interception) της σηματοδοσίας [7], [8].

2.1.1.4 Policy and Charging Rules Function

Το Policy and Charging Rules Function (PCRF) είναι το στοιχείο του δικτύου που είναι υπεύθυνο για την πολιτική και τον έλεγχο των χρεώσεων (Policy and Charging Control, PCC). Λαμβάνει αποφάσεις για το χειρισμό των υπηρεσιών όσον αφορά το QoS (Quality of Service) και παρέχει πληροφορίες στο PCEF (policy and charging enforcement function) που βρίσκεται στη P-GW, έτσι ώστε να μπορούν να οριστούν τα κατάλληλα bearers. Οι πληροφορίες που παρέχει το PCRF στο PCEF ονομάζονται κανόνες PCC. Το PCRF στέλνει τους κανόνες PCC κάθε φορά που ένα νέο bearer πρέπει να δημιουργηθεί. Για παράδειγμα, όταν ένας UE συνδέεται για πρώτη φορά στο δίκτυο και δημιουργείται το default bearer και στη συνέχεια όταν δημιουργούνται ένα ή περισσότερα dedicated bearers [7], [8].

2.1.1.5 Home Subscription Server

Ο Home Subscription Server (HSS) χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των δεδομένων συνδρομής όλων των μόνιμων χρηστών. Είναι μια βάση δεδομένων αποθηκευμένη σε κάποιο εξυπηρετητή, που διατηρείται στις κεντρικές εγκαταστάσεις του παρόχου. Ο HSS διατηρεί αντίγραφο του προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιέχει πληροφορίες για τις υπηρεσίες του χρήστη, τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις και το αν επιτρέπεται η περιαγωγή σε ένα δίκτυο που έχει επισκεφθεί. Για την δυνατότητα υποστήριξης handover μεταξύ των non-3GPP δικτύων, ο HSS αποθηκεύει επίσης τις ταυτότητες των P-GWs που είναι διαθέσιμες προς χρήση.

Εκτός αυτού στο HSS μπορεί να είναι ενσωματωμένη μια ακόμα οντότητα, το Κέντρο Πιστοποίησης (Authentication Centre) το οποίο είναι επιφορτισμένο με τον έλεγχο γνησιότητας των συνδρομητών και τον έλεγχο πρόσβασης στο δίκτυο, ενώ παράλληλα παράγει τα κλειδιά κρυπτογράφησης για την προστασία της πληροφορίας. Σε όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με αυτές τις λειτουργίες ο HSS αλληλεπιδρά με το MME, επομένως θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με κάθε MME σε όλο το δίκτυο, προκειμένου να μπορεί ο χρήστης να μετακινείται. Για κάθε UE, οι εγγραφές του HSS θα δείχνουν σε ένα MME που του προσφέρει υπηρεσίες κάθε στιγμή, ενώ όταν ένα νέο MME αναφέρει ότι προσφέρει υπηρεσίες στον UE, το HSS θα ακυρώσει την τοποθεσία του προηγούμενου MME [7], [8].

2.1.2 Δίκτυο Πρόσβασης

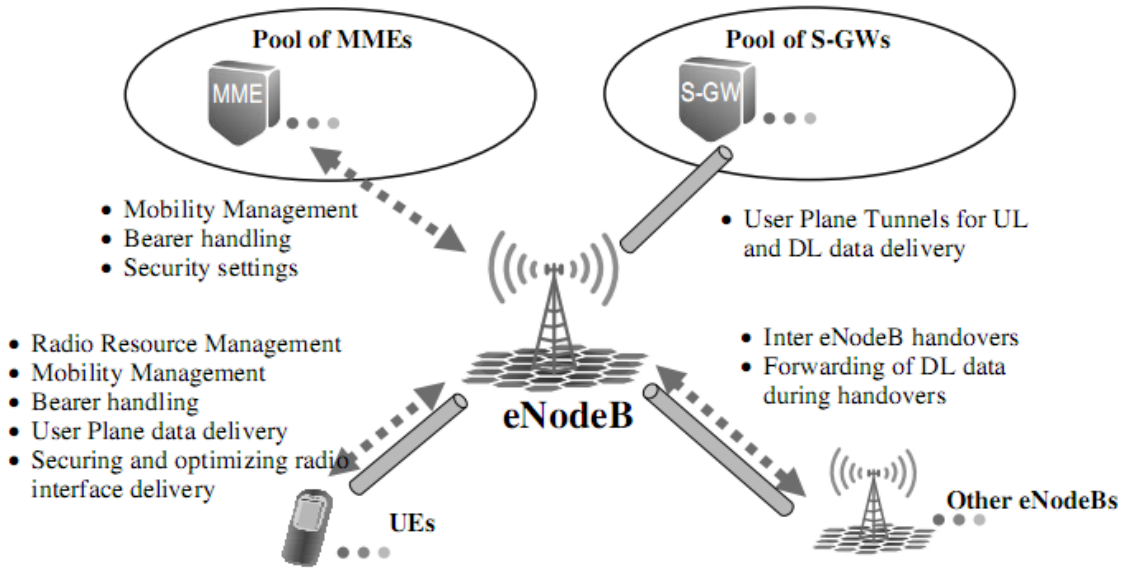
2.1.2.1 Evolved NodeB

Ο μόνος κόμβος στο E-UTRAN είναι ο evolved NodeB (eNodeB), δηλαδή ένας σταθμός βάσης που ελέγχει όλες τις ραδιο-λειτουργίες στο σταθερό μέρος του συστήματος. Οι σταθμοί βάσης, όπως ο eNodeB, κατανέμονται συνήθως σε όλη την περιοχή κάλυψης των δικτύων. Ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων του UE και βελτιώνει τη φασματική απόδοση εκτελώντας συμπίεση και αποσυμπίεση των IP κεφαλίδων.

Ο eNodeB είναι επίσης υπεύθυνος για τη διαχείριση των πόρων του ασύρματου δικτύου (Radio Resource Management), δηλαδή τον έλεγχο χρήσης της ράδιο-επαφής. Αυτό περιλαμβάνει για παράδειγμα, την κατανομή των πόρων με βάση τις αιτήσεις και τη συνεχή παρακολούθηση της χρήσης τους, όπως επίσης τη δημιουργία προτεραιοτήτων και τον προγραμματισμό της ροής των δεδομένων με βάση το απαιτούμενο QoS.

Σημαντικός είναι ο ρόλος του eNodeB και στη διαχείριση της κινητικότητας (mobility management). Με βάση τις μετρήσεις που κάνει ο ίδιος για την ένταση των σημάτων αλλά και αυτές που πραγματοποιεί ο UE, λαμβάνεται η απόφαση για τις μεταπομπές των UEs μεταξύ των κυψελών. Όταν ένας νέος UE ενεργοποιείται υπό κάποιον eNodeB και κάνει αίτηση σύνδεσης στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση αυτού του αιτήματος στο MME το οποία εξυπηρετούσε το συγκεκριμένο UE κάποια προηγούμενη φορά ή μπορεί να επιλέξει ένα νέο MME αν η δρομολόγηση προς το παλιότερο δεν είναι διαθέσιμη

Στην εικόνα φαίνονται οι συνδέσεις του eNodeB με τους περιβάλλοντες λογικούς κόμβους και συνοψίζονται οι βασικές λειτουργίες αυτών. Ο eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλούς UEs ,αλλά κάθε UE είναι συνδεδεμένος με ένα μόνο eNodeB τη φορά [8].



Σχήμα 3: Οι συνδέσεις του eNodeB και οι κύριες λειτουργίες [8]

2.1.3 Εξοπλισμός Χρήστη

Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment) είναι η συσκευή που χρησιμοποιεί για επικοινωνία ο τελικός χρήστης. Τον χαρακτηρισμό UE μπορεί να πάρει οποιαδήποτε συσκευή προσφέρει στον χρήστη πρόσβαση στο δίκτυο του LTE, από ένα κινητό τελευταίας τεχνολογίας μέχρι ένα laptop.

Ο UE επιτελεί λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας όπως handover και αναφορά της τοποθεσίας όπου βρίσκεται ο τερματικός σταθμός. Επίσης ο UE παρέχει τη διεπαφή για τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε εφαρμογές όπως το VoIP να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας φωνητικής κλήσης.

Τα πρωτόκολλα ελέγχου που τρέχουν μεταξύ ενός UE και του MME είναι γνωστά με το όνομα NAS (Non Access Stratum) ενώ αυτά που τρέχουν στην ασύρματη ζεύξη είναι γνωστά ως AS (Access Stratum) [8].

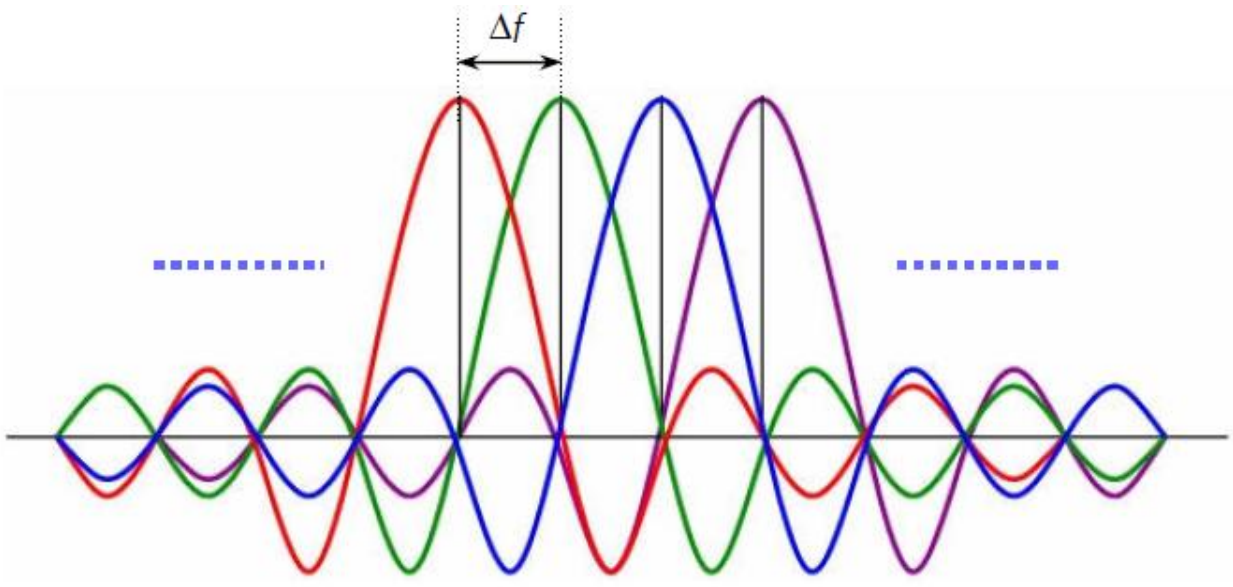
2.2 Φυσικό επίπεδο συστήματος LTE-A

Ο σχεδιασμός του φυσικού στρώματος (PHY) του LTE επηρεάστηκε σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (100 Mbps στο DL / 50 Mbps στο UL), υψηλή φασματική απόδοση και κλιμακωτή χρήση του φάσματος (1.4-20 MHz). Προκειμένου να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, επιλέχθηκε η τεχνική Ορθογώνιας Πολυπλεξίας με Διαίρεση Συχνότητας (OFDM) ως βάση του PHY στρώματος. Η τεχνολογία OFDM σχεδιάστηκε τη δεκαετία του 1960 και μετά τις εξελίξεις στο χώρο της ηλεκτρονικής και της επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε συστήματα πρόσβασης, όπως το 802.11 (WiFi) και το 802.16 (WiMAX) και σε συστήματα μετάδοσης όπως τα Digital Audio Broadcast (DAB) και Digital Video Broadcast (DVB).

2.2.1 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

Η τεχνολογία OFDM βασίζεται στη χρήση πολλαπλών υπό-φέροντων (υπό-καναλιών) στενής ζώνης σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης καναλιού. Τα υπο-φέροντα είναι αμοιβαία ορθογώνια στο πεδίο των συχνοτήτων περιορίζοντας έτσι τη διασυμβολική παρεμβολή (ISI) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Κάθε ένα από αυτά τα υπο-φέροντα αντιμετωπίζει επίπεδες διαλείψεις (flat fading), καθώς το εύρος ζώνης τους είναι μικρότερο από το

εύρος συσχέτισης (coherence bandwidth) του καναλιού. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η ανάγκη για πολύπλοκους ισοσταθμιστές συχνοτήτων που χαρακτηρίζει τις τεχνολογίες 3G.



Σχήμα 4: OFDM υπο-φέροντα [10]

Το ρεύμα δεδομένων πληροφορίας είναι παραλληλοποιημένο και απλώνεται σε όλα τα υπό-φέροντα για μετάδοση. Η διαδικασία της διαμόρφωσης συμβόλων δεδομένων και του συνδυασμού τους είναι ισοδύναμη με την εφαρμογή αντίστροφου ταχύ μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) καταλήγοντας έτσι σε ένα OFDM σύμβολο διάρκειας T_u που ονομάζεται «χρήσιμο μήκος συμβόλου». Στο δέκτη, εφαρμόζεται η αντίστροφη διαδικασία στο OFDM σύμβολο για να ανακτηθεί το ρεύμα δεδομένων. Αυτό είναι ισοδύναμο με την εφαρμογή ταχύ μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform, FFT).

Το κανάλι διάδοσης υπόκειται συνήθως σε χρονική διασπορά (time dispersive): πολλαπλά αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος λαμβάνονται με διάφορες χρονικές καθυστερήσεις εξαιτίας του φαινομένου των πολλαπλών διαδρομών (multipath) που οφείλεται σε αντανακλάσεις που αντιμετωπίζει το σήμα κατά μήκος της διαδρομής μεταξύ πομπού και δέκτη. Η χρονική διασπορά είναι ισοδύναμη με μια απόκριση συχνότητας καναλιού επιλεκτικών συχνοτήτων (frequency selective channel frequency response). Αυτό οδηγεί σε τουλάχιστον μερική απώλεια ορθογωνιότητας μεταξύ των υπό-φερόντων. Το αποτέλεσμα είναι η ύπαρξη διασυμβολικών παρεμβολών όχι μόνο σε ένα υπό-φέρον, αλλά και μεταξύ των υπό-φερόντων. Για να αποφευχθεί η επικάλυψη των συμβόλων και να μειωθεί η διασυμβολική παρεμβολή, προστίθεται στην αρχή του OFDM συμβόλου ένα διάστημα προστασίας (guard interval) T_g. Το διάστημα προστασίας ή κυκλικό πρόθεμα (CP) είναι το αντίγραφο ενός τμήματος από το τέλος του συμβόλου. Έτσι το συνολικό μήκος του συμβόλου γίνεται $T_s = T_u + T_g$. Αυτό καθιστά το σύμβολο OFDM ευαίσθητο στη χρονική διασπορά.

Η χρήση τεχνολογίας OFDM σε ένα σύστημα κινητής πρόσβασης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, συγκεκριμένα:

1) Η μεγάλη διάρκεια συμβόλου και το διάστημα προστασίας αυξάνουν την αντοχή απέναντι στο φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών και περιορίζουν τις διασυμβολικές παρεμβολές.

2) Εξαλείφεται η ανάγκη για ενδοκυψελική ακύρωση παρεμβολών.

3) Επιτρέπεται η ευέλικτη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων.

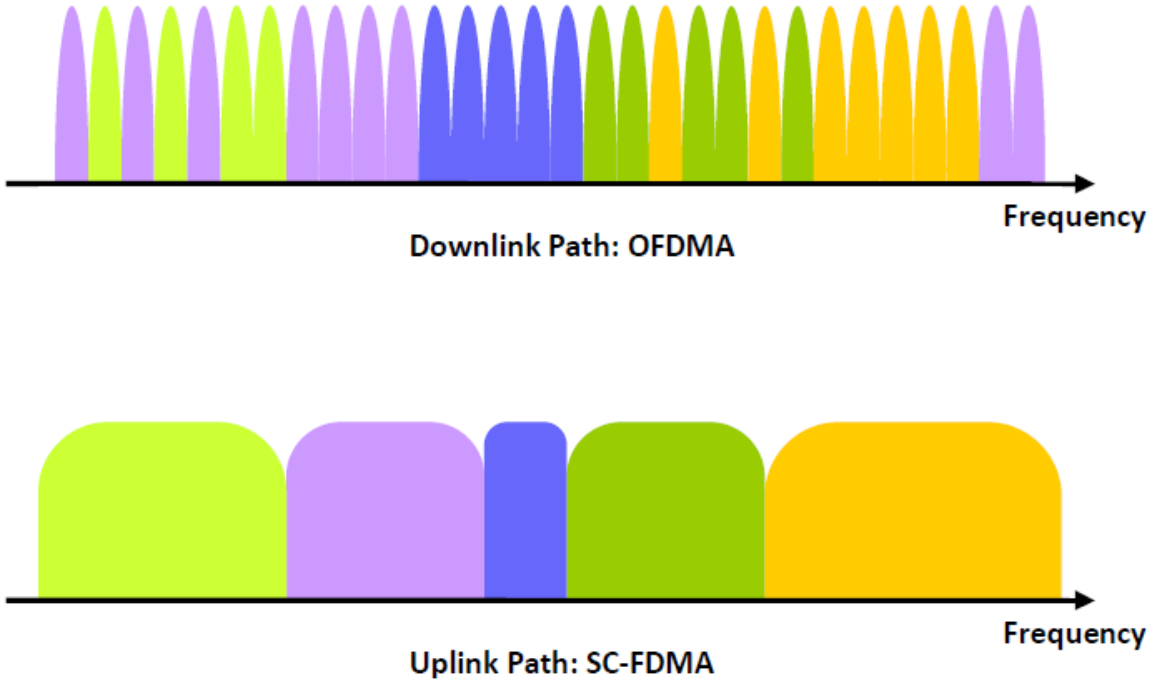
4) Αυξάνεται η φασματική απόδοση λόγω της ορθογωνιότητας μεταξύ των υπό-φέροντων.

5) Επιτρέπεται η βελτιστοποίηση των ρυθμών δεδομένων για όλους τους χρήστες σε μια κυψέλη, μεταδίδοντας στα καλύτερα υπό-φέροντα για κάθε χρήστη (αυτά που δεν υπόκεινται σε διαλείψεις δηλαδή).

Το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό είναι η θεμελιώδης πτυχή του OFDMA: η χρήση της τεχνολογίας OFDM για πολυπλεξία της κίνησης, εκχωρώντας σε διαφορετικούς χρήστες συγκεκριμένα υπό-φέροντα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων. Εκτός από τη ροή των δεδομένων, διασπορά μπορεί να παρουσιάσουν επίσης τα κανάλια ελέγχου και τα σύμβολα αναφοράς. Τα κανάλια ελέγχου μεταφέρουν πληροφορίες στο δίκτυο και στις κυψέλες ενώ τα σύμβολα αναφοράς βοηθούν στον καθορισμό της απόκρισης του καναλιού διάδοσης.

Το φυσικό στρώμα του downlink στο LTE βασίζεται στη τεχνολογία OFDMA. Ωστόσο παρά τα πολλά πλεονεκτήματά του, το OFDMA παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι η υψηλή ευαισθησία στη μετατόπιση συχνότητας και η υψηλή τιμή του λόγου μέγιστη προς μέση ισχύς (peak-to-average power ratio, PAPR) που καταλήγει στη διεύρυνση του φάσματος του σήματος προκαλώντας έτσι παρεμβολές γειτονικού καναλιού. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που μπορεί να ξεπεραστεί χρησιμοποιώντας ενισχυτές ισχύος υψηλού σημείου συμπίεσης και τεχνικές γραμμικοποίησης ενισχυτών (amplifier linearization techniques). Ενώ αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σταθμό βάσης, είναι ιδιαίτερα ακριβές στους χρήστες UEs. Ως εκ τούτου, στο uplink το LTE χρησιμοποιεί FDMA απλού φέροντος (Single Carrier FDMA, SC-FDMA) με κυκλικό πρόθεμα, που μειώνει την τιμή του PAPR καθώς υπάρχει μόνο ένα φέρον αντί για N φέροντα. Το Σχήμα 9 απεικονίζει τις τεχνολογίες των OFDMA και SC-FDMA.

Πρακτικά, το SC-OFDMA υλοποιείται στο LTE χρησιμοποιώντας μια OFDM μετάδοση διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFTS-OFDM), η οποία συνήθως αναφέρεται ως γενίκευση του SC-FDMA στο πεδίο συχνοτήτων. Ο μετασχηματισμός DFT χρησιμοποιείται για πολυπλεξία των μεταδόσεων στο uplink σε συγκεκριμένα τμήματα κατανομής συχνοτήτων στο συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος, σύμφωνα με τις οδηγίες του eNodeB scheduler. Το εύρος ζώνης του απλού φέροντος προσδιορίζεται με βάση τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων από το χρήστη. Τα δεδομένα παραμένουν σειριακά και δεν παραλληλοποιούνται όπως γίνεται στο downlink με το OFDMA (για παράδειγμα 1 bit πληροφορίας μεταδίδεται κάθε στιγμή). Αυτό οδηγεί σε παρόμοιες παραμέτρους απόδοσης της σύνδεσης για το uplink και το downlink. Ωστόσο, λόγω της διαμόρφωσης απλού φέροντος, θα υπάρχει σχετικά υψηλή διασυμβολική παρεμβολή στο uplink. Αυτό απαιτεί τη χρήση ενός μπλοκ ισοσταθμιστή χαμηλής πολυπλοκότητας στο δέκτη eNodeB για να διορθωθούν οι παραμορφώσεις στο κανάλι. Λόγω της διαμόρφωσης απλού φέροντος, το SC-FDMA δεν παρουσιάζει τόση ευαισθησία όσο το OFDM στην αστάθεια συχνότητας και στη διασπορά Doppler.



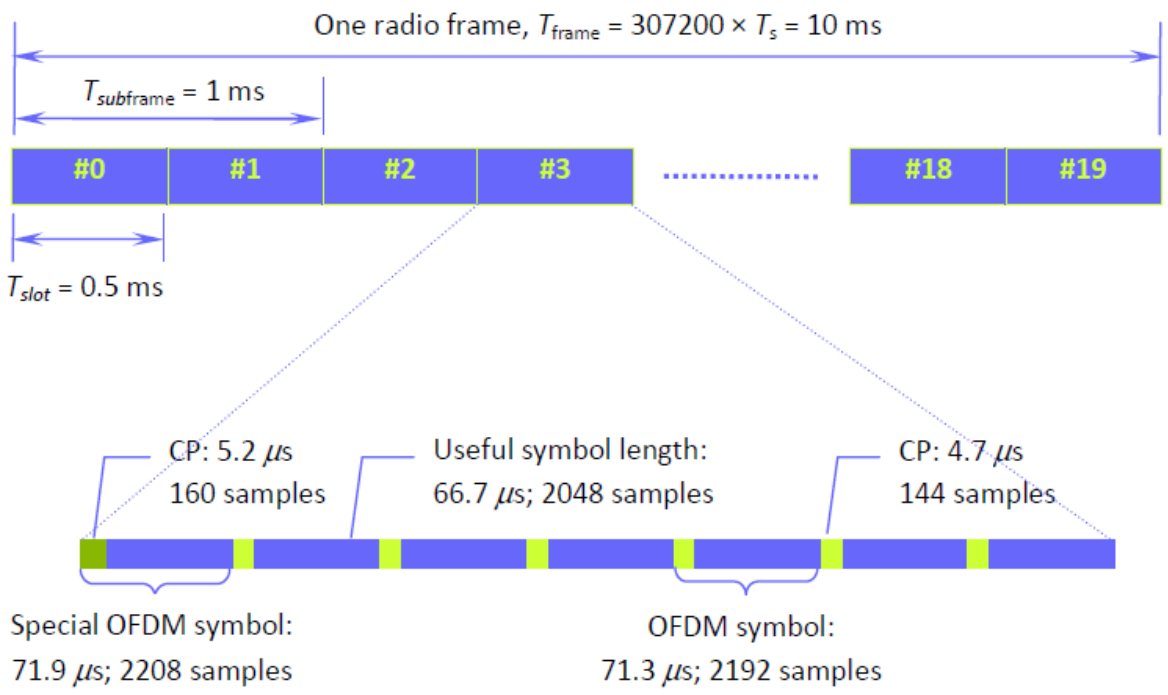
Σχήμα 5: Το πεδίο συχνοτήτων στο downlink και uplink του LTE [10]

2.2.2 Παράμετροι φυσικού στρώματος

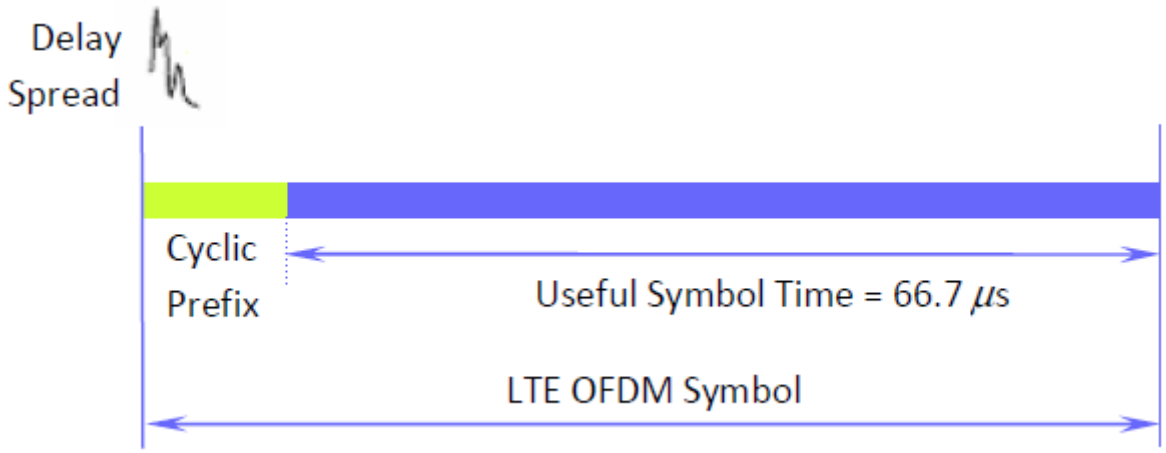
Στο πεδίο του χρόνου, τα διάφορα χρονικά διαστήματα στο LTE εκφράζονται ως πολλαπλάσια μιας βασικής χρονικής μονάδας, $T_s = 1/30720000$. Το χρονικό πλαίσιο (frame) έχει διάρκεια 10ms ($T_{frame} = 307200 \cdot T_s$). Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε δέκα ισομεγέθη υπό-πλαίσια διάρκειας 1 ms ($T_{subframe} = 30720 \cdot T_s$). Ο προγραμματισμός των μεταδόσεων γίνεται βάσει υπο-πλαισίου, τόσο στο uplink όσο και στο downlink. Κάθε υπό-πλαίσιο αποτελείται από δύο ισομεγέθεις χρονοθυρίδες (slots) διάρκειας 0,5 ms ($T_{slot} = 15360 \cdot T_s$). Κάθε χρονοθυρίδα αποτελείται είτε από 7 OFDM σύμβολα (περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος) είτε από 6 σύμβολα (εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα). Το Σχήμα 10 δείχνει τη δομή του frame στο LTE σε FDD mode.

Η ωφέλιμη διάρκεια συμβόλου είναι $T_u = 2048 \cdot T_s \approx 66{,}7\mu s$. Στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος, το πρώτο σύμβολο έχει ένα κυκλικό πρόθεμα μήκους $T_{CP} = 160 \cdot Ts \approx 5{,}2\,\mu s$. Τα υπόλοιπα έξι σύμβολα έχουν ένα κυκλικό πρόθεμα μήκους $T_{CP} = 144 \cdot Ts \approx 4{,}7\,\mu s$. Το διαφορετικό μήκος κυκλικού προθέματος του πρώτου συμβόλου χρειάζεται προκειμένου το συνολικό μήκος χρονοθυρίδας σε μονάδες χρόνου να μπορεί να διαιρεθεί με το 15360. Στην περίπτωση εκτεταμένου κυκλικού προθέματος, το κυκλικό πρόθεμα έχει μήκος $T_{CP-e} = 512 \cdot Ts \approx 16{,}7\,\mu s$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11 το CP είναι μεγαλύτερο από την τυπική διασπορά καθυστέρησης μερικών μs. Το κανονικό κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται σε αστικές κυψέλες και εφαρμογές υψηλού ρυθμού δεδομένων, ενώ το εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε πολύ-κυψελωτές μεταδόσεις και σε πολύ μεγάλες κυψέλες (για παράδειγμα σε αγροτικές περιοχές ή σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων).

Το CP χρησιμοποιεί ως και 7,5% της χωρητικότητας του φυσικού στρώματος στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος. Ένας τρόπος για να μειωθεί το σχετικό overhead εξαιτίας της εισαγωγής του κυκλικού προθέματος είναι να μειωθεί η απόσταση Δf των υπό-φέροντων, με συνέπεια μια αντίστοιχη αύξηση της διάρκειας συμβόλου T_u. Ωστόσο αυτό θα αυξήσει την ευαισθησία της OFDM μετάδοσης στην αστάθεια συχνότητας που προκύπτει από τις ταχείες διακυμάνσεις του καναλιού.



Σχήμα 6: Δομή πλαισίου [10]



Σχήμα 7: Δομή συμβόλου [10]

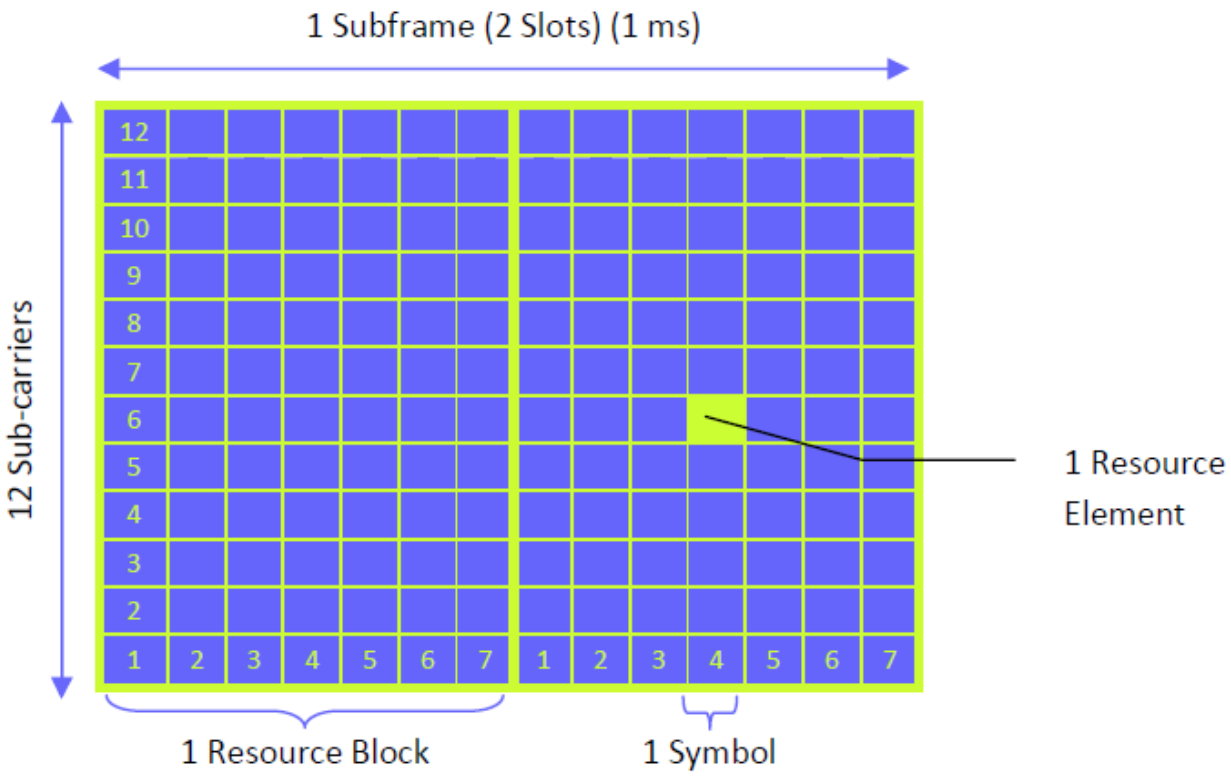
Στο πεδίο των συχνοτήτων, ο αριθμός N των υπό-φερόντων κυμαίνεται από 128 έως 2048 ανάλογα με το εύρος ζώνης καναλιού. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι 512 και 1024 υπο-φέροντα για κανάλι 5 και 10 MHz, αντίστοιχα. Η απόσταση των υπό-φερόντων είναι $\Delta f = 1/T_u = 15\,kHz$. Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι $f_s = \Delta f \cdot N = 15000\,N$. Αυτό οδηγεί σε ένα ρυθμό δειγματοληψίας που είναι πολλαπλάσιος ή υπο-πολλαπλάσιος του WCDMA ρυθμού chip των 3,84 Mcps: οι LTE παράμετροι έχουν επιλεγεί έτσι ώστε τα FFT μήκη και οι ρυθμοί δειγματοληψίας να λαμβάνονται εύκολα για όλους τους τρόπους λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η εύκολη παροχή dual-mode διατάξεων με ένα κοινό σημείο αναφοράς ρολογιού. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει μερικές από τις κύριες παραμέτρους φυσικού στρώματος για το LTE σε FDD mode.

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν χρησιμοποιούνται όλα τα υπο-φέροντα. Το DC υπο-φέρον δεν χρησιμοποιείται, ενώ 10% των υπό-φερόντων χρησιμοποιούνται ως φορείς προστασίας (guard carriers).

Σε ένα macrocell, το εύρος συσχέτισης (coherence bandwidth) του σήματος είναι της τάξεως του 1 MHz. Εντός του εύρους ζώνης του LTE φέροντος που είναι έως 20 MHz, υπάρχουν κάποια υπό-φέροντα που έχουν εξασθενήσει και άλλα που δεν έχουν εξασθενήσει. Η μετάδοση γίνεται με τη χρήση των συχνοτήτων που δεν έχουν υποστεί εξασθένηση. Η μετάδοση μπορεί να προγραμματιστεί μέσω των Resource Blocks (RB) καθένα από τα οποία αποτελείται από 12 διαδοχικά υπο-φέροντα, ή 180 kHz, στη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας (0,5ms). Το Resource Element (RE) είναι η μικρότερη καθορισμένη μονάδα που αποτελείται από ένα OFDM υπο-φέρον κατά τη διάρκεια του διαστήματος ενός OFDM συμβόλου. Κάθε Resource Block αποτελείται από $12 \cdot 7 = 84$ Resource Elements στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος (72 για εκτεταμένο CP). Το Σχήμα 12 δίνει μια εικόνα για τα Resource Blocks και Resource Elements.

Πίνακας 1: Παράμετροι φυσικού στρώματος στο downlink. [10]

Channel Bandwidth (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Frame Duration (ms)	10					
Subframe Duration (ms)	1					
Sub-carrier Spacing (kHz)	15					
Sampling Frequency (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
Occupied Sub-carriers (inc. DC sub-carrier)	76	151	301	601	901	1201
Guard Sub-carriers	52	105	211	423	635	847
Number of Resource Blocks	6	12	25	50	75	100
Occupied Channel Bandwidth (MHz)	1.140	2.265	4.515	9.015	13.515	18.015
DL Bandwidth Efficiency	77.1%	90%	90%	90%	90%	90%
OFDM Symbols/Subframe	7/6 (short/long CP)					
CP Length (Short CP) (μs)	5.2 (first symbol) / 4.69 (six following symbols)					
CP Length (Long CP) (μs)	16.67					



Σχήμα 8: Resource Block και Resource Element [10]

Η δομή εκπομπής στο uplink είναι παρόμοια με το downlink. Η μικρότερη μονάδα πόρων είναι ένα Resource Element που αποτελείται από ένα μπλοκ δεδομένων SC-FDMA σε ένα υπο-φέρον. Ένα Resource Block αποτελείται από 12 REs στη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας (0,5 ms). Το ελάχιστο εύρος ζώνης που εκχωρείται σε ένα UE επομένως είναι 180 kHz. Πολλαπλά Resource Blocks εκχωρούνται διαδοχικά σε ένα UE στο πεδίο της συχνότητας στο uplink, ενώ στο downlink γίνεται διεσπαρμένη, ασυνεχής εκχώρηση.

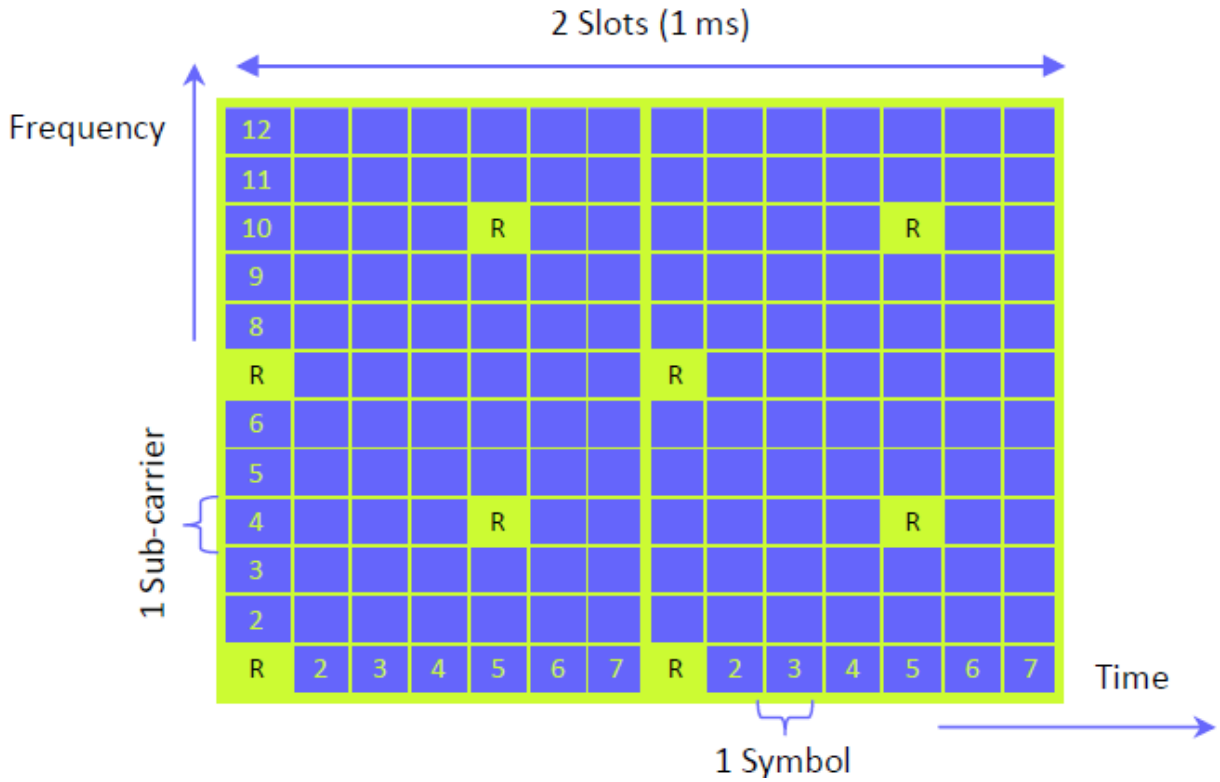
Στο πεδίο του χρόνου, ένα πλαίσιο 10 ms στο uplink αποτελείται από 10 υποπλαίσια 1 ms και 20 χρονοθυρίδες. Οι υποστηριζόμενες διάρκειες προθέματος στο uplink είναι ίδιες με εκείνες του downlink: κανονικό CP των 4.69 μs και εκτεταμένο CP των 16,67 μs (η διάρκεια του πρώτου CP σε κανονική λειτουργία είναι 5,2 μs, παρόμοια με το downlink). Μια χρονοθυρίδα αποτελείται από 7 ή 6 SC-FDMA σύμβολα σε περίπτωση κανονικού ή εκτεταμένου CP, αντίστοιχα.

2.2.3 Σήματα αναφοράς

2.2.3.1 Σήματα αναφοράς στο downlink

Προκειμένου να επιτραπεί η συσχετισμένη αποδιαμόρφωση στον UE, εισάγονται σύμβολα αναφοράς (ή πιλοτικά σύμβολα) στο OFDM πλέγμα χρόνου-συχνοτήτων. Στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος και για ένα σύστημα LTE μίας κεραίας, τα σύμβολα αναφοράς στο downlink εισάγονται στο πρώτο και τρίτο από το τέλος OFDM σύμβολο κάθε χρονοθυρίδας, με μια απόσταση έξι υπο-φερόντων στο πεδίο των συχνοτήτων (αυτό αντιστοιχεί στο πέμπτο και τέταρτο OFDM σύμβολο της χρονοθυρίδας στην περίπτωση κανονικού και εκτεταμένου κυκλικού προθέματος, αντίστοιχα) όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Επιπλέον, υπάρχει μια κλιμάκωση των τριών υπο-φερόντων στο πεδίο συχνοτήτων μεταξύ πρώτου και δεύτερου συμβόλου αναφοράς. Ως εκ τούτου, υπάρχουν τέσσερα σύμβολα αναφοράς σε κάθε Resource Block. Ο UE θα παρεμβάλει σε πολλαπλά σύμβολα αναφοράς για την εκτίμηση του

καναλιού. Στην περίπτωση δύο κεραιών εκπομπής, κάθε κεραία εισάγει σήματα αναφοράς, με αυτά της δεύτερης κεραίας να είναι μετατοπισμένα στο πεδίο των συχνοτήτων κατά τρία υπο-φέροντα. Προκειμένου ο UE να υπολογίσει με ακρίβεια τους συντελεστές του καναλιού, η άλλη κεραία δεν μεταδίδει τίποτα στην ίδια θέση με αυτή των σημάτων αναφοράς.



Σχήμα 9: Η θέση των reference symbols σε ένα Resource Block [10]

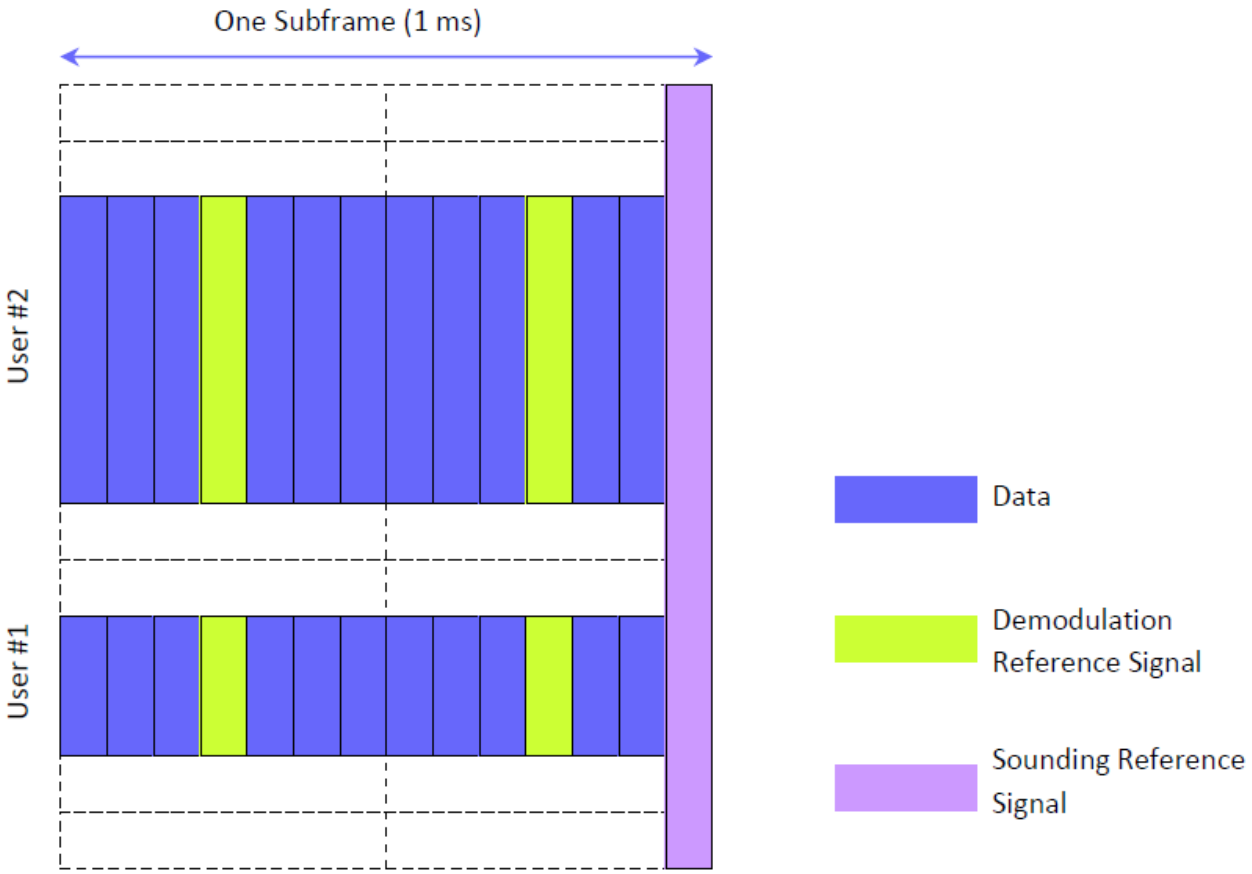
Τα σύμβολα αναφοράς έχουν πολύπλοκες τιμές οι οποίες καθορίζονται σύμφωνα με τη θέση του συμβόλου και της κυψέλης. Οι LTE προδιαγραφές αναφέρονται σε αυτό ως μια δισδιάστατη ακολουθία σημάτων αναφοράς που υποδεικνύει την ταυτότητα της LTE κυψέλης. Υπάρχουν 510 ακολουθίες σημάτων αναφοράς που αντιστοιχούν σε 510 διαφορετικές ταυτότητες κυψελών. Τα σήματα αναφοράς παράγονται από το αποτέλεσμα μιας δισδιάστατης ψευδο-τυχαίας ακολουθίας και μιας δισδιάστατης ορθογώνιας ακολουθίας. Υπάρχουν 170 διαφορετικές ψευδο-τυχαίες ακολουθίες που αντιστοιχούν σε 170 ομάδες ταυτοτήτων κυψελών, και τρεις ορθογώνιες ακολουθίες που καθεμία αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη ταυτότητα κυψέλης από την ομάδα ταυτοτήτων κυψελών.

2.2.3.2 Σήματα αναφοράς στο uplink

Υπάρχουν δύο τύποι σημάτων αναφοράς για το uplink στο LTE. Ο πρώτος είναι τα σήματα αναφοράς αποδιαμόρφωσης (Demodulation Reference Signals, DM-RS) τα οποία χρησιμοποιούνται για να επιτρέψουν τη συσχετισμένη αποδιαμόρφωση σήματος στον eNodeB. Αυτά τα σήματα πολυπλέκονται χρονικά με uplink δεδομένα και μεταδίδονται στο τέταρτο ή τρίτο SC-FDMA σύμβολο μιας uplink χρονοθυρίδας για κανονικό ή εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα CP αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας το ίδιο εύρος ζώνης με τα δεδομένα.

Ο δεύτερος τύπος σημάτων αναφοράς είναι το σήμα αναφοράς ακρόασης (Sounding Reference Signal, SRS), το οποίο επιτρέπει uplink scheduling εξαρτώμενο από το

κανάλι (δηλαδή επιλεκτικών συχνοτήτων) καθώς τα σήματα DM-RS δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό, δεδομένου ότι έχουν διατεθεί για το εκχωρημένο εύρος ζώνης ενός UE. Το SRS είναι ένα σήμα αναφοράς ευρύτερης ζώνης συχνοτήτων που συνήθως μεταδίδεται στο τελευταίο SC-FDMA σύμβολο ενός υποπλαισίου 1 ms, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14. Η μετάδοση δεδομένων δεν επιτρέπεται σε αυτό το μπλοκ οδηγώντας έτσι σε μείωση περίπου 7% της χωρητικότητας του uplink. Το SRS σήμα είναι ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό και μπορεί να διαμορφωθεί για τον έλεγχο του overhead - μπορεί να απενεργοποιηθεί σε μια κυψέλη. Οι χρήστες με διαφορετικό εύρος ζώνης εκπομπής μοιράζονται αυτό το κανάλι ακρόασης στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 10: Σήματα αναφοράς αποδιαμόρφωσης και ακρόασης στο uplink [10]

2.2.4 Ακολουθίες συχρονισμού

Ένα χρήστης που επιθυμεί να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα σύστημα LTE ακολουθεί μια διαδικασία αναζήτησης κυψέλης η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από στάδια συγχρονισμού, με τα οποία ο UE προσδιορίζει κάποιες παραμέτρους χρόνου και συχνότητας που είναι αναγκαίες για την αποδιαμόρφωση σημάτων στο downlink, τη μετάδοση με σωστό χρονισμό και την απόκτηση κάποιων κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος.

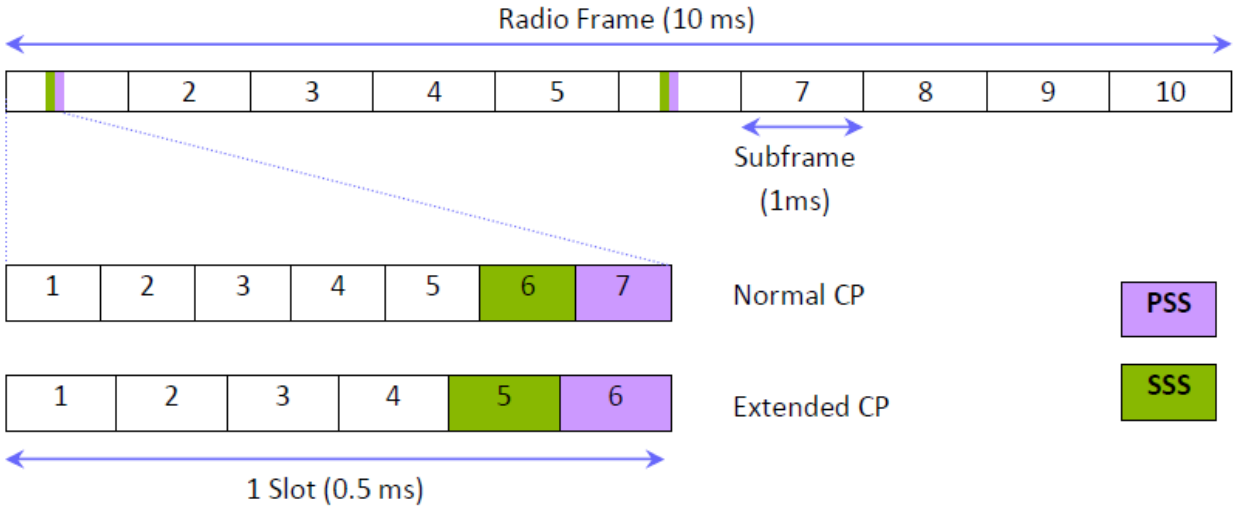
Υπάρχουν τρεις προϋποθέσεις συγχρονισμού στο LTE: η απόκτηση χρονισμού συμβόλου (symbol timing acquisition) με την οποία προσδιορίζεται το σωστό σημείο έναρξης του συμβόλου, ο συγχρονισμός συχνότητας φέροντος (carrier frequency synchronization) που περιορίζει την επίδραση των σφαλμάτων συχνότητας που προκύπτουν από τη μετατόπιση Doppler, και ο συγχρονισμός δειγματοληψίας ρολογιού (sampling clock synchronization).

Υπάρχουν δύο διαδικασίες αναζήτησης κυψέλης στο LTE: μία για τον αρχικό συγχρονισμό και μια άλλη για την ανίχνευση γειτονικών κύψελών στο πλαίσιο της προετοιμασίας για handover. Και στις δύο περιπτώσεις, ο UE χρησιμοποιεί δύο ειδικές μεταδόσεις σημάτων σε κάθε κυψέλη: Την πρωτεύουσα ακολουθία συγχρονισμού (Primary Synchronization Sequence, PSS) και τη δευτερεύουσα ακολουθία συγχρονισμού (Secondary Synchronization Sequence, SSS). Η ανίχνευση αυτών των σημάτων επιτρέπει στο χρήστη να ολοκληρώσει το συγχρονισμό στα πεδία χρόνου και συχνότητας και να αποκτήσει χρήσιμες παραμέτρους του συστήματος όπως την ταυτότητα της κυψέλης, το μήκος κυκλικού προθέματος και το mode πρόσβασης (FDD / TDD). Σε αυτό το στάδιο, ο UE μπορεί επίσης να αποκωδικοποιήσει το Φυσικό Κανάλι Ελέγχου Εκπομπής (PBCH) και να λάβει σημαντικές πληροφορίες του συστήματος.

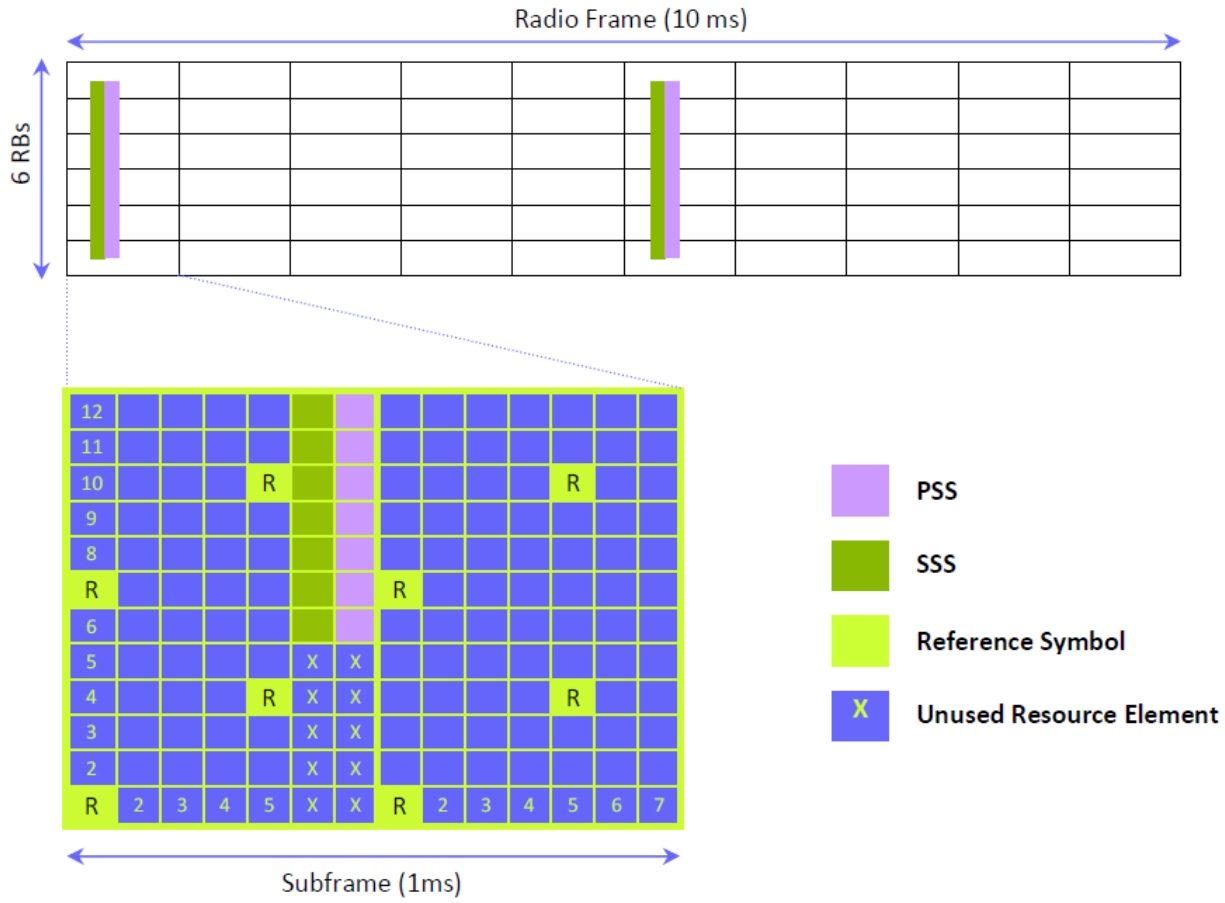
Τα σήματα συγχρονισμού μεταδίδονται δύο φορές σε κάθε frame των 10 ms. Το PSS σήμα βρίσκεται στο τελευταίο OFDM σύμβολο της 1ης και 11ης χρονοθυρίδας κάθε πλαισίου επιτρέποντας στον UE να ανακτήσει το χρονικό όριο χρονοθυρίδας ανεξάρτητα από τον τύπο του κυκλικού προθέματος. Το σήμα PSS είναι ίδιο για κάθε κυψέλη σε κάθε υπο-πλαίσιο στο οποίο μεταδίδεται.

Η θέση του σήματος SSS προηγείται του σήματος PSS, δηλαδή βρίσκεται πριν το τελευταίο OFDM σύμβολο της πρώτης και 11ης χρονοθυρίδας κάθε frame. Ο UE είναι σε θέση να καθορίσει το μήκος του CP ελέγχοντας την απόλυτη θέση του σήματος SSS. Ο UE μπορεί επίσης να προσδιορίσει τη θέση του ορίου του πλαισίου των 10ms, καθώς το σήμα SSS εναλλάσσεται με έναν ειδικό τρόπο μεταξύ δύο μεταδόσεων.

Στο πεδίο των συχνοτήτων, τα σήματα PSS και SSS καταλαμβάνουν τα έξι κεντρικά resource blocks, ανεξαρτήτως του εύρος ζώνης καναλιού του συστήματος, επιτρέποντας στον UE να συγχρονιστεί με το δίκτυο χωρίς εκ των προτέρων γνώση του εκχωρούμενου εύρους ζώνης. Οι ακολουθίες συγχρονισμού χρησιμοποιούν 62 υπο-φέροντα συνολικά, με 31 υπο-φέροντα σε κάθε πλευρά του DC υπο-φέροντος που δεν χρησιμοποιείται. Έτσι μένουν 5 υπο-φέροντα αχρησιμοποίητα σε κάθε άκρο των 6 κεντρικών RBs



Σχήμα 11: Δομή πλαισίου και χρονοθυρίδων του σήματος συγχρονισμού στο πεδίο του χρόνου [10]



Σχήμα 12: Δομή πλαισίου του σήματος συγχρονισμού στο πεδίο συχνοτήτων και χρόνου [10]

2.2.5 Φυσικά Κανάλια

2.2.5.1 Φυσικά κανάλια στο downlink

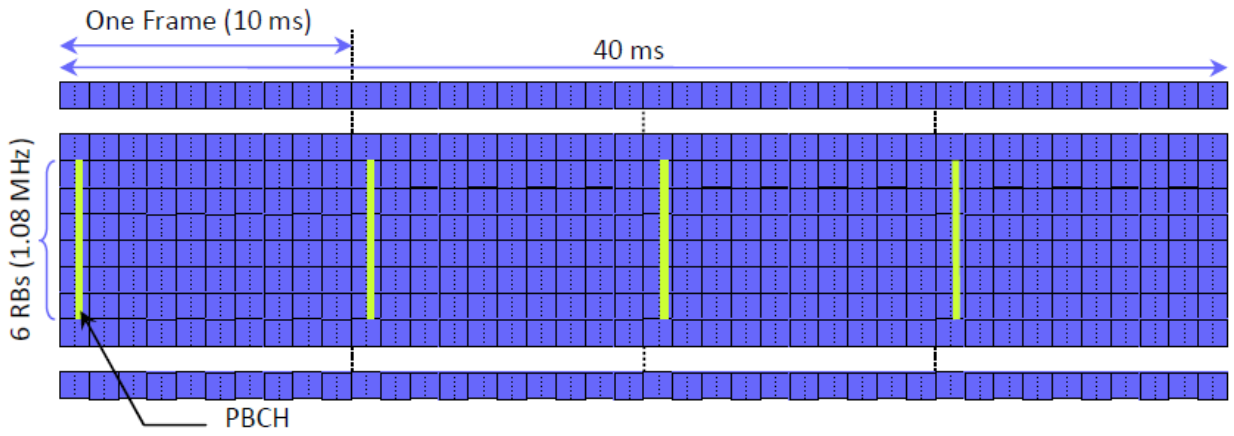
Στο LTE ορίζονται μια σειρά από φυσικά κανάλια στο downlink για τη μεταφορά μπλοκ πληροφοριών που λαμβάνονται από το επίπεδο MAC και τα υψηλότερα επίπεδα. Τα κανάλια αυτά κατηγοριοποιούνται ως κανάλια μεταφοράς ή ελέγχου.

2.2.5.1.1 Κανάλια μεταφοράς

1) Physical Broadcast Channel (PBCH):Το κανάλι PBCH μεταδίδει ένα περιορισμένο αριθμό σημαντικών παραμέτρων για την αρχική πρόσβαση στη κυψέλη, όπως είναι το εύρος ζώνης στο downlink του συστήματος, η δομή του καναλιού Physical Hybrid ARQ Indicator Channel και τα οκτώ πιο σημαντικά bits του αριθμού πλαισίου του συστήματος (System Frame Number). Αυτές οι παράμετροι μεταφέρονται μέσα στο επονομαζόμενο Master Information Block που έχει μήκος 14 bits.

Το κανάλι PBCH έχει σχεδιαστεί για να είναι ανιχνεύσιμο χωρίς προηγούμενη γνώση του εύρους ζώνης του συστήματος και να είναι προσβάσιμο στα όρια της κυψέλης. Το MIB είναι κωδικοποιημένο σε ένα πολύ χαμηλό ρυθμό κωδικοποίησης και αντιστοιχίζεται στα 72 κεντρικά υπο-φέροντα (6 RBs) της δομής του OFDM. Η μετάδοση του PBCH εκτείνεται σε τέσσερα πλαίσια των 10 ms, δηλαδή εκτείνεται σε μια περίοδο 40 ms, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Κάθε υπο-πλαίσιο είναι αυτό-αποκωδικοποιήσιμο μειώνοντας έτσι τις καθυστερήσεις και την εξάντληση της μπαταρίας του UE σε περίπτωση σήματος καλής ποιότητας. Διαφορετικά ο UE συνδυάζει πολλαπλές μεταδόσεις μέχρι να αποκωδικοποιηθεί το PBCH. Το κανάλι PBCH μεταδίδεται χρησιμοποιώντας Space Frequency Block Code (SFBC), μια μορφή διαφορισμού

εκπομπής (transmit diversity) σε περίπτωση πολλαπλών κεραιών επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη κάλυψη.



Σχήμα 13: Δομή PBCH καναλιού [10]

2) Physical Downlink Shared Channel (PDSCH): Το κανάλι PDSCH είναι το κύριο κανάλι μεταφοράς δεδομένων το οποίο εκχωρείται στους χρήστες με δυναμικό και οπορτουνιστικό τρόπο. Το κανάλι PDSCH μεταφέρει δεδομένα σε Transport Blocks (TB) που αντιστοιχούν σε μια μονάδα MAC PDU. Τα blocks αυτά περνάνε από το επίπεδο MAC στο επίπεδο PHY μία φορά ανά χρονικό διάστημα 1 ms. Αυτό το διάστημα είναι γνωστό ως Transmission Time Interval (TTI).

Για την προστασία από σφάλματα μετάδοσης του καναλιού, χρησιμοποιείται ένας συνελικτικός turbo κωδικοποιητής (convolutional turbo coder) για άμεση διόρθωση σφαλμάτων (forward error correction). Τα δεδομένα αντιστοιχίζονται σε επίπεδα ανάλογα με την τεχνική πολλαπλών κεραιών (χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόχου, ανοιχτού βρόχου, διαφορισμός εκπομπής) και στη συνέχεια αντιστοιχίζονται σε ένα σύμβολο διαμόρφωσης που περιλαμβάνει διαμόρφωση QPSK, 16 QAM και 64 QAM.

Οι φυσικοί πόροι εκχωρούνται με τη λογική «δύο RBs για κάθε TTI (1 ms)». Αυτό αναφέρεται ως «ζεύγος RBs», που είναι η ποσότητα των πόρων που μπορούν να εκχωρηθούν. Αντιστοιχεί σε 12 υπο-φέροντα (180 kHz) για 14 OFDM σύμβολα (περίπτωση κανονικού CP).

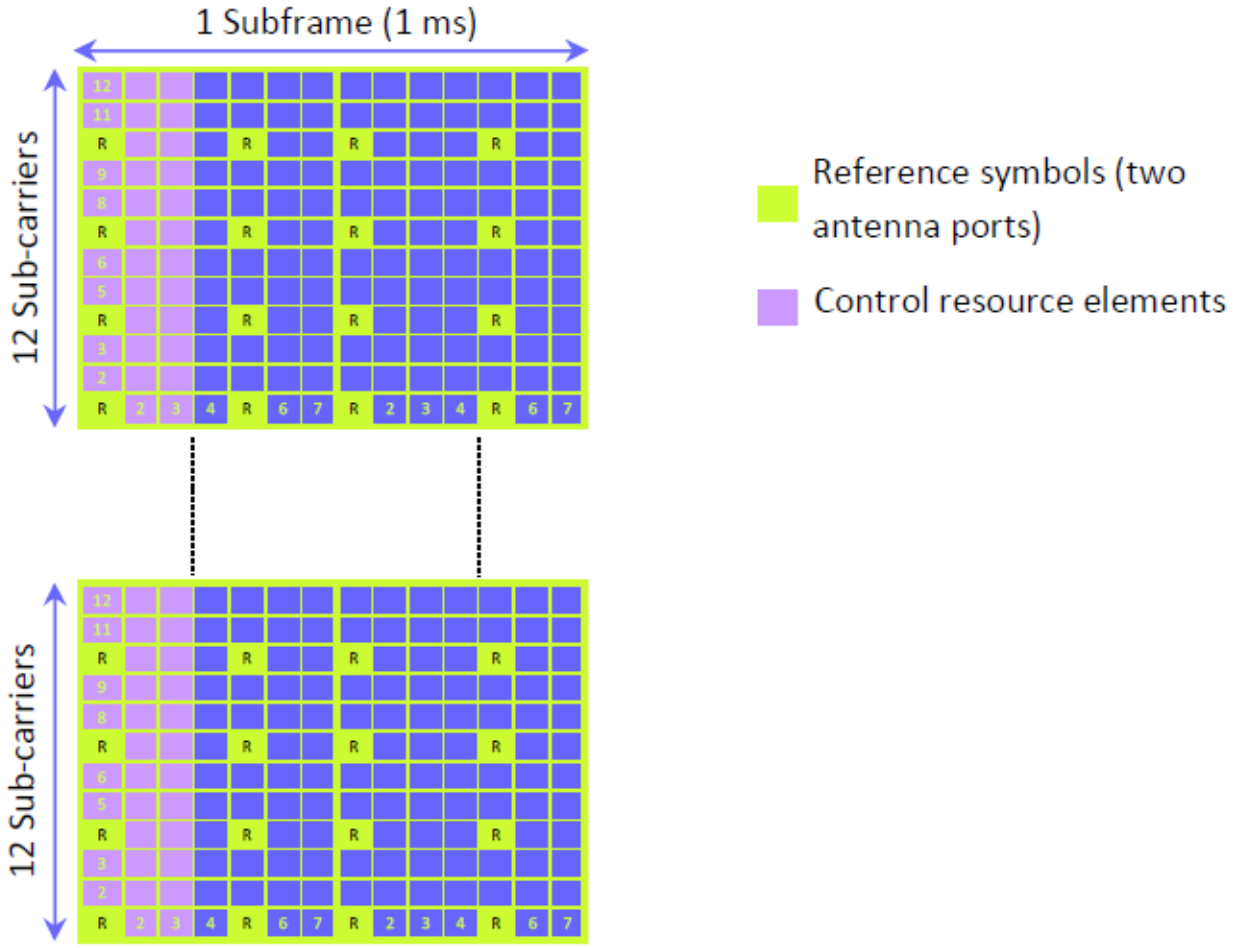
Το κανάλι PDCH χρησιμοποιείται επίσης για τη μετάδοση πληροφοριών που δεν μεταδίδονται στο PBCH, όπως είναι οι πληροφορίες συστήματος (System Information Blocks, SIB) και τα μηνύματα σελιδοποίησης (paging messages).

3) Physical Multicast Channel (PMCH): Αυτό το κανάλι ορίζει τη δομή φυσικού στρώματος που μεταφέρει τις υπηρεσίες Multimedia Broadcast and Multicast Services (MBMS), οι οποίες όμως δεν περιλαμβάνονται στην πρώτη έκδοση του LTE. Το κανάλι PMCH έχει σχεδιαστεί για δίκτυο μίας συχνότητας και απαιτεί από τους σταθμούς βάσης να εκπέμπουν τα ίδια διαμορφωμένα σύμβολα με ακριβή συγχρονισμό. Το PMCH μεταδίδεται σε ειδικό υπο-πλαίσια όπου δε μεταδίδεται το PDSCH.

2.2.5.1.2 Κανάλια ελέγχου

Τα κανάλια ελέγχου καταλαμβάνουν τα πρώτα 1, 2, ή 3 OFDM σύμβολα σε ένα υπο-πλαίσιο και εκτείνονται σε όλο το εύρος ζώνης του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 18. Σε συστήματα στενής ζώνης (λιγότερα από 10 RBs), τα σύμβολα ελέγχου μπορούν να αυξηθούν και να συμπεριλάβουν και το τέταρτο OFDM σύμβολο.

1) Physical Downlink Control Channel (PDCCH): Το κανάλι PDCCH μεταφέρει την πληροφορία για την εκχώρηση πόρων στους UEs που περιέχεται σε ένα μήνυμα Downlink Control Information (DCI). Πολλαπλά PDCCH κανάλια μπορούν να μεταδοθούν στο ίδιο υπο-πλαίσιο χρησιμοποιώντας Control Channel Elements (CCE) καθένα από τα οποία αποτελείται από εννέα σύνολα τεσσάρων REs, που είναι γνωστά ως Resource Element Groups (REG). Στο κανάλι PDCCH χρησιμοποιείται QPSK διαμόρφωση. Σε κάθε ομάδα REG αντιστοιχίζονται τέσσερα QPSK σύμβολα. Επιπλέον, 1, 2, 4, ή 8 CCEs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα UE ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού προκειμένου να εξασφαλιστεί ευρωστία.



Σχήμα 14: Περιοχή σηματοδοσίας του καναλιού PDCCH (3 OFDM σύμβολα) [10]

2) Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH): Αυτό το κανάλι μεταφέρει το δείκτη Control Frame Indicator (CFI), ο οποίος περιλαμβάνει τον αριθμό των OFDM συμβόλων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση του καναλιού ελέγχου σε κάθε υπο-πλαίσιο (τυπικά 1, 2, ή 3). Ο δείκτης CFI μήκους 32 bit αντιστοιχίζεται σε 16 REs στο πρώτο OFDM σύμβολο του κάθε πλαισίου στο downlink, χρησιμοποιώντας QPSK διαμόρφωση.

3) Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH): Το κανάλι PHICH μεταφέρει τα μηνύματα HARQ και ACK / NAK που υποδεικνύουν στο UE εάν ο eNodeB έλαβε σωστά τα δεδομένα του χρήστη που μεταφέρονται στο κανάλι PUSCH. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση BPSK.

2.2.5.2 Φυσικά Κανάλια στο uplink

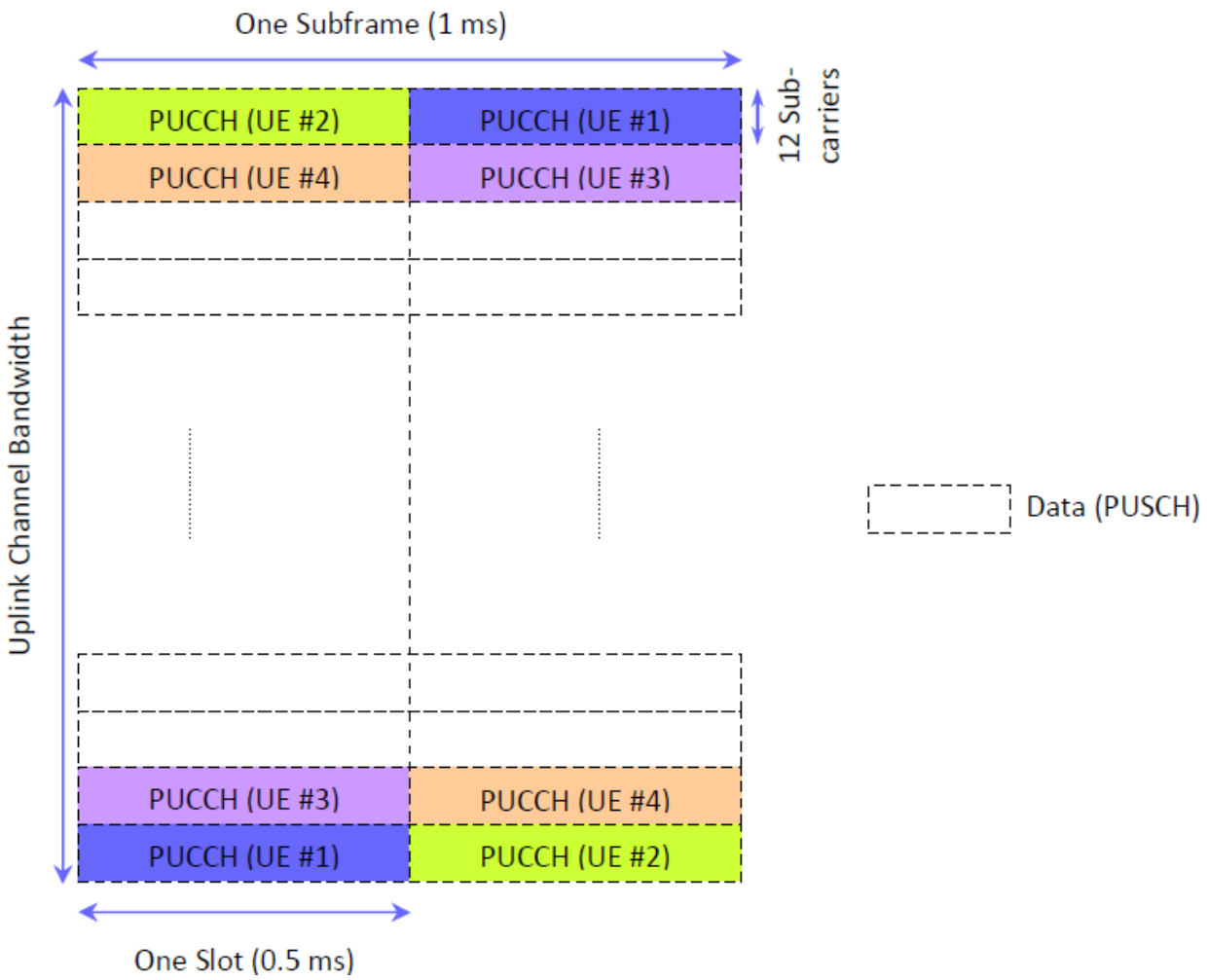
Τρία κανάλια φυσικού στρώματος ορίζονται για το uplink στο LTE:

Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): Αυτό το κανάλι μεταφέρει τα δεδομένα του χρήστη. Υποστηρίζει διαμορφώσεις QPSK και 16 QAM ενώ η διαμόρφωση 64QAM είναι προαιρετική. Τα bits πληροφοριών αρχικά κωδικοποιούνται στο κανάλι με ένα Turbo κώδικα μητρικού ρυθμού 1/3, προτού προσαρμοστούν μέσω μίας διαδικασίας προσαρμογής ρυθμού για ένα τελικό κατάλληλο ρυθμό κώδικα. Γειτονικά σύμβολα δεδομένων αντιστοιχίζονται σε γειτονικά SC-FDMA σύμβολα στο πεδίο του χρόνου προτού αντιστοιχηθούν στα υπο-φέροντα. Μετά από αυτή τη διαδικασία, τα bits κωδικοποιούνται και ακολουθούν οι διαδικασίες modulation mapping, διασποράς DFT, sub-carrier mapping και OFDM διαμόρφωσης. Η κωδικοποίηση καναλιού είναι παρόμοια με εκείνη στο downlink.

Το διάστημα scheduling στο uplink είναι 1 ms, όπως και στο downlink. Ωστόσο είναι δυνατόν να «ενωθεί» μια ομάδα από 4 TTI για να βελτιωθεί η απόδοση στα όρια των κυψελών και να μειωθεί το overhead των πρωτοκόλλων υψηλότερων επιπέδων. Σε αυτή την περίπτωση, μια μονάδα MAC PDU τμηματοποιείται για μετάδοση σε πολλαπλά TTIs. Στο πεδίο των συχνοτήτων, οι μεταδόσεις κατανέμονται με βάση πολλαπλάσια των 180 kHz RBs. Στις δύο χρονοθυρίδες ενός υπο-πλαισίου εκχωρούνται πόροι που αντιστοιχούν στο ίδιο σύνολο υπο-φερόντων. Ωστόσο, μπορεί να αξιοποιηθεί η μεταπήδηση συχνοτήτων μεταξύ χρονοθυρίδων (inter-slot frequency hopping) κατά την οποία χρησιμοποιούνται διαφορετικά υπο-φέροντα στη δεύτερη χρονοθυρίδα με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ένα κέρδος διαφορισμού συχνοτήτων και να μετριάζονται οι παρεμβολές δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες σε γειτονικές κυψέλες.

Το κανάλι PUSCH μεταφέρει εκτός από τα δεδομένα των χρηστών και κάθε απαραίτητη πληροφορία ελέγχου για την αποκωδικοποίηση πληροφοριών όπως οι δείκτες μορφής μετάδοσης (Transmit format Indicators) και οι παραμέτροι MIMO. Τα δεδομένα ελέγχου πολυπλέκονται με τα δεδομένα πληροφοριών πριν από τη διασπορά DFT .

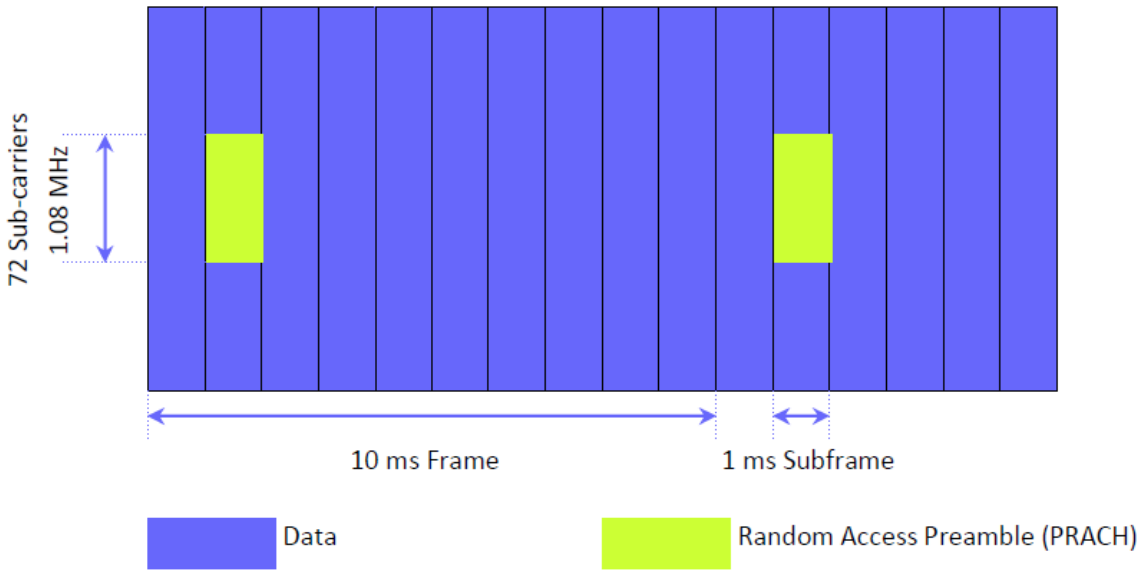
Physical Uplink Control Channel (PUCCH): Η σηματοδοσία ελέγχου περιλαμβάνει δεδομένα του uplink που διαβιβάζονται ανεξάρτητα από τα δεδομένα κίνησης, όπως είναι τα μηνύματα HARQ, ACK / NACK, οι δείκτες ποιότητας του καναλιού (CQI), η ανατροφοδότηση MIMO (Rank Indicator, Precoding Matrix Indicator, PMI) και οι αιτήσεις scheduling για μετάδοση στο uplink. Αυτό το κανάλι εκπέμπει σε μια περιοχή συχνοτήτων στα άκρα του εύρους ζώνης του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Αποτελείται από ένα RB ανά μετάδοση στο ένα άκρο του εύρους ζώνης του συστήματος που ακολουθείται από ένα RB στην επόμενη χρονοθυρίδα στο αντίθετο άκρο του φάσματος του καναλιού, κάνοντας έτσι χρήση του διαφορισμού συχνοτήτων με εκτιμώμενο κέρδος 2 dB. Η περιοχή ελέγχου (control region) του καναλιού PUCCH περιλαμβάνει δύο τέτοια RBs. Ο Πίνακας 2 δείχνει τον τυπικό αριθμό PUCCH περιοχών για διάφορα εύρη ζώνης. Για τη διαμόρφωση της PUCCH πληροφορίας χρησιμοποιείται BPSK ή QPSK.



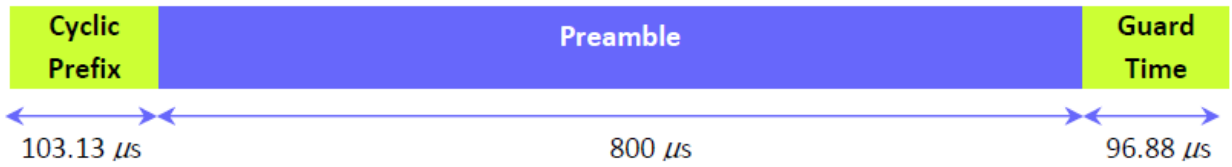
Σχήμα 15: Δομή του PUCCH καναλιού [10]

Πίνακας 2: Τυπικός αριθμός PUCCH περιοχών [10]

System Bandwidth (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
PUCCH Control Regions	1	2	4	8	12	16
Number of Resource Blocks	2	4	8	16	24	32



Σχήμα 16: Μετάδοση preamble τυχαίας προσπέλασης [10]



Σχήμα 17: Preamble τυχαίας προσπέλασης [10]

Physical Random Access Channel (PRACH): Αυτό το κανάλι μεταφέρει το preamble τυχαίας προσπέλασης που στέλνει ένας UE για να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο σε ασύγχρονο mode και επιτρέπει στο UE να συγχρονιστεί με τον eNodeB. Αποτελείται από 72 υπο-φέροντα στο πεδίο των συχνοτήτων (6 RBs, 1.08 MHz) όπως φαίνεται στο Σχήμα 20. Για τη λειτουργία FDD του LTE ορίζονται τέσσερα διαφορετικά formats του preamble τυχαίας προσπέλασης με διαφορετικές διάρκειες κυκλικού προθέματος και preamble. Το Preamble με Format 0 είναι κατάλληλο για μικρού και μεσαίου μεγέθους κυψέλες, χρησιμοποιεί ένα πλήρες υποπλαίσιο 1 ms και έχει διάρκεια 800 μs με κυκλικό πρόθεμα 103 μs και διάστημα προστασίας 97 μs, όπως φαίνεται στο Σχήμα 21 [10].

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι τύποι παρεμβολών που προκαλούνται σε ένα ετερογενές LTE/LTE-A δίκτυο και παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνικές διαχείρισης τους.

3.1 Κυψελωτά δίκτυα με φεμτοκυψέλες

Τα femtocells είναι μικροί σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος, που παρέχουν ραδιοκάλυψη σε κινητούς χρήστες εντός ενός εσωτερικού περιβάλλοντος. Εγκαθίστανται από το τελικό χρήστη όπως ένα Wi-Fi router και το access point των Femtocells συνδέεται με το δίκτυο πυρήνα (core network) του operator μέσω της ασύρματης διαδικτυακής σύνδεσης του χρήστη. Τα femtocells χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία φυσικού στρώματος με τα κυψελωτά δίκτυα, τυποποιήθηκαν από τη 3GPP στο release 8 και στα LTE συστήματα αποκαλούνται συνήθως Home eNodeBs (HeNBs).

Τα femtocells μπορούν να υποστηρίζουν έναν περιορισμένο αριθμό χρηστών, επομένως πρέπει να είναι σαφές ποιοι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κάθε femtocell. Επί του παρόντος τρεις τρόποι πρόσβασης έχουν οριστεί για ένα femtocell:

• Ανοικτή Πρόσβαση (Open Access Mode): Κάθε χρήστης μπορεί να έχει ελεύθερη πρόσβαση στο femtocell και να επωφελείται από τις υπηρεσίες του.

• Κλειστή Πρόσβαση (Close Access Mode): Μόνο οι εγγεγραμμένοι χρήστες στο femtocell μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτό, για παράδειγμα οι ένοικοι ενός σπιτιού στο οποίο έχει αναπτυχθεί ένα femtocell. Η λίστα των συνδρομητών του femtocell καθορίζεται από τον κάτοχο του. Στη 3GPP η λειτουργία αυτή αναφέρεται ως CSG (Close Subscriber Group).

• Υβριδική Πρόσβαση (Hybrid Access mode): Αυτός ο τρόπος πρόσβασης επιτρέπει μόνο σε συγκεκριμένες εξωτερικούς χρήστες να έχουν πρόσβαση στο femtocell. Οι όροι της πρόσβασης στο femtocell μπορούν να οριστούν από κάθε operator ξεχωριστά και η είσοδος ενός νέου χρήστη μπορεί να ζητηθεί από τον ιδιοκτήτη.

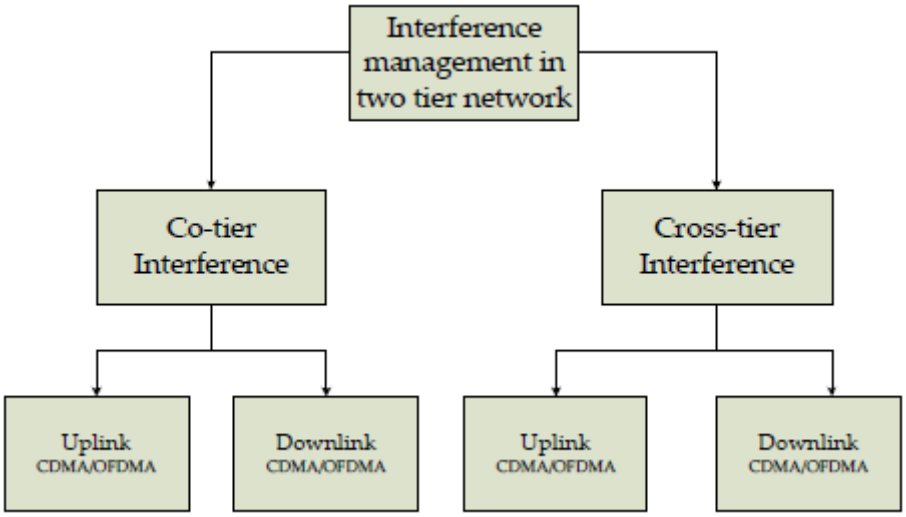
Δύο είναι οι κυριότεροι τρόποι εγκατάστασης των femtocells. Η εγκατάσταση ξεχωριστού καναλιού (separate channel deployment) και η εγκατάσταση κοινού καναλιού (co channel deployment). Στην εγκατάσταση ξεχωριστού καναλιού, εκχωρείται ένα συγκεκριμένο κανάλι για το δίκτυο των femtocells, το οποίο δεν χρησιμοποιείται από το macrocell. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν οι παρεμβολές μεταξύ femtocell και macrocell χρηστών Στην εγκατάσταση κοινού καναλιού, το femtocell χρησιμοποιεί τα ίδια κανάλια με το macrocell. Κάτι τέτοιο προτιμάται από τους operators καθώς αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του συστήματος και επίσης επειδή η εκχώρηση ορισμένου τμήματος του φάσματος στα femtocells μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβή, δεδομένου ότι το ραδιοφάσμα είναι ένα πολύτιμο αγαθό. Με την εγκατάσταση διαμοιραζόμενου καναλιού όμως, υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος να προκληθούν παρεμβολές μεταξύ femtocell και macrocell χρηστών.

3.2 Τύποι παρεμβολών σε ένα δίκτυο δύο επιπέδων

Όπως είπαμε η χρήση κοινού τμήματος του ραδιοφάσματος από τα femtocells και τα macrocells αυξάνει μεν τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, παράλληλα όμως προκαλεί σοβαρά προβλήματα παρεμβολών. Η διαχείριση αυτών των παρεμβολών είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις για την πυκνή ανάπτυξη των femtocells.

Εξαιτίας της εγκατάστασης των μικρών εσωτερικών σταθμών βάσης, η κυψελωτή αρχιτεκτονική αλλάζει και αποτελείται από 2 επίπεδα, το επίπεδο του δικτύου των macrocells και αυτό του δικτύου των femtocells. Η νέα αυτή αρχιτεκτονική ονομάζεται

αρχιτεκτονική δύο επιπέδων και παρουσιάζει βελτιωμένη χωρητικότητα, κάλυψη και ποιότητα. Παράλληλα όμως προκαλεί μια σειρά από προβλήματα και θέτει νέες προκλήσεις, ανάμεσα στις οποίες μεγάλη σημασία έχει η διαχείριση των παρεμβολών που προκαλούνται εξαιτίας της χρήσης ίδιων ζωνών συχνοτήτων από τα femtocells και τα macrocells.



Σχήμα 18: Τύποι παρεμβολών στη κυψελωτή αρχιτεκτονική δύο επιπέδων [9]

Η αρχιτεκτονική δύο επιπέδων μας επιτρέπει να διαχωρίσουμε αυτές τις παρεμβολές σε δύο βασικούς τύπους που απεικονίζονται στο Σχήμα 4: τις παρεμβολές ίδιου επιπέδου και τις παρεμβολές διαφορετικών επιπέδων.

3.2.1 Παρεμβολές ίδιου επιπέδου (co-tier)

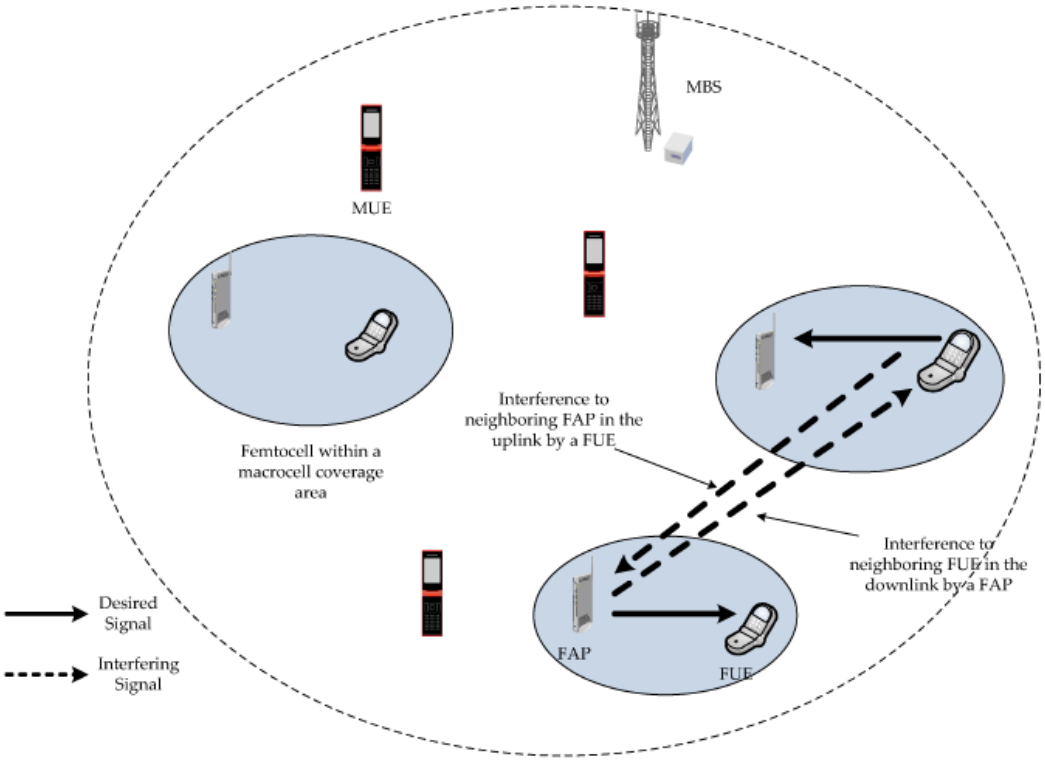
Οι παρεμβολές αυτές προκαλούνται από στοιχεία του δικτύου που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο για παράδειγμα από ένα femtocell σε ένα άλλο femtocell. Η κατανομή των femtocells είναι τυχαία, οπότε μπορούν να αναπτυχθούν πολύ κοντά το ένα στο άλλο σε δωμάτια και ο διαχωρισμός των τοιχωμάτων να μην είναι αρκετός προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές μεταξύ τους. Στη περίπτωση πυκνής κατανομής των κυψελών, όπου θα υπάρχουν περισσότεροι από ένας γειτονικοί παρεμβολείς, οι αθροιστικές παρεμβολές σε ένα femtocell μπορεί να είναι υψηλότερες από τις παρεμβολές που προκαλεί κάθε femtocell ξεχωριστά. Για να είναι δυνατή η δημιουργία σύνδεσης επικοινωνίας, πρέπει η τιμή του λόγου σήματος προς θόρυβο συν τις παρεμβολές (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) να είναι μεγαλύτερη από κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι. Εάν η τιμή του SINR σε μια συγκεκριμένη θέση του femtocell είναι μικρότερη από το κατώφλι εξαιτίας των co-tier παρεμβολών, καθίσταται αδύνατη η δημιουργία σύνδεσης και δημιουργείται μία νεκρή ζώνη. Η τιμή του κατωφλίου για το SINR καθορίζεται συνήθως από την τεχνολογία ασύρματων διεπαφών (air interface technology) που χρησιμοποιείται και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις απαιτήσεις QoS.

Οι μέθοδοι πρόσβασης που χρησιμοποιούνται στα femtocells έχουν ισχυρή επίδραση στις συνολικές παρεμβολές. Οι παρεμβολές ιδίου επιπέδου είναι πιο ισχυρές σε συστήματα κλειστής πρόσβασης απ ότι στα ελεύθερης πρόσβασης, προκαλώντας έτσι και μεγαλύτερες νεκρές ζώνες. Το μέγεθος αυτών των ζωνών εξαρτάται επίσης από τις απαιτήσεις QoS κάθε υπηρεσίας. Αν μία υπηρεσία απαιτεί υψηλή τιμή SINR, μπορεί να μην είναι δυνατή η παροχή της στα άκρα ενός femtocell. Άρα η νεκρή ζώνη σε αυτή την

περίπτωση θα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες υπηρεσίες που δεν απαιτούν ανάλογα υψηλό SINR.

Οι co-tier παρεμβολές στο uplink προκαλούνται από τους HUEs στους γειτονικούς HeNBs. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα CDMA, η κύρια πηγή παρεμβολών στο uplink είναι οι άμεσα γειτονικοί HUEs. Εάν ένας χρήστης σε γειτονικό femtocell εκπέμπει με υψηλή ισχύ, θα επηρεάσει το πληττόμενο femtocell υποβαθμίζοντας την απόδοση του. Σε αυτή την περίπτωση κάθε HeNB πρέπει να θέσει κάποια όρια στην ισχύ εκπομπής των UEs του προκειμένου να ελέγξει το επίπεδο του θορύβου στις γειτονικές κυψέλες. Τα συστήματα 3G όπως είναι το UMTS και το HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) εφαρμόζουν τεχνικές ρύθμισης ισχύος προκειμένου να περιορίσουν τις παρεμβολές στο uplink. Σε αυτά τα συστήματα, ο HeNB είναι σε θέση να ανιχνεύσει το ράδιο-περιβάλλον και να συλλέξει πληροφορίες για τους κοντινούς HUEs βάσει των οποίων στη συνέχεια καθορίζει την ισχύ εκπομπής τους.

Στην περίπτωση των OFDMA femtocells, ο HeNB ανιχνεύει το ράδιο-περιβάλλον για συγκεκριμένα υπό-κανάλια. Ο UE απαιτεί συγκεκριμένο αριθμό υπό-καναλιών ανάλογα με το απαιτούμενο QoS και ο HeNB θα πρέπει να του εκχωρήσει υπό-κανάλια που υπόκεινται σε χαμηλή παρεμβολή. Σε σύγκριση με το CDMA, το σύστημα OFDMA παρέχει περισσότερες πιθανότητες αποφυγής των παρεμβολών χάρη στη διαίρεση του φάσματος σε μικρά υπό-κανάλια.



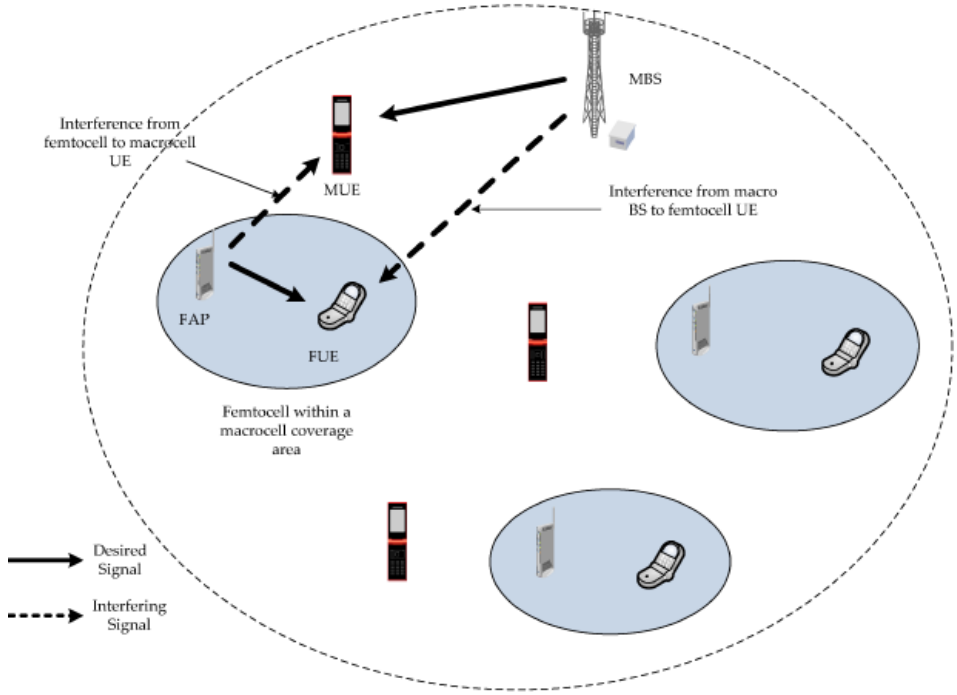
Σχήμα 19: Ένα σενάριο co-tier παρεμβολών μεταξύ γειτονικών femtocells [9]

Οι co-tier παρεμβολές στο downlink προκαλούνται από τους HeNBs στους γειτονικούς HUEs. Λόγω της πυκνής κατανομής των femtocells υπάρχει μεγάλη πιθανότητα διαρροής ισχύος μέσα από παράθυρα, πόρτες και μπαλκόνια προκαλώντας παρεμβολές στους γειτονικούς χρήστες. Σε ένα σύστημα CDMA, αυτές οι παρεμβολές αθροίζονται με το επίπεδο θορύβου και δημιουργούν νεκρές ζώνες γύρω από το femtocell. Για την αποφυγή τέτοιων παρεμβολών, η 3GPP προτείνει τη χρήση προσαρμοστικών τεχνικών ελέγχου ισχύος στους HeNBs. Αυτές οι τεχνικές είναι ιδιαίτερα σημαντικές για femtocells κλειστής πρόσβασης, καθώς σε αυτή την περίπτωση ο UE δεν εξυπηρετείται από τον ισχυρότερο HeNB αλλά από αυτό στο οποίο έχει εγγραφεί. Όπως και στο uplink, ο HeNB θα πρέπει να μπορεί να ανιχνεύει το ράδιο-

περιβάλλον στο downlink και να ρυθμίζει αναλόγως την ισχύ του. Στη περίπτωση των OFDMA femtocells, η ύπαρξη παρεμβολών εξαρτάται και πάλι από τον τρόπο εκχώρησης των υπό-καναλιών. Εάν χρησιμοποιούνται διαφορετικά υπό-κανάλια από την πηγή και το θύμα των παρεμβολών, τότε οι παρεμβολές αποφεύγονται.

3.2.2 Παρεμβολές διαφορετικών επιπέδων (cross-tier)

Προκαλούνται από στοιχεία του δικτύου που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα. Για παράδειγμα, ένας HeNB μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε ένα MUE στο downlink όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Επίσης ένας MUE μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε ένα κοντινό HeNB στο uplink. Γενικά τα femtocells προκαλούν ισχυρές παρεμβολές σε γείτονες που χρησιμοποιούν macrocell υπηρεσίες για indoor σκοπούς. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ισχυρότερο στην περίπτωση κυψελών κλειστής πρόσβασης, καθώς οι MUEs θα δέχονται ισχυρά σήματα από γειτονικά femtocells στα οποία απαγορεύεται η πρόσβαση, δημιουργώντας έτσι μεγάλες νεκρές ζώνες γύρω από το femtocell. Για την αντιμετώπιση των παρεμβολών διαφορετικών επιπέδων, έχει προταθεί η διαίρεση του φάσματος, χωρίς όμως να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνική λόγω του υψηλού κόστους και της σπανιότητας αυτού του πόρου. Εκχωρώντας διαφορετικό τμήμα του φάσματος στο επίπεδο των femtocells, αντιμετωπίζονται μεν οι cross-tier παρεμβολές, αν όμως οι ζώνες συχνοτήτων είναι γειτονικές θα δημιουργηθούν παρεμβολές γειτονικών καναλιών, οπότε θα απαιτείται εκ νέου προσπάθεια για το περιορισμό τους.



Σχήμα 20: Ένα σενάριο cross-tier παρεμβολών μεταξύ femtocell και macrocell [9]

Παρεμβολές διαφορετικών επιπέδων μπορούν να προκληθούν επίσης από ένα HUE σε ένα σταθμό βάσης του macrocell. Σε ένα σύστημα CDMA, χρησιμοποιείται έλεγχος ισχύος για την αποφυγή τέτοιων παρεμβολών. Ο HeNB πρέπει να ανιχνεύει το περιβάλλον και να μην απαιτεί υψηλή ισχύ εκπομπής από τους χρήστες του. Οι HUEs είναι συνήθως κοντά στο HeNB και η ισχύς εκπομπής τους είναι τόση ώστε να μη προκαλούν παρεμβολές στο MeNB. Στην περίπτωση κυψελών ελεύθερης πρόσβασης οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν είτε στο femto είτε στο macro επίπεδο ανάλογα με την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος κάθε φορά. Αυτό επιτρέπει τη χρήση ελάχιστης ισχύος και από το femtocell και από το macrocell, επομένως οι παρεμβολές μειώνονται.

Μια άλλη περίπτωση cross-tier παρεμβολών στο uplink έχουμε όταν ένας MUE εκπέμπει με μεγάλη ισχύ ενώ βρίσκεται κοντά σε ένα femtocell, προκαλώντας έτσι παρεμβολές στο HeNB. Τα femtocells είναι συνήθως απομονωμένα λόγω των τοίχων που περιβάλλουν την περιοχή κάλυψης τους, αλλά και πάλι σε κάποιες περιπτώσεις ένας MUE μπορεί να τους προκαλέσει επαρκείς παρεμβολές.

Οι δύο ίδιοι τύποι παρεμβολών που αναφέρθηκαν για το CDMA μπορούν να συμβούν και στην περίπτωση του OFDMA. Εάν ένα femtocell βρίσκεται κοντά σε ένα MeNB και ένας HUE εκπέμπει με μεγάλη ισχύ σε συγκεκριμένα υπό-κανάλια τότε αυτά δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το MeNB. Θα πρέπει τότε να περιοριστεί η ισχύς εκπομπής του HUE και να τεθεί ένα όριο στη μέγιστη τιμή της. Στη δεύτερη περίπτωση παρεμβολών, όπου ένας MUE εκπέμπει με υψηλή ισχύ επειδή βρίσκεται μακριά από το MeNB, πρέπει να εκχωρηθούν διαφορετικά υπό-κανάλια στο femtocell για να αποφευχθούν οι παρεμβολές.

Σε ότι αφορά το downlink οι cross-tier παρεμβολές προκαλούνται από ένα HeNB σε ένα κοντινό MUE. Για κυψέλες κλειστής πρόσβασης, η περιοχή γύρω από το femtocell μετατρέπεται σε νεκρή ζώνη για το MUE. Στην περίπτωση ενός συστήματος CDMA λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών είναι αναγκαίος ένας προσαρμοστικός έλεγχος της ισχύος, που θα παρέχει στους HeNBs μια ποικιλία επιλογών και θα περιορίζει τις παρεμβολές. Εάν το femtocell βρίσκεται κοντά στο MeNB, το μέγεθος του θα συρρικνωθεί λόγω των παρεμβολών από το MeNB. Σε αυτή την περίπτωση οι HUEs θα έχουν επαρκή κάλυψη μόνο αν βρίσκονται πολύ κοντά στο HeNB. Θεωρώντας έναν HUE δίπλα στο παράθυρο ενός σπιτιού στο οποίο έχει εγκατασταθεί ένας HeNB, είναι πιο πιθανό ο UE να συνδεθεί στο MeNB παρά στο HeNB.

Στην περίπτωση των OFDMA femtocells, η διαχείριση των παρεμβολών στο downlink εξαρτάται κυρίως από την εκχώρηση των υπό-καναλιών. Αν οι MUE χρησιμοποιούν διαφορετικό σύνολο υπό-καναλιών από το HeNB τότε δε θα δεχτούν παρεμβολές.

3.3 Τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών

3.3.1 Εξάλειψη παρεμβολών

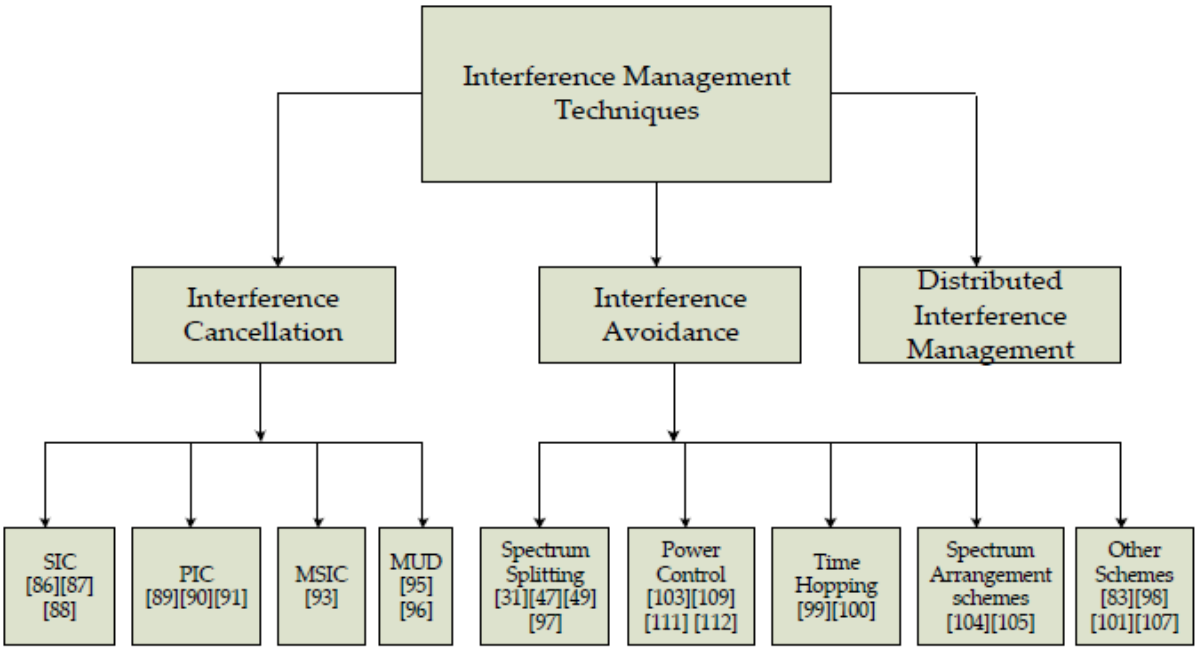
Οι τεχνικές αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν κάποια αποκωδικοποιημένη πληροφορία μαζί με κάποιες μετρήσεις στο κανάλι προκειμένου να εξαλείψουν τις παρεμβολές από το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη. Οι δύο κλασικές τεχνικές εξάλειψης παρεμβολών που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα είναι η Διαδοχική (Successive interference cancelation – SIC) και η Παράλληλη εξάλειψη παρεμβολών (Parallel interference cancelation – PIC).

Η τεχνική PIC ανιχνεύει όλους τους χρήστες ταυτόχρονα. Η αρχική αυτή εκτίμηση χρησιμοποιείται για την εξάλειψη των παρεμβολών στο κοντινό μέλλον, στη συνέχεια η παράλληλη ανίχνευση επαναλαμβάνεται και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται σε πολλά στάδια. Η τεχνική PIC είναι επίσης γνωστή ως τεχνική εξάλειψης παρεμβολών σε πολλαπλά στάδια (multistage interference cancellation). Από την άλλη η τεχνική SIC ανιχνεύει ένα χρήστη ανά στάδιο. Αρχικά ανιχνεύεται το ισχυρότερο λαμβανόμενο σήμα, στη συνέχεια το αμέσως ισχυρότερο και ούτω καθεξής. Η τεχνική PIC μειώνει την καθυστέρηση αλλά αυξάνει τη συνολική πολυπλοκότητα καθώς πρέπει να ανιχνευτούν παράλληλα N χρήστες και υπάρχουν P στάδια εξάλειψης. Η καθυστέρηση είναι ανάλογη του αριθμού P, που είναι πολύ μικρότερος από την τιμή του N για τα κυψελωτά δίκτυα, ενώ η πολυπλοκότητα είναι ανάλογη του γινομένου PN. Στην τεχνική SIC, η πολυπλοκότητα και η καθυστέρηση είναι ανάλογες του N και η καθυστέρηση μπορεί να είναι τεράστια αν υπάρχουν πολλοί χρήστες με δεδομένα πραγματικού χρόνου. Μια βελτιωμένη τεχνική αποτελεί ο συνδυασμός των δύο τεχνικών, δηλαδή η μέθοδος SIC πολλαπλών σταδίων. (Multistage SIC). Σε αυτή τη μέθοδο μια ομάδα χρηστών

ανιχνεύεται παράλληλα, οι αθροιστικές παρεμβολές τους αφαιρούνται από το σύνθετο λαμβανόμενο σήμα και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η πλειοψηφία των τεχνικών εξάλειψης παρεμβολών απαιτούν γνώση των χαρακτηριστικών του σήματος παρεμβολής και συστοιχίες κεραιών στο δέκτη, οπότε είναι περισσότερο κατάλληλες για χρήση από τους σταθμούς βάσης και γι αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως για διαχείριση παρεμβολών στο uplink.

Εκτός από τις τρεις προαναφερθείσες τεχνικές έχει προταθεί και η μέθοδος ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών (Multiuser detection-MUD) η οποία λειτουργεί σύμφωνα με την ίδια αρχή και προσδιορίζει την ταυτότητα κάθε χρήστη. Επιλέγει το πιο πιθανό σήμα από K χρήστες με βάση τις παρατηρήσεις της και τις πληροφορίες για την κατάσταση του καναλιού. Είναι κατάλληλη για συστήματα CDMA, όπου κάθε χρήστης έχει το δικό του κώδικα και κυματομορφή, βοηθάει στην ανίχνευση των διαφόρων CDMA χρηστών και όλοι οι χρήστες επωφελούνται από τη κοινή ανίχνευση. Οι συνηθισμένοι τύποι ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπιστούν οι παρεμβολές πολλαπλών χρηστών στα CDMA κανάλια είναι ο ανιχνευτής αποσυσχέτισης (decorrelating detector) και οι ανιχνευτές ελάχιστου γραμμικού μέσου τετραγωνικού σφάλματος (linear minimum mean square error – MMSE). Αυτοί προϋποθέτουν προηγούμενη γνώση για το σύστημα όπως κυματομορφές και λαμβανόμενα πλάτη ή την παροχή κάποιων δεδομένων εκπαίδευσης (training data). Επειδή οι αλγόριθμοι αυτοί μπορεί να είναι πολύπλοκοι και δύσκολα εφαρμόσιμοι, χρησιμοποιούνται συνήθως βελτιωμένες παραλλαγές τους.



Σχήμα 21: Τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών [9]

3.3.2 Αποφυγή παρεμβολών

Λόγω του δυναμικού χαρακτήρα που παρουσιάζει η κατανομή των femtocells, είναι δύσκολη η διαχείριση τους από ένα συγκεντρωτικό controller καθώς στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να επιτευχθεί κυψελοειδής σχεδιασμός (cell planning). Είναι συνεπώς προτιμότερο να προστεθεί ευφυΐα στο HeNB, που θα του επιτρέψει να αυτό-οργανωθεί και να αντιμετωπίσει τις παρεμβολές χωρίς κάποιο συγκεντρωτικό controller. Ανάλογα με την τοποθεσία και το περιβάλλον τους, τα femtocells θα αντιμετωπίζουν διαφορετικές παρεμβολές χωρίς καμία γνώση του γενικού δικτύου και ως εκ τούτου είναι σημαντικό να υπάρχουν κατανεμημένες τεχνικές αυτό-οργάνωσης και βελτιστοποίησης. Ο HeNB θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τις περισσότερες από τις καταστάσεις

αυτές και να βεβαιωθεί ότι ο χρήστης απολαμβάνει καλή ποιότητα των υπηρεσιών των femtocells. Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται τα πιο πρόσφατα προτεινόμενα συστήματα αποφυγής παρεμβολών. Αρχικά αναφέρονται οι γενικές τεχνικές αποφυγής παρεμβολών και στη συνέχεια οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες τεχνολογίες φυσικού επιπέδου (CDMA και OFDMA). Τέλος περιγράφονται κάποιες κατανεμημένες τεχνικές βελτιστοποίησης.

Οι κυριότεροι τύποι παρεμβολών, όπως αναλύθηκε παραπάνω, είναι οι co-tier και cross-tier παρεμβολές. Για την αντιμετώπιση των cross-tier παρεμβολών, αρχικά προτάθηκε η διαίρεση του φάσματος σε δύο τμήματα. Ένα τμήμα εκχωρείται για χρήση από τους MUEs και το άλλο τμήμα χρησιμοποιείται από το femtocell. Με αυτό τον τρόπο θα πρέπει να αντιμετωπιστούν τελικά μόνο οι co-tier παρεμβολές. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους και της σπανιότητας του φάσματος, η τεχνική αυτή θα οδηγήσει σε μειωμένη αποτελεσματικότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η κατανομή των femtocells είναι πυκνή και οι cross-tier παρεμβολές είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν, προτείνεται η χρήση ξεχωριστού τμήματος του φάσματος για τα femtocells. Στη περίπτωση ενός συστήματος OFDMA κατανέμονται ξεχωριστά υποκανάλια στα femtocells προκειμένου να περιοριστούν οι cross-tier παρεμβολές. Σύμφωνα με άλλη προσέγγιση, προτείνεται ένα όριο στο μέγιστο αριθμό HUEs στο macrocell. Δεδομένου όμως των ιδιοτήτων των HeNBs ως plug and play συσκευές, είναι δυνατό να υπάρξει ένας οποιοσδήποτε αριθμός από femtocells σε ένα macrocell και είναι δύσκολο να γνωρίζει κανείς τον ακριβή τους αριθμό σε μια δεδομένη στιγμή, ως εκ τούτου η προσέγγιση αυτή φαίνεται ανέφικτη.

Μια βασική μέθοδος αποφυγής παρεμβολών, ιδιαίτερα για πυκνή κατανομή των femtocells, είναι ο έλεγχος ισχύος (power control). Εάν η ισχύς εκπομπής ενός femtocell ρυθμίζεται και βελτιστοποιείται, οι outdoor MUEs μπορούν να προστατευθούν επαρκώς. Σε μία τέτοια προτεινόμενη τεχνική, η βελτιστοποίηση του δικτύου των femtocells πραγματοποιείται με περιορισμούς στην περιοχή κάλυψης και στις παρεμβολές που προκαλούνται από το HeNB στους εξωτερικούς MUEs. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης μορφοποιείται ως ένα πρόβλημα ακεραίων και τελικά προκύπτουν η μέγιστη ισχύς μετάδοσης και η συχνότητα λειτουργίας του femtocell. Αυτό οδηγεί σε μια κατάσταση όπου ο HeNB δεν προκαλεί ισχυρές παρεμβολές στους MUEs και ταυτόχρονα το femtocell έχει αρκετή περιοχή κάλυψης. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα και δεν θα ήταν εφικτό να εφαρμοστεί σε ένα HeNB.

Μια πιο απλή τεχνική για τον έλεγχο της ισχύος στα femtocells βασίζεται στην υπόθεση ότι το femtocell λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τους MUEs από τον σταθμό βάσης του macrocell. Έτσι αν διαπιστωθεί ότι ο MUE δέχεται παρεμβολές, το κοντινότερο femtocell μειώνει την ισχύ εκπομπής του.

α) CDMA: Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές αποφυγής παρεμβολών για ασύρματα CDMA συστήματα. Μια βασική τεχνική που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των cross-tier παρεμβολών στο uplink είναι το time hopping. Στα 3G συστήματα, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση Time Hopped CDMA (TH-CDMA). Σε αυτό το σχήμα, η περίοδος μετάδοσης υποδιαιρείται σε μικρά τμήματα κατά τα οποία ένας χρήστης μεταδίδει ενώ στα υπόλοιπα τμήματα παραμένει αδρανής. Εάν δεν υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των δύο επιπέδων του δικτύου, τότε κάθε επίπεδο επιλέγει ανεξάρτητα τις χρονικές περιόδους του. Για παράδειγμα, μια CDMA περίοδος μετάδοσης P μπορεί να διαιρεθεί σε N τμήματα. Κάθε χρήστης επιλέγει ένα από τα τμήματα αυτά (που έχουν μήκος P/N) για τη μετάδοση. Η συγκεκριμένη μέθοδος μειώνει τις co-tier και cross-tier παρεμβολές κατά έναν παράγοντα N.

Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί μια κοινή τεχνική time hopping έχοντας όλους τους χρήστες ενός femtocell να μεταδίδουν στην ίδια χρονοθυρίδα. Καθώς οι συνολικές

παρεμβολές σε ένα CDMA σύστημα μετριάζονται, οι χρήστες του femtocell δεν προκαλούν παρεμβολές ο ένας στον άλλο. Τα γειτονικά femtocells επιλέγουν ανεξάρτητα χρονοθυρίδες, μειώνοντας τις co-tier παρεμβολές κατά ένα παράγοντα N. Λόγω της ανεξάρτητης επιλογής χρονοθυρίδων μειώνονται και οι cross-tier παρεμβολές στο HeNB στο uplink.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα femtocells στα άκρα ενός macrocell μπορεί να δεχτούν παρεμβολές στο uplink εξαιτίας της υψηλής ισχύος με την οποία μεταδίδουν οι κοντινοί MUEs. Ομοίως, ένα femtocell που λειτουργεί σε κατάσταση κλειστής πρόσβασης μπορεί να προκαλέσει σοβαρές παρεμβολές σε ένα κοντινό MUE. Μια σχετική μελέτη δείχνει ότι ένας HeNB με σταθερή ισχύ εκπομπής μπορεί να προκαλέσει ισχυρή παρεμβολή στον MUE. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενός cell edge σεναρίου σε ένα σύστημα FDD WCDMA έδειξαν νεκρές ζώνες με μέγεθος ακτίνας 30 μέτρα για την περίπτωση που femtocells και macrocells χρησιμοποιούν κοινά κανάλια. Το μέγεθος αυτών των νεκρών ζωνών μειώθηκε στα 5 μέτρα, όταν οι carriers διαχωρίστηκαν ανά 5MHz ενώ για μικρότερο διαχωρισμό, οι παρεμβολές και το μέγεθος των νεκρών ζωνών αυξάνονται. Στα πλαίσια αυτού του σεναρίου προτάθηκε μια τεχνική ρύθμισης ισχύος για τη μείωση των cross-tier παρεμβολών, κατά την οποία ο HeNB προσαρμόζει την ισχύ του παρατηρώντας την τιμή της ισχύος RSCP (Received Signal Code Power) στο γειτονικό κανάλι.

Για την περίπτωση ενός MUE που προκαλεί παρεμβολές σε ένα HeNB στα άκρα του macrocell, μια λύση για τον περιορισμό των cross-tier παρεμβολών μπορεί να είναι η χρήση κεραιών πολλαπλών τομέων από το HeNB. Εάν χρησιμοποιηθεί μια κεραία S τομέων, οι cross-tier παρεμβολές μειώνονται κατά ένα παράγοντα S. Παράλληλα όμως αυξάνεται το συνολικό κόστος και η πολυπλοκότητα του HeNB καθιστώντας το λιγότερο λειτουργικό για εγκατάσταση ευρείας κλίμακας.

Σημαντικό ρόλο στην αποφυγή παρεμβολών σε συστήματα CDMA έχει και ο έλεγχος ισχύος. Οι δύο κύριες τεχνικές ελέγχου ισχύος που έχουν προταθεί για τα femtocells είναι ο έλεγχος ισχύος ανοικτού και κλειστού βρόχου. Στον έλεγχο ισχύος ανοικτού βρόχου, ένας HUE υπολογίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής εκτιμώντας τις cross-tier παρεμβολές στο MeNB. Έπειτα ο HUE προσαρμόζει την ισχύ του με τέτοιο τρόπο ώστε οι παρεμβολές στο MBS να είναι μικρότερες από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Στον ελέγχο ισχύος κλειστού βρόχου οι HUEs ρυθμίζουν τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους με βάση δύο στοιχεία. Αρχικά υπολογίζουν τις πρόσθετες cross-tier παρεμβολές στο MBS λόγω του HUE και έπειτα λαμβάνουν υπόψη το επίπεδο του θορύβου και των παρεμβολών (NI) στο MBS. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από το MBS ο οποίος στη συνέχεια ενημερώνει το HeNB μέσω του backhaul δικτύου και αυτό με τη σειρά του μεταδίδει την τιμή στους HUEs. Ο κλειστός βρόχος ελέγχου ισχύος παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από τον ανοικτό βρόχο.

Μια άλλη τεχνική που έχει προταθεί για την αντιμετώπιση των παρεμβολών κοινού καναλιού στο downlink, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που συνδυάζει έλεγχο ισχύος, διαχείριση καναλιού και έλεγχο αποδοχής. Αυτός ο αλγόριθμος δίνει μεγαλύτερη προτεραιότητα στους MUEs και παρέχει κατανεμημένες και συγκεντρωτικές λύσεις ελέγχου ισχύος.

β) OFDMA: Σε σύγκριση με το σύστημα CDMA, το OFDMA παρέχει μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό τεχνικών αποφυγής παρεμβολών. Το OFDMA femtocell πρέπει να έχει γνώση του ράδιο-περιβάλλοντος, ώστε ο HeNB να έχει πιο λεπτομερείς αναφορές μετρήσεων από τους χρήστες και ως εκ τούτου να εκχωρεί τα υπό-κανάλια με πιο έξυπνο τρόπο. Για την αντιμετώπιση των cross-tier παρεμβολών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια προσέγγιση αφιερωμένου φάσματος (dedicated spectrum) σύμφωνα με την οποία το φάσμα χωρίζεται σε δύο κύρια τμήματα. Ένα τμήμα θα είναι

αφιερωμένο σε λειτουργίες του macrocell, ενώ το άλλο σε αυτές του femtocell. Ωστόσο, μπορεί και πάλι να υπάρχουν παρεμβολές ICI (Inter Carrier Interference) και MAI (Multiple Access Interference), λόγω της έλλειψης συγχρονισμού. Αυτό το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο σοβαρό σε περίπτωση πυκνής ανάπτυξης των femtocells. Προκειμένου να υπάρξει ακριβής συγχρονισμός, κάθε HeNB υπολογίζει πρώτα την απόσταση του από το MBS. Εάν ο MBS βρίσκεται σε απόσταση S από το HeNB, ο HeNB καθυστερεί τη μετάδοση του κατά S/C σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης του MeNB, όπου C είναι η ταχύτητα του φωτός. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για σχετικά ακριβή συγχρονισμό και οδηγεί στην αποφυγή ICI ή MAI παρεμβολών. Συνήθως πάντως οι operators προτιμούν να χρησιμοποιούν ίδιο τμήμα του φάσματος για τα femtocells, καθώς αυτή είναι μια πιο αποτελεσματική χρήση του ακριβού αυτού πόρου.

Ανάλογα με τον τρόπο ανάπτυξης των femtocells (κοινά κανάλια με τα macrocells / αποκλειστικό κανάλι) υπάρχει πάντα μια αμοιβαία αντιστάθμιση μεταξύ της αξιοποίησης του φάσματος και των παρεμβολών κοινού καναλιού. Για να διατηρηθεί μια ισορροπία, σε συστήματα LTE η ανάπτυξη των femtocells μπορεί να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ορισμένα κανάλια να προορίζονται για τη χρήση του macrocell, ενώ άλλα κανάλια να διαμοιράζονται μεταξύ macrocells και femtocells. Για να αποφευχθούν οι cross-tier παρεμβολές σε μια τέτοια περίπτωση, προτείνεται μια τεχνική ρύθμισης του φάσματος υποθέτοντας ότι το macrocell γνωρίζει το τμήμα του φάσματος που είναι αφιερωμένο για χρήση του macrocell και το τμήμα που μοιράζεται με τα femtocells. Έχοντας αυτή τη γνώση, το macrocell στη συνέχεια αναπτύσσει μια βάση δεδομένων ή «δεξαμενή παρεμβολών». Αυτή η βάση αποτελείται από MUEs που μπορεί να δεχτούν παρεμβολές κοινού καναλιού από τα femtocells. Σε αυτούς τους MUEs εκχωρείται το τμήμα του φάσματος το οποίο είναι αφιερωμένο στο macrocell. Στους υπόλοιπους MUEs μπορεί να εκχωρηθεί οποιοδήποτε τμήμα του φάσματος καθώς δεν υπάρχει απειλή παρεμβολών. Σύμφωνα με μια παρόμοια τεχνική που βασίζεται στη κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (Fractional Frequency Reuse-FFR) εκχωρούνται στα femtocells μόνο εκείνα τα υπό-κανάλια που δεν χρησιμοποιούνται από το macrocell. Με αυτή τη μέθοδο αποφεύγονται οι cross-tier παρεμβολές που θα μπορούσαν να προκύψουν εξαιτίας της ύπαρξης κοντινών MUEs.

Η κατανομή των πόρων είναι πολύ σημαντική σε OFDMA συστήματα και έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές, όπως είναι η μέθοδος εξυπηρέτησης εκ περιτροπής (Round Robin-RR) και η μέθοδος αναλογικής δικαιοσύνης (Proportional Fair-PR). Στη τεχνική RR, σε κάθε MUE κατανέμεται η ίδια χρονοθυρίδα. Οι χρήστες είναι τοποθετημένοι σε ένα είδος ουράς και η χρονοθυρίδα επιστρέφει στην αφετηρία της, αφού περάσει από όλη την ουρά των χρηστών. Στη τεχνική PR, δίνεται σειρά προτεραιότητας στους χρήστες με βάση τις ανάγκες τους, οπότε ο χρήστης με ανάγκη για υψηλότερο ρυθμό δεδομένων θα επιλεγεί πρώτος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα συστήματα PR παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις από τα συστήματα RR. Από την άλλη, είναι επιθυμητό να εκχωρούνται στα femtocells υπό-κανάλια που μειώνουν τις παρεμβολές και αυξάνουν τη φασματική απόδοση της περιοχής κάλυψης (Area Spectral Efficiency – ASE).

Ένα femtocell που έχει γνωστικές ικανότητες μπορεί να αποφύγει τις παρεμβολές χρησιμοποιώντας τη λειτουργία ανίχνευσης φάσματος. Το femtocell μπορεί να ανιχνεύσει το ράδιο-περιβάλλον και να αναγνωρίσει μια υπογραφή παρεμβολής (interference signature). Αυτή η υπογραφή παρεμβολής επιτρέπει σε ένα femtocell να επιλέξει συγκεκριμένα κανάλια που δεν αντιμετωπίζουν παρεμβολές. Η βασική ιδέα εδώ είναι η επαναχρησιμοποίηση κάθε διαθέσιμου καναλιού που δεν θα προκαλέσει παρεμβολές στα macrocells ή σε κοντινά femtocells. Το μέγεθος της επαναχρησιμοποίησης των καναλιών ποικίλλει σε διαφορετικά femtocells, ανάλογα με την τοποθεσία και το περιβάλλον τους. Ωστόσο αυτό απαιτεί από το HeNB να έχει τη

δυνατότητα έξυπνης αντίληψης του ράδιο- περιβάλλοντος και ακριβής αναγνώρισης της υπογραφής παρεμβολών. Μια παρόμοια τεχνική αποφυγής cross-tier παρεμβολών βασίζεται στην κατάσταση κλειστής πρόσβασης και αναγκάζει το femtocell να χρησιμοποιεί μόνο RBs που χρησιμοποιούνται από MUEs που βρίσκονται πολύ μακριά από το femtocell. Αξιοποιούνται επίσης τα αποτελέσματα ανίχνευσης του φάσματος και πληροφορίες χρονοπρογραμματισμού που λαμβάνονται από το MBS μέσω του backhaul δικτύου

Μία άλλη μέθοδος για δυναμική πρόσβαση φάσματος (Dynamic Spectrum Access-DSA) και κατανομής ισχύος (Power Allocation-PA) θεωρεί τα femtocells ως δευτερεύοντες χρήστες όπως στην περίπτωση των γνωστικών femtocells και παίρνει μια απλή περίπτωση όπου υπάρχουν 3 MUEs (πρωτεύοντες χρήστες) που καταλαμβάνουν τα 3 διαθέσιμα κανάλια. Τα femtocells έχουν από έναν χρήστη το καθένα και είναι τυχαία κατανεμημένα και πολλά σε αριθμό. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και σε κάθε femtocell εκχωρείται ένα από τα 3 κανάλια που χρησιμοποιούνται επίσης από τους πρωτεύοντες χρήστες. Η DSA μέθοδος βελτιστοποιεί τα κανάλια με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο το femtocell που έχει επαρκή απόσταση από το πρωτεύον χρήστη να επαναχρησιμοποιήσει τον ίδιο κανάλι. Προκύπτει έτσι μια διαίρεση σε τρεις ζώνες, όπου κάθε ζώνη χρησιμοποιεί το κανάλι ενός πρωτογενούς χρήστη που βρίσκεται σε επαρκή απόσταση από τη ζώνη. Η κατανομή ισχύος βασίζεται επίσης στο γεγονός ότι κάθε femtocell ρυθμίζει την ισχύ του κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μέγιστη παρεμβολή στα γύρω femtocells να μην ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Μια άλλη τεχνική συντονισμού παρεμβολών χρησιμοποιεί τη κατανομή πόρων σε πολύ-κυψελωτά συστήματα μαζί με δυναμικό συντονισμό μεταξύ των κυψελών, επιτυγχάνοντας καλύτερη απόδοση χωρίς καμία απώλεια στον τομέα του throughput. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε femtocells ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρεμβολές από κοντινούς MeNBs.

3.3.3 Κατανεμημένες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών

Τα femtocells έχουν περιορισμένη γνώση για το γενικό δίκτυο των femtocells, καθιστώντας έτσι τις συγκεντρωτικές τεχνικές δύσκολα εφαρμόσιμες. Η παροχή επαρκούς πληροφορίας στα femtocells είναι δυνατή μέσω του δικτύου backhaul, αλλά κάτι τέτοιο θα προκαλέσει μεγάλη συμφόρηση στο δίκτυο. Επιπλέον, καθώς ο αριθμός των femtocell μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, καθίσταται ανέφικτο για τον operator να παρέχει πολλές πληροφορίες στο femtocell μέσω του backhaul δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, οι κατανεμημένες τεχνικές είναι πολύ σημαντικές.

Ένας κατανεμημένος αλγόριθμος ελέγχου ισχύος που έχει προταθεί για femtocells κλειστής πρόσβασης, βασίζεται σε μια σχέση η οποία, δεδομένου ενός συνόλου από εφικτές τιμές SINR για femtocells, παρέχει τις μεγαλύτερες από αυτές τις δυνατές τιμές. Έχει προταθεί επίσης μια τεχνική που βασίζεται στις τιμές του SINR στο HeNB και μειώνει σταδιακά την ισχύ των femtocells που προκαλούν ισχυρές παρεμβολές. Σε μια άλλη κατανεμημένη και δυναμική τεχνική αποφυγής παρεμβολών μεταξύ των κυψελών (Inter Cell Interference), προτείνεται ένας αλγόριθμος που εισάγει την έννοια της σύνδεσης ICI και του προγραμματισμού 2 επιπέδων βάσει των οποίων είναι σε θέση να εναρμονίσει προσαρμοστικά όλους τους σταθμούς βάσης με τους χρήστες. Σύμφωνα με άλλη μέθοδο, τα femtocells είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσουν το κανάλι ελέγχου του BS και να πάρουν αποφάσεις για τη μετάδοση με βάση το σχεδιασμό και την κατανομή των πόρων του macrocell.

Οι κατανεμημένες τεχνικές ελέγχου ισχύος είναι πολύ σημαντικές και για τα HSDPA femtocells. Σε μια προτεινόμενη μέθοδο, η ισχύς εκπομπής ενός femtocell ρυθμίζεται βάσει της θέσης του, ενώ σε μια προσαρμοστική μέθοδο ελέγχου ισχύος, υπολογίζεται από το δίκτυο ένας ρυθμός δεδομένων ως στόχος και η ισχύς εκπομπής ρυθμίζεται έτσι

ώστε να επιτευχθεί αυτός ο ρυθμός. Μια άλλη τεχνική αντιμετωπίζει το πρόβλημα ελέγχου της ισχύος σε αποκεντρωμένα OFDMA δίκτυα femtocells προτείνοντας έναν αλγόριθμο κατανεμημένου ελέγχου ισχύος και προγραμματισμού. Ο αλγόριθμος είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί το φαινόμενο διαφορικότητας πολλαπλών χρηστών (multiuser diversity) προσδιορίζοντας ταυτόχρονα το επίπεδο ισχύος σε κάθε υπό-κανάλι.

Σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των femtocell δικτύων έχει η βελτιστοποίηση της ράδιο-κάλυψης. Λόγω της έλλειψης κεντρικού ελέγχου στα femtocell δίκτυα, η ανάπτυξη ενός κατανεμημένου αλγορίθμου βελτιστοποίησης της κάλυψης μπορεί να είναι δύσκολη. Ένας τέτοιος προτεινόμενος αλγόριθμος τρέχει ξεχωριστά για κάθε HeNB και προσπαθεί να επιτύχει εξισορρόπηση του φορτίου των χρηστών και ελαχιστοποίηση τυχόν νεκρών ζωνών και επικαλύψεων. Αυτή η τεχνική ρυθμίζει τη ισχύ εκπομπής του femtocell και παρέχει βελτίωση 18% στο φορτίο των χρηστών σε σύγκριση με τις τεχνικές σταθερής ισχύος. Σε μια άλλη μέθοδο ελαχιστοποίησης της ισχύος για HSDPA δίκτυα femtocell, η ισχύς ρυθμίζεται με βάση τις στιγμιαίες απαιτήσεις κάλυψης. Δημιουργείται ένα γενικευμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης και παρέχεται μια βέλτιστη αναλυτική λύση για κάθε femtocell. Παρόμοια έχει προταθεί μια τεχνική προσαρμογής της κάλυψης για femtocells όπου οι πληροφορίες για τη κινητικότητα των indoor χρηστών χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της κάλυψης μειώνοντας έτσι τη σηματοδοσία στον πυρήνα του δικτύου. Σε ένα άλλο σχήμα ρύθμισης ισχύος με βάση τη θέση των χρηστών, χρησιμοποιούνται πληροφορίες για τη κινητικότητα των outdoor χρηστών προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η περιοχή κάλυψης, ενώ κάτι παρόμοιο γίνεται και σε άλλη μέθοδο όπου το femtocell αποκτά πρώτα κάποιες πληροφορίες σχετικά με το ράδιο-περιβάλλον και στη συνέχεια τις χρησιμοποιεί για να επιτύχει αυτό-διαμόρφωση και αυτό-βελτιστοποίηση. Χρησιμοποιείται μία χαμηλού κόστους κεραία πολλαπλών στοιχείων μαζί με μία σειρά από αντίστοιχους αλγόριθμους που βασίζονται σε χαμηλής πολυπλοκότητας μορφοποίηση δέσμης και ρύθμιση ισχύος.

Η θεωρία παιγνίων έχει χρησιμοποιηθεί για κατανομή δικτυακών πόρων και χρησιμοποιείται και στα femtocells για τεχνικές ρύθμισης της ισχύος. Μια τέτοια τεχνική, χρησιμοποιεί έναν αποκεντρωμένο αλγόριθμο ελέγχου ισχύος που βασίζεται σε ένα μη συνεργατικό μοντέλο παιχνιδιού και για την υλοποίηση του χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες ενός supermodular παιχνιδιού. Αποδεικνύεται τελικά ότι η ισχύς των femtocells με λιγότερο φορτίο χρηστών, μειώνεται περισσότερο σε σύγκριση με τα femtocells με μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. Σύμφωνα με έναν άλλο παρόμοιο αλγόριθμο για τη διαχείριση παρεμβολών σε OFDM femtocells, τα femtocells αυτό-οργανώνονται προκειμένου να βρουν την πλέον κατάλληλη στρατηγική πρόσβασης. Οι HeNBs προσπαθούν να ανακαλύψουν μια βέλτιστη στρατηγική για την κατανομή των πόρων υπό τον περιορισμό της εισαγωγής περιορισμένων παρεμβολών στο MUE.

Τέλος ένας προτεινόμενος κατανεμημένος αλγόριθμος αντιμετωπίζει το πρόβλημα των co-tier παρεμβολών. Χρησιμοποιείται η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (FFR) για να ρυθμίσει το κλασματικό παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων με τη βοήθεια της θέσης του femtocell και της πληροφορίας για τις παρεμβολές. Τα femtocells ταξινομούνται σε διαφορετικές ομάδες, στις οποίες εκχωρούνται τα υπο-κανάλια για να αποφευχθούν παρεμβολές. Η κατανομή της ισχύος εκπομπής λαμβάνει χώρα μετά την κατανομή των επιμέρους καναλιών και γίνεται με κατανεμημένο τρόπο βάσει της πληροφορίας για την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength Information-RSSI) [9].

4. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προτυποποιημένη από την 3GPP (3rd Generation Partnership Project) μέθοδος ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των παρεμβολών σε ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη.

4.1 Power Control

Ο τύπος ελέγχου ισχύος στο uplink περιέχει δύο συνιστώσες ανοικτού και κλειστού βρόχου αντίστοιχα. Στον ανοικτό βρόχο ελέγχου ισχύος (OLPC), η ισχύς εκπομπής του UE ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας παραμέτρους και μετρήσεις που λαμβάνονται από σήματα που αποστέλλονται από το σταθμό βάσης. Αντισταθμίζονται έτσι οι αργές διακυμάνσεις του λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή οι απώλειες διάδοσης και οι απώλειες λόγω σκίασης. Από την άλλη, η συνιστώσα του κλειστού βρόχου βελτιώνει την απόδοση του power control αντισταθμίζοντας τις γρήγορες διακυμάνσεις στο κανάλι. Στο κλειστό βρόχο ελέγχου ισχύος (CLPC), υπάρχει ανάδραση μεταξύ σταθμού βάσης και UE, δηλαδή ο σταθμός βάσης στέλνει δεδομένα στο χρήστη τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να διορθωθεί η τιμή της ισχύος εκπομπής σε σχέση με την τιμή που ορίστηκε από τον ανοικτό βρόχο.

Πιο συγκριμένα στον ανοικτό βρόχο ελέγχου ισχύος τίθεται η αρχική τιμή της ισχύος εκπομπής του UE, χρησιμοποιώντας τις εκτιμώμενες απώλειες διαδρομής μεταξύ UE και eNB, έναν συντελεστή α αντιστάθμισης των απωλειών διάδοσης και την τιμή P_0 της ενέργειας που περιέχεται σε ένα resource block. Οι 2 τελευταίες τιμές χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του μέσου λαμβανόμενου PSD, άρα και του SINR. Συγκεκριμένα η τιμή P_0 ελέγχει το μέσο λαμβανόμενο SINR και ο συντελεστής α τη διακύμανση του SINR.

Στον κλειστό βρόχο ελέγχου ισχύος, ο σταθμός βάσης στο uplink υπολογίζει το SINR του λαμβανόμενου σήματος, και το συγκρίνει με την επιθυμητή τιμή του SINR που έχει τεθεί ως στόχος (SINR target). Όταν η τιμή του λαμβανόμενου SINR είναι μικρότερη από την τιμή στόχο, μεταδίδεται στο UE μία εντολή ελέγχου ισχύος εκπομπής (Transmit Power Control command) που ζητάει αύξηση της ισχύος εκπομπής. Διαφορετικά η εντολή TPC θα ζητήσει τη μείωση της ισχύος. Υπάρχουν 2 τύποι TPC εντολών:

• Απόλυτη: όπου χρησιμοποιείται ως αναφορά η αρχική ισχύς εκπομπής που τέθηκε στον ανοικτό βρόχο.

• Σωρευτική: όπου χρησιμοποιείται ως αναφορά η πιο πρόσφατη τιμή της ισχύος εκπομπής.

Γενικά ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου λειτουργεί γύρω από ένα σημείο λειτουργίας ανοικτού βρόχου. Μέσω του ανοικτού βρόχου τίθεται η τιμή της αρχικής ισχύος, η οποία στη συνέχεια ρυθμίζεται περαιτέρω με τη χρήση μιας τιμής διόρθωσης (correction value) κλειστού βρόχου [11].

4.1.1 Physical uplink shared channel

Εάν ο UE μεταδίδει το PUSCH στην τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης c χωρίς να μεταδίδει ταυτόχρονα το PUCCH, τότε η ισχύς εκπομπής του UE στο subframe i δίνεται από τον τύπο:

$$P_{PUSCH,c}(i) = min\left\{\begin{matrix} P_{CMAX,c}(i), \\ 10\log_{10}\left(M_{PUSCH,c}(i)\right) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j)\cdot PL_c + \Delta_{TF,c}(i) + f_c(i) \end{matrix}\right\}$$

Εάν ο UE μεταδίδει ταυτόχρονα το PUSCH και το PUCCH στην τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης c, τότε η ισχύς εκπομπής του UE στο subframe i δίνεται από τον τύπο:

$$P_{PUSCH,c}(i) = min\begin{Bmatrix} 10\log_{10}\left(\hat{P}_{CMAX,c}(i) - \hat{P}_{PUCCH}(i)\right), \\ 10\log_{10}\left(M_{PUSCH,c}(i)\right) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j)\cdot PL_c + \Delta_{TF,c}(i) + f_c(i) \end{Bmatrix}$$

Εάν ο UE δε μεταδίδει το PUSCH στην τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης c τότε για τη λειτουργία της συσσώρευσης της διαταγής ελέγχου μεταδιδόμενης ισχύος (Transmit Power Control command), ο UE θεωρεί ότι η ισχύς εκπομπής του στο subframe i δίνεται από τον τύπο:

$$P_{PUSCH,c}(i) = min\begin{Bmatrix} P_{CMAX,c}(i), \\ P_{O_PUSCH,c}(1) + a_c(1)\cdot PL_c + f_c(i) \end{Bmatrix}$$

Όπου:

$P_{CMAX,c}(i)$ η μέγιστη ισχύς εκπομπής που επιτρέπεται από το σύστημα μετάδοσης για το uplink και εξαρτάται από το UE.

$\hat{P}_{CMAX,c}(i)$ η γραμμική τιμή της $P_{CMAX,c}(i)$.

$\hat{P}_{PUCCH}(i)$ η γραμμική τιμή της ισχύος εκπομπής του UE στο PUCCH, $P_{PUCCH}(i)$

$M_{PUSCH,c}(i)$ ο αριθμός των Resource Blocks που έχουν εκχωρηθεί σε ένα χρήστη στην τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης c για το subframe i

$P_{O_PUSCH,c}(j)$ η ισχύς που περιέχεται σε ένα resource block

$a_c(j)$ μια παράμετρος αντιστάθμισης των απωλειών διαδρομής που παίρνει τιμές στο διάστημα [0,1]

PL_c η εκτίμηση των απωλειών διαδρομης στο downlink όπως υπολογίζεται από το UE

$\Delta_{TF,c}(i)$ μια παράμετρος η τιμή της οποίας εξαρτάται από το σχήμα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται

$\delta_{PUSCH,c}$ τιμή διόρθωσης ή διαταγή ελέγχου μεταδιδόμενης ισχύος (Transmit Power Control command). Μπορεί να είναι απόλυτη ή σωρευτική.

$f_c(i)$ συνάρτηση που επιτρέπει την επιλογή χρήσης απόλυτης ή σωρευτικής τιμής διόρθωσης $\delta_{PUSCH,c}$

Εάν η συνολική ισχύς εκπομπής του UE υπερβεί τη μέγιστη τιμή συνολικής ισχύος $\hat{P}_{CMAX}(i)$ στο subfame i, τότε ο UE κλιμακώνει την ισχύ εκπομπής $\hat{P}_{PUSCH,c}(i)$ χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή κλίμακας, $w(i)$, έτσι ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη

$$\sum_c w(i)\cdot\hat{P}_{PUSCH,c}(i) \le \left(\hat{P}_{CMAX}(i) - \hat{P}_{PUCCH}(i)\right)$$

Εάν ο UE μεταδίδει το κανάλι PUSCH μαζί με πληροφορίες ελέγχου (Uplink Control Information) στη κυψέλη j, ενώ στις υπόλοιπες κυψέλες μεταδίδει μόνο το PUSCH και η συνολική ισχύς εκπομπής του UE υπερβεί τη μέγιστη τιμή συνολικής ισχύος $\hat{P}_{CMAX}(i)$, τότε ο UE κλιμακώνει την ισχύ εκπομπής $\hat{P}_{PUSCH,c}(i)$ για τις κυψέλες στις οποίες δε μεταδίδεται πληροφορία ελέγχου, έτσι ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη

$$\sum_{c\neq j} w(i)\cdot\hat{P}_{PUSCH,c}(i) \le \left(\hat{P}_{CMAX}(i) - \hat{P}_{PUSCH,j}(i)\right)$$

Εάν ο UE έχει ταυτόχρονες μεταδόσεις των καναλιών PUSCH και PUCCH μαζί με πληροφορίες ελέγχου (Uplink Control Information) στη κυψέλη j, ενώ στις υπόλοιπες κυψέλες μεταδίδει μόνο το PUSCH και η συνολική ισχύς εκπομπής του UE υπερβεί τη μέγιστη τιμή συνολικής ισχύος $\hat{P}_{CMAX}(i)$, τότε η ισχύς εκπομπής του UE για την κυψέλη j δίνεται από τον τύπο

$$\hat{P}_{PUSCH,j}(i) = min\left(\hat{P}_{PUSCH,j}(i), \left(\hat{P}_{CMAX}(i) - \hat{P}_{PUCCH}(i)\right)\right)$$

ενώ ο UE κλιμακώνει την ισχύ εκπομπής $\hat{P}_{PUSCH,c}(i)$ για τις κυψέλες στις οποίες δε μεταδίδεται πληροφορία ελέγχου, έτσι ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη

$$\sum_{c \neq j} w(i) \cdot \hat{P}_{PUSCH,c}(i) \leq \left(\hat{P}_{CMAX}(i) - \hat{P}_{PUCCH}(i) - \hat{P}_{PUSCH,j}(i)\right)$$

4.1.2 Power Headroom

Ορίζονται 2 τύποι περιθωρίου ελέγχου ισχύος (power headroom)

Τύπος 1:

Εάν ο UE μεταδίδει το κανάλι PUSCH χωρίς το PUCCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type1,c}(i) = P_{CMAX,c}(i) - \left\{10\log_{10}\left(M_{PUSCH,c}(i)\right) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j) \cdot PL_c + \Delta_{TF,c}(i) + f_c(i)\right\}$$

Εάν ο UE μεταδίδει το κανάλι PUSCH μαζί με το PUCCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type1,c}(i) = \tilde{P}_{CMAX,c}(i) - \left\{10\log_{10}\left(M_{PUSCH,c}(i)\right) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j) \cdot PL_c + \Delta_{TF,c}(i) + f_c(i)\right\}$$

Εάν ο UE δε μεταδίδει το κανάλι PUSCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type1,c}(i) = \tilde{P}_{CMAX,c}(i) - \left\{P_{O_PUSCH,c}(1) + a_c(1) \cdot PL_c + f_c(i)\right\}$$

Τύπος 2:

Εάν ο UE μεταδίδει το κανάλι PUSCH ταυτόχρονα με το PUCCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type2}(i) = P_{CMAX,c}(i) - 10\log_{10}\left(\begin{array}{c} 10^{\left(10\log_{10}\left(M_{PUSCH,c}(i)\right) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j) \cdot PL_c + \Delta_{TF,c}(i) + f_c(i)\right)/10} \\ + 10^{\left(P_{O_PUCCH,c}(j) + PL_c + h\left(n_{CQI} + n_{HARQ} + n_{SR}\right) + \Delta_{F_PUCCH}(F) + \Delta_{TxD}(F') + g(i)\right)/10} \end{array}\right)$$

Εάν ο UE μεταδίδει το κανάλι PUSCH χωρίς το PUCCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type2}(i) = P_{CMAX,c}(i) - 10\log_{10}\left(\begin{array}{c} 10^{\left(10\log_{10}\left(M_{PUSCH,c}(i)\right) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j) \cdot PL_c + \Delta_{TF,c}(i) + f_c(i)\right)/10} \\ + 10^{\left(P_{O_PUCCH,c}(j) + PL_c + g(i)\right)/10} \end{array}\right)$$

Εάν ο UE μεταδίδει το κανάλι PUCCH χωρίς το PUSCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type2}(i) = P_{CMAX,c}(i) - 10\log_{10}\left(\begin{array}{c} 10^{\left(P_{O_PUSCH,c}(1)+a_c(1)\cdot PL_c+f_c(i)\right)/10} \\ +\,10^{\left(P_{O_PUCCH,c}(j)+PL_c+h\left(n_{CQI}+n_{HARQ}+n_{SR}\right)+\Delta_{F_PUCCH}(F)+\Delta_{TxD}(F')+g(i)\right)/10} \end{array}\right)$$

Εάν ο UE δε μεταδίδει ούτε το κανάλι PUSCH ούτε το PUCCH στο subframe i για την κυψέλη c, τότε το περιθώριο ισχύος δίνεται από τον τύπο

$$PH_{type2}(i) = \tilde{P}_{CMAX,c}(i) - 10\log_{10}\left(\begin{array}{c} 10^{\left(P_{O_PUSCH,c}(1)+a_c(1)\cdot PL_c+f_c(i)\right)/10} \\ +\,10^{\left(P_{O_PUCCH,c}(j)+PL_c+g(i)\right)/10} \end{array}\right)$$

4.1.3 Physical uplink control channel

Η ισχύς εκπομπής του UE για μετάδοση στο PUCCH στο subframe i δίνεται από τον τύπο

$$P_{PUCCH}(i) = min\left\{\begin{array}{c} P_{CMAX,c}(i), \\ P_{O_PUCCH} + PL_c + h\left(n_{CQI} + n_{HARQ} + n_{SR}\right) + \Delta_{F_PUCCH}(F) + \Delta_{TxD}(F') + g(i) \end{array}\right\}$$

Εάν ο UE δε μεταδίδει το PUCCH στην τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης c τότε για τη λειτουργία της συσσώρευσης της διαταγής ελέγχου μεταδιδόμενης ισχύος (Transmit Power Control command), ο UE θεωρεί ότι η ισχύς εκπομπής για τη μετάδοση στο PUCCH στο subframe i δίνεται από τον τύπο:

$$P_{PUCCH}(i) = min\left\{\begin{array}{c} P_{CMAX,c}(i), \\ P_{O_PUCCH} + PL_c + g(i) \end{array}\right\}$$

Όπου:

$P_{CMAX,c}(i)$ η μέγιστη ισχύς εκπομπής που επιτρέπεται από το σύστημα μετάδοσης για το uplink και εξαρτάται από το UE.

P_{O_PUCCH} μια παράμετρος που υπολογίζεται από το άθροισμα των παραμέτρων $P_{O_NOMINAL_PUCCH}$ και $P_{O_UE_PUCCH}$ που παρέχονται από τα ανώτερα επίπεδα

$h\left(n_{CQI} + n_{HARQ} + n_{SR}\right)$ παράμετρος που η τιμή της εξαρτάται από το PUCCH format. n_{CQI} είναι ο αριθμός των bits πληροφορίας της ποιότητας του καναλιού, το $n_{SR} = 1$ εφόσον το subframe i χρησιμοποιείται για scheduling request, n_{HARQ}ο αριθμός των HARQ-ARQ bits που στέλνονται στο subframe i

$\Delta_{TxD}(F')$ παράμετρος που παρέχεται από τα ανώτερα επίπεδα

$\Delta_{F_PUCCH}(F)$ παράμετρος που παρέχεται από τα ανώτερα επίπεδα και αντιστοιχεί σε ένα PUCCH format F

δ_{PUCCH} τιμή διόρθωσης ή διαταγή ελέγχου μεταδιδόμενης ισχύος (Transmit Power Control command).

$g(i)$ συνάρτηση που εκφράζει την τρέχουσα ρύθμιση ελέγχου ισχύος

4.1.4 Sounding Reference Symbol

Η ισχύς εκπομπής του UE για το σήμα αναφοράς ακρόασης (Sounding Reference Symbol) που μεταδίδεται στο subframe i για την κυψέλη c δίνεται από τον τύπο

$$P_{SRS,c}(i) = min\begin{Bmatrix} P_{CMAX,c}(i), \\ P_{SRS_OFFSET,c}(m) + 10\log_{10}(M_{SRS,c}) + P_{O_PUSCH,c}(j) + a_c(j)\cdot PL_c + f_c(i) \end{Bmatrix}$$

Όπου

$P_{CMAX,c}(i)$ η μέγιστη ισχύς εκπομπής που επιτρέπεται από το σύστημα μετάδοσης για το uplink και εξαρτάται από το UE.

$P_{SRS_OFFSET,c}(m)$

$M_{SRS,c}$ ο αριθμός των Resource Blocks που έχουν ανατεθεί σε ένα χρήστη στην τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης c για το subframe i

$P_{O_PUSCH,c}(j)$ η ισχύς που περιέχεται σε ένα resource block

$a_c(j)$ μια παράμετρος αντιστάθμισης των απωλειών διαδρομής που παίρνει τιμές στο διάστημα [0,1]

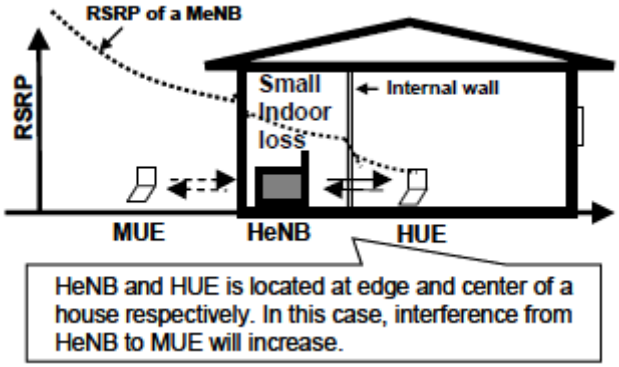
$f_c(i)$ συνάρτηση που εκφράζει την τρέχουσα ρύθμιση ελέγχου ισχύος

Εάν η συνολική ισχύς εκπομπής του UE για το Sounding Reference Symbol ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή συνολικής ισχύος $\hat{P}_{CMAX}(i)$, τότε ο UE κλιμακώνει την ισχύ εκπομπής $\hat{P}_{SRS,c}(i)$ χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή κλίμακας, $w(i)$, έτσι ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη

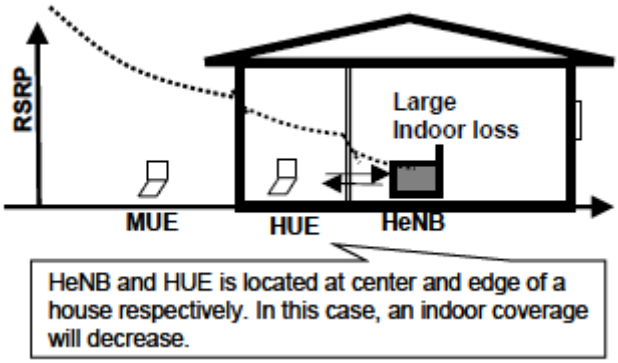
$$\sum_c w(i)\cdot \hat{P}_{SRS,c}(i) \leq \hat{P}_{CMAX}(i)$$

4.2 Βασικές αρχές ελέγχου ισχύος στην κατωφερή ζευξη

Ο HeNB τυπικά ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του εκτιμώντας τις RF συνθήκες στο περιβάλλον των macrocells ώστε να περιοριστούν οι παρεμβολές στο MUE και να διατηρηθεί καλή indoor κάλυψη για τους HUEs. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των συνθηκών RF που εκτιμώνται από το HeNB και εκείνων που αντιμετωπίζουν οι MUEs ή οι HUEs. Ακόμη και σε ένα εσωτερικό περιβάλλον, ο HeNB και οι HUEs μπορεί να καταλήγουν σε εντελώς διαφορετικές μετρήσεις σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως μεταξύ διαφορετικών δωματίων ή διαφορετικών ορόφων. Ένα τέτοιο παρουσιάζεται στα Σχήματα 22 και 23. Στο σχήμα 22 απεικονίζεται ένα σενάριο όπου ένας HeNB και ένας HUE βρίσκονται στο άκρο και το κέντρο του σπιτιού αντίστοιχα ενώ ένας MUE βρίσκεται πολύ κοντά στο σπίτι. Υποθέτουμε ότι το άκρο και το κέντρο του σπιτιού απομονώνονται από ένα εσωτερικό τοίχωμα. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς εκπομπής του HeNB τίθεται σε μια σχετικά υψηλότερη τιμή επειδή το επίπεδο του λαμβανόμενου σήματος από το MenB (RSRP) είναι σχετικά υψηλό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί σημαντικά η παρεμβολή στο MUE και η indoor περιοχή κάλυψης του HeNB να διευρυνθεί άσκοπα. Από την άλλη πλευρά στο σχήμα 23, απεικονίζεται το σενάριο όπου ένας HeNB και ένας HUE βρίσκονται στο κέντρο και στο άκρο του σπιτιού αντίστοιχα ενώ ένας MUE βρίσκεται πολύ κοντά στο σπίτι. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς εκπομπής του HeNB τίθεται σε μία σχετικά χαμηλότερη τιμή επειδή το επίπεδο του σήματος από το MenB είναι σχετικά χαμηλό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η indoor περιοχή κάλυψης του HeNB να μειωθεί σημαντικά, ενώ περιορίζονται οι παρεμβολές στο MUE [12].



Σχήμα 22: Η ρύθμιση ισχύος του HeNB οδηγεί σε αύξηση των παρεμβολών στο MUE [12]



Σχήμα 23: Η ρύθμιση ισχύος του HeNB οδηγεί σε μείωση της περιοχής κάλυψης [12]

Σε αυτές τις 2 περιπτώσεις είναι αναγκαίο για το HeNB να λάβει υπόψη τα αποτελέσματα των μετρήσεων των HUEs ώστε να ρυθμίσει κατάλληλα την ισχύ εκπομπής του. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση κυψελών που χρησιμοποιούν ίδια κανάλια και μπορεί να προσφέρει καλύτερη προστασία στους MUEs, διατηρώντας παράλληλα καλή κάλυψη από το HeNB στους HUEs.

Ο HeNB πρέπει αρχικά να ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του σήματος αναφοράς ή τη μέγιστη ισχύς εκπομπής στο downlink με βάση τις μετρήσεις για το macrocell όπως είναι η ισχύς RSRP. Έπειτα ο HUE πρέπει να μετρήσει το επίπεδο ποιότητας του σήματος αναφοράς από το HeNB όπως είναι οι RSRP ή RSRQ και να αναφέρει την τιμή αυτή στο HeNB μέσω αναφορών μετρήσεων. Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ο HeNB θα βελτιστοποιήσει την ισχύ μετάδοσης έτσι ώστε οι επακόλουθες τιμές των μετρήσεων να είναι κοντά σε μια προκαθορισμένη τιμή-στόχο. Εάν συνδέονται με το HeNB πολλοί HUEs, η ελάχιστη τιμή των μετρήσεων από κάθε HUE θα πρέπει να είναι κοντά στην τιμή στόχο.

Αυτή η μέθοδος βελτιώνει το πρόβλημα που παρουσιάζεται στα Σχήματα 22 και 23. Στο σχήμα 22 το HeNB θα μειώσει την ισχύ εκπομπής του και η παρεμβολή στο MUE θα μειωθεί, επειδή τα αποτελέσματα των μετρήσεων του HUE φανερώνουν καλή ποιότητα και είναι προτιμότερο να μειωθεί η ισχύς μετάδοσης. Στο σχήμα 23 ο HeNB θα αυξήσει την ισχύ εκπομπής του και η περιοχή indoor κάλυψης θα διευρυνθεί, διότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων του HUE δείχνουν κακή ποιότητα και είναι προτιμότερο να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής [12].

4.2.1 Έξυπνος έλεγχος ισχύος με βάση τις μέτρησεις παρεμβολών από το MeNB

Ελλείψει εναλλακτικών τεχνικών όπως ο διαχωρισμός πόρων, η σταθερή ρύθμιση μέγιστης ισχύος από το δίκτυο δεν είναι επαρκής για να εξασφαλίσει το ελάχιστο εύρος της περιοχής κάλυψης του HeNB, προστατεύοντας παράλληλα τους macro χρήστες σε

όλες τις περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ανίχνευση του περιβάλλοντος του HeNB για τη ρύθμιση της ισχύος μετάδοσης.

Ο HeNB προσαρμόζει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής στο downlink με βάση τις μετρήσεις στην ασύρματη διεπαφή προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές στους MUEs. Παραδείγματα τέτοιων μετρήσεων είναι η συνολική λαμβανόμενη παρεμβολή και η λαμβανόμενη ισχύς $\mathrm{CRS}\,\hat{E}_c$ από το πιο ισχυρό MeNB. Η μέθοδος αυτή είναι ανοικτού βρόχου και δεν περιλαμβάνει τους UEs και σηματοδοσία μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Ο HeNB ρυθμίζει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{tx} = \max\left(min(a \times (\mathrm{CRS}\,\hat{E}_c + 10\log(N_{RB}^{DL} \times N_{SC}^{RB})) + \beta, P_{max}), P_{min}\right) \text{ [dBm]}$$

Όπου P_{max} και P_{min} η μέγιστη και ελάχιστη ρύθμιση ισχύος του HeNB αντίστοιχα, $\mathrm{CRS}\,\hat{E}_c$ η RSRP ισχύς ανά Resource element που λαμβάνεται στο HeNB από το ισχυρότερο macrocell. N_{RB}^{DL} ο αριθμός των RBs στο downlink στο κανάλι του HeNB και N_{SC}^{RB} ο αριθμός των υπο-φέροντων σε ένα RB ($N_{SC}^{RB} = 12$). Η παράμετρος α είναι ένας γραμμικός συντελεστής που επιτρέπει τη μεταβολή της κλίσης της καμπύλης απεικόνισης του power control, ενώ η παράμετρος β εκφράζεται σε dB και χρησιμοποιείται για τη μεταβολή του ακριβούς εύρους της ισχύος $\mathrm{CRS}\,\hat{E}_c$ [12].

4.2.2 Έλεγχος ισχύος του HeNB με βάση τις απώλειες διαδρομής μεταξύ HeNB-MUE

Ο HeNB πρέπει να ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του στο downlink λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες διαδρομής μεταξύ του HeNB και ενός outdoor γειτονικού MUE συμπεριλαμβανομένων των απωλειών διείσδυσης, προκειμένου να παρέχει αρτιότερο περιορισμό των παρεμβολών στον MUE ενώ παράλληλα διατηρείται καλή κάλυψη στους HUEs.

Ο HeNB επομένως ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του σήματος αναφοράς P_tx ως εξής:

$$P_{tx} = median(P_m + P_offset, P_tx_upp, P_tx_low)$$

Όπου

- $P_m(dBm)$ η ισχύς RSRP από το κοντινότερο MeNB όπως μετράται στο HeNB. Η τιμή αυτή εξαρτάται από τις απώλειες διαδρομής οι οποίες περιλαμβάνουν και τις απώλειες διείσδυσης μεταξύ του κοντινότερου MeNB και του HeNB.

- $P_tx_upp, P_tx_low(dBm)$ η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ισχύος εκπομπής του σήματος αναφοράς.

Ο HeNB μπορεί επίσης να ρυθμίσει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής σε αναλογία με την ισχύ εκπομπής του σήματος αναφοράς. Καθώς η RSRP μειώνεται, που σημαίνει ότι ο HeNB βρίσκεται κοντά στο άκρο του macrocell, η ισχύς εκπομπής θα πρέπει να είναι μικρή για να περιορίσει την παρεμβολή στο MUE.

Σε ότι αφορά την τιμή του P_offset θα πρέπει να καθοριστεί με βάση τις απώλειες διαδρομής μεταξύ HeNB και MUE. Οι απώλειες διαδρομής μπορεί να αποτελούνται από το άθροισμα των εσωτερικών απωλειών διαδρομής μεταξύ του HeNB και των άκρων της κυψέλης του HeNB και των απωλειών διείσδυσης.

Ως εκ τούτου, το P_offset διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_offset = median(P_offset_o + K * LE, P_offset_, max, P_offset_min)$$

Όπου

- $P_offset_o(dB)$ μια προκαθορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στις indoor απώλειες διάδοσης. Οι τυπικές τιμές κυμαίνονται μεταξύ 50 και 100dB.

- Κ ένας προσαρμοζόμενος θετικός συντελεστής η τιμή του οποίου πρέπει να υψηλή για να αυξηθεί η συνολική ισχύς εκπομπής και μικρή για να μειωθούν οι παρεμβολές στη λειτουργία του MeNB.

- $P_offset_, max, P_offset_\min(dB)$ η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του P_offset, μέσω των οποίων η τιμή του P_offset προστατεύεται από το να είναι ιδιαίτερα υψηλή ή χαμηλή. Η τιμή αυτή εξαρτάται από το άθροισμα απωλειών διείσδυσης και P_offset_o. Οι τυπικές τιμές των απωλειών διείσδυσης κυμαίνονται μεταξύ 10 και 30 dB.

Οι απώλειες διαδρομής μεταξύ HeNB και MUE πρέπει να εκτιμηθούν με βάση τη διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης ισχύος εκπομπής του MUE στο UL και της λαμβανόμενης ισχύος του HeNB από το MUE. Η εκτίμηση της τιμής της ισχύος εκπομπής στο UL βασίζεται στην παραδοχή ότι ο έλεγχος ισχύος εφαρμόζεται τόσο για MUE και HeNB αντιμετωπίζοντας τα σαν ένα UE, λόγω της κοντινής τους απόστασης. Τότε η ισχύς εκπομπής στο UL μπορεί να υπολογιστεί μέσω των απωλειών διάδοσης στο DL μεταξύ MenB και HeNB αξιοποιώντας τη μέτρηση της ισχύος RSRP [12].

4.2.3 Downlink power allocation

Ο eNodeB καθορίζει την ενέργεια μετάδοσης ανά resource element στο downlink.

Μέχρι να λάβει κάποια διαφορετική πληροφορία, ο UE θεωρεί ότι η ενέργεια ανα resource element για τα reference signals (RS EPRE) είναι σταθερή σε όλο το εύρος ζώνης και τα subframes. Η RS EPRE μπορεί να εξαχθεί από την ενέργεια μετάδοσης των reference signals στο downlink, η οποία ορίζεται ως ο γραμμικός μέσος της ενέργειας όλων των resource elements που μεταφέρουν σήματα αναφοράς.

Ο λόγος της ενέργειας EPRE για τα RE του καναλιού PDSCH προς την ενέργεια EPRE για τα RE που μεταφέρουν reference signals, σε κάθε OFDM σύμβολο, παριστάνεται με ρ_A ή ρ_B ανάλογα με το δείκτη του OFDM συμβόλου όπως φαίνεται στους πίνακες.

Για ένα UE σε transmission mode 8 ή 9, όταν δεν υπάρχουν reference signals στο resource block στο οποίο έχει αντιστοιχηθεί το κανάλι PDSCH ή για ένα UE σε transmission mode 1-7, ο UE μπορεί να θεωρήσει ότι

$\rho_A = \delta_{power-offset} + P_A + 10\log_{10} 2$ όταν λάβει μια μετάδοση δεδομένων στο PDSCH χρησιμοποιώντας 4 θύρες κεραίας ή αλλιώς

$\rho_A = \delta_{power-offset} + P_A$

Όπου το $\delta_{power-offset}$ είναι ίσο με 0 db για όλα τα σχήματα μετάδοσης PDSCH εκτός του MIMO και P_A μια παράμετρος που παρέχεται από τα ανώτερα επίπεδα.

Σε transmission mode 7 εάν υπάρχουν reference signals στο resource block στο οποίο έχει αντιστοιχηθεί το κανάλι PDSCH, ο λόγος της ενέργειας EPRE για τα RE του καναλιού PDSCH προς την ενέργεια EPRE για τα RE που μεταφέρουν reference signals, σε κάθε OFDM σύμβολο που περιέχει reference signals πρέπει να είναι σταθερός.

Σε transmission mode 8 εάν υπάρχουν reference signals στο resource block στο οποίο έχει αντιστοιχηθεί το κανάλι PDSCH, τότε ο λόγος αυτός μπορεί να θεωρηθεί από το UE ίσος με 0 db.

Σε transmission mode 9 εάν υπάρχουν reference signals στο resource block στο οποίο έχει αντιστοιχηθεί το κανάλι PDSCH, τότε ο λόγος αυτός μπορεί να θεωρηθεί από το UE ίσος με 0 db εάν τα επίπεδα μετάδοσης είναι μικρότερα ή ίσα από 2 αλλιώς -3db.

Για το downlink power control απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός της τιμής της RNTP (Relative Narrowband Transmit Power) αναφοράς. Έτσι έχουμε

$$RNTP(n_{PRB}) = \begin{cases} 0 \text{ εάν } \dfrac{E_A(n_{PRB})}{E^{(p)}_{\max_nom}} \leq RNTP_{threshold} \\ 1 \text{ έαν δεν έχει τεθεί άνω όριο για το } \dfrac{E_A(n_{PRB})}{E^{(p)}_{\max_nom}} \end{cases}$$

Όπου $E_A(n_{PRB})$είναι η μέγιστη δυνατή τιμή της EPRE για RE σε OFDM σύμβολα που δεν περιέχουν reference signals στο resource block με αριθμό n_{PRB}. Το $RNTP_{threshold}$ παίρνει τιμές από το σύνολο {-oo, -11, -10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3} [db] και

$$E^{(p)}_{\max_nom} = \frac{P^{(p)}_{max} \cdot \frac{1}{\Delta f}}{N^{DL}_{RB} \cdot N^{RB}_{SC}}$$

Όπου $P^{(p)}_{max}$ η μέγιστη ισχύς του σταθμού βάσης [11].

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΛΥΣΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς μια σειρά από λύσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον έλεγχο ισχύος στο downlink και στο uplink των LTE δικτύων με φεμτοκυψέλες.

5.1 Λύσεις προσαρμοσμένες στην κατωφερή ζεύξη

Στην αναφορά [13] προτείνεται μία μέθοδος ελέγχου ισχύος στο DL, στην οποία η ισχύς εκπομπής του HeNB ρυθμίζεται μέσω 2 timers, κάθε φορά που ο HeNB λαμβάνει ένα μήνυμα παρεμβολής από ένα MUE.

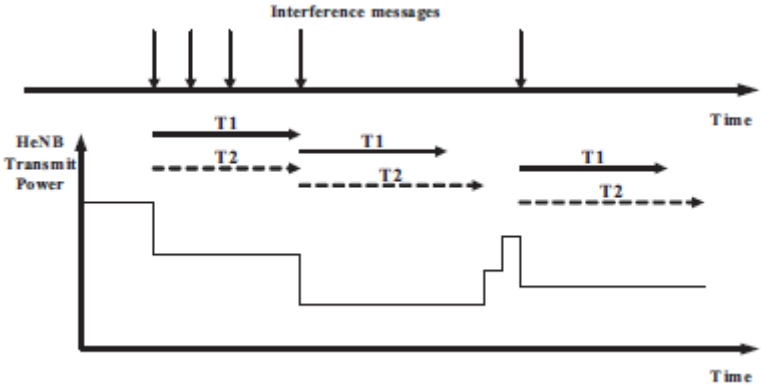
Όταν ένας MUE βρεθεί κοντά σε ένα femtocell, δέχεται ισχυρή παρεμβολή από το HeNB στο DL. Γενικά σε αυτή την περίπτωση ο MUE θα προσπαθήσει να ξεκινήσει τη διαδικασία εκ νέου επιλογής κυψέλης ή του handover. Εάν ο HeNB είναι σε CSG mode και ο MUE δεν είναι μέλος των CSG χρηστών, δε θα αποκτήσει πρόσβαση στο femtocell. Ωστόσο, ο MUE θα στείλει στο MenB την τιμή της ισχύος RSRP μαζί με την ταυτότητα PCID (Physical Cell Identity) της αντίστοιχης κυψέλης και το δείκτη ποιότητας του καναλιού CQI (Channel Quality Indicator). Ο MenB στη συνέχεια θα αποφασίσει ποιο HeNB παρεμβάλει το MUE σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{eNB} > \gamma \cdot I_{MUE} \qquad (1)$$

Όπου I_{eNB} (dBm) είναι η τιμή της ισχύος RSRP για κάποιο HeNB και I_{MUE} (dBm) η συνολική ισχύς των παρεμβολών από τους γύρω MeNBs και HeNBs. Η παράμετρος γ παίρνει τιμές στο διάστημα (0,1).

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει διεπαφή X2/S1 μεταξύ των MeNBs και HeNBs, ο MeNB θα στείλει ένα μήνυμα παρεμβολής στο MUE και στη συνέχεια αυτός θα το προωθήσει στο HeNB.

Η προτεινόμενη μέθοδος ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του HeNB κάθε φορά που λαμβάνει το μήνυμα παρεμβολής. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην εικόνα 1.



Σχήμα 24: Ρύθμισης ισχύος του HeNB [13]

Χρησιμοποιούνται δύο timers T1 και T2 για τον έλεγχο της ισχύος μετάδοσης του HeNB. Όταν ο HeNB λάβει το πρώτο μήνυμα παρεμβολής από το MUE, θα ξεκινήσει τους 2 timers μειώνοντας την ισχύ εκπομπής του κατά Δ_{down} dB . Ο timer T1 χρησιμοποιείται για να αποφευχθεί η συχνή μείωση της ισχύος εκπομπής του HeNB. Έτσι ο HeNB δεν θα μειώσει ξανά την ισχύ εκπομπής του μέχρι να λήξει ο T1, ακόμη και αν λάβει ένα νέο μήνυμα παρεμβολής. Ο timer T2 χρησιμοποιείται για να ελέγχει πότε ο HeNB πρέπει να αρχίσει να αυξάνει ξανά την ισχύ εκπομπής. Η τιμή του T2 πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή του T1.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1, ο HeNB δεν θα ανταποκριθεί σε νέα μηνύματα παρεμβολής μέχρι τη λήξη του T1. Εάν ο T1 σταματήσει και ο T2 είναι ακόμα ενεργός, ο HeNB μπορεί να ανταποκριθεί σε νέα μηνύματα. Με άλλα λόγια, αν ο HeNB λάβει ένα νέο μήνυμα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, θα μειώσει την ισχύ εκπομπής κατά

Δ_{down} dB και θα επανεκκινήσει τον timer T2. Αντίθετα αν ο HeNB δε λάβει νέο μήνυμα μέχρι τη λήξη του T2, θα αυξάνει την ισχύ εκπομπής κατά Δ_{up} dB σε κάθε διάστημα TTI (Transmission Time Interval). Κατά τη διαδικασία της αύξηση της ισχύος, αν ο HeNB λάβει νέο μήνυμα, θα επαναλάβει τη παραπάνω διαδικασία.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το Δ_{up} θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη τιμή από το Δ_{down}, καθώς ακόμη κι αν ο HeNB δε λάβει νέο μήνυμα στην τελευταία περίοδο T2, δε σημαίνει ότι το MUE είναι πολύ μακριά από το femtocell. Σε περίπτωση που ο MUE εξακολουθεί να είναι κοντά στο femtocell, η αύξηση της ισχύος εκπομπής του HeNB θα οδηγήσει σε ισχυρή downlink παρεμβολή στο MUE. Επομένως πρέπει ο HeNB να αυξάνει αργά την ισχύ εκπομπής του.

Με βάση τα παραπάνω, ο αλγόριθμος αυτής της μεθόδου συνοψίζεται στα εξής:

Βήμα 1: ο MUE που δέχεται παρεμβολές μετρά την ισχύ RSRP και το δείκτη ποιότητας CQI του καναλιού και τα αναφέρει στο MenB , που αποφασίζει αν ο MUE δέχεται παρεμβολές και ποιο HeNB είναι η πηγή αυτών.

Βήμα 2: ο MUE δέχεται το μήνυμα παρεμβολής από το MenB και προωθεί το μήνυμα στον HeNB.

Βήμα 3: ο HeNB λαμβάνει το μήνυμα παρεμβολής και ενημερώνει την ισχύ εκπομπής του σύμφωνα με το παρακάτω:

$$\begin{cases} \begin{cases} P_{tx} = P_{tx_last}\,,\ T1\ running \\ P_{tx} = P_{tx_last} - \Delta_{down},\ T1\ stop\&New\ IM \\ P_{tx} = P_{tx_last} + \Delta_{up},\ T2\ stop\&No\ IM \end{cases} \\ P_{tx} = \max\left(\min(P_{tx}, P_{max})\,, P_{min}\right) \end{cases} \qquad (2)$$

όπου IM το μήνυμα παρεμβολής (interference message), P_{tx_last} (dBm) η ισχύς εκπομπής στη τελευταία ρύθμιση, P_{max} και P_{min} η μέγιστη και ελάχιστη ισχύς εκπομπής του HeNB.

Σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος ισχύος, με αυτή τη μέθοδο μειώνεται ελαφρά η απόδοση των MUEs που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή της κυψέλης (cell center), καθώς μετά τη μείωση της ισχύος του HeNB, κάποιοι CSG χρήστες εγκαταλείπουν τα femtocells και επιλέγουν ξανά το macrocell, μειώνοντας έτσι το μέσο αριθμό RBs ανά MUE σε κάθε διάστημα TTI. Αντίθετα βελτιώνεται η απόδοση των MUEs που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης. Επίσης σε σχέση με το σχήμα power control που βασίζεται στη μέτρηση της ισχύος των παρεμβολών που δέχεται ο HeNB από το MeNB, η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιώνει αισθητά την απόδοση των HUEs.

Άρα με τη μέθοδο αυτή μειώνονται οι παρεμβολές στους MUEs και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η υψηλή απόδοση των HUEs.

Στην αναφορά [14] προτείνονται:

- μια βελτίωση στην αυτόνομη μέθοδο με την οποία ο HeNB ανιχνεύει την ύπαρξη ενός victim MUE

- μια βελτίωση στις αυτόνομες μεθόδους υπολογισμού της τιμής των απωλειών μεταξύ HeNB και MUE ($PL_{HeNB-MUE}$). Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στον τύπο για τον έλεγχο ισχύος του HeNB που προτείνεται από τη 3GPP στο Technical Report 36.921.

Σύμφωνα με τη 3GPP, προκειμένου ο HeNB να ανιχνεύσει ένα victim MUE συγκρίνει την ισχύ που λαμβάνει από τους MUE στο uplink με ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Εφόσον η απόσταση του κάθε HeNB από το MeNB, άρα και η ισχύς εκπομπής του

κάθε MUE στο uplink είναι διαφορετικές, η τιμή αυτού του κατωφλίου θα διαφέρει για κάθε HeNB. Προτείνεται λοιπόν μια μέθοδος με την οποία ο HeNB προσδιορίζει αυτόνομα την τιμή αυτού του threshold ($ULRP_{bound}$).

Συμβολίζοντας με ψ( ) τη συνάρτηση ρύθμισης ισχύος στο UL, η ισχύς εκπομπής του MUE στο UL υπολογίζεται ως ψ($PL_{MeNB-MUE}$). Δεδομένου ότι $απόσταση_{MeNB-HeNB} \approx απόσταση_{MeNB-indoor\ MUE} \approx απόσταση_{MeNB-nearby\ outdoor\ MUE}$

και ότι το επίπεδο των απωλειών $\delta_{wall-penetration}$ είναι σημαντικό (10~30dB) έχουμε

1) $PL_{MeNB-indoor\ MUE} \approx PL_{MeNB-HeNB}$ άρα για κάθε indoor MUE μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εκπομπής του ως ψ($PL_{MeNB-HeNB}$)

2) $PL_{MeNB-nearby\ outdoor\ MUE} \approx PL_{MeNB-HeNB} - \delta_{wall-penetration}$ οπότε για κάθε outdoor MUE, η ισχύς εκπομπής υπολογίζεται ως ψ($PL_{MeNB-HeNB}$ - $\delta_{wall-penetration}$) έτσι ώστε η ισχύς εκπομπής από ένα κοντινό outdoor MUE να είναι μικρότερη από αυτή ενός indoor MUE.

Βάσει αυτών ο υπολογισμός του threshold $ULRP_{bound}$ γίνεται ως εξής:

$$\mathrm{ULRP_{bound}} = \psi\left(PL_{MeNB-HeNB} - \delta_{wall-penetration}\right) - \delta_{wall-penetration} - PL_{indoor}^{(distance)}(r) - PL_{indoor}^{(distance)}(R-r) \quad (3)$$

Όπου r η προκαθορισμένη εκτίμηση της ακτίνας του δωματίου και R η προκαθορισμένη εκτίμηση της ακτίνας κάλυψης του HeNB. Επίσης

$PL_{indoor}^{(distance)}(r) = 38.46 + 20\log_{10}(r)$ και $PL_{indoor}^{(distance)}(R-r) = \max\left(15.3 + 37.6\log_{10}(R-r),\ 38.46 + 20\log_{10}(R-r)\right)$

Σχετικά με τη δεύτερη πρόταση-βελτίωση της αναφοράς, αυτή αφορά τον τύπο για τον έλεγχο ισχύος του HeNB που προτείνεται από τη 3GPP στο Technical Report 36.921 και είναι ο εξής:

$$P_{tx} = median(P_{MeNB-HeNB} + PL_{HeNB-MUE}, P_{max}, P_{min}) \quad (4)$$

Όπου

P_{tx} η ισχύς εκπομπής του HeNB

$P_{MeNB-FeNB}$ η λαμβανόμενη ισχύς RSRP από το MeNB στο HeNB

P_{max}, P_{min} προκαθορισμένες τιμές μέγιστης και ελάχιστης ισχύος εκπομπής αντίστοιχα

$PL_{HeNB-MUE}$ οι απώλειες μεταξύ HeNB και victim MUE

Εφόσον δεν υπάρχει συντονισμός μεταξύ MeNB-HeNB έχουν προταθεί από τη 3GPP δύο μέθοδοι αυτόνομης εκτίμησης από το HeNB της τιμής των απωλειών $PL_{HeNB-MUE}$

1) $PL_{HeNB-MUE} = PL_{indoor}^{(distance)}(r) + k * \delta_{wall-penetration}$

όπου $\delta_{wall-penetration}$ =10~30dB και $PL_{indoor}^{(distance)}(r) = 38.46 + 20\log_{10}(r)$

2) Βάσει της διαφοράς μεταξύ της εκτιμώμενης ισχύος εκπομπής του MUE στο UL και της λαμβανόμενης ισχύος του HeNB από το MUE

Για τον υπολογισμό της ισχύος εκπομπής του MUE στο UL, ο HeNB υπολογίζει τις απώλειες $PL_{MeNB-HeNB}$ μέσω της $P_{MeNB-HeNB}$. Εφόσον ο victim MUE θα είναι κοντά στο HeNB θεωρούμε ότι $PL_{MeNB-MUE} \approx PL_{MeNB-HeNB}$. Οπότε χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ρύθμισης ισχύος στο UL και την τιμή $PL_{MeNB-HeNB}$ γίνεται η εκτίμηση της τιμής της ισχύος.

Στην αναφορά [14] βελτιώνονται αυτές οι 2 μέθοδοι κάνοντας μια διάκριση μεταξύ indoor και outdoor MUE και προτείνοντας μια αυτόνομη μέθοδο ανίχνευσης της ύπαρξης ενός τουλάχιστον indoor victim MUE.

Το ελάχιστο επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος από ένα indoor MUE ακριβώς δίπλα στον τοίχο είναι:

$$ULRP_{indMUE}^{(min)} = \psi(PL_{\ MeNB-HeNB}) - PL_{indoor}^{(distance)}(r) \quad (5)$$

Ενώ το μέγιστο επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος από ένα κοντινό outdoor MUE ακριβώς δίπλα στον τοίχο είναι:

$$ULRP_{outdMUE}^{(max)} = \psi\left(PL_{\ MeNB-HeNB} - \delta_{wall-penetration}\right) - PL_{indoor}^{(distance)}(r) \quad (6)$$

Γενικά η συνάρτηση ρύθμισης ισχύος στο UL θα είναι της μορφής $\psi(x) = P_0 + \varepsilon \cdot x$, όπου x οι απώλειες μεταξύ του UE και του eNB που το εξυπηρετεί. Οπότε έχουμε

$$\begin{aligned} ULRP_{indMUE}^{(min)} - ULRP_{outdMUE}^{(max)} \\ = \psi(PL_{\ MeNB-HeNB}) + \delta_{wall-penetration} \\ - \psi\left(PL_{\ MeNB-HeNB} - \delta_{wall-penetration}\right) = (1+\varepsilon) \cdot \delta_{wall-penetration} \end{aligned}$$

Επομένως αν υπάρχουν ένα ή περισσότερα indoor victim MUEs, η λαμβανόμενη ισχύς στο HeNB από τους MUE θα είναι μεγαλύτερη από την $ULRP_{outdMUE}^{(max)}$ κατά μία ποσότητα ίση η μεγαλύτερη της διαφοράς $ULRP_{indMUE}^{(min)} - ULRP_{outdMUE}^{(max)}$.

Οπότε το HeNB θα αντιλαμβάνεται ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα indoor victim MUE αν ισχύει $ULRP_{MUE(s)} - ULRP_{outdMUE}^{(max)} \geq ULRP_{indMUE}^{(min)} - ULRP_{outdMUE}^{(max)}$

Βάσει αυτού έχουμε τις εξής βελτιώσεις στο τρόπο υπολογισμού των απωλειών $PL_{HeNB-MUE}$:

Για τη πρώτη μέθοδο σύμφωνα με την οποία

$$PL_{HeNB-MUE} = PL_{indoor}^{(distance)}(r) + k * \delta_{wall-penetration}$$

αν το HeNB θεωρεί ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα indoor victim MUE τότε τίθεται k=0 αλλιώς k=1, ώστε ένα indoor victim MUE να δέχεται μεγαλύτερη παρεμβολή από ένα κοντινό outdoor victim MUE.

Για τη δεύτερη μέθοδο υπολογισμού των απωλειών, αν το HeNB θεωρεί ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα indoor victim MUE τότε η ισχύς εκπομπής του victim MUE υπολογίζεται ως ψ($PL_{\ MeNB-HeNB}$) ενώ σε αντίθετη περίπτωση η ισχύς υπολογίζεται ως ψ$\left(PL_{\ MeNB-HeNB} - \delta_{wall-penetration}\right)$.

Στις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, αξιολογήθηκε η απόδοση του control channel με βάση την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης (link failure probability, LPF). Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φαίνεται ότι με τις δύο προτεινόμενες βελτιώσεις η πιθανότητα διακοπής μειώνεται αισθητά σε σύγκριση με την απλή μέθοδο της 3GPP, επομένως η απόδοση του CCH βελτιώνεται.

Στην αναφορά [15] προτείνεται μια μέθοδος που λαμβάνει υπόψη τη θέση του MUE σε σχέση με το HeNB και τους HUEs προκειμένου να ρυθμίσει κατάλληλα την ισχύ εκπομπής του HeNB.

Τα συμβατικά σχήματα ρύθμισης ισχύος που έχουν προταθεί από τη 3GPP μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε σχήματα ημι-στατικής και δυναμικής ρύθμισης ισχύος και μπορούν να απλοποιηθούν στην ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{DL} = max(\min(P_0 + P_{offset}, P_{max}), P_{min}) \qquad (7)$$

όπου στη περίπτωση σχήματος ημι-στατικής ρύθμισης ισχύος, P_0 είναι η λαμβανόμενη ισχύς στο HeNB από το MenB και το P_{offset} μπορεί να είναι μια προκαθορισμένη τιμή ή να υπολογίζεται βάση των απωλειών διαδρομής μεταξύ του HeNB και του victim MUE. Ενώ στη περίπτωση δυναμικής ρύθμισης ισχύος, P_0 είναι η λαμβανόμενη παρεμβολή στο HUE και το P_{offset} μπορεί να είναι μια προκαθορισμένη τιμή ή να υπολογίζεται βάση των απωλειών διαδρομής μεταξύ HeNB και HUE.

Ο τύπος αυτός δε λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του MUE εφόσον δεν υπάρχει συντονισμός μεταξύ MenB και HeNB. Έτσι ο HeNB θα χρησιμοποιεί την ίδια ποσότητα ενέργειας είτε υπάρχει κάποιος MUE στην ευρύτερη περιοχή είτε όχι. Θα μπορούσε επομένως να χρησιμοποιηθεί μια πιο έξυπνη μέθοδος ρύθμισης ισχύος βάσει της εκτίμησης των απωλειών μεταξύ HeNB-MUE, έτσι ώστε ο HeNB να ρυθμίζει την ισχύ του ανάλογα με την κατάσταση του MUE. Η προτεινόμενη διαδικασία ρύθμισης ισχύος συνδυάζει ημι-στατικές και δυναμικές μεθόδους που μπορούν να γενικευτούν στον παρακάτω τύπο:

$$P_{DL} = max(\min(f(), P_{static}), P_{min}) \qquad (8)$$

Όπου η P_{static} καθορίζεται κατά τη διάρκεια της στατικής ρύθμισης ισχύος με βάση τις μετρήσεις του HeNB ενώ $f()$ είναι η συνάρτηση δυναμικής ρύθμισης ισχύος με βάση μετρήσεις του HUE.

α) Ημι-στατική Ρύθμιση ισχύος βάσει θέσης, P_{static}:

Για κάθε HeNB ορίζεται μια ειδική τιμή P_{static} ως εξής:

$$P_{static} = max(\min(P_{M-HeNB} + PL(d) + LP, P'_{max}), P'_{min}) \qquad (9)$$

όπου P_{M-HeNB} (dBm) είναι η RSRP στο HeNB από το κοντινότερο MeNB και εξαρτάται από τις απώλειες διαδρομής που περιλαμβάνουν τις απώλειες διείσδυσης μεταξύ του πλησιέστερου MenB και του HeNB. $PL(d)$ (dB) είναι οι απώλειες σε μια ορισμένη απόσταση d, η οποία είναι η ακτίνα κάλυψης και LP είναι οι απώλειες διείσδυσης. P'_{max} $\kappa\alpha\iota$ P'_{min} το άνω και κάτω όριο της P_{static}.

Αυτή η ρύθμιση του P_{static} γίνεται κατά την έναρξη λειτουργίας του HeNB για να εξασφαλιστεί επαρκής κάλυψη για τους HUEs.

β) Δυναμική Ρύθμιση ισχύος βάσει παρεμβολών, $f()$:

Η περιοχή κάλυψης του HeNB ρυθμίζεται έτσι ώστε να παρέχεται επαρκής κάλυψη στο HUE όταν δεν υπάρχει κάποιος MUE στην περιοχή, ενώ όταν πλησιάζει ένας MUE ο HeNB να συρρικνώσει την περιοχή κάλυψης του για να ελαχιστοποιήσει τη παρεμβολή στο MUE. Η διαδικασία αυτή εκφράζεται στον τύπο:

$$f() = P_{M-HUE} + PL_{H-HUE} + P_{offset} \qquad (10)$$

όπου P_{M-HUE} (dBm) η ισχύς RSRP στο HUE από το πλησιέστερο MenB, PL_{H-HUE} (dB) οι απώλειες μεταξύ HeNB και HUE που προκύπτουν αφαιρώντας τη λαμβανόμενη ισχύ από την ισχύ εκπομπής του HUE, ενώ το P_{offset} χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της περιοχής κάλυψης του HeNB με βάση τις απώλειες μεταξύ HeNB και MUE. Συγκεκριμένα:

- $P_{offset} = \alpha$, α>0 όταν ο MUE είναι μακριά από το HeNB
- $P_{offset} = 0$, όταν ο MUE είναι πολύ κοντά στο HUE
- $P_{offset} = \beta$, β<0 όταν ο MUE είναι πιο κοντά στο HeNB από το HUE

Όπου τα α και β παίρνουν τιμές μεταξύ 20 και 50db και -20 και -50db αντίστοιχα.

Ο HeNB υπολογίζει τις απώλειες μεταξύ HeNB και MUE με βάση τη διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης ισχύος εκπομπής του MUE στο UL και της λαμβανόμενης ισχύος στο UL, $P_{MUE-HeNB}$. Ο υπολογισμός της ισχύος εκπομπής P'_{UL} βασίζεται στην υπόθεση ότι ο MUE βρίσκεται πολύ κοντά στο HeNB, άρα $PL_{MeNB-MUE} \approx PL_{MeNB-HeNB}$. Οπότε χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ρύθμισης ισχύος στο UL και την τιμή $PL_{MeNB-HeNB}$ γίνεται η εκτίμηση της τιμής της ισχύος.

Έπειτα ο HeNB εξετάζει την τιμή της διαφοράς $P'_{UL} - P_{MUE-HeNB}$ και

- $P_{offset} = \alpha$, εάν $P'_{UL} - P_{MUE-HeNB} > \gamma$
- $P_{offset} = \beta$, εάν $P'_{UL} - P_{MUE-HeNB} < \lambda$
- Αλλιώς $P_{offset} = 0$

Όπου γ και λ είναι κατώφλια που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το επίπεδο εγγύτητας του MUE στο HeNB.

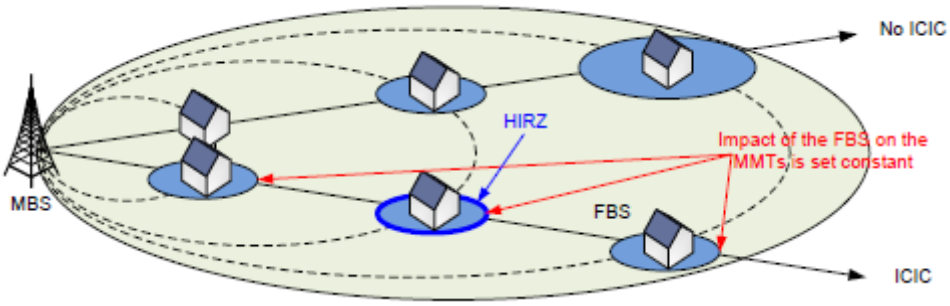
Ως εκ τούτου, η ρύθμιση της f( ) εξασφαλίζει τη καλή λειτουργία του HUE υπό την παρουσία παρεμβολών στο macrocell, προστατεύει το MUE θέτοντας $P_{offset} = 0$ και ενεργοποιεί τη ρύθμιση του P_{offset} με βάση τον υπολογισμό των απωλειών μεταξύ HeNB και MUE.

Για να συνοψίσουμε, το προτεινόμενο σύστημα ρύθμισης ισχύος συνδυάζει ημι-στατική και δυναμική ρύθμιση ισχύος και δίνει τη δυνατότητα στους HeNBs να καθορίσουν αρχικά τη μέγιστη ισχύ εκπομπής τους P_{static} με βάση τις πληροφορίες τοποθεσίας και στη συνέχεια να προσαρμόσουν κατάλληλα την ισχύ εξόδου σύμφωνα με την τιμή των παρεμβολών στη γύρω περιοχή.

Με τη μέθοδο αυτή μειώνονται οι παρεμβολές στους MUEs ενώ ταυτόχρονα προστατεύεται η απόδοση των HUEs.

Στην αναφορά [16] προτείνεται μια μέθοδος ρύθμισης ισχύος στο DL που έχει ως στόχο όλοι οι HeNBs, ανεξάρτητα από τη θέση τους μέσα στο macrocell, να έχουν την ίδια επίδραση στην απόδοση των MUEs.

Γενικά, η επίδραση των παρεμβολών που παράγονται από ένα HeNB στους γύρω MUEs εξαρτάται από την ισχύ που λαμβάνει κάθε MUE από το MeNB που το εξυπηρετεί. Εφόσον δεν εφαρμόζεται κάποια μέθοδος ICIC, όσο χαμηλότερο είναι το μέσο κέρδος διαδρομής μεταξύ του MeNB και των MUEs, δηλαδή όσο πιο μακριά από το MeNB βρίσκονται οι MUEs, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η περιοχή στην οποία δέχονται έντονες παρεμβολές από το HeNB όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 2. Ωστόσο, λόγω των ισχυρών παρεμβολών από άλλα MeNBs ή του ισχυρού προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου (AWGN), η επίδραση της παρεμβολής του HeNB στους MUEs ελαττώνεται. Επομένως, η υποβάθμιση της απόδοσης του MUE εξαιτίας του HeNB, συνδέεται επίσης με το επίπεδο παρεμβολής και θορύβου AWGN.



Σχήμα 25: ICIC με εξίσωση της macro-υποβάθμισης [16]

Σε αυτό το paper κάθε HeNB καθορίζει ανεξάρτητα την ισχύ εκπομπής του σύμφωνα με τις πληροφορίες του για το επίπεδο του AWGN θορύβου και τη λαμβανόμενη ισχύ από το κοντινότερο MeNB και τους γειτονικούς MeNBs. Αυτή η μέθοδος ρύθμισης ισχύος δε λαμβάνει τόσο υπόψη την πραγματική εγγύτητα ενός MUE γύρω από το HeNB όσο τις πιθανές μελλοντικές θέσεις του MUE γύρω από το HeNB. Δεδομένου ότι υπάρχουν περισσότεροι HeNBs στα άκρα του macrocell, είναι σημαντικό να ελέγχεται η επίδραση τους στην απόδοση των MUEs διατηρώντας παράλληλα μια αμοιβαία αντιστάθμιση στην απόδοση MUEs και HUEs. Επιπλέον, από πλευράς operator, είναι επιθυμητό η επίδραση του HeNB στους γύρω MUEs να είναι ανεξάρτητη από τη θέση του στην περιοχή κάλυψης του MeNB. Η προτεινόμενη μέθοδος ρύθμισης της ισχύος επιτυγχάνει αυτήν την ιδιότητα που αποκαλείται «εξίσωση της macro-υποβάθμισης» (macro degradation equalization).

Για το σκοπό αυτό ορίζεται μια ζώνη αναφοράς υψηλών παρεμβολών (High Interference Reference Zone - HIRZ), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2, η οποία είναι μια περιοχή στην οποία ελέγχεται το επίπεδο υποβάθμισης της απόδοσης του MUE. Θεωρώντας για όλους τους HeNBs ίδια ζώνη HIRZ και ίδιο επίπεδο υποβάθμισης της απόδοσης των MUEs, αναμένεται όλοι οι HeNBs να έχουν την ίδια επίδραση στους MUEs. Έτσι επιτυγχάνεται η εξίσωση της macro-υποβάθμισης.

Η περιοχή HIRZ που συμβολίζεται με Z_{MUE} είναι για παράδειγμα ένας κύκλος ή ένας δακτύλιος γύρω από το HeNB. Η υποβάθμιση της macro-απόδοσης αναπαρίσταται από μια συνάρτηση g( ) η τιμή της οποίας μειώνεται ανάλογα με το επίπεδο υποβάθμισης της απόδοσης και έχει τις εξής ιδιότητες:

- Παραμένει σταθερή ή αυξάνεται όταν αυξάνεται και η P_M

- Παραμένει σταθερή ή αυξάνεται όταν αυξάνεται και η $I = I_0 + N$

- Μειώνεται όταν αυξάνεται το γινόμενο $P_{t,F}G_F$

όπου P_M η λαμβανόμενη ισχύς στο MUE ή HUE από το MeNB που εξυπηρετεί το MUE, N το σταθερό επίπεδο ισχύος του θορύβου AWGN σε ένα MUE ή HUE, I_0 το επίπεδο ισχύος των παρεμβολών που λαμβάνονται από άλλα MeNBs και HeNBs, $P_{t,F}$ η ισχύς εκπομπής του HeNB με την ισχυρότερη παρεμβολή για ένα δεδομένο MUE και G_F το κέρδος διαδρομής από αυτό το HeNB στο MUE ή HUE.

Η macro-υποβάθμιση ορίζεται ως ο λόγος της τιμής της μετρικής απόδοσης του MUE (πχ SINR) με μετάδοση του HeNB προς την τιμή της μετρικής χωρίς μετάδοση του HeNB. Έτσι η τιμή της συνάρτησης g( ) κυμαίνεται από 0 για πλήρη υποβάθμιση έως 1 για μηδενική υποβάθμιση. Δεδομένου ότι οι ιδιότητες του κέρδους διαδρομής δεν είναι ίδιες για όλες τις θέσεις στη περιοχή Z_{MUE}, εξετάζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) της συνάρτησης υποβάθμισης g( ).

Η ισχύς εκπομπής του HeNB τίθεται σε $P_{t,F}^{sol}$ έτσι ώστε στην περιοχή Z_{MUE}:

$$Pr\left(g(P_M, I, G_F, P_{t,F}^{sol}\right) \leq g_{th} | Z_{MUE}) = P_{OUT} \qquad (11)$$

Αυτό είναι ισοδύναμο με το να βρούμε την ισχύ εκπομπής του HeNB, $P_{t,F}^{sol}$, ώστε:

$$Pr\left(P_{t,F}^{sol} \leq P_{t,F}^{th}(P_M, I, G_F, g_{th}\right) | Z_{MUE}) = P_{OUT} \qquad (12)$$

όπου $P_{t,F}^{th}(P_M, I, G_F, g_{th}) = g^{-1}(P_M, I, g_{th})/G_F$ είναι η κατάλληλη τιμή ρύθμισης ισχύος για δεδομένα P_M, I, G_F ενώ g^{-1} είναι η αντίστροφη συνάρτηση της g( ). Έτσι η λύση $P_{t,F}^{sol}$ για τη ρύθμισης της ισχύος εκπομπής του HeNB μπορεί να εκφραστεί ως γενικευμένη αντίστροφος (quantile function):

$$P_{t,F}^{sol} = Q_{\frac{1}{G_F} g^{-1}(P_M, I, g_{th}) | Z_{MUE}}(P_{OUT}) \qquad (13)$$

Όπου η $Q_{u|Z_{MUE}}(P)$ δηλώνει την τιμή έτσι ώστε η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) της συνάρτησης u( ) στη περιοχή Z_{MUE} να ισούται με P. Έτσι, η συγκεκριμένη μέθοδος ρύθμισης ισχύος εξαρτάται από την επιλογή της συνάρτησης g(), της περιοχής Z_{MUE} και των παραμέτρων g_{th} και P_{OUT}.

Θεωρώντας το SINR ως μετρική απόδοσης, η υποβάθμιση της απόδοσης του macro γίνεται:

$$g\left(P_M, I, P_{t,F}^{sol}\right) = SINR_M\left(P_{t,F}\right)/SINR_M(0) \qquad (14)$$

όπου

$$SINR_M\left(P_{t,F}\right) = \frac{P_M}{N+I_0+P_{t,F}G_F} \qquad (15)$$

Καταλήγουμε λοιπόν στη σχέση:

$$P_{t,F} = \frac{g^{-1}(P_M, I, g_{th})}{G_F} = \frac{(1/g_{th}-1)I}{G_F} \qquad (16)$$

Αντί για το επίπεδο παρεμβολής και θορύβου I, χρησιμοποιείται η τιμή $\max\left(I, P_M/SINR_{\max}\right)$ προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο κορεσμός της απόδοσης του συστήματος πέρα από μια μέγιστη τιμή $SINR_{\max}$.

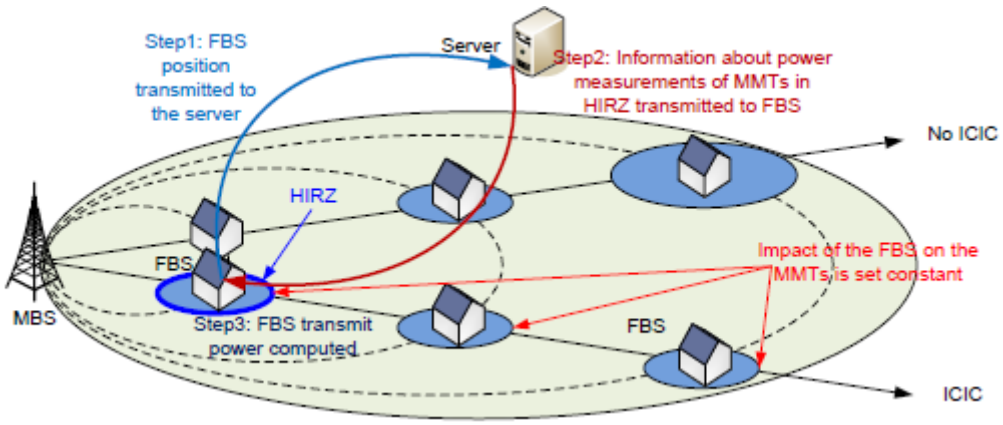
Θεωρείται μια κυκλική περιοχή Z_{MUE} και οι μετρήσεις ισχύος P_M^{meas} και I^{meas} στο HeNB. Αυτές οι μετρήσεις υποτίθεται ότι είναι κατά μέσο όρο ίσες με την πραγματική λαμβανόμενη ισχύ στη περιοχή Z_{MUE} διά τις απώλειες διείσδυσης A_w. Αυτή η υπόθεση ικανοποιείται αν το μέγεθος της Z_{MUE} είναι πολύ μικρότερο από την απόσταση HeNB-MeNB. Σε λογαριθμική κλίμακα, η διακύμανση της διαφοράς μεταξύ αυτών των τιμών και των πραγματικών τιμών λαμβανόμενης ισχύος στη περιοχή Z_{MUE} υποτίθεται ότι είναι πολύ μικρότερη από τη διακύμανση του κέρδους διαδρομής G_F στη Z_{MUE}. Το κέρδος G_F μοντελοποιείται με λογαριθμική κανονική κατανομή και η ακριβής κατανομή επιτυγχάνεται με μετρήσεις του HUE ή μέσω ενός προκαθορισμένου μοντέλου απωλειών διαδρομής. Στην τελευταία περίπτωση, η διακύμανση είναι η διακύμανση της σκίασης και η μέση τιμή λαμβάνεται για παράδειγμα από ένα μοντέλο απωλειών διαδρομής, χρησιμοποιώντας την ακτίνα της περιοχής Z_{MUE}. Σε λογαριθμική κλίμακα, η λύση για τη ρύθμιση της ισχύος εκπομπής είναι

$$P_{t,F}^{sol}|_{dB} = C + A_W|_{dB} + \max\left(I^{meas}|_{dB}, P_M^{meas}|_{dB} - SINR_{\max}|_{dB}\right) \qquad (17)$$

με $C = 10\log_{10}(1/g_{th}-1) - \overline{G_F}|_{dB} - \sigma_{G_F|dB}Q_N(P_{OUT})$ όπου Q_N η γενικευμένη αντίστροφος της κανονικής κατανομής, $\overline{G_F}$ και σ_{G_F} η μέση τιμή και η διακύμανση του G_F στη Z_{MUE}.

Τελικά η συγκεκριμένη μέθοδος ρύθμισης ισχύος βελτιώνει την αμοιβαία αντιστάθμιση μεταξύ HUE και MUE απόδοσης. Αυτή η βελτίωση ενισχύεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα των HeNBs και μειώνεται με την αύξηση των απωλειών διείσδυσης.

Στην αναφορά [17] προτείνεται μια μέθοδος ρύθμισης ισχύος στην οποία κάθε HeNB ενημερώνει ένα server σχετικά με τη θέση του, λαμβάνει σχετικές πληροφορίες από μετρήσεις των κινητών τερματικών που έχουν αποθηκευτεί σε μια βάση δεδομένων στο server και διαμορφώνει την ισχύ εκπομπής του σύμφωνα με αυτές τις πληροφορίες. Αυτή η μέθοδος power control στοχεύει στη διατήρηση μίας ελεγχόμενης επίδρασης του HeNB στην απόδοση του macrocell, ανεξάρτητα από τη θέση του HeNB.



Σχήμα 26: ICIC με εξίσωση της macro-υποβάθμισης [17]

Στην προτεινόμενη μέθοδο που απεικονίζεται στην εικόνα 3, το στατιστικό μοντέλο για την ισχύ που λαμβάνουν οι MUEs από τους MeNBs στην περιοχή Z_{MUE}, βασίζεται στη πληροφορία για τη θέση του HeNB και τη χρήση μιας βάσης δεδομένων με γεωγραφική αναφορά (geo_referenced database). Η βάση αυτή έχει κατασκευαστεί εκ των προτέρων βάσει των αναφορών των MUEs στον MeNB που τους εξυπηρετεί, οι οποίες περιέχουν τις τιμές των λαμβανόμενων ισχύων από γειτονικούς σταθμούς βάσης και τις θέσεις των MUEs. Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης ή επανεγκατάστασης του, ο HeNB αποκτά τη δική του πληροφορία τοποθεσίας (π.χ. μέσω του Global Navigation Satellite System (GNSS), και τη μεταδίδει στο server που διατηρεί τη βάση δεδομένων (στάδιο 1). Με βάση αυτές τις πληροφορίες, ο server μεταφέρει στους HeNBs τις κατάλληλες πληροφορίες για τους MUEs που βρίσκονται στη περιοχή Z_{MUE} (στάδιο 2). Οι πληροφορίες αυτές επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση της ισχύος στο HeNB (βήμα 3).

Οι πληροφορίες που μεταφέρονται από το server στο HeNB μπορεί να προκύψουν με δύο τουλάχιστον τρόπους από τις μετρήσεις που εκτελούν οι MUEs στην περιοχή Z_{MUE}. Μπορεί δηλαδή να είναι:

- Η μέση τιμή $\overline{g^{inv}}|_{dB}$ και η διακύμανση $\sigma^2{}_{g^{inv}|_{dB}}$ της αντίστροφης συνάρτησης υποβάθμισης $g^{-1}(\hat{P}_{M,i}, \hat{I}_i, g_{th})|_{dB}$ σε όλα τα δείγματα i στη περιοχή Z_{MUE}

- ή απευθείας τα δείγματα της αντίστροφης συνάρτησης υποβάθμισης $g^{-1}(\hat{P}_{M,i}, \hat{I}_i, g_{th})|_{dB}$

όπου $\hat{P}_{M,i}$ και $\hat{I}_i$ είναι το δείγμα i για τις ισχύεις P_M και I αντίστοιχα.

Στη πρώτη προσέγγιση θεωρώντας μια λογαριθμική κανονική κατανομή για τη $g^{-1}(P_M, I, g_{th})$ και το G_F και χρησιμοποιώντας τον τύπο $P_{t,F}^{sol} = Q_{\frac{1}{G_F} g^{-1}(P_M, I, g_{th})|Z_{MUE}}(P_{OUT})$, προκύπτει η $P_{t,F}^{sol}$ ως εξής:

$$P_{t,F}^{sol} = Q_{-G_F|_{dB} + g^{-1}(P_M, I, g_{th})|_{dB}|Z_{MUE}}(P_{OUT}) = -\overline{G_F}|_{dB} + \bar{g}^{inv}|_{dB} + \sigma|_{dB} Q_N(P_{OUT}) \quad (18)$$

όπου Q_N είναι η γενικευμένη αντίστροφος της κανονικής κατανομής. Υποθέτοντας ανεξαρτησία μεταξύ του κέρδους διαδρομής HeNB-MUE και της λαμβανόμενης ισχύος από το MeNB, προκύπτει ότι:

$$\sigma|_{dB} = \sqrt{\sigma^2_{G_F|_{dB}} + \sigma^2_{g^{inv}|_{dB}}} \quad (19)$$

όπου $\overline{G_F}|_{dB}$ και $\sigma^2_{G_F|_{dB}}$ η μέση τιμή και η διακύμανση του $G_F|_{dB}$ στη περιοχή Z_{MUE}, αντίστοιχα.

Τελικά σε λογαριθμική κλίμακα, η λύση για τη ρύθμιση της ισχύος εκπομπής είναι:

$$P_{t,F}^{sol} = -\overline{G_F}|_{dB} + \bar{g}^{inv}|_{dB} + \sqrt{\sigma_{G_F|_{dB}}^2 + \sigma_{g^{inv}|_{dB}}^2}\, Q_N(P_{OUT}) \quad (20)$$

Οι παράμετροι $\bar{g}^{inv}|_{dB}$, $\sigma_{g^{inv}|_{dB}}^2$και P_{OUT} παρέχονται στο HeNB από τον server. Το μοντέλο για τον υπολογισμό του κέρδους G_F μπορεί επίσης να παρέχεται από το server βάσει τυπικών τιμών που υποθέτει ο operator, αλλιώς υπολογίζεται σε κάθε HeNB βάσει των μετρήσεων των MUEs.

Στην μέθοδο PC του [16] , η ισχύς του HeNB ρυθμίζεται σύμφωνα με τις τιμές των P_M και I που μετρώνται στο HeNB, υποθέτοντας ότι οι τιμές αυτές είναι ίδιες για τους MUEs στην περιοχή Z_{MUE} , εκτός από τις απώλειες διείσδυσης τοίχου. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της ισχύος του HeNB σύμφωνα με τις μετρήσεις του HeNB, ρυθμίζοντας τη $\sigma_{g^{inv}|_{dB}}$ σε μια κοινή τιμή, συνάρτηση του μοντέλου κέρδους διαδρομής από το MeNB στο MUE στην περιοχή Z_{MUE}. Έτσι η τιμή $\sigma_{g^{inv}|_{dB}}$ είναι κοινή σε πολλούς HeNBs, ενώ στην προτεινόμενη μέθοδο ρύθμισης ισχύος βάσει θέσης, του [17], η $\sigma_{g^{inv}|_{dB}}$ είναι διαφορετική για κάθε HeNB. Η τιμή $\bar{g}^{inv}|_{dB}$ είναι επίσης διαφορετική για κάθε HeNB και λαμβάνεται από τις μετρήσεις ισχύος $\hat{P}_M{}^{\mathrm{HeNB}}$ και $\hat{I}^{\mathrm{HeNB}}$ που εκτελεί ο HeNB για τα DL σήματα από τους γειτονικούς MeNBs:

$$\bar{g}^{inv}|_{dB} \approx g^{-1}(\hat{P}_M{}^{\mathrm{HeNB}} A_W, \hat{I}^{\mathrm{HeNB}} A_W, g_{th})|_{dB} \quad (21)$$

Έτσι, η μέθοδος PC βάσει θέσης που προτείνεται στο [17] παρέχει περισσότερες πληροφορίες για τις πραγματικές τιμές των P_M και I στους MUEs και αποφεύγει την επίδραση του σφάλματος απωλειών διείσδυσης. Για περιπτώσεις όπου οι indoor και outdoor λαμβανόμενες ισχύεις από το MeNB είναι πολύ διαφορετικές, επιτυγχάνεται καλύτερη αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης femto-macro χάρη στις συμπληρωματικές πληροφορίες που παρέχονται από τη βάση δεδομένων. Επιπλέον, ένα σφάλμα στις απώλειες διείσδυσης έχει μικρότερη επίδραση απ ότι στη μέθοδο ρύθμισης ισχύος που βασίζεται στις μετρήσεις του HeNB και προτείνεται στο [4]. Αυτά τα πλεονεκτήματα απόδοσης παρουσιάζουν βέβαια το κόστος της διατήρησης μιας βάσης δεδομένων, προσθέτοντας σηματοδοσία μεταξύ MeNB και server στον πυρήνα του δικτύου.

Τελικά, σε σχέση με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εκπομπής του HeNB και τη μέθοδο ρύθμισης ισχύος με βάση τις μετρήσεις του HeNB, η συγκεκριμένη προσέγγιση βελτιώνει την αμοιβαία αντιστάθμιση μεταξύ HUE και MUE απόδοσης και παρουσιάζει ευρωστία έναντι των σφαλμάτων απωλειών διείσδυσης και των σφαλμάτων θέσης.

Στην αναφορά [18] προτείνεται ένα σχήμα ρύθμισης ισχύος που αξιοποιεί τη γνώση για το QoE των χρηστών.

Η πλειοψηφία των σχημάτων διαχείρισης παρεμβολών δίνουν έμφαση στη διασφάλιση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας (QoS), υποσχόμενα κυρίως μια υψηλή τιμή SINR στους χρήστες. Ωστόσο, ένας καταλληλότερος τρόπος αξιολόγησης της ποιότητας μιας παρεχόμενης υπηρεσίας (ειδικά για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου) είναι η εκτίμηση του βαθμού ικανοποίησης των τελικών χρηστών.

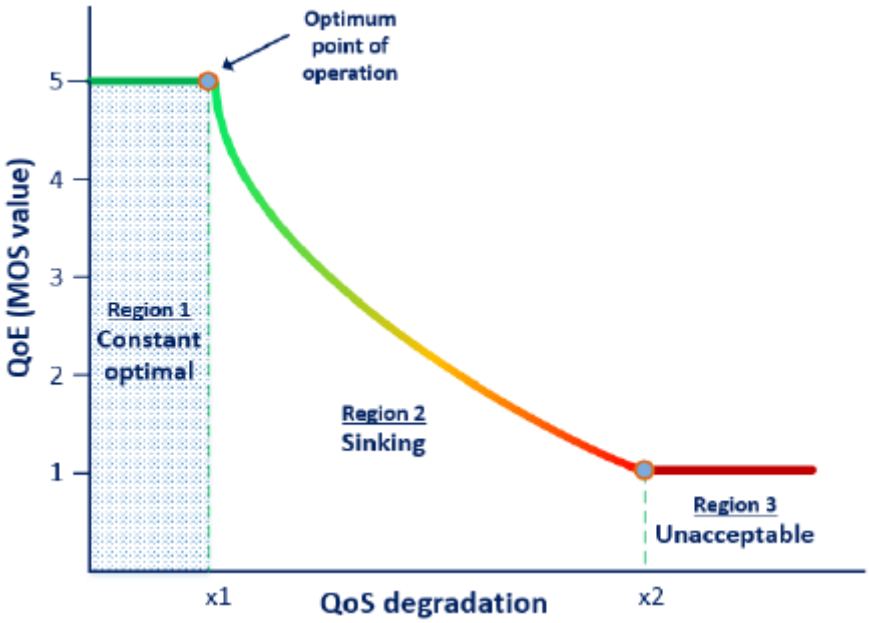
Αναγνωρίζοντας τη σημασία της ποσοτικοποίησης του βαθμού ικανοποίησης των τελικών χρηστών, η ITU όρισε την έννοια Ποιότητα Εμπειρίας (QoE) ως "τη συνολική αποδοχή μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας, όπως γίνεται αντιληπτή υποκειμενικά από τον τελικό χρήστη». Το QoE είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που κρίνει την απόφαση ενός χρήστη για το αν θα διατηρήσει μια υπηρεσία ή θα την αφήσει.

Σε αυτή την εργασία εξετάζεται κατά πόσο οι παρεμβολές σε ένα femtocell-overlaid δίκτυο αντιστοιχούν σε διακυμάνσεις στην ικανοποίηση των τελικών χρηστών. Αρχικά, δίνεται έμφαση σε υπηρεσίες VoIP σε ένα LTE-A δίκτυο και ποσοτικοποιείται η υποβάθμιση του QoE που αντιλαμβάνονται οι macrocell χρήστες λόγω των παρεμβολών από τα femtocells. Στη συνέχεια εξετάζεται η σχέση μεταξύ της τιμής του SINR και του QoE στους χρήστες που αντιμετωπίζουν παρεμβολές. Τέλος με βάση αυτά τα αποτελέσματα, προτείνεται ένα νέο σχήμα ρύθμισης ισχύος που αξιοποιεί την τιμή του QoE που αντιλαμβάνονται οι χρήστες και γίνεται η σύγκριση του με το παραδοσιακό σχήμα Ελέγχου Ισχύος (PC) που έχει προταθεί από τη 3GPP.

Δύο είναι οι λόγοι που καθιστούν χρήσιμη τη διαφοροποίηση μεταξύ QoS και QoE και την υιοθέτηση του QoE ως το καταλληλότερο κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας μιας υπηρεσίας: Πρώτα απ 'όλα, το QoS χειρίζεται αμιγώς τεχνικά ζητήματα σχετικά με την υπηρεσία και δεν ενσωματώνει ανθρωπογενείς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα. Αυτό σημαίνει για παράδειγμα ότι για δύο διαφορετικούς χρήστες, το ίδιο επίπεδο QoS μπορεί να μην εγγυάται και το ίδιο επίπεδο QoE. Εκτός από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος, σημαντικό αντίκτυπο στο QoE του χρήστη έχουν και άλλοι παράγοντες, όπως το πλαίσιο χρήσης, τα ειδικά χαρακτηριστικά των χρηστών, (όπως η εμπειρία και οι προσδοκίες τους), το παραδοθέν περιεχόμενο και η τιμολόγηση της υπηρεσίας. Ο δεύτερος λόγος αυτής της διαφοροποίησης είναι ότι το QoS δεν αντικατοπτρίζει την επίδραση που έχουν οι τεχνικοί παράγοντες στην ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης, δεδομένου ότι δεν έχει οριστεί κάποια άμεση σύνδεση μεταξύ των δύο. Αυτό συνεπάγεται για παράδειγμα ότι η σταθερή βελτίωση μιας τεχνικής παραμέτρου δε βελτιώνει γραμμικά και απείρως την εμπειρία του χρήστη. Με βάση αυτό το χάσμα μεταξύ QoS και QoE, προέκυψαν ορισμένες προσεγγίσεις που προσπαθούν να αντιστοιχήσουν τις παραμέτρους QoS στη συνολική τιμή του QoE.

Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στην υπόθεση WQL (WQL hypothesis) η οποία είναι εμπνευσμένη από το νόμο "Weber-Fechner (WFL)". Αυτός περιγράφει την επίδραση ενός φυσικού ερεθίσματος στην ανθρώπινη αντίληψη, σύμφωνα με τις αρχές της ψυχοφυσικής. Ο νόμος αυτός ισχυρίζεται ότι η σχέση μεταξύ ερεθίσματος και αντίληψης είναι λογαριθμική, οδηγώντας έτσι στο συμπέρασμα πως προκειμένου η μεταβολή σε ένα ερέθισμα να είναι αξιόπιστα ανιχνεύσιμη από έναν παρατηρητή, πρέπει αυτό να διαφέρει από την αρχική αξία του κατά ένα σταθερό κλάσμα.

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στην IQX υπόθεση (IQX hypothesis) σύμφωνα με την οποία η σχέση μεταξύ του QoE και μιας παραμέτρου υποβάθμισης του QoS είναι αρνητικά εκθετική και η μεταβολή της τιμής του QoE εξαρτάται από το τρέχον επίπεδο του QoE. Το διάγραμμα της καμπύλης του QoE και της υποβάθμισης του QoS αποτελείται από τρεις ευδιάκριτες περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 27. Η πρώτη είναι η σταθερή βέλτιστη περιοχή COR (Constant Optimal Region) (Region 1 στο σχήμα), όπου το QoE είναι πάντα άριστο είτε επειδή ορισμένοι μηχανισμοί στο εσωτερικό του συστήματος παρέχουν κάποια ανοχή σε διαταραχές είτε επειδή η ανθρώπινη αντίληψη (όραση / ακοή) δεν είναι ικανή να διακρίνει αυτές τις μεταβολές. Η δεύτερη περιοχή της καμπύλης QoS-QoE χαρακτηρίζεται από την απότομη υποβάθμιση του QoE με εκθετικό τρόπο, έτσι ώστε οι διαταραχές του QoS να έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο όταν το QoE είναι υψηλότερο. Η τρίτη και τελευταία περιοχή αντιστοιχεί σε μη αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας.



Σχήμα 27: IQX υπόθεση [18]

Η σαφής διάκριση μεταξύ αυτών των τριών περιοχών μπορεί να αξιοποιηθεί από τους παρόχους υπηρεσιών, όχι μόνο για το δικό τους οικονομικό όφελος, αλλά και για το κοινό καλό. Εφόσον υπάρχει μια περιοχή (Region 1), όπου το QoE είναι σταθερό ανεξάρτητα από την υποβάθμιση κάποιων τεχνικών παραμέτρων, οι πάροχοι θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν σκόπιμα τις επιδόσεις ορισμένων παραμέτρων, ώστε όλοι οι χρήστες να λειτουργούν ακριβώς στο σημείο καμπής μεταξύ των περιοχών 1 και 2 (το σημείο x1 στο σχήμα 27, με κάποιο περιθώριο ασφαλείας ίσως). Αυτό θα μπορούσε να καταστεί δυνατό μειώνοντας πόρους, όπως είναι το φάσμα ή ισχύς εκπομπής. Ως εκ τούτου, όλοι οι τελικοί χρήστες θα ωθούνταν να λειτουργήσουν στο σημείο x1 του διαγράμματος αντί οποιουδήποτε άλλου αριστερότερου σημείου της περιοχής 1, δεδομένου ότι κάτι τέτοιο δεν θα προσέθετε στην ποιότητα αλλά θα οδηγούσε και στην άσκοπη κατανάλωση πόρων. Ως άμεση συνέπεια, θα μπορούσαν να απελευθερωθούν περιττοί πόροι και να προσφερθούν σε άλλους χρήστες βελτιώνοντας το QoE που αυτοί αντιλαμβάνονται. Τέτοιοι χρήστες θα μπορούσαν να είναι για παράδειγμα αυτοί που λειτουργούν στις περιοχές 2 και 3.

Λαμβάνοντας αυτά υπόψη, προτείνεται η εισαγωγή κριτηρίων QoE στο συμβατικό σχήμα ρύθμισης ισχύος της 3GPP, αξιοποιώντας τη λειτουργία μέσα στην προαναφερόμενη σταθερή βέλτιστη περιοχή της καμπύλης QoE-QoS. Προτείνεται η μείωση της ισχύος εκπομπής των σταθμών βάσης (MeNBs και HeNBs) προκειμένου να διασφαλιστεί η ελάχιστη επαρκής τιμή του SINR στους MUEs και HUEs, χωρίς καμία επίπτωση στην ποιότητα υπηρεσίας του χρήστη. Περαιτέρω αύξηση του SINR θα οδηγήσει σε προβλήματα παρεμβολών, χωρίς αντίστοιχη αύξηση στην ποιότητα οπότε κάτι τέτοιο θεωρείται περιττό και δαπανηρό από άποψη ενέργειας και πόρων.

Το συμβατικό σχήμα ρύθμισης ισχύος της 3GPP περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο

$$P_{tx} = median(P_{MeNB-HeNB} + PL_{HeNB-MUE}, P_{max}, P_{min}) \qquad (22)$$

όπου οι παράμετροι P_{tx} και $P_{MeNB-HeNB}$ αντιπροσωπεύουν την ισχύ εκπομπής του HeNB και τη λαμβανόμενη ισχύ από το MeNB αντίστοιχα, ενώ το $PL_{HeNB-MUE}$ απεικονίζει τις απώλειες μεταξύ HeNB και MUE..

Ο προτεινόμενος κανόνας ρύθμισης ισχύος με βάση το QoE συνοψίζεται στο εξής: «Εάν η εκτιμώμενη ισχύς εκπομπής είναι υψηλότερη από το κατώφλι ισχύος που οδηγεί στη μικρότερη τιμή SINR στη σταθερή βέλτιστη περιοχή QoE (δηλαδή, στο βέλτιστο

σημείο λειτουργίας του σχήματος 27), μείωσε την ισχύ μέχρι την τιμή του κατωφλίου, χρησιμοποιώντας ένα περιθώριο ασφαλείας».

Αυτό οδηγεί σε μια ενισχυμένη φόρμουλα που ενσωματώνει τον προτεινόμενο κανόνα ως εξής:

$$P'_{tx} = \max\left(P_{min}, P_{tx(3GPP)} - \Delta P_{COR,opt}\right), \quad if\ \Delta P_{COR,opt} > 0 \qquad (23)$$

όπου $\Delta P_{COR,opt}$είναι η μείωση της ισχύος εκπομπής που έχει σαν αποτέλεσμα τη μετακίνηση του SINR από το σημείο που καθορίζει η $P_{tx(3GPP)}$, στο δεξιότερο βέλτιστο σημείο της περιοχής COR. Αυτός ο τύπος εφαρμόζεται μόνο εάν το σχήμα PC της 3GPP παρέχει μια τιμή QoE μέσα στην περιοχή COR, έτσι ώστε το $\Delta P_{COR,opt}$ να είναι θετικό. Η τιμή του QoE εκτιμάται χρησιμοποιώντας τη κλίμακα Mean Opinion Score (MOS). Για τη μέτρηση του MOS χρησιμοποιείται το μοντέλο E-model που έχει προταθεί από την ITU-T.

Με τη προτεινόμενη μέθοδο μειώνεται σημαντικά η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής και οι παρεμβολές στους MUEs, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται το απαιτούμενο υψηλό επίπεδο QoE στους εξυπηρετούμενους HUEs.

Στην αναφορά [19] προτείνεται ένας μηχανισμός που ελέγχει αποτελεσματικά τις παρεμβολές του συστήματος, ενώ παράλληλα εγγυάται το QoS του χρήστη. Ο μηχανισμός ενημερώνει δυναμικά τη ρύθμιση ισχύος του HeNB σε πραγματικό χρόνο με βάση την τοπολογία των MUEs και HUEs, καθώς και το απαιτούμενο σενάριο κίνησης από τους χρήστες. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μια μεθοδολογία ομαδοποίησης προτεραιότητας (priority grouping), σύμφωνα με την οποία κάθε HUE ανατίθεται σε μία από τις διαθέσιμες ομάδες διαφορετικών προτεραιοτήτων με βάση τις απαιτήσεις ισχύος και του απαιτούμενου φορτίου κίνησης. Η χρήση των ομάδων προτεραιότητας οδηγεί στη συνδυασμένη χρήση τριών αλγορίθμων ελέγχου ισχύος από τον HeNB ανάλογα με το σενάριο της κίνησης. Επιπλέον ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο κίνησης, ο μηχανισμός μπορεί να παρέχει καλύτερη προστασία από τις παρεμβολές είτε στους MUEs είτε στους HUEs.

Ο μηχανισμός χρησιμοποιεί τους τρεις πιο κοινούς αλγορίθμους που έχουν οριστεί από τη 3GPP για τον έλεγχο ισχύος του HeNB στο downlink, οι οποίοι είναι

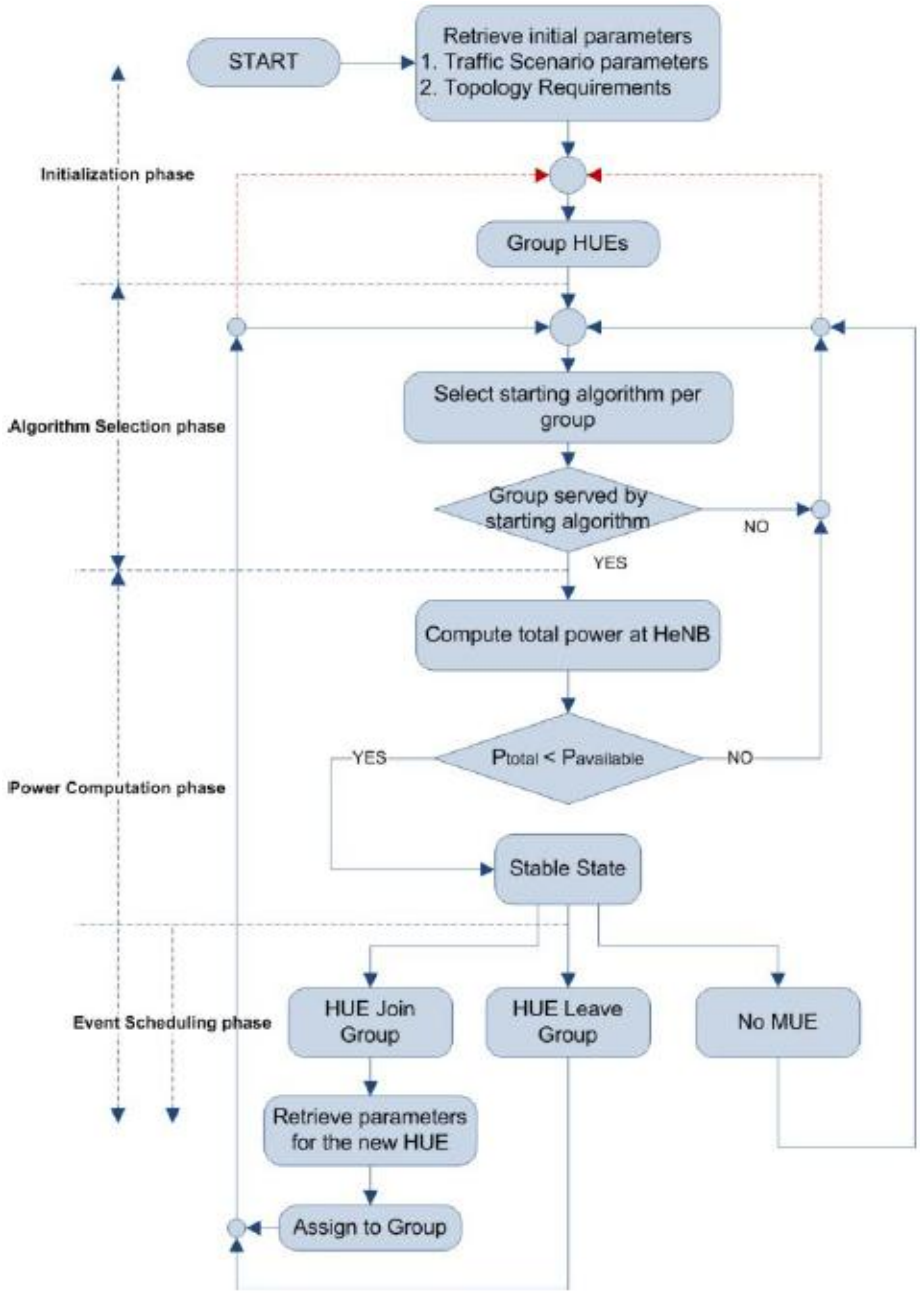
Αλγόριθμος 1: Σταθερή ρύθμιση ισχύος, ανεξάρτητα από αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου και στο φορτίο κίνησης.

Αλγόριθμος 2: Έξυπνος έλεγχος ισχύος με βάση την εκτίμηση των παρεμβολών από το MeNB.

Αλγόριθμος 3: Έλεγχος ισχύος του HeNB με βάση τις απώλειες διαδρομής μεταξύ HeNB-MUE.

Ένα μπλοκ διάγραμμα του μηχανισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 28 ενώ η περιγραφή του μηχανισμού σε ψευδό-κώδικα παρουσιάζεται στο σχήμα 29. Ο μηχανισμός ανιχνεύει σε πραγματικό χρόνο την τοπολογία και τις απαιτήσεις του σεναρίου κίνησης και επιλέγει κάθε φορά τον αλγόριθμο που ταιριάζει καλύτερα σε αυτά.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα αποτελείται από τέσσερις διακριτές φάσεις λειτουργίας: Αρχικοποίησης, Επιλογής αλγόριθμου, Υπολογισμού ισχύος και Χρονοδρομολόγησης (event scheduling).



Σχήμα 28: Block διάγραμμα του προτεινόμενου μηχανισμού [19]

Στη φάση της αρχικοποίησης, ο μηχανισμός κατηγοριοποιεί τους HUEs σε ένα προκαθορισμένο αριθμό N_G ομάδων προτεραιότητας με βάση τις απαιτήσεις τους σε φορτίο κίνησης. Για κάθε μία από αυτές τις ομάδες τίθεται ως στόχος μια μέση τιμή throughput για το HUE (Th_{target}). Για παράδειγμα, ένας HUE με υψηλές απαιτήσεις φορτίου κίνησης (μια υπηρεσία streaming) κατηγοριοποιείται σε μια ομάδα προτεραιότητας με υψηλή τιμή Th_{target}, ενώ ένας HUE με μειωμένες απαιτήσεις κίνησης (μια υπηρεσία http browsing) κατηγοριοποιείται σε μια ομάδα προτεραιότητας με χαμηλή τιμή Th_{target}. Με αυτή την κατηγοριοποίηση γίνεται διάκριση μεταξύ των χρηστών με βάση τις απαιτήσεις τους σε ισχύ. Επιπλέον γίνεται η υπόθεση ότι η μέγιστη τιμή της διαθέσιμης ισχύος ($P_{available}$) είναι γνωστή στον HeNB.

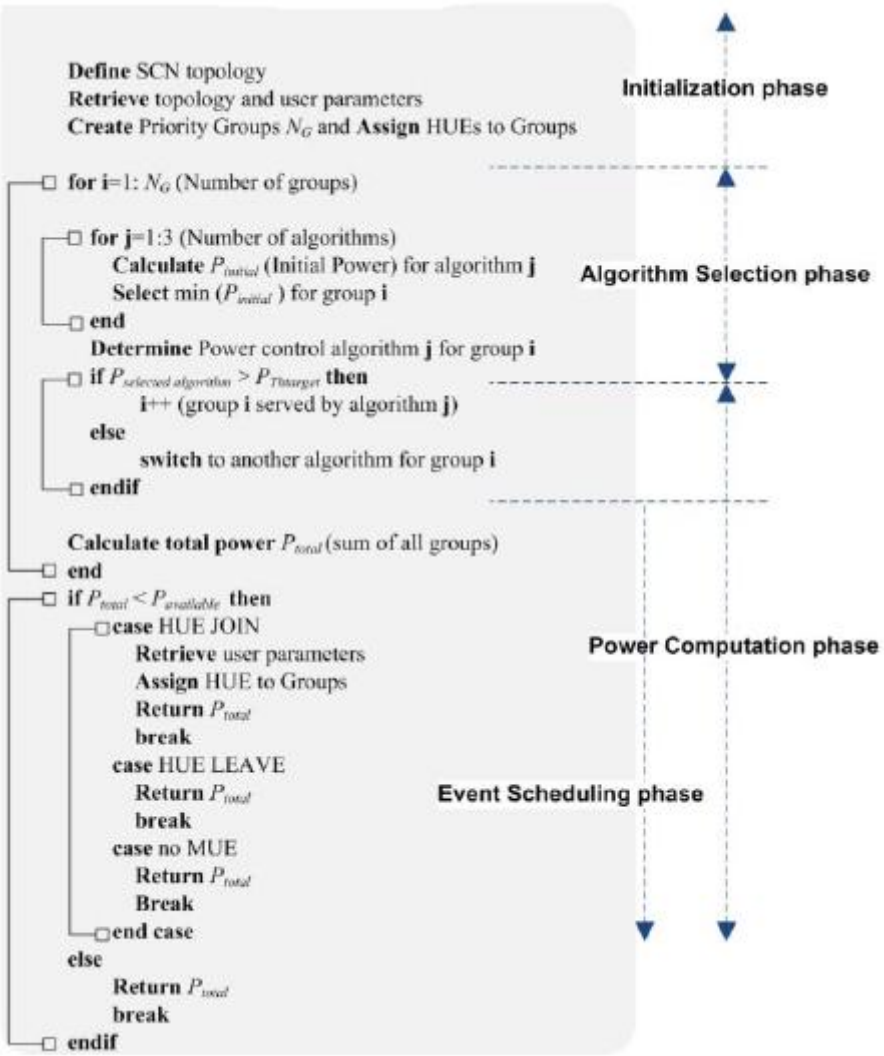
Στη φάση επιλογής αλγόριθμου, επιλέγεται ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος που θα εφαρμοστεί αρχικά σε κάθε ομάδα. Σε αυτό το στάδιο, ο μηχανισμός επιλέγει τον αλγόριθμο που απαιτεί την ελάχιστη αρχική ισχύ. Στη συνέχεια, ελέγχει για κάθε ομάδα αν αυτός ο αρχικός αλγόριθμος μπορεί να εξυπηρετήσει το φορτίο κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη το μέσο throughput χρήστη ανά ομάδα (Th_{target}), τον αριθμό των

HUEs σε κάθε ομάδα, καθώς και τη θέση τους εντός των femtocells. Εφόσον ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε σε κάθε ομάδα, έχει αρκετή ισχύ για να εξυπηρετήσει το φορτίο κίνησης της ομάδας, ο μηχανισμός εισέρχεται στη φάση υπολογισμού της ισχύος. Διαφορετικά επιλέγεται άλλος αλγόριθμος αρχικοποίησης για την ομάδα αυτή.

Στη φάση υπολογισμού της ισχύος, υπολογίζεται στο HeNB η συνολική ισχύς (P_{total}) ως άθροισμα της απαιτούμενης ισχύος σε καθεμία από τις N_G ομάδες προτεραιότητας. Η P_{total} συγκρίνεται με τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ $P_{available}$ προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η συνολική ισχύς του συστήματος διατηρείται σε αποδεκτό επίπεδο. Αν $P_{total} < P_{available}$, ο μηχανισμός εισέρχεται στη σταθερή κατάσταση που σημαίνει ότι όλοι οι χρήστες στο δίκτυο εξυπηρετούνται ομαλά σε σχέση με τις απαιτήσεις τους σε φορτίο κίνησης. Αν όμως $P_{total} > P_{available}$, ο μηχανισμός πρέπει να μειώσει τη συνολική ισχύ του συστήματος. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

-Επιλέγοντας εκ νέου τον αλγόριθμο ελέγχου ισχύος ανά ομάδα

-Εκτελώντας μια συνολική ανασυγκρότηση του συστήματος (για παράδειγμα μειώνοντας τον αριθμό των ομάδων).



Σχήμα 29: Ο ψευδο-κώδικας του προτεινόμενου μηχανισμού [19]

Η τελευταία διαδικασία αποφεύγεται καθώς αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που η συνολική ισχύς του συστήματος είναι εξαιρετικά υψηλή συνεπάγεται ότι η επιλεγμένη κατηγοριοποίηση δεν αντιστοιχεί στις απαιτήσεις κίνησης και στη χωρητικότητα του συστήματος και επομένως είναι απαραίτητη η αναδιοργάνωση των ομάδων.

Στη σταθερή κατάσταση, επιλέγεται σε κάθε ομάδα ο αλγόριθμος που καταλήγει στην ελάχιστη συνολική ισχύ του HeNB, με άλλα λόγια αυτός που απαιτεί την ελάχιστη αποδεκτή ισχύ προκειμένου να εξυπηρετήσει το συνολικό throughput των HUEs που αποτελούν την κάθε ομάδα.

Όσον αφορά τη φάση του χρονοπρογραμματισμού, ανάλογα με το γεγονός που θα συμβεί κατά τη διάρκεια ενός σεναρίου κίνησης (ένας HUE μπαίνει σε μια ομάδα, ένας HUE φεύγει από μια ομάδα, δεν υπάρχει MUE στο δίκτυο) ενεργοποιείται μια διαφορετική διαδικασία όπως φαίνεται στο σχήμα 29.

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ο συγκεκριμένος μηχανισμός πετυχαίνει εξοικονόμηση ισχύος τουλάχιστον 21% σε σχέση με τα δύο σχήματα ρύθμισης ισχύος που έχει προτείνει η 3GPP, καθώς είναι σε θέση να ικανοποιεί το απαιτούμενο throughput ανά ομάδα χρηστών ενώ ταυτόχρονα βελτιστοποιεί το χειρισμό των διαθέσιμων πόρων του HeNB. Αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας, όμως, μειώνεται αν αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των HUEs.

Στην αναφορά [20] προτείνονται δύο μέθοδοι ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιούν τις μετρήσεις των χρηστών προκειμένου να εξασφαλίσουν μια ελάχιστη ποιότητα υπηρεσίας στους HUEs ή να μειώσουν τις παρεμβολές στους MUEs.

Η πρώτη μέθοδος ελέγχου ισχύος βασίζεται στις μετρήσεις που εκτελούν οι HUEs για την ισχύ που λαμβάνουν από το HeNB που τους εξυπηρετεί, τους γειτονικούς HeNBs και το MeNB. Ο HeNB αξιοποιεί αυτές τις πληροφορίες και ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του με βάση τον τύπο:

$$P_{HUE_assisted} = \max\left(P_{min}, \min\left(P_1, P_{max}\right)\right) \qquad (24)$$

όπου

$P_1 = \max_i\left(I_{HUE_i} + L_{HeNB\rightarrow HUE_i}\right) + \varepsilon_1$

I_{HUE_i} οι λαμβανόμενες παρεμβολές συν το θόρυβο στον i-οστό HUE

$L_{HeNB\rightarrow HUE_i}$ οι απώλειες από το HeNB στον i-οστό HUE

ε_1 μια παράμετρος που ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το ελάχιστο QoS για τους HUEs.

Στόχος αυτής της μεθόδου είναι να εξασφαλίσει ότι ο HUE με το χαμηλότερο SINR ικανοποιεί κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις QoS.

Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στις μετρήσεις των MUEs και έχει ως στόχο να μειώσει τις παρεμβολές στο MUE που βρίσκεται πλησιέστερα στο HeNB. Ο HeNB χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να ρυθμίσει την ισχύ εκπομπής του με βάση τον τύπο:

$$P_{MUE_assisted} = \max\left(P_{min}, \min\left(P_2, P_{max}\right)\right) \qquad (25)$$

όπου

$P_2 = 10\log\left(10^{(S_{MUE}+\varepsilon_2)/10} - 10^{I/10}\right) + L_{HeNB\rightarrow MUE}$

$L_{HeNB\rightarrow MUE}$ οι απώλειες από το HeNB στον κοντινότερο MUE

I οι παρεμβολές στο MUE από άλλους σταθμούς βάσης

S_{MUE} η λαμβανόμενη ισχύς στο MUE από τον MeNB που τον εξυπηρετεί

ε_2 οι ελάχιστες απαιτήσεις QoS για το MUE

Γίνεται αντιληπτό ότι ο έλεγχος ισχύος που βασίζεται σε πληροφορίες που στέλνουν οι χρήστες στους σταθμούς βάσης είναι μια διαδικασία κατά την οποία πρέπει να ενημερώνεται δυναμικά η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης ανάλογα με τις θέσεις των χρηστών και τις παρεμβολές από γειτονικούς BSs. Ενώ η πρώτη μέθοδος καταφέρνει να εγγυηθεί την ελάχιστη απαίτηση QoS για τους HUEs, η δεύτερη μέθοδος δίνει περισσότερη προσοχή στις παρεμβολές που υφίστανται οι MUEs. Σε αυτή τη περίπτωση η πληροφορία για τις μετρήσεις του MUE πρέπει να σταλεί στο HeNB μέσω του backhaul δικτύου, καθώς δεν υπάρχει άμεση διασύνδεση μεταξύ του MUE και του HeNB. Αυτό μπορεί να προκαλέσει επιπλέον κόστος σηματοδοσίας (signaling overhead).

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν ότι με την εφαρμογή ελέγχου ισχύος βελτιώνεται το throughput των macrocells, αλλά υποβαθμίζεται η απόδοση των femtocells, σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος ισχύος και οι HeNBs εκπέμπουν με τη μέγιστη ισχύ. Η μέθοδος που βασίζεται στις μετρήσεις των MUEs παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση σε ότι αφορά τα macrocells, καθώς εστιάζει στη μείωση των παρεμβολών στους MUEs, έχει όμως και τη χειρότερη απόδοση για τα femtocells. Τέλος με τις δύο προτεινόμενες μεθόδους η πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης ενός MUE μειώνεται τουλάχιστον κατά 10% σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται έλεγχος ισχύος, ενώ η αντίστοιχη πιθανότητα για τους HUEs αυξάνεται το πολύ κατά 17%.

Στην αναφορά [21] προτείνεται ένας κατανεμημένος ευρετικός (heuristic) αλγόριθμος ελέγχου ισχύος που στοχεύει στη μείωση της άσκοπης χρήσης ισχύος, ιδίως για τους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο των κυψελών και συνήθως αντιμετωπίζουν καλές συνθήκες καναλιού. Ο αλγόριθμος αυτός αυξάνει την ισχύ εκπομπής που αντιστοιχεί στα RBs που ανατίθενται στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών και αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα παρεμβολών και απωλειών.

Ο χρονοπρογραμματισμός του downlink καναλιού στο LTE απαιτεί να σταλούν συγκεκριμένες πληροφορίες από τα τερματικά στο δίκτυο. Οι πληροφορίες αυτές διαβιβάζονται μέσω των αναφορών κατάστασης καναλιού (channel state reports) που περιέχουν μεταξύ άλλων και την πληροφορία CQI (Channel Quality Indication). Κάθε χρήστης καθορίζει την τιμή του CQI με βάση μετρήσεις των σημάτων αναφοράς στο downlink και στέλνει αυτή την πληροφορία στον σταθμό βάσης ως ένδειξη του ρυθμού δεδομένων που μπορεί να υποστηριχτεί από το κανάλι. Αυτό βοηθά τον eNB να επιλέξει το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και ρυθμό κωδικοποίησης για τη downlink μετάδοση. Υπάρχουν δύο τύποι αναφορών κατάστασης καναλιού στο LTE: οι περιοδικές που ρυθμίζονται από το δίκτυο ώστε να παραδίδονται με ορισμένη περιοδικότητα και οι απεριοδικές που παραδίδονται όταν ζητούνται ρητώς από το δίκτυο.

Στο paper αυτό, η πληροφορία CQI χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος κατανομής της ισχύος στο downlink. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνεται ένας κατανεμημένος ευρετικός αλγόριθμος ελέγχου ισχύος που υπολογίζει την κατανομή της ισχύος στα RBs σύμφωνα με τις τιμές του CQI που λαμβάνονται από τους χρήστες. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, ο scheduler κάθε σταθμού βάσης εκτελεί την ανάθεση των RBs και της ισχύος εκπομπής ανά TTI, ανεξάρτητα από τους άλλους σταθμούς βάσης στο δίκτυο. Η ιδέα του αλγόριθμου είναι η ελαχιστοποίηση την ισχύος εκπομπής στο downlink, χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοση των χρηστών που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης. Επιπλέον, αυξάνεται η ισχύς εκπομπής που κατανέμεται στα RBs που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές SINR προκειμένου να διασφαλιστεί η καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος.

Πιο συγκεκριμένα εάν η ληφθείσα τιμή του CQI είναι υψηλότερη από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου $CQI_{\text{threshold}}$, τότε η ισχύς εκπομπής μειώνεται, εφόσον είναι μεγαλύτερη από μία προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή ισχύος P_{min}. Αντίστοιχα αν η τιμή του CQI είναι χαμηλότερη από το $CQI_{\text{threshold}}$, τότε η ισχύς αυξάνεται εφόσον είναι μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ισχύος εκπομπής P_{max}, όπου:

$$P_{max} = \frac{\text{Μέγιστη ισχύς του sector στο downlink}}{\text{Αριθμός διαθέσιμων RBs}} \qquad (26)$$

Η ελάχιστη ισχύς εκπομπής P_{min} είναι μια προκαθορισμένη παράμετρος που εγγυάται ένα αποδεκτό ρυθμό bit στα συγκεκριμένα RBs. Το κατώφλι $CQI_{\text{threshold}}$ μπορεί να λάβει μία από τις δεκαπέντε πιθανές ακέραιες τιμές 1 ≤ CQI ≤ 15. Όταν το $CQI_{\text{threshold}} = 15$ ο αλγόριθμος ελέγχου ισχύος κατανέμει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής σε κάθε RB. Το P_{max} εγγυάται ότι η μέγιστη ισχύς εκπομπής που κατανέμεται σε όλα τα RBs είναι πάντα μικρότερη ή ίση με τη μέγιστη ισχύ εκπομπής στη κυψέλη.

Αλγόριθμος 1.

1: Κάθε χρήστης στέλνει την πληροφορία CQI για όλα τα διαθέσιμα RBs στο σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί

2: Για κάθε RB ∈ RB_pool

Εάν (($CQI < CQI_{\text{threshold}}$) και ($P_{t-TTI} < P_{maxperRB}$)) τότε

$P_t \leftarrow P_{t-TTI} + Power_Control_Step$

αλλιώς αν ((($CQI > CQI_{\text{threshold}}$) και ($P_{t-TTI} > P_{maxperRB}$)) τότε

$P_t \leftarrow P_{t-TTI} - Power_Control_Step$

Ο Αλγόριθμος 1 περιγράφει πως ο scheduler ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής που κατανέμεται σε κάθε RB με βάση την τελευταία ανατροφοδότηση που έλαβε ο σταθμός βάσης για το CQI. Στόχος του αλγορίθμου είναι να αποφευχθεί η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας για τους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης άρα κοντά στους σταθμούς βάσης και γενικότερα για τους χρήστες που έχουν καλές συνθήκες καναλιού δηλαδή υψηλές τιμές CQI. Επιπλέον, αυτή η μείωση ισχύος θα μειώσει τις διακυψελικές παρεμβολές που πλήττουν κυρίως τους χρήστες που βρίσκονται στα άκρα των γειτονικών κυψελών και θα βελτιώσει την απόδοση τους αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης για τα RBs που έχουν ανατεθεί σε αυτούς τους χρήστες.

Με βάση τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν προκύπτουν μια σειρά από συμπεράσματα:

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω αλγόριθμο, η συνολική απόδοση του συστήματος παραμένει ίδια με αυτή που παρουσιάζει το σύστημα χωρίς να εφαρμοστεί έλεγχος ισχύος. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται καθώς μειώνεται μεν η ισχύς εκπομπής για τα RBs με υψηλή τιμή CQI, αλλά αυξάνεται η ισχύς για τα RBs που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές CQI, ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες που θα αντιμετωπίσουν λόγω των παρεμβολών και των απωλειών διάδοσης.

Η μέση ρυθμαπόδοση για τους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο των κυψελών παρουσιάζει μια ελάχιστη μείωση. Οι εν λόγω χρήστες βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης οπότε παρουσιάζουν μικρές απώλειες διαδρομής. Επιπλέον επηρεάζονται λιγότερο από τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, δεδομένου ότι τα σήματα

παρεμβολής θα αντιμετωπίσουν σημαντική υποβάθμιση πριν φθάσουν σε αυτούς. Έτσι οι πόροι που κατανέμονται σε αυτούς τους χρήστες παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές CQI, οπότε η ισχύς εκπομπής που διατίθενται για τους συγκεκριμένους πόρους είναι μειωμένη.

Η μέση ρυθμαπόδοση για τους χρήστες που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών αυξάνεται με τη χρήση του αλγορίθμου. Οι χρήστες αυτοί αντιμετωπίζουν τα περισσότερα προβλήματα διακυψελικών παρεμβολών καθώς παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες διαδρομής και πλήττονται ιδιαίτερα από τα σήματα παρεμβολών που μεταδίδονται από τις γειτονικές κυψέλες. Εφόσον τα RBs που ανατίθενται σε αυτούς τους χρήστες χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές CQI, η ισχύς που διατίθεται για αυτά τα RBs αυξάνεται. Έτσι μειώνονται οι απώλειες των σημάτων που προκαλούνται από τη διάδοση στο χώρο. Επιπλέον εφόσον μειώνεται η ισχύς για τους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο των κυψελών, μειώνονται και οι διακυψελικές παρεμβολές που αντιμετωπίζουν οι χρήστες στα άκρα των κυψελών.

Τέλος η χρήση αυτού του αλγορίθμου συντελεί στην εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς μειώνεται αισθητά η συνολική ισχύς εκπομπής στο downlink χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοση του συστήματος

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με την περιεκτική καταγραφή των πλεονεκτημάτων και των προβλημάτων που παρουσιάζουν οι μέθοδοι ρύθμισης ισχύος που παρουσιάστηκαν στο υπό-κεφάλαιο αυτό.

Πίνακας 3: Επισκόπηση σχημάτων ρύθμισης ισχύος στο downlink

Αναφορά	Κύρια λειτουργία PC	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
[13]	Αποστολή μηνυμάτων παρεμβολών από τους MUEs στους HeNBs	(i) Μειώνονται οι παρεμβολές στους MUEs και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η υψηλή απόδοση των HUEs. (ii)Αποφεύγει αποτελεσματικά αχρείαστες αλλαγές στην ισχύ εκπομπής	Απαιτείται η αποστολή μηνυμάτων από τον MUE στο HeNB χωρίς όμως να υπάρχει απευθείας σύνδεση μεταξύ τους
[14]	Ρύθμιση ισχύος βάσει της θέσης του MUE (indoor / outdoor)	Βελτιώνεται η απόδοση του DL CCH με βάση την πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης (link failure probability, LPF)	(i) Σε περίπτωση περιττης ενεργοποίησης του PC λόγω λανθασμένης εκτίμησης ενός MUE ως θύμα παρεμβολών, Η DL απόδοση των HUE υποβαθμίζεται (ii) Το προτεινόμενο κριτήριο απόφασης για την ύπαρξη ενός τουλάχιστον indoor victim MUE θα οδηγήσει σε λανθασμένη εκτίμηση στη περίπτωση που υπάρχουν πολλοί outdoor MUEs και κανένας indoor MUE
[15]	Ρύθμιση ισχύος με βάση τη θέση του MUE σε σχέση με αυτές των HeNB & HUE	(i) αύξηση της συνολικής χωρητικότητας (ii) μείωση των παρεμβολών στους MUEs (iii) ικανοποιητικό throughput για τους HUEs	Υπολογισμός των απωλειών μεταξύ HeNB-MUE χωρίς να υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους (backhaul coordination)
[16]	Εξίσωση macro-υποβάθμισης (Macro-degradation equalization)	Παρατηρείται βελτίωση στην αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης των HUEs και MUEs	Η βελτίωση που παρατηρείται στην αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης των HUEs και MUEs μειώνεται καθώς αυξάνονται οι απώλειες διάδοσης μέσα από τοίχους
[17]	Ο HeNB πληροφορεί το server για τη θέση του. Ο server στέλνει τις μετρήσεις των MUEs στο BS	(i) Παρατηρείται βελτίωση στην αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης των HUEs και MUEs (ii) Ευρωστία απέναντι σε σφάλματα θέσης και απωλειών διάδοσης μέσα από τοίχους	(i) Συντήρηση μιας βάσης δεδομένων (ii) Προστίθεται σηματοδοσία μεταξύ HeNB-server στο δίκτυο πυρήνα
[18]	Μείωση της ισχύος στη τιμή που οδηγεί στο χαμηλότερο SINR στη περιοχή COR	Μειώνεται σημαντικά η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής και οι παρεμβολές στους MUEs, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται το απαιτούμενο υψηλό επίπεδο QoE στους εξυπηρετούμενους HUEs.	(i) υπόκειται στην αξιοπιστία του μηχανισμού που μετράει το QoE (ii) προϋποθέτει μια αποτύπωση της σχέσης SINR - QoE για το σενάριο στο οποίο εφαρμόζεται
[19]	Ομαδοποίηση των HUEs με βάση τις απαιτήσεις τους σε ισχύ εφαρμογή διαφορετικού αλγορίθμου PC σε κάθε group	Επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ισχύος τουλάχιστον 21% σε σχέση με τα σχήματα ρύθμισης ισχύος που έχει προτείνει η 3GPP. Ικανοποιεί το απαιτούμενο throughput ανά ομάδα χρηστών ενώ ταυτόχρονα βελτιστοποιεί το χειρισμό των διαθέσιμων πόρων του HeNB.	Γίνεται η υπόθεση ότι οι HUEs έχουν σταθερές θέσεις. Αν ληφθεί υπόψη η κινητικότητα των χρηστών, απαιτείται περιοδική επανεκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος ανά group, άρα εισάγεται περαιτέρω πολυπλοκότητα στο HeNB
[20]	Ρύθμιση της ισχύος με βάση τις μετρήσεις που κάνουν οι χρήστες (MUEs & FUEs)	Η FUE-assisted μέθοδος εγγυάται την ελάχιστη απαίτηση QoS για τους HUEs, Η MUE-assisted μέθοδος μειώνει τις παρεμβολές στους MUEs.	-Με τις 2 προτεινόμενες μεθόδους είτε περιορίζονται οι παρεμβολές στους MUEs είτε εγγυάται η απόδοση των HUEs . Δεν επιτυγχάνονται και τα 2 μαζί -Η πληροφορία για τις μετρήσεις του MUE πρέπει να σταλεί στο HeNB μέσω του backhaul δικτύου, προκαλώντας επιπλέον κόστος σηματοδοσίας (signaling overhead).
[21]	Κάθε BS ρυθμίζει ανεξάρτητα την ισχύ εκπομπής του με βάση το CQI feedback που λαμβάνει από τους χρήστες	-Μειώνεται η συνολική ισχύς του συστήματος στο DL, άρα εξοικονομείται ενέργεια χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοση του συστήματος -Αυξάνεται το throughput των cell-edge χρηστών	Θεωρείται ομογενές δίκτυο κυψελών, δε προβλέπεται η παρουσία femtocells που θα επιδείνωνε τις παρεμβολές

5.2 Λύσεις προσαρμοσμένες στην ανωφερή ζεύξη

Στην αναφορά [15] παρουσιάζεται ένα σενάριο παρεμβολών στο οποίο οι MUEs που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών εκπέμπουν με υψηλή ισχύ προκειμένου να αντισταθμίσουν τις μεγάλες απώλειες προς τους σταθμούς βάσης που τους εξυπηρετούν. Επηρεάζονται έτσι ισχυρά οι μεταδόσεις των HeNBs στο uplink λόγω των παρεμβολών από τους MUEs, ειδικά αν οι τελευταίοι βρίσκονται αρκετά κοντά.

Ο τύπος που έχει προταθεί από τη 3GPP για τον έλεγχο ισχύος ανοικτού βρόχου στο uplink μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$P_{UL} = \min\{P_{max}, P_0 + a \cdot PL\} \qquad (27)$$

όπου

P_{max}, η μέγιστη ισχύς εκπομπής που επιτρέπεται από το τερματικό

P_0, μια παράμετρος με μια συνιστώσα $P_{0_nominal}$ ειδική για κάθε κυψέλη και μια συνιστώσα P_{0_UE} ειδική για κάθε UE.

α, μια παράμετρος ειδική για κάθε κυψέλη που παίρνει μόνο τις τιμές [0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1]

PL, οι απώλειες της σύνδεσης

Ο κλασματικός παράγοντας α επιτρέπει σε UEs που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης να λειτουργούν με χαμηλότερες απαιτήσεις λαμβανόμενου σήματος ώστε να προκαλούν μικρότερη παρεμβολή στις γειτονικές κυψέλες.

Στο paper αυτό προτείνεται ο έλεγχος ισχύος του HUE να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την ποιότητα του επιθυμητού λαμβανόμενου σήματος αλλά και τις παρεμβολές από το κοντινότερο MUE. Προκειμένου να αποφύγει αυτές τις παρεμβολές όταν πλησιάζει ο MUE, η ισχύς του HUE θα πρέπει να αυξηθεί. Η απλούστερη λύση θα ήταν να καθοριστεί μια μέγιστη τιμή αύξησης της ισχύος του UE για κάθε HeNB. Πιο εξελιγμένα συστήματα θα μπορούσαν να στηριχθούν σε μηχανισμούς όπου ο HeNB υπολογίζει αυτόνομα την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής του UE βάσει των μετρήσεων του HeNB. Οπότε η ισχύς θα πρέπει να αυξάνεται με την αύξηση των απωλειών μεταξύ HUE και MeNB. Προτείνεται λοιπόν μια μέθοδος ελέγχου ισχύος βάσει της θέσης του HUE, με την οποία ρυθμίζονται οι τιμές των παραμέτρων α και P_0 με βάση την τιμή $PL_{HUE-\mathrm{MeNB}}$ όπως φαίνεται στο παρακάτω τύπο

$$P_{UL} = \min\{P_{max}, P_0(PL_{HUE-\mathrm{MeNB}}) + a(PL_{HUE-\mathrm{MeNB}}) \cdot PL_{HUE-HeNB}\} \qquad (28)$$

όπου οι παράμετροι α και P_0 είναι συναρτήσεις των απωλειών μεταξύ HUE και MeNB, για παράδειγμα:

$$P_0(PL_{HUE-\mathrm{MeNB}}) = P_{0_HUE} + \beta_{0_HUE} \cdot PL_{HUE-\mathrm{MeNB}}$$
$$a(PL_{HUE-\mathrm{MeNB}}) = a_{0_HUE} + \gamma_{0_HUE} \cdot PL_{HUE-\mathrm{MeNB}} \qquad (29)$$

όπου P_{0_HUE}, β_{0_HUE}, a_{0_HUE}, γ_{0_HUE} είναι ρυθμιζόμενες παράμετροι

Με τον προτεινόμενο αλγόριθμο, όταν δεν υπάρχει MUE κοντά στο HeNB, δεν είναι απαραίτητο να αυξηθεί σημαντικά η ισχύς του HUE, διαφορετικά θα δημιουργήσει επιπλέον παρεμβολές στο MenB και θα μειωθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Η κυψέλη διαιρείται σε δύο περιοχές, την κεντρική περιοχή (cell center) και τα άκρα (cell edge) της κυψέλης και ο HeNB επιλέγει ποιο τύπο ρύθμισης ισχύος θα χρησιμοποιήσει με βάση τις απώλειες μεταξύ HUE και MeNB. Εάν ο HUE βρίσκεται στην κεντρική περιοχή του macrocell, μπορεί να επιλέξει τον τύπο (28). Εάν ο HUE βρίσκεται στα

άκρα του macrocell, τότε ελέγχει αν υπάρχει MUE κοντά στο HeNB οπότε και θα επιλέξει τον τύπο (28) αλλιώς χρησιμοποιεί τον τύπο (27) για εξοικονόμηση ενέργειας.

Με αυτή τη μέθοδο βελτιώνεται η τιμή του SINR των HUEs και η συνολική χωρητικότητα του συστήματος χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση των MUEs.

Στην αναφορά [22] προτείνεται μια μέθοδος ελέγχου ισχύος στο UL που λαμβάνει υπόψη τις παρεμβολές στις γειτονικές κυψέλες προκειμένου να θέσει μια κατάλληλη τιμή ως στόχο για το SINR των UEs.

Ο συμβατικός έλεγχος ισχύος στοχεύει στη διατήρηση του ίδιου SINR για όλα τα UEs αντισταθμίζοντας πλήρως τις απώλειες διαδρομής και σκίασης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις παρεμβολές σε γειτονικές κυψέλες. Στην περίπτωση αυτή, τα UEs στα άκρα των κυψελών μεταδίδουν με πολύ μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με τα UEs στην εσωτερική περιοχή, προκαλώντας έτσι ισχυρές παρεμβολές στις γειτονικές κυψέλες. Λόγω αυτής τη συμπεριφοράς προτάθηκε η μέθοδος του κλασματικού ελέγχου ισχύος (FPC) στην οποία η τιμή στόχος για το SINR ρυθμίζεται έτσι ώστε να αυξάνεται καθώς μειώνονται οι απώλειες διαδρομής. Έτσι, UEs με μεγάλες απώλειες διαδρομής αντιμετωπίζονται ως UEs που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης και τίθεται για αυτά μια χαμηλή τιμή στόχος για το SINR. Με αυτό τον τρόπο ο έλεγχος ισχύος μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιείται το απαιτούμενο SINR από τα UEs. Ωστόσο, η διαδικασία προσδιορισμού των «εσωτερικών» και «οριακών» UEs χρησιμοποιώντας αποκλειστικά την τιμή των απωλειών διαδρομής δεν είναι αποτελεσματική σε ένα δίκτυο όπου μικρές κυψέλες μπορούν να αναπτυχθούν με άναρχο τρόπο. Για παράδειγμα, MUEs με μικρές απώλειες διαδρομής μπορεί να συνορεύουν με μικρές κυψέλες αλλά βάσει της μεθόδου FPC να θεωρείται ότι βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή της κυψέλης και να τίθεται μια υψηλή τιμή στόχος για το SINR. Η μέθοδος FPC δεν μπορεί να εντοπίσει σωστά αυτού του είδους τα UEs, με αποτέλεσμα να προκαλούνται σοβαρές παρεμβολές μεταξύ των macrocells και των μικρότερων κυψελών. Επίσης στη μέθοδο FPC η ρύθμιση ισχύος εφαρμόζεται ανεξάρτητα σε κάθε κυψέλη, χωρίς να υπάρχει συντονισμός μεταξύ γειτονικών κυψελών, ώστε για παράδειγμα να προσαρμόζεται η τιμή της ισχύος ανάλογα με τις πληροφορίες για την τιμή του IoT (Interference over Thermal Noise) και το φορτίο των γειτονικών κυψελών.

Προτείνεται λοιπόν μια νέα μέθοδος ελέγχου ισχύος στο UL, κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη οι παρεμβολές στις γειτονικές κυψέλες σύμφωνα με τις απώλειες διαδρομής μεταξύ ενός UE και του γειτονικού eNodeB. Στον υπολογισμό της τιμής στόχου για το SINR προστίθεται μια ποσότητα offset βάσει του IoT των γειτονικών κυψελών.

Υποθέτουμε ότι για κάθε UE, ο eNodeB που το εξυπηρετεί και ο πλησιέστερος γειτονικός eNodeB μπορούν να προσδιοριστούν μέσω της λαμβανόμενης ισχύς στο DL. Για να ελεγχθούν οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, θα πρέπει να περιοριστεί σε ένα αποδεκτό επίπεδο η παρεμβολή από κάθε UE στο πλησιέστερο γειτονικό eNodeB:

$$SINR_{Tar} + NI_{serving} - \left(PL_{neighbor} - PL_{serving}\right) < I_{neighbor} \qquad (30)$$

όπου $NI_{serving}$ είναι το επίπεδο θορύβου και παρεμβολών στη κυψέλη εξυπηρέτησης, $PL_{neighbor}$ οι απώλειες μεταξύ του UE και του γειτονικού eNB, $PL_{serving}$ οι απώλειες μεταξύ του UE και του eNB που το εξυπηρετεί.

Από την εξίσωση αυτή εξάγονται δύο κριτήρια για τον καθορισμό της τιμής στόχου του SINR.

Πρώτον, για να διακριθούν οι UEs στα άκρα μιας κυψέλης από αυτούς στην εσωτερική περιοχή της, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί η διαφορά απωλειών διαδρομής $\Delta_{PL} = PL_{neighbor} - PL_{serving}$ από ότι μόνο οι απώλειες $PL_{serving}$. Έτσι για τους UEs στην εσωτερική περιοχή της κυψέλης που παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά απωλειών διαδρομής τίθεται υψηλή τιμή SINR ως στόχος, καθώς προκαλούν μικρότερες παρεμβολές στους γειτονικούς eNBs, ενώ για τους UEs στα άκρα της κυψέλης που παρουσιάζουν μικρή διαφορά απωλειών διαδρομής τίθεται χαμηλή τιμή SINR ως στόχος, καθώς προκαλούν ισχυρές παρεμβολές .

Δεύτερον, το επίπεδο αποδοχής παρεμβολών $I_{neighbor}$ επηρεάζει τη τιμή στόχο του SINR. Αν ο γειτονικός eNB μπορεί να ανεχτεί ισχυρές παρεμβολές, τότε το $SINR_{Tar}$ για τον UE μπορεί να ρυθμιστεί υψηλότερα, και το αντίστροφο. Σε ετερογενή δίκτυα, το επίπεδο αποδοχής παρεμβολής σε διαφορετικές κυψέλες μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικό. Για παράδειγμα σε σύγκριση με τις macro κυψέλες, οι μικρές κυψέλες έχουν συνήθως πολύ μικρότερη περιοχή κάλυψης και μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ λιγότερα UEs. Έτσι τα UEs μικρών κυψελών μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις τους σε QoS ακόμη κι αν δεχτούν ισχυρότερη παρεμβολή. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να τεθεί ως στόχος υψηλότερη τιμή SINR για αυτές τις μικρές κυψέλες απ ότι για τις γειτονικές macro κυψέλες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει η ακόλουθη μέθοδος ελέγχου ισχύος που θέτει ως $SINR_{Tar}$

$$SINR_{Tar} = SINR_{Tar}^{nominal} + \beta(\Delta PL - \Delta PL_{nominal}) + \Delta_{neighbor} \quad (31)$$

όπου β ο παράγοντας αντιστάθμισης των απωλειών διαδρομής, $SINR_{Tar}^{nominal}$ και $\Delta PL_{nominal}$ είναι προκαθορισμένες τιμές, $\Delta PL = PL_{neighbor} - PL_{serving}$ η διαφορά απωλειών διαδρομής που μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\Delta PL = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_{serving}^{Tx}/P_{serving}^{Rx}}{P_{sneighbor}^{Tx}/P_{sneighbor}^{Rx}}\right) \quad (32)$$

όπου $P_{serving}^{Tx}$ και $P_{serving}^{Rx}$ η ισχύς εκπομπής και λήψης για το DL pilot από τον eNB εξυπηρέτησης. $P_{sneighbor}^{Tx}$ και $P_{sneighbor}^{Rx}$ η ισχύς εκπομπής και λήψης για το DL pilot από το γειτονικό eNB.

Το $\Delta_{neighbor}$ είναι μια ποσότητα offset, η τιμή της οποίας ρυθμίζεται ανάλογα με την τιμή του IoT της ισχυρότερης γειτονικής κυψέλης στο UE.

Ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1) Ενεργοποίηση αναφοράς IoT status: Αν η γειτονική κυψέλη ικανοποιεί μία από τις εξής δύο προϋποθέσεις α) φορτίο < threshold1 && IoT < threshold2 β) φορτίο > threshold3 && IoT > threshold4, θα στείλει το IoT status στη macro κυψέλη

2) Ανάλογα με την τιμή του IoT, ο MeNB θα θέσει ένα θετικό ή αρνητικό offset στο $SINR_{Tar}$ όλων των UEs που γειτνιάζουν με αυτή τη κυψέλη.

3) Με βάση τις νέες τιμές στόχους για το SINR, στέλνονται νέες εντολές TPC στα UEs

Σύμφωνα με την εξίσωση (30), η ισχύς εκπομπής για το UE δίνεται από τον τύπο:

$$P = min\{P_{max}, SINR_{Tar}^{nominal} + \beta(\Delta PL - \Delta PL_{nominal}) + \Delta_{neighbor} + NI_{serving} - PL_{serving}\} \quad (33)$$

Τελικά με τις βελτιώσεις που προτείνονται σε αυτή τη μέθοδο ελέγχου ισχύος παρατηρείται σημαντική βελτίωση του throughput τόσο για τους UEs στα όρια των κυψελών όσο και για αυτούς στο εσωτερικό τους.

Στην αναφορά [23] προτείνεται μία μέθοδος ρύθμισης ισχύος ανοιχτού βρόχου στο UL, βάσει της οποίας εκχωρείται διαφορετικός αριθμός από RBs σε κάθε UE ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού του χρήστη και τους περιορισμούς της ισχύος.

Γενικά η συνολική ισχύς εκπομπής του κάθε χρήστη καθορίζεται από δύο παράγοντες: την ισχύ ανά RB που ρυθμίζεται ανάλογα με τις απώλειες του χρήστη και επίσης από τον αριθμό των RBs που του έχουν εκχωρηθεί.

Στα συμβατικά σχήματα ελέγχου ισχύος, οι UEs με κακές συνθήκες καναλιού μεταδίδουν με μεγάλη συνολική ισχύ, αφού αντισταθμίζουν τις μεγάλες απώλειες με το να τους κατανέμεται μεγαλύτερη ισχύς εκπομπής σε κάθε RB, ενώ παράλληλα ο αριθμός των RBs που τους εκχωρούνται είναι ίδιος με των άλλων χρηστών. Αυτοί οι UEs βρίσκονται συνήθως στα άκρα των κυψελών με αποτέλεσμα να προκαλούν σοβαρές παρεμβολές στις άλλες κυψέλες. Προτείνεται λοιπόν η εκχώρηση λιγότερων RBs στα UEs που βρίσκονται στα όρια των κυψελών, ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές. Οι πόροι που εκχωρούνταν σε αυτούς τους UEs θα ανατεθούν τώρα σε UEs με καλύτερες συνθήκες καναλιού, που αντιμετωπίζουν μικρές απώλειες, εκπέμπουν με χαμηλότερη ισχύ και βρίσκονται μακριά από άλλες κυψέλες, οπότε το συνολικό επίπεδο παρεμβολής στο σύστημα μειώνεται. Παράλληλα αυξάνεται ο συνολικός ρυθμός δεδομένων ανά κυψέλη, που δίνεται από τον τύπο

$$\sum_{i=1}^{N} M_i \log(1 + SINR_{eff}^{i}) \quad (34)$$

όπου N ο αριθμός των UEs στη κυψέλη, M_i ο αριθμός των RBs που εκχωρούνται στο i-οστό UE. Το $SINR_{eff}^{i}$ εκφράζει την κατάσταση του καναλιού για τον i-οστό UE, για παράδειγμα χαμηλή τιμή $SINR_{eff}^{i}$ σημαίνει ότι το κανάλι παρουσιάζει μεγάλες απώλειες.

Το πρόβλημα της εκχώρησης πόρων συνίσταται στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού δεδομένων της κυψέλης

$$max_{M_i} \sum_{i=1}^{N} M_i \log(1 + SINR_{eff}^{i}) \quad (35)$$

με τους εξής περιορισμούς

- $\sum_{i=1}^{N} M_i = B$, δηλαδή το συνολικό bandwidth που ανατίθεται σε όλους τους UEs δε πρέπει να ξεπερνάει το bandwidth του συστήματος

- $10 \log_{10} M_i + PSD_{tx}^{i} \leq P_{max}$, δηλαδή η ισχύς εκπομπής κάθε UE δε πρέπει να παραβιάζει το περιορισμό μέγιστης ισχύος

- $M_{min} \leq M_i \leq M_{max,} M_{min} < M_{max}$

όπου B ο συνολικός αριθμός RBs στο σύστημα, PSD_{tx}^{i} η ισχύς εκπομπής σε κάθε RB του i-οστού UE και $M_{max,}$ M_{min} ο μέγιστος και ελάχιστος αριθμός RBs που μπορούν να εκχωρηθούν σε ένα UE αντίστοιχα.

Η διαδικασία της εκχώρησης των πόρων στον eNB έχει ως εξής:

Βήμα 1: Για τον i-οστό UE σε κάθε κυψέλη υπολόγισε την ισχύ εκπομπής PSD_{tx}^{i} σε ένα RB και το μέγιστο αριθμό RBs που μπορούν να χρησιμοποιηθούν $M_{max}^{i} = 10^{\frac{P_{max} - PSD_{tx}^{i}}{10}}$. Σύγκρινε την ελάχιστη τιμή του M_{max}^{i} για όλους τους UE με το M_{min}. Εάν η ελάχιστη τιμή είναι μικρότερη από το M_{min} αντικατέστησε το M_{min} με το $\min_{\mathrm{i}} (M_{max}^{i})$ για να

εξασφαλιστεί ότι ο αριθμός των RBs που θα χρησιμοποιηθούν από κάθε UE δε θα υπερβούν τον περιορισμό ισχύος

Βήμα 2: Για τον i-οστό UE σε κάθε κυψέλη αρχικοποίησε $M_i = M_{min}$ ως τον ελάχιστο αριθμό RBs στον i-οστό UE, ώστε να εξασφαλιστεί το ελάχιστο bandwidth για κάθε UE ακόμα κι αν βρίσκεται σε κακή κατάσταση καναλιού

Βήμα 3: Ταξινόμησε τις τιμές $SINR_{eff}^{i}$ των UEs σε φθίνουσα σειρά. Για κάθε UE i: Εάν το M_i υπερβαίνει την τιμή $\min(M_{max}^{\iota}, M_{max})$ προχώρα στο UE i+1, αλλιώς αντικατέστησε επαναληπτικά το M_i με $M_i + 1$. Πραγματοποίησε αυτό το βήμα για κάθε UE στη σειρά μέχρι να χρησιμοποιηθούν όλα τα RBs.

Βήμα 4: Μετά το βήμα 3 έχουμε τον αριθμό των RBs που θα εκχωρηθούν σε κάθε UE. Έπειτα εκχωρούνται τα RBs σε κάθε UE με 2 περιορισμούς: σε κάθε UE εκχωρούνται μόνο συνεχόμενα RBs και σε κάθε UE εκχωρούνται τα RBs με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού.

Οπότε τελικά για τη ρύθμιση της ισχύος κάθε UE υπολογίζονται οι απώλειες και η ισχύς εκπομπής με βάση τον τύπο:

$$P_{UL} = \min\{P_{max}, P_0 + 10\log_{10} M + a \cdot PL\} \qquad (36)$$

όπου M ο αριθμός των RBs που έχουν ανατεθεί στο UE.

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται υψηλότερη φασματική απόδοση του συστήματος με μειωμένες παρεμβολές και αποδοτικότερη χρήση της ισχύος.

Στην αναφορά [24] προτείνεται ένας ευρετικός (heuristic) αλγόριθμος βάσει του οποίου οι χρήστες των κυψελών διαιρούνται σε σύνολα, σε καθένα από τα οποία εφαρμόζεται διαφορετική ρύθμιση ισχύος. Με αυτή τη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί ένας δυναμικός μηχανισμός ελέγχου της ισχύος βάσει της κατανομής, της τοποθεσίας και του απαιτούμενου throughput των UEs.

Ορίζεται μια παράμετρος α που λειτουργεί ως ένας κλιμακωτός συντελεστής ισχύος με παρόμοιο τρόπο με την παράμετρο α του ανοικτού βρόχου ελέγχου ισχύος. Έτσι αν το α ισούται με 0 δεν εφαρμόζεται έλεγχος ισχύος, αν α=1 οι UEs μπορούν να αυξήσουν την ισχύ εκπομπής τους στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο προκειμένου να αντισταθμίσουν πλήρως τις απώλειες τους, ενώ οι τιμές μεταξύ 0 και 1 επιτυγχάνουν μερική αντιστάθμιση.

Γίνεται η υπόθεση ότι οι eNBs μπορούν να υποστηρίξουν ένα δυναμικό μηχανισμό για την ανάθεση διαφορετικής ισχύος εκπομπής στο uplink σε διαφορετικά σύνολα χρηστών σε μια κυψέλη. Αυτό σημαίνει ότι για τα σύνολα αυτά εφαρμόζονται διαφορετικές τιμές του α ανάλογα με την κατανομή των χρηστών, τη θέση τους σε σχέση με τους υπόλοιπους χρήστες στη κυψέλη, το απαιτούμενο throughput και το επίπεδο των παρεμβολών που παράγει το κάθε σύνολο. Κάθε σύνολο αντιπροσωπεύει χρήστες με παρόμοιες ιδιότητες και κάθε χρήστης από ένα σύνολο «συνδέεται» με όλους τους άλλους χρήστες από το ίδιο σύνολο.

Για τον καθορισμό των συνόλων των χρηστών σε μια κυψέλη χρησιμοποιείται ένας ευρετικός αλγόριθμος και στόχος είναι η βελτιστοποίηση της συνολικής ισχύος των διαφορετικών συνόλων συνδεδεμένων χρηστών, ώστε να εξασφαλιστεί το μέγιστο μέσο throughput ανά κυψέλη υπό τον περιορισμό των ελάχιστων παρεμβολών μεταξύ των κυψελών.

Γι αυτό το λόγο σχεδιάζεται το μοντέλο ενός πλήρως συνδεδεμένου κατευθυνόμενου γράφου με βάρη. Το βάρος κάθε ακτίνας A_iA_j ορίζεται ως το γινόμενο της απόστασης dA_iA_j μεταξύ των χρηστών A_i και A_j και του βάρους B_{A_i} του χρήστη A_i

$$\mathrm{Weight_{ij}} = dA_iA_j * B_{A_i} \qquad (37)$$

Το βάρος B_{A_i} του χρήστη A_i παριστάνει το απαιτούμενο throughput για μια συγκεκριμένη υπηρεσία και είναι συνάρτηση της παραμέτρου ισχύος εκπομπής $P_{0,PUSCH}$ που μεταδίδεται από τον eNB, του αριθμού των RBs και του συντελεστή α

$$B_{A_i} = f(P_{0,PUSCH}; PRB; a) \qquad (38)$$

Παριστάνοντας ως A_k τον eNB εξυπηρέτησης, τα βάρη των ακτινών από τους χρήστες στον κόμβο εξυπηρέτησης είναι

$$\mathrm{Weight_{ik}} = dA_iA_k * B_{A_i} \qquad (39)$$

Οι παράμετροι AUPP (Absolute Uplink Power Potential) και RUPP (Relative Uplink Power Potential) παριστάνουν τη συνεισφορά των χρηστών στην ισχύ εκπομπής.

$$\mathrm{AUPP} = \sum_{\mathrm{i=1,i\neq k}}^{\mathrm{N+1}} \mathrm{Weight_{ik}} * \mathrm{M}A_{ik} \qquad (40)$$

όπου $\mathrm{M}A_{ik}$ η k-οστή στήλη από τον πίνακα σύνδεσης που ορίζεται παρακάτω.

Πρακτικά η παράμετρος AUPP παριστάνει επίσης την απευθείας συνεισφορά των χρηστών στη συνολική παρεμβολή προς άλλες κυψέλες. Η γενική υπόθεση είναι ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ ενός χρήστη και του eNB εξυπηρέτησης αυξάνεται και η συνεισφορά του στις παρεμβολές στη πλησιέστερη γειτονική κυψέλη.

Η παράμετρος RUPP ορίζεται μέσω των βαρών των χρηστών A_j που συνδέονται με τους χρήστες A_i και η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$\mathrm{RUPP} = \sum_{\mathrm{i=1,i\neq k}}^{\mathrm{N+1}} \sum_{\mathrm{j=1,j\neq k}}^{\mathrm{N+1}} \mathrm{Weight_{ij}} * \mathrm{M}A_{ij} \qquad (41)$$

όπου $\mathrm{M}A_{ij}$ τα στοιχεία του πίνακα συνδέσεων M(i,j) με τιμές:

$$\mathrm{M}A_{ij} = \begin{cases} 1, \text{εάν ο χρήστης } A_j \text{ συνδέεται με τον } A_i \\ 0, \text{εάν ο χρήστης } A_j \text{ δε συνδέεται με τον } A_i \\ 1, \text{για } i = j \end{cases}$$

Για ένα σύνολο χρηστών που βρίσκονται στη μικρότερη απόσταση από όλους τους άλλους χρήστες, ορίζεται μια συνάρτηση σύνδεσης G_f ως το άθροισμα των AUPP και RUPP

$$G_f = AUPP + RUPP \qquad (42)$$

Η βασική ιδέα πίσω από αυτή τη σύνδεση είναι η δημιουργία συνόλων χρηστών με τα αντίστοιχα βάρη για τα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η ίδια τεχνική ελέγχου ισχύος. Αυτό μπορεί να γίνει λύνοντας το αποκαλούμενο πρόβλημα εύρεσης των p-medians σε ένα γράφο με βάρη. Καταλήγουμε λοιπόν στο εξής πρόβλημα, βρες το $MIN\{G_f = AUPP + RUPP\}$ υπό τους ακόλουθους περιορισμούς:

- $B_{A_i} \leq B_{max}$ δηλαδή το απαιτούμενο throughput του χρήστη να είναι μικρότερο από ένα μέγιστο όριο.

- $dA_iA_k \leq d_{max}$ δηλαδή η απόσταση μεταξύ 2 χρηστών να είναι μικρότερη από μια δεδομένη d_{max}. Στη γενική περίπτωση αυτή θα είναι η διάμετρος της περιοχής εξυπηρέτησης.

Χρησιμοποιώντας τον ευρετικό αλγόριθμο η εύρεση ενός συνόλου αγνώστου αριθμού σημείων που βρίσκεται στη μικρότερη απόσταση από όλα τα άλλα σημεία στο γράφο (δηλαδή το σύνολο p-median) βασίζεται στην υπόθεση ότι το σύνολο μπορεί να δημιουργηθεί μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης ενός σημείου σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Στο πρώτο βήμα, ως πρώτο μέλος του median συνόλου επιλέγεται ο κόμβος χρήστη για τον οποίο το άθροισμα των στοιχείων στη γραμμή του πίνακα Floyd είναι το ελάχιστο σε σύγκριση με τα αθροίσματα των άλλων κόμβων. Στο δεύτερο βήμα, για τους υπόλοιπους N-1 κόμβους στο γράφο, επιλέγεται το δεύτερο μέλος του συνόλου υπολογίζοντας τις N-1 συναρτήσεις σύνδεσης G_f και βρίσκοντας τη μικρότερη τιμή. Με αυτό τον τρόπο το σύνολο αυξάνεται διαδοχικά και ο αριθμός των συγκρίσεων μειώνεται με το N-p, όπου p η τρέχουσα διάσταση του median συνόλου. Η διαδικασία λήγει όταν το αποτέλεσμα του υπολογισμού της συνάρτησης G_f για p είναι μεγαλύτερο από αυτό για p-1.

Έχοντας ορίσει τους χρήστες σε σύνολα, εφαρμόζεται στη συνέχεια σε κάθε σύνολο ένας από τους γνωστούς αλγορίθμους ρύθμισης ισχύος στο UL.

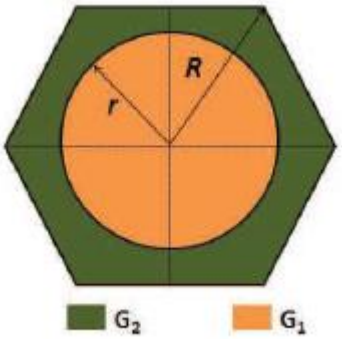
Στην αναφορά [25] προτείνεται μια βελτίωση στο σχήμα κλασματικής ρύθμισης ισχύος (FPC) της 3GPP προκειμένου να αποφευχθεί η μείωση του throughput που αυτή επιφέρει. Η βελτιωμένη μέθοδος χρησιμοποιεί επίσης την αρχή της κλασματικής ρύθμισης ισχύος αλλά διαχωρίζει τους χρήστες σε αυτούς που παράγουν ισχυρές παρεμβολές (ομάδα G_2) και σε αυτούς που παράγουν χαμηλές παρεμβολές (ομάδα G_1). Έτσι η κλασματική αντιστάθμιση των απωλειών θα είναι διαφορετική σε κάθε ομάδα.

Συμβολίζουμε με RB_i^p το i-οστό RB που εκχωρείται στη p-οστή κυψέλη ($enodeB^p$) και με PL_{ip}^j τις απώλειες μεταξύ του χρήστη που του έχει εκχωρηθεί το RB_i^p και ενός άλλου $enodeB^j$ (όχι αυτού που εξυπηρετεί τον χρήστη)

Η βασική ιδέα της νέας μεθόδου είναι η ανάθεση μιας διαφορετικής τιμής του παράγοντα αντιστάθμισης απωλειών, α, σε κάθε ομάδα χρηστών. Η διάκριση των χρηστών μπορεί να γίνει με 2 τρόπους.

Α. Ταξινόμηση βάσει θέσης

Θεωρείται περιβάλλον χωρίς απώλειες σκίασης. Το σύνολο G_1 περιλαμβάνει τους χρήστες στην εσωτερική περιοχή της κυψέλης ενώ το σύνολο G_2 περιέχει τους χρήστες που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης. Η ταξινόμηση φαίνεται καλύτερα στην εικόνα 4 όπου με r συμβολίζεται η ακτίνα του δίσκου στο εσωτερικό του οποίου βρίσκονται οι χρήστες του συνόλου G_1. Στον υπόλοιπο χώρο της κυψέλης βρίσκονται χρήστες του συνόλου G_2.



Σχήμα 30: Ταξινόμηση των χρηστών με βάση τη θέση τους στη κυψέλη [25]

Με d συμβολίζεται η απόσταση κάθε χρήστη από τον eNB που τον εξυπηρετεί, οπότε η ταξινόμηση γίνεται με βάση την τιμή του d:

$$G_1 = \{\text{οι χρήστες για τους οποίους ισχύει } d \leq r\} \quad (43)$$

$$G_2 = \{\text{οι χρήστες για τους οποίους ισχύει } d > r\} \quad (44)$$

Β. Ταξινόμηση χρηστών λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες λόγω σκίασης

Όταν ο χρήστης υπολογίζει τις απώλειες είναι αδύνατο να διακρίνει μεταξύ αργών και ημι-στατικών διακυμάνσεων. Οι εκτιμώμενες απώλειες λαμβάνουν υπόψη και τους 2 τύπους. Προτείνεται λοιπόν η ταξινόμηση των χρηστών στα σύνολα G_1 και G_2 λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες. Γίνεται η υπόθεση ότι οι παρεμβολές σε κάθε κυψέλη προκαλούνται μόνο από τις 6 άμεσες γειτονικές κυψέλες. Θεωρούμε ένα χρήστη στον οποίο εκχωρήθηκε το RB_i^p και υπολογίζουμε τις διαφορές μεταξύ των τιμών PL_{ip}^p και PL_{ip}^j όπου $p \neq j$. Θεωρούμε την ελάχιστη διαφορά $DPL_{ip} = min_{j \neq p}(|PL_{ip}^p - PL_{ip}^j|)$ [dB] που αντιστοιχεί στον eNB που δέχεται τις ισχυρότερες παρεμβολές από το RB_i^p. Για χαμηλή τιμή της DPL, ο χρήστης προκαλεί ισχυρή παρεμβολή σε κάποιο από τα γειτονικά κελιά, ενώ για υψηλές τιμές του DPL, οι παρεμβολές είναι μικρές. Συμβολίζοντας με TH την τιμή κατωφλίου για τη DPL, η ταξινόμηση των χρηστών γίνεται ως εξής:

$$G_1 = \{\text{οι χρήστες για τους οποίους ισχύει } DPL > TH\} \quad (45)$$

$$G_2 = \{\text{οι χρήστες για τους οποίους ισχύει } DPL \leq TH\} \quad (46)$$

Χρησιμοποιώντας τη βελτιωμένη μέθοδο DFPC με την ταξινόμηση των χρηστών βάσει θέσης, το throughput των χρηστών του G_1 αυξάνεται κατά 150 kbps σε σχέση με το σχήμα ρύθμισης ισχύος πλήρους αντιστάθμισης (FCPC). Χρησιμοποιώντας τη βελτιωμένη μέθοδο DFPC με την ταξινόμηση των χρηστών βάσει των συνολικών απωλειών συμπεριλαμβανομένων των απωλειών σκίασης, το throughput των χρηστών του G_1 αυξάνεται κατά 200 kbps σε σχέση με το σχήμα ρύθμισης ισχύος πλήρους αντιστάθμισης (FCPC), ενώ το throughput των χρηστών του G_2 μειώνεται μόνο κατά 25 kbps.

Στην αναφορά [26] προτείνεται μια ημι-συγκεντρωτική (semi-centralized) μέθοδος στην οποία ένας συντονιστής ορίζει μια συνάρτηση ελέγχου ισχύος για όλους τους HeNBs με βάση τις αναφορές που λαμβάνει από τους σταθμούς βάσης μέσω μιας μικρής σηματοδοσίας δικτύου. Η συνάρτηση αυτή παίρνει ως ορίσματα το κέρδος διαδρομής από το HUE στο HeNB, που καθορίζει την απόδοση του HUE και το κέρδος διαδρομής από το HUE στο MeNB, που καθορίζει τις παρεμβολές. Έτσι η ισχύς εκπομπής κάθε HUE ρυθμίζεται σύμφωνα με τα κέρδη διαδρομών που αυτό μεταδίδει και είναι διαφορετική για κάθε τερματικό.

Πιο συγκεκριμένα η συγκεντρωτική διαδικασία έχει ως εξής: αρχικά οι MUEs (ή αντίστοιχα οι HUEs) μεταδίδουν τα κέρδη διαδρομής από τον MeNB (ή HeNB) που τους εξυπηρετεί και από τους HeNBs (ή MeNBs) που παρεμβάλλουν. Στη συνέχεια ο MeNB (ή κάθε HeNB) χρησιμοποιεί τα κέρδη διαδρομής για να κατασκευάσει κάποια μακροπρόθεσμα στατιστικά, τα οποία στη συνέχεια μεταδίδονται από το MeNB και τους HeNBs στο συντονιστή ο οποίος βελτιστοποιεί την αρχή ρύθμισης ισχύος για το MeNB και τους HeNBs. Η αρχή ρύθμισης ισχύος είναι μια συνάρτηση f( ) των κερδών διαδρομής. Τελικά ο MeNB και κάθε HeNB λαμβάνουν τη πληροφορία ελέγχου ισχύος, δηλαδή τη συνάρτηση f( ) και εφαρμόζουν τη ρύθμιση ισχύος με βάση αυτή.

Για ένα HUE που εξυπηρετείται από το HeNB i, συμβολίζεται με $G_{F,i}$ το κέρδος διαδρομής από το HUE στο HeNB i και με $G_{M,i}$ το κέρδος διαδρομής από το HUE στο MeNB που εξυπηρετεί MUEs κοντά στη θέση του HUE. Για ένα MUE, $G_{F,i}^{MUE}$ είναι το κέρδος διαδρομής από το MUE στο HeNB i και G_M^{MUE} το κέρδος διαδρομής από το MUE στο MeNB που το εξυπηρετεί. Με $P_{F,i}$ και P_M συμβολίζουμε την ισχύ εκπομπής του HUE και του MUE αντίστοιχα. Με $N_{F,i}$ και N_M παριστάνονται το επίπεδο ισχύος του αθροίσματος θορύβου AWGN και παρεμβολών από γειτονικά macrocells στο HeNB i και στο MeNB αντίστοιχα.

Γίνεται η υπόθεση ότι η μέση παρεμβολή, I_{FM}, από τους HUEs στον MeNB είναι ανάλογη του μέσου επιπέδου θορύβου AWGN και παρεμβολών, $E[N_M]$.

Έχουμε

$$I_{FM} = \sum_{i=1}^{N_f} \alpha_i P_{F,i} G_{M.i} \qquad (47)$$

και

$$P_{F,i} = f\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = C \cdot g(G_{M,i}, G_{F,i}) \qquad (48)$$

οπότε προκύπτει:

$$E[I_{FM}] = CE\left[\sum_{i=1}^{N_f} \alpha_i g(G_{M,i}, G_{F,i}) G_{M.i}\right] = aE[N_M] \qquad (49)$$

όπου α είναι ένας συντελεστής αναλογίας που αντιστοιχεί στην ανεκτή υποβάθμιση του macro και C είναι μια σταθερά που ελέγχει αυτή την υποβάθμιση και βελτιστοποιείται από τον συντονιστή.

οπότε

$$C = \frac{aE[N_M]}{\sum_{i=1}^{N_f} \rho_i X_i} \qquad (50)$$

όπου $X_i = E[g(G_{M,i}, G_{F,i}) G_{M.i}]$ και $\rho_i = E[\alpha_i]$ το φορτίο του HeNB i, π.χ. η πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί ένας πόρος. Έτσι ο MeNB πρέπει να μεταδώσει στο συντονιστή την τιμή του $E[N_M]$ ενώ κάθε HeNB πρέπει να μεταδώσει το φορτίο του ρ_i και τα μεγέθη που περιλαμβάνει το X_i. Η τιμή του X_i μπορεί να σταλεί απευθείας όταν η συνάρτηση g() είναι γνωστή σε κάθε HeNB.

Παρακάτω παρουσιάζονται 5 διαφορετικοί μέθοδοι ορισμού της συνάρτησης g()

- Ίδια σταθερή ισχύς εκπομπής για όλα τα HUEs

$$g\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = 1 \text{ οπότε } X_i = E[G_{M,i}] \qquad (51)$$

Για μεγάλο αριθμό HeNBs, είναι δυνατό να αποφευχθεί η μετάδοση του X_i χρησιμοποιώντας αντί αυτού, το κέρδος G_M^{MMT} και ένα συντελεστή διόρθωσης πιθανών απωλειών διείσδυσης, c. Επίσης μπορεί να θεωρηθεί ένας αριθμός από HeNBs $N'_f = \sum_{i=1}^{N_f} \rho_i$ για να αντικαταστήσει την πληροφορία για το φορτίο του HeNB. Τελικά

$$C = \frac{aE[N_M]}{N'_f cE[G_M^{MMT}]} \qquad (52)$$

οπότε οι HeNBs μπορεί να μη χρειαστεί να στείλουν καμιά πληροφορία. Στη συνέχεια, ο συντονιστής μπορεί να συγκρίνει το επίπεδο των παρεμβολών στο MeNB με την αναμενόμενη τιμή και να προσαρμόσει το C.

- Βάσει του κέρδους διαδρομής μεταξύ HUE και MeNB

Η ισχύς εκπομπής του HUE ρυθμίζεται ώστε να αντισταθμίσει τις απώλειες μεταξύ HUE και MeNB, εξισώνεται δηλαδή η επίδραση του HUE στο MeNB ανεξάρτητα με τη θέση του.

$$g\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = 1/G_{M,i} \text{ οπότε } X_i = 1 \qquad (53)$$

Η μέθοδος αυτή καταλήγει στη μέγιστη απόδοση του MeNB. Ο συντονιστής απαιτεί μόνο τον αριθμό των HeNBs, N'_f.

- Βάσει του κέρδους διαδρομής μεταξύ HUE και HeNB

Η ισχύς εκπομπής του HUE ρυθμίζεται ώστε να αντισταθμίσει τις απώλειες μεταξύ HUE και του HeNB που το εξυπηρετεί

$$g\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = 1/G_{F,i} \text{ οπότε } X_i = E[G_{M,i}/G_{F,i}] \qquad (54)$$

Υποθέτοντας ανεξαρτησία μεταξύ των $G_{M,i}$ και $G_{F,i}$, το X_i μπορεί να υπολογιστεί από το $E[G_{M,i}]$ και το μέσο 1/ $E[1/G_{F,i}]$

- Βάσει του κέρδους διαδρομής μεταξύ HUE και HeNB και του κέρδους διαδρομής μεταξύ HUE και MeNB

Συνδυάζοντας τις πληροφορίες για τα δύο κέρδη, λαμβάνονται υπόψη και η απόδοση του HUE και οι παρεμβολές στο MeNB οπότε επιτυγχάνεται μια καλή αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης των MUE και HUE.

$$g\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = \frac{1}{G_{F,i}G_{M,i}} \text{ οπότε } X_i = E[1/G_{F,i}] \qquad (55)$$

- Βάσει του κέρδους διαδρομής μεταξύ HUE και HeNB και του κέρδους διαδρομής μεταξύ HUE και MeNB

Η αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης των MUE και HUE μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας μια παράμετρο B:

$$g\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = min\left(\frac{1}{G_{M,i}}, \frac{B}{G_{F,i}}\right) \qquad (56)$$

Η παράμετρος B εξαρτάται ισχυρά από τις σχετικές τιμές των $G_{M,i}, G_{F,i}$ για όλα τους HeNBs. Οπότε

$$g\left(G_{M,i}, G_{F,i}\right) = \frac{1}{G_{M,i}} min(1, C_s z_i) \qquad (57)$$

Όπου z_i ο νορμαλισμένος λόγος των κερδών διαδρομής

$$z_i = \frac{G_{M,i}}{G_{F,i}}\left(\frac{1}{N_f}\sum_{i=1}^{N_f} E\left[\frac{G_{M,i}}{G_{F,i}}\right]\right)^{-1} \qquad (58)$$

Και C_s μια παράμετρος που επηρεάζει τη μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του I_{FM}.

Υποθέτοντας ανεξαρτησία μεταξύ των $G_{M,i}$ και $G_{F,i}$, ο συντονιστής χρειάζεται να γνωρίζει μόνο τη μέση τιμή και τη διακύμανση των μεταβλητών $G_{M,i}$, $G_{F,i}$ και $N_{F,i}$ και το φορτίο ρ_i κάθε HeNB i.

Στην αναφορά [27] αξιολογείται η απόδοση του ελέγχου ισχύος κλειστού βρόχου με κλασματική αντιστάθμιση των απωλειών, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του σφάλματος ανοικτού βρόχου, της καθυστέρησης των εντολών TPC και των αναφορών περιθωρίου ισχύος.

Ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου με κλασματική αντιστάθμιση απωλειών θέτει την τιμή στόχο για το SINR με βάση τις απώλειες διαδρομής των χρηστών, ενώ το συμβατικό σχήμα κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί μία και μόνο τιμή στόχο για το SINR για όλους τους χρήστες σε μια κυψέλη. Στο paper αυτό αξιολογείται η απόδοση του ελέγχου ισχύος κλειστού βρόχου χρησιμοποιώντας συντελεστή κλασματικής αντιστάθμισης των απωλειών με τιμή α=0.8 και λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του σφάλματος ανοικτού βρόχου, της καθυστέρησης των εντολών TPC και των αναφορών περιθωρίου ισχύος.

Α. Μοντέλο αναφοράς περιθωρίου Ισχύος (Power Headroom)

Το περιθώριο ισχύος (Power Headroom) είναι ένας μηχανισμός με τον οποίο το κινητό τερματικό ρυθμίζεται ώστε να παρέχει τακτικές αναφορές για την ισχύ του στο δίκτυο. Οι αναφορές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον eNB για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής των χρηστών, που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τιμών στόχων για το SINR.

Οι αναφορές για το περιθώριο ισχύος στέλνονται από το UE στον eNB και δείχνουν πόση ισχύς απομένει για το UE ώστε να αρχίσει να χρησιμοποιεί πλήρη ισχύ. Με άλλα λόγια, είναι η διαφορά μεταξύ της εκπεμπόμενης ισχύος του UE και της μέγιστης ισχύος εκπομπής του UE και δίνεται από το τύπο:

$$P_h = P_{max} - P_{PUSCH} \ [dBm] \qquad (59)$$

Τα συμβάντα που μπορούν να προκαλέσουν την ενεργοποίηση της αναφοράς περιθωρίου ισχύος είναι:

- Οι απώλειες διαδρομής να έχουν αλλάξει κατά μία τιμή κατωφλίου, σε σχέση με την τελευταία αναφορά που στάλθηκε. Η τιμή κατωφλίου μπορεί να είναι [1, 3, 6, inf] dB.

- Ο χρόνος που μεσολάβησε από την προηγούμενη αναφορά να είναι μεγαλύτερος από [10, 20, 50, 200, 1000, inf] TTIs.

Η εξίσωση για τον καθορισμό των τιμών στόχων του SINR με βάση τις απώλειες διαδρομής είναι:

$$SINR'_{target} = \begin{cases} (a-1)\cdot(PL - PL_{max}) + SINR_{target} & ,PL \le PL_{max} \\ SINR_{target} & ,PL \ge PL_{max} \end{cases} \qquad (60)$$

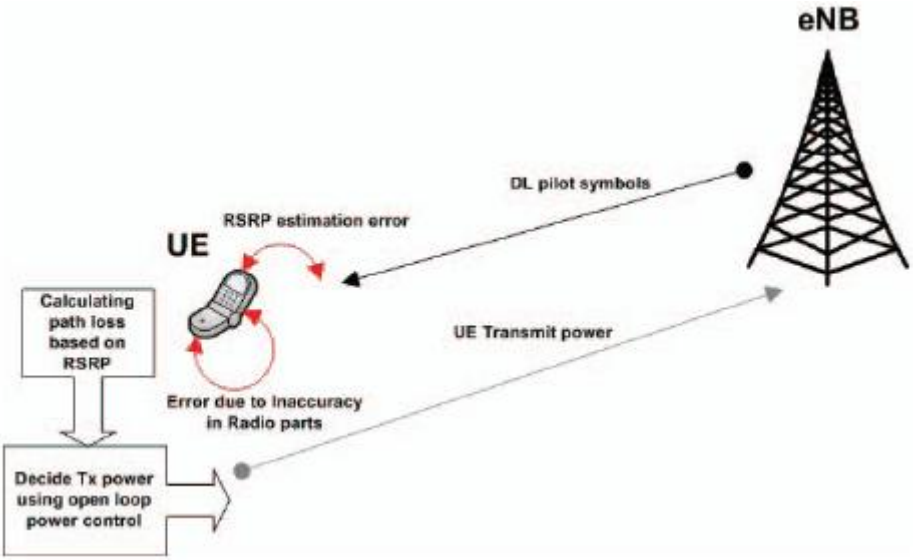
Λαμβάνοντας υπόψη τις αναφορές περιθωρίων ισχύος για να καθοριστεί η τιμή στόχος για το SINR με βάση τις απώλειες διαδρομής, το PL υπολογίζεται ως εξής:

$$PL = \frac{1}{a\cdot\{P_h - 10\cdot\log_{10} M - P_0 - f(\Delta_i)\}} \quad [dB] \qquad (61)$$

όπου $P_h = P_{PUSCH} = P_{max}$ όταν $PL = PL_{max}$.

Β. Μοντέλο Σφάλματος Ανοικτού βρόχου

Τα σφάλματα ανοικτού βρόχου ελέγχου ισχύος είναι συνήθως αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων, όπως η ακρίβεια των μετρήσεων της λαμβανόμενης ισχύος RSRP στον UE και οι ανακρίβειες σε στοιχεία όπως η ευαισθησία στη θερμοκρασία και οι ανοχές στο πρότυπο. Το σφάλμα ανοικτού βρόχου εντοπίζεται ως μια αργά μεταβαλλόμενη συνιστώσα και ποικίλλει μεταξύ των διαφόρων UEs. Οι πηγές του σφάλματος απεικονίζονται στο σχήμα 31.



Σχήμα 31: Οι πηγές του σφάλματος ανοικτού βρόχου [27]

Ως σφάλμα ανοικτού βρόχου θεωρείται η απόλυτη τιμή των $\pm 4\ dB$ και ο υπολογισμός της ισχύος του UE στο uplink χρησιμοποιώντας κλειστό βρόχο γίνεται με βάση τον τύπο:

$$P_{PUSCH} = \min\{P_{min,} P_{OL} + abserr + f(\Delta_i)\} \quad [dBm] \qquad (62)$$

όπου abserr είναι η απόλυτη τιμή του σφάλματος ανοικτού βρόχου.

Γ. Μοντέλο καθυστέρησης TPC εντολών

Ο eNodeB εκδίδει την εντολή TPC για να ρυθμίσει την ισχύ στο UE. Ωστόσο, η ρύθμιση γίνεται με κάποια καθυστέρηση. Αυτή η καθυστέρηση τυπικά είναι ο χρόνος μετάδοσης μετ' επιστροφής (round trip time, RTT) και η καθυστέρηση επεξεργασίας στο UE και στο eNB. Η καθυστέρηση RTT οφείλεται στη διάδοση του κύματος ενώ η καθυστέρηση επεξεργασίας στον eNodeB οφείλεται στη μέτρηση του λαμβανόμενου SINR και στην έκδοσης TPC εντολών. Η καθυστέρηση επεξεργασίας στο UE οφείλεται στη διαδικασία μέτρησης της ισχύος RSRP, υπολογισμού των απωλειών PL και της ισχύος εκπομπής και εφαρμογής της ρύθμισης ισχύος με βάση τις λαμβανόμενες εντολές TPC.

Με βάση τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Χρησιμοποιώντας αναφορές για το περιθώριο ισχύος σε περιοδικά διαστήματα, η απόδοση του συστήματος σε όρους μέσου ρυθμού bit υποβαθμίζεται λόγω της ξεπερασμένης τιμής των απωλειών διαδρομής που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της τιμής στόχου του SINR. Για παράδειγμα αν η ισχύς εκπομπής του UE αλλάξει αμέσως μετά το περιοδικό διάστημα, ο UE πρέπει να περιμένει για το επόμενο διάστημα ώστε να αναφέρει τη νέα τιμή της ισχύος. Άρα όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα αυτό τόσο περισσότερο θα περιμένει ο UE για να στείλει το ενημερωμένο περιθώριο ισχύος. Ωστόσο η απόδοση παραμένει και πάλι καλύτερη από την απόδοση του ελέγχου ισχύος κλειστού βρόχου με πλήρη αντιστάθμιση.

Αν οι αναφορές για το περιθώριο ισχύος ενεργοποιούνται με βάση τις αλλαγές στην τιμή των απωλειών και όχι σε συγκεκριμένα περιοδικά διαστήματα, η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται, καθώς η ισχύς εκπομπής του UE αναφέρεται αμέσως επομένως ο eNB έχει πιο ενημερωμένη εκτίμηση των απωλειών του UE.

Λαμβάνοντας υπόψη το σφάλμα ανοικτού βρόχου ο μέσος ρυθμός bit των χρηστών που αντιμετωπίζουν καλές συνθήκες, βελτιώνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς εκπομπής άρα και το λαμβανόμενο SINR. Αντίθετα η απόδοση των χρηστών που αντιμετωπίζουν

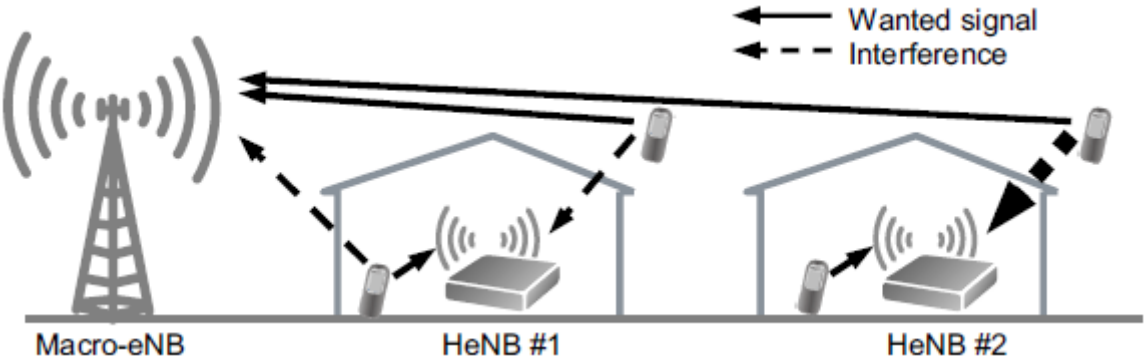
χειρότερες συνθήκες καναλιού υποβαθμίζεται καθώς δεν ικανοποιείται το απαιτούμενο SINR.

Η καθυστέρηση που υπεισέρχεται στο σύστημα λόγω των TPC εντολών δεν έχει κάποια ορατή επίδραση στην απόδοση των χρηστών.

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση του σφάλματος ανοικτού βρόχου, της καθυστέρησης των TPC εντολών και των αναφορών περιθωρίου ισχύος, ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου με α=0.8 παρουσιάζει μιας βελτίωση της τάξης του 63% στο μέσο ρυθμό bit των χρηστών και ταυτόχρονα παρέχει καλύτερη απόδοση στους χρήστες στα άκρα των κυψελών σε σχέση με το σχήμα πλήρους αντιστάθμισης

Στην αναφορά [28] προτείνεται μια τροποποιημένη διαδικασία ελέγχου ισχύος ανοικτού βρόχου (OLPC), όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές των παραμέτρων P_0 και α για τα femtocells από αυτές που χρησιμοποιούνται στα macrocells και μάλιστα η τιμή του P_0 σε κάθε femtocell ρυθμίζεται αυτόνομα, με βάση την απόσταση του HeNB από το κοντινότερο MeNB.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 32 μπορούμε να διακρίνουμε 2 περιπτώσεις παρεμβολών σε uplink μεταδόσεις. Στη πρώτη περίπτωση, οι MUEs που βρίσκονται στα άκρα ενός macrocell αναγκάζονται να μεταδώσουν με υψηλή ισχύ για να αντιμετωπίσουν τις υψηλές απώλειες προς τους σταθμούς βάσης που τους εξυπηρετούν, προκαλώντας έτσι ισχυρές παρεμβολές στα κοντινά femtocells. Στη δεύτερη περίπτωση, οι HUEs που βρίσκονται κοντά σε ένα MeNB μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές παρεμβολές στο macrocell.



Σχήμα 32: Σενάρια παρεμβολών στο uplink [28]

Δεδομένου ότι το επίπεδο παρεμβολών που μετρώνται από τους HeNBs στο uplink είναι συνήθως υψηλότερο στα άκρα ενός macrocell, οι HUEs σε αυτές τις περιοχές θα πρέπει να εκπέμπουν με υψηλότερη ισχύ. Από την άλλη, οι HUEs που βρίσκονται κοντά σε ένα MeNB θα πρέπει να εκπέμπουν με χαμηλότερη ισχύ, ώστε να μην προκαλέσουν ισχυρές παρεμβολές στο macrocell. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες και των δύο περιπτώσεων μια λύση θα ήταν η χρήση διαφορετικών τιμών για τις OLPC παραμέτρους ανάλογα με τη θέση του femtocell σε σχέση με το macrocell. Μια άλλη λύση θα μπορούσε να είναι ο καθορισμός μιας διαδικασίας αυτό-διαμόρφωσης των femtocells με βάση τις μετρήσεις τους για τα σημάτα του macrocell.

Η λύση που προτείνεται σε αυτή το paper είναι η ρύθμιση της παραμέτρου P_0 για τους HUEs, έτσι ώστε η κατανομή των παρεμβολών εντός του macrocell να εκφράζεται ως μία συνάρτηση των απωλειών προς το πλησιέστερο MeNB.

Προτείνεται λοιπόν η ακόλουθη σχέση:

$$P_0 = round(A_{P_0} + B_{P_0} \cdot PL_{LA_WA}) \qquad (63)$$

όπου P_0 είναι η τιμή της OLPC παραμέτρου για ένα συγκεκριμένο HeNB, PL_{LA_WA} είναι οι απώλειες μεταξύ του HeNB και του πλησιέστερου MeNB, A_{P_0} και B_{P_0} είναι παράμετροι διαμόρφωσης. Η συνάρτηση round χρησιμοποιείται για την κβάντιση του ορίσματος στη πλησιέστερη τιμή της παραμέτρου P_0 που επιτρέπεται από το πρότυπο της 3GPP.

Η προτεινόμενη μέθοδος προσφέρει μια αμοιβαία αντιστάθμιση μεταξύ της βελτίωσης της απόδοσης των χρηστών και της απλοποίησης της διαμόρφωσης του δικτύου. Εισάγονται δύο επιπλέον παράμετροι A_{P_0} και B_{P_0} που είναι ίδιες για όλους τους HeNBs, επιτρέποντας έτσι τη πλήρως ατομική διαμόρφωση των femtocells. Για να πετύχαινε κάτι τέτοιο με τη βασική OLPC διαδικασία, κάθε femtocell θα έπρεπε να ρυθμιστεί με ένα ατομικό σύνολο παραμέτρων.

Με βάση τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, φαίνεται αρχικά ότι χρησιμοποιώντας στα femtocells διαφορετικές τιμές των παραμέτρων P_0 και α από αυτές που χρησιμοποιούνται στα macrocells, επιτυγχάνεται βελτίωση κατά περίπου 30% της μέσης χωρητικότητας και της κάλυψης των femtocells, χωρίς παράλληλα να υποβαθμιστεί η απόδοση των macrocells. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτόνομη ρύθμιση της παραμέτρου P_0 από κάθε femtocell, επιτυγχάνεται περαιτέρω βελτίωση της χωρητικότητας των femtocells κατά 8% και της κάλυψης τους κατά 14%. Αυτό συμβαίνει επειδή οι HUEs που βρίσκονται κοντά σε ένα MeNB εκπέμπουν με χαμηλότερη ισχύ (χαμηλό P_0), ενώ παράλληλα οι HUEs με υψηλές απώλειες προς το MeNB μπορούν να εκπέμψουν με υψηλότερη ισχύ (υψηλό P_0), καθώς επηρεάζουν πολύ λιγότερο την απόδοση του macrocell.

Στην αναφορά [29] προτείνεται μια νέα μέθοδος ελέγχου ισχύος κλειστού βρόχου που ρυθμίζει τη συνολική κατανομή της ισχύος εκπομπής έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις μεταβολές του διατιθέμενου εύρους ζώνης και η ισχύς εκπομπής να παραμένει σταθερή.

Η ισχύς εκπομπής για το PUSCH υπολογίζεται ως εξής:

$$P = P_0 + M_{dB} + a \cdot PL \qquad (64)$$

Αν το εύρος ζώνης M μεταβάλλεται, θα αλλάζει και η τιμή του P. Αυτό πρέπει να αποφεύγεται δεδομένου ότι η ισχύς μετάδοσης P πρέπει να παραμείνει σταθερή για όλους τους χρήστες. Κάθε αλλαγή στο εύρος ζώνης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη συνολική ισχύ μετάδοσης. Εφόσον οι απώλειες δεν μεταβάλλονται, τότε πρέπει να αλλάξει είτε η τιμή του P_0 είτε η συνολική πυκνότητα της ισχύος εκπομπής με τη χρήση εντολών ισχύος κλειστού βρόχου. Ας πάρουμε 2 διαδοχικές χρονικές στιγμές όπου το εύρος ζώνης έχει αλλάξει, όπως φαίνεται στην εξίσωση.

$$\begin{cases} P(t_1) = P_0 + M_{dB}(t_1) + a \cdot PL \\ P(t_2) = P_0 + M_{dB}(t_2) + a \cdot PL \end{cases} \qquad (65)$$

Για να εξισωθούν οι τιμές της ισχύος στις δύο αυτές χρονικές στιγμές πρέπει να εφαρμοστεί μια διόρθωση ή να προστεθεί η διαφορά του εύρος ζώνης στη συνολική ισχύ ή στο P_0.

$$\begin{cases} P(t_2) = P(t_1) = P_0 + M_{dB}(t_2) + a \cdot PL + \Delta M_{dB} \\ \text{όπου } \Delta M_{dB} = M_{dB}(t_2) - M_{dB}(t_1) \end{cases} \qquad (66)$$

Η διαφορά αυτή πρέπει να εκτιμάται περιοδικά από το σύστημα. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και εδώ προτείνεται ένας που βασίζεται στην εκτίμηση του μέσου αριθμού N των χρηστών ανά κυψέλη. Χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή μνήμης α για το φιλτράρισμα, η εκτίμηση του διατιθεμένου εύρους ζώνης δίνεται στην εξίσωση.

$$\begin{cases} \widehat{M}(t_{n+1}) = a \cdot \widehat{M}(t_n) + (1-a) \cdot M(t_n) \\ \text{όπου} \\ \widehat{M}(t_n) = max\left(\frac{BW}{\widehat{N}(t_n)}, \frac{BW}{N_{max}}\right) \\ \widehat{N}(t_{n+1}) = a \cdot \widehat{N}(t_n) + (1-a) \cdot N(t_n) \end{cases} \quad (67)$$

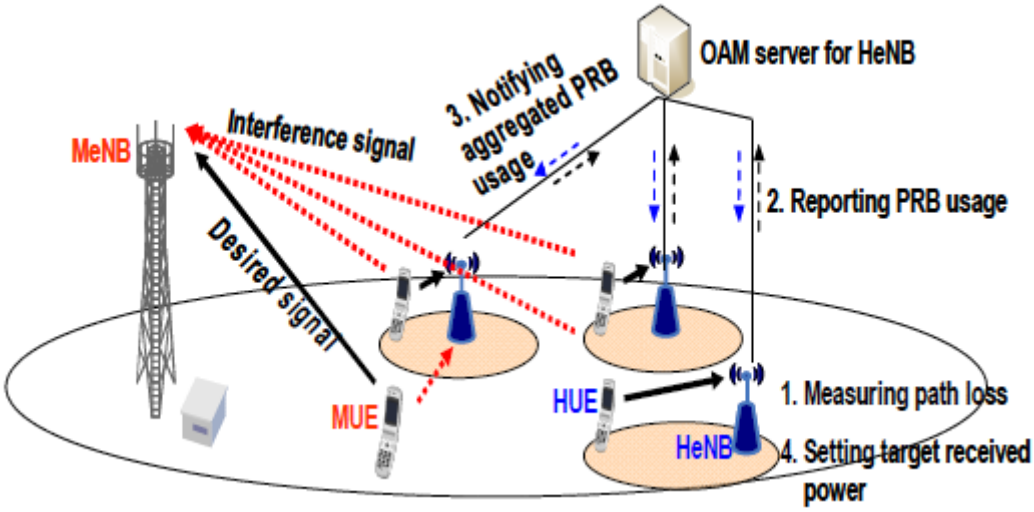
Η βασική υπόθεση είναι ότι το εύρος ζώνης κατανέμεται ισομερώς μεταξύ των χρηστών σε μια κυψέλη. Επομένως το μέσο εύρος ζώνης ανά χρήστη μπορεί να υπολογιστεί ως ο λόγος του συνολικά διατιθέμενου εύρους ζώνης προς τον αριθμό των χρηστών ανά κυψέλη.

Οι προσομοιώσεις που εκτελούνται συγκρίνουν την απόδοση του αλγορίθμου LAPC με το κλασικό σχήμα FPC όπου η τιμή του P_0 παραμένει σταθερή. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι η μέση τιμή του P_0 στον LAPC αλγόριθμο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στη περίπτωση του FPC. Επίσης παρατηρείται σημαντική βελτίωση έως και 60% στην απόδοση των χρηστών που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών, καθώς ο αλγόριθμος παρακολουθεί τις μεταβολές του φορτίου και ανταποκρίνεται επιλέγοντας πάντα τη βέλτιστη τιμή του P_0. Αυτή η βελτίωση γίνεται σε βάρος της συνολικής μέσης απόδοσης των χρηστών, η οποία υποβαθμίζεται αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό (περίπου 10%).

Στην αναφορά [30] προτείνεται μια μέθοδος ελέγχου ισχύος που ρυθμίζει την τιμή που έχει τεθεί ως στόχος για τη λαμβανόμενη ισχύ ενός HeNB, χρησιμοποιώντας το σύνολο του βαθμού χρήσης των PRBs από όλους τους HeNBs σε ένα macrocell, τις απώλειες διαδρομής μεταξύ HUE και MenB, και τις απώλειες μεταξύ του HUE και του HeNB. Ως βαθμός χρήσης των PRBs ορίζεται ο λόγος του συνόλου των PRBs που διατίθενται για UL μετάδοση προς τον συνολικό αριθμό των διαθέσιμων PRBs. Όταν ο συνολικός βαθμός χρήσης των PRBs είναι μικρός, η ρυθμαπόδοση των HeNBs μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής του HUE, ενώ όταν ο συνολικός βαθμός χρήσης των PRBs είναι μεγάλος, η ρυθμαπόδοση των MeNBs μπορεί να διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα μειώνοντας την ισχύ εκπομπής του HUE.

Στόχος της μεθόδου είναι να μεγιστοποιήσει την απόδοση των HeNBs μειώνοντας την υποβάθμιση της απόδοσης των MeNBs.

Στο σχήμα 33 παρουσιάζεται η συνολική δομή της μεθόδου.



Σχήμα 33: Συνολική δομή της προτεινόμενης μεθόδου [30]

Στο βήμα 1, ένας HeNB υπολογίζει τις απώλειες διαδρομής μεταξύ ενός HUE και ενός MenB και αυτές μεταξύ ενός HUE και του ίδιου του HeNB. Για να υπολογίσει τις απώλειες διαδρομής προς τον MenB, ο HeNB αφαιρεί την τιμή της ισχύος του σήματος αναφοράς που μεταδίδεται από το MenB από τη τιμή της ισχύος του MeNB όπως αυτή μεταδίδεται από έναν συνδεδεμένο HUE. Παρόμοια υπολογίζει τις απώλειες διαδρομής προς τον ίδιο το HeNB χρησιμοποιώντας την τιμή της ισχύος RSRP του HeNB όπως μεταδίδεται από τον ίδιο HUE. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο είδη απωλειών διαδρομής, το P_0 μπορεί να να βελτιστοποιηθεί ανάλογα με τη θέση κάθε HeNB.

Στο βήμα 2, ο HeNB υπολογίζει το βαθμό χρήσης των PRBs και στέλνει τη μέση τιμή σε έναν server σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα.

Στο βήμα 3, ο server συλλέγει τις τιμές των βαθμών χρήσης των PRBs που στέλνονται από κάθε HeNB κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διάστηματος και υπολογίζει τη συνολική τιμή του βαθμού χρήσης των PRBs από όλους τους HeNBs ανά macrocell. Στη συνέχεια, ο server στέλνει σε κάθε HeNB την τιμή αυτή.

Στο βήμα 4, ο HeNB υπολογίζει την τιμή που θα τεθεί ως στόχος για τη λαμβανόμενη ισχύ P_{0-H}, χρησιμοποιώντας τα δύο είδη απωλειών διαδρομής, το συνολικό βαθμό χρήσης των PRBs, τις πληροφορίες ρύθμισης που μεταδίδονται από το MenB και μια ακόμη παράμετρο. Η διαδικασία υπολογισμού του P_{0-H} περιγράφεται παρακάτω:

Αρχικά υπολογίζεται η τιμή του SINR του MUE ανά RB, $\Gamma_i(t)$, όπου το i δηλώνει τον αριθμό του HeNB. Το $\Gamma_i(t)$ ικανοποιεί τη συνθήκη

$$\Gamma_i(t) \geq \Gamma_{min} \qquad (68)$$

όπου το Γ_{min} αντιστοιχεί στην ελάχιστη απαιτούμενη τιμή για το SINR του MUE.

Το $\Gamma_i(t)$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\Gamma_i(t) = S_{M,i}(t) - I_{H,i}(t) - 10\log_{10}\sum_{i=1}^{N} U_{H,i}(t) \qquad (69)$$

όπου

$S_{M,i}(t)$ είναι η απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς στο MeNB από το MUE

$I_{H,i}(t)$ είναι η λαμβανόμενη ισχύς των παρεμβολών στο MeNB από το HUE

$U_{H,i}(t)$ είναι ο βαθμός χρήσης των PRBs από κάθε HeNB

N είναι ο αριθμός των ενεργών HeNBs ανά macrocell, δηλαδή αυτών στους οποίους είναι συνδεδεμένος κάποιος HUE.

Η τιμή του $I_{H,i}(t)$ θεωρείται σταθερή ανεξάρτητα από τη θέση του HeNB καθώς η ισχύς P_{0-H} εξαρτάται από τις απώλειες μεταξύ HUE και MeNB. Η συνεισφορά των συνολικών παρεμβολών από όλους τους HUEs ενός macrocell στο MeNB περιγράφεται από τη χρήση του αθροίσματος των βαθμών χρήσης στην προηγούμενη εξίσωση. Οι παρεμβολές από τους MUEs και τους HUEs άλλων macrocells θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με το $I_{H,i}(t)$ καθώς αυτοί οι χρήστες βρίσκονται πολύ μακριά από το MeNB.

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα $S_{M,i}(t)$ και $I_{H,i}(t)$ ως εξής:

$$S_{M,i}(t) = P_{0_M} + a_M \cdot L_{M,i}(t) - L_{M,i}(t) \qquad (70)$$

$$I_{H,i}(t) = P_{0_H,i}(t) + a_H \cdot L_{H,i}(t) - L_{M,i}(t) \qquad (71)$$

όπου P_{0_M} είναι η τιμή της λαμβανόμενης ισχύος του MeNB που τίθεται ως στόχος, a_M και a_H είναι οι παράγοντες αντιστάθμισης των απωλειών για το MeNB και HeNB αντίστοιχα, $L_{M,i}(t)$ και $L_{H,i}(t)$ είναι οι απώλειες μεταξύ HUE-MeNB και HUE-HeNB

αντίστοιχα. Ο HeNB αποκτά τις τιμές των P_{0_M} και a_M λαμβάνοντας πληροφορίες εκπομπής από το MeNB.

Τελικά υπολογίζεται η τιμή που τίθεται ως στόχος για τη λαμβανόμενη ισχύ στο HeNB, $P_{0_H,i}(t)$, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (70), (71) και (68)

$$P_{0_H,i}(t) = P_{0_M} - \Gamma_{min} + a_M \cdot L_{M,i}(t) - a_H \cdot L_{H,i}(t) - 10\log_{10}\sum_{i=1}^{N} U_{H,i}(t) \qquad (72)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση, η συνολική ισχύς των παρεμβολών από όλους τους HUEs μπορεί να μειωθεί, όταν ο συνολικός βαθμός χρήσης των PRBs είναι μεγάλος. Η ισχύς εκπομπής των HUEs μπορεί να αυξηθεί όταν ο βαθμός χρήσης είναι μικρός. Η ισχύς των παρεμβολών στο MeNB από κάθε HUE μπορεί να είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο ανεξάρτητα από τη θέση του HeNB.

Με βάση τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, έγινε η σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τρεις άλλες μεθόδους ελέγχου ισχύος:

- Το σταθερό έλεγχο ισχύος όπου το $P_{0_H,i}(t)$ έχει την ίδια σταθερή τιμή για όλους τους HeNBs ανεξάρτητα από τη θέση τους και το φορτίο.

- Τον έλεγχο ισχύος βάσει των απωλειών όπου το $P_{0_H,i}(t)$ ρυθμίζεται με βάση τις απώλειες μεταξύ HUE-MeNB και αυτές μεταξύ HUE-HeNB όπως φαίνεται στην εξίσωση

$$P_{0_H,i}(t) = P_{0_M} - \Gamma_{min} + a_M \cdot L_{M,i}(t) - a_H \cdot L_{H,i}(t) \qquad (73)$$

- Τον έλεγχο ισχύος βάσει του αριθμού των ενεργών HeNBs όπου το $P_{0_H,i}(t)$ ρυθμίζεται με βάση τα 2 είδη απωλειών και τη συνολική παρεμβολή όλων των HUEs στο MeNB, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση. Η συνολική παρεμβολή υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των ενεργών HeNBs ανά macrocell, N(t).

$$P_{0_H,i}(t) = P_{0_M} - \Gamma_{min} + a_M \cdot L_{M,i}(t) - a_H \cdot L_{H,i}(t) - 10\log_{10} N(t) \qquad (74)$$

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι με την προτεινόμενη μέθοδο όπως και με τη μέθοδο που βασίζεται στον αριθμό των ενεργών HeNBs, η μέση ρυθμαπόδοση των MUEs παραμένει σταθερή καθώς αυξάνεται ο αριθμός των HeNBs ανά macrocell. Αντίθετα χρησιμοποιώντας τις άλλες 2 μεθόδους ελέγχου ισχύος παρατηρείται σημαντική υποβάθμιση, καθώς δε λαμβάνουν υπόψη τη συνολική παρεμβολή των HUEs στο MeNB η οποία αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των HeNBs. Επίσης με την προτεινόμενη μέθοδο βελτιώνεται σημαντικά η μέση ρυθμαπόδοση των HUEs όταν αυξάνεται ο αριθμός των HeNBs ανά macrocell. Συγκεκριμένα παρουσιάζει έως και 24% αύξηση σε σχέση με την απόδοση που παρατηρείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που βασίζεται στον αριθμό των ενεργών HeNBs.

Τέλος αποδείχτηκε ότι ο φόρτος επεξεργασίας στον server και το κόστος σηματοδοσίας μεταξύ του server και των HeNBs μπορούν να μειωθούν σημαντικά, αυξάνοντας το περιοδικό διάστημα στο οποίο ενημερώνεται η τιμή του $P_{0_H,i}(t)$, χωρίς να παρατηρείται υποβάθμιση της απόδοσης των HUEs.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με την περιεκτική καταγραφή των πλεονεκτημάτων και των προβλημάτων που παρουσιάζουν οι μέθοδοι ρύθμισης ισχύος που παρουσιάστηκαν στο υπό-κεφάλαιο αυτό.

Πίνακας 4: Επισκόπηση σχημάτων ρύθμισης ισχύος στο uplink

Αναφορά	Λειτουργία PC	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
[15]	Θέση του HUE (cell edge / cell center) ανάλογα με τις απώλειες μεταξύ HUE-MeNB	Βελτιώνει το SINR των HUEs και τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος χωρίς η αύξηση της ισχύος των HUEs να επηρεάζει σημαντικά το macrocell	Δε λαμβάνει υπόψη την αθροιστική παρεμβολή (aggregate interference) από όλους τους HUEs. Αν αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των HeNBs η αθροιστική παρεμβολή θα αυξηθεί υποβαθμίζοντας την απόδοση των MUEs
[22]	(i) Διάκριση των χρηστών με βάση τη διαφορά απωλειών μεταξύ του eNB εξυπηρέτησης και του γειτονικού eNB (ii) Ρύθμιση της τιμής στόχου για το SINR μέσω διακυψελικης συνεργασίας με ανταλλαγή πληροφοριών για την τιμή του IoT	Βελτιώνει το μέσο throughput, ιδιαίτερα αυτό των cell-edge UEs	Δε γίνεται αναφορά στο ποιες είναι οι συγκεκριμένες τιμές του φορτίου και των IoT thresholds που χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση της αποστολής αναφορών για το IoT status
[23]	Εκχώρηση διαφορετικού αριθμού RBs σε κάθε UE ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού	Υψηλότερο throughput Χαμηλότερες παρεμβολές Αποτελεσματική χρήση των ραδιο-πόρων	Θεωρείται ομογενές δίκτυο κυψελών, δε προβλέπεται η παρουσία femtocells και δε λαμβάνονται υπόψη οι cross-tier παρεμβολές
[24]	Διάκριση των χρηστών σε σύνολα στα οποία εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι PC	- Χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα -Ο έλεγχος ισχύος εφαρμόζεται σε σύνολα χρηστών με ίδιες ιδιότητες αντί για κάθε χρήστη ξεχωριστά	Μπορεί να απαιτεί τον καθορισμό μιας διαδικασίας διόρθωσης για την ανακατανομή των συνολικών διακυψελικών παρεμβολών ώστε αυτές να περιοριστούν και να επιτευχθεί το μέγιστο μέσο throughput ανά κυψέλη
[25]	Διάκριση των χρηστών σε 2 ομάδες ανάλογα με το επίπεδο των παρεμβολών που παράγουν	Αυξάνεται το throughput των users που παράγουν χαμηλές παρεμβολές	Δε παρουσιάζεται κάποια προτεινόμενη διαδικασία υπολογισμού των τιμών της ακτίνας r και του threshold TH.
[26]	- Οι BSs στέλνουν αναφορές μετρήσεων για τις παρεμβολές σε έναν coordinator - Ο coordinator ορίζει μια συνάρτηση PC βάσει αυτών των μετρήσεων - Οι BSs εφαρμόζουν τη συνάρτηση PC με ορίσματα τα κέρδη διαδρομής από το HUE στο HeNB και από το HUE στο MeNB	Παρατηρείται βελτίωση στην αμοιβαία αντιστάθμιση της απόδοσης των HUEs και MUEs	Σε περίπτωση υψηλής πυκνότητας FBSs και πέρα από μια μέση ισχύ, η φασματική απόδοση των HUEs μειώνεται εξαιτίας των διακυψελικών παρεμβολών μεταξύ των FMTs διαφορετικών FBSs
[27]	Έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου με κλασματική αντιστάθμιση απωλειών λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των PH αναφορών, του σφάλματος ανοικτού βρόχου και της καθυστέρησης των TPC εντολών	Παρατηρείται βελτίωση της τάξης του 63% στο μέσο ρυθμό bit των χρηστών και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται καλύτερη απόδοση για τους cell-edge χρήστες σε σχέση με το σχήμα πλήρους αντιστάθμισης	Θεωρείται ομογενές δίκτυο κυψελών, δε προβλέπεται η παρουσία femtocells
[28]	-Χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους α και P_0 του OLPC στα macrocells και διαφορετικές στα femtocells. -Η τιμή του P_0 ρυθμίζεται ξεχωριστά για κάθε femtocell	Βελτιώνεται κατακόρυφα η μέση χωρητικότητα και η μέση κάλυψη των femtocells, χωρίς να υποβαθμιστεί η απόδοση των macrocells	Γίνεται πιο πολύπλοκη η διαμόρφωση του δικτύου καθώς χρησιμοποιούνται περισσότερες παράμετροι
[29]	Η ισχύς εκπομπής ρυθμίζεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις διακυμάνσεις του εκχωρούμενου BW	Σημαντική βελτίωση έως και 60% στην απόδοση των cell-edge χρηστών	- Θεωρείται ομογενές δίκτυο κυψελών, δε προβλέπεται η παρουσία femtocells και δε λαμβάνονται υπόψη οι cross-tier παρεμβολές - Υποβαθμίζεται περίπου 10% η χωρητικότητα των κυψελών σε σχέση με το κλασικό σχήμα FPC

[30]	Προσαρμοστική ρύθμιση της παραμέτρου P_0 με βάση το συνολικό βαθμό χρήσης των RBs από τους HeNBs και τις απώλειες HUE-MeNB και HUE-HeNB	Παρατηρείται σημαντική βελτίωση του μέσου throughput των HUEs όταν αυξάνεται ο αριθμός των HeNBs ανά macrocell, ενώ παράλληλα το μέσο throughput των MUEs παραμένει σταθερό	Κόστος σηματοδοσίας μεταξύ του server και των σταθμών βάσης Φόρτος επεξεργασίας στο server

6. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό κατηγοριοποιούμε τα σχήματα ελέγχου ισχύος που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 και εξάγουμε μια σειρά από συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη αυτών των σχημάτων. Η κατηγοριοποίηση φαίνεται στο πίνακα 5.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά διαχωρίσαμε τις προτεινόμενες λύσεις της βιβλιογραφίας με βάση τον τύπο των παρεμβολών δηλαδή σε αυτές που λαμβάνουν υπόψη τις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών επιπέδων (cross-tier interference) και σε αυτές που θεωρούν ομογενή δίκτυα και λαμβάνουν υπόψη μόνο τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών κυψελών (inter-cell interference). Με βάση το επίπεδο συντονισμού θεωρήσαμε δύο κατηγορίες τεχνικών, αυτές που απαιτούν συντονισμό μεταξύ των κόμβων (coordinated) και αυτές που δεν έχουν ανάγκη τέτοιου είδους επικοινωνία (un-coordinated). Επίσης έγινε ο διαχωρισμός ανάμεσα στις κατανεμημένες (distributed) λύσεις και στις κεντρικοποιημένες (centralized) που χρησιμοποιούν μια κεντρική οντότητα για συλλογή πληροφοριών. Με βάση κάποιες επιπλέον σχεδιαστικές απαιτήσεις θεωρήσαμε τις κατηγορίες των σχημάτων ελέγχου ισχύος που διαιρούν τους χρήστες σε ομάδες, των τεχνικών που χρησιμοποιούν ανταλλαγή μηνυμάτων παρεμβολών μεταξύ των σταθμών βάσης και των μεθόδων που αξιοποιούν τις μετρήσεις των χρηστών. Τέλος με βάση το κριτήριο απόφασης αλλαγής της ισχύος θεωρήσαμε τις κατηγορίες των σχημάτων ρύθμισης ισχύος που απαιτούν πληροφορίες για τις θέσεις των χρηστών, των τεχνικών που αξιοποιούν τη γνώση για το QoE των χρηστών, των μεθόδων που επιτυγχάνουν την εξίσωση macro-υποβάθμισης (macro degradation equalization), των σχημάτων που ρυθμίζουν την ισχύ με βάση ένα συγκεκριμένο τρόπο εκχώρησης των πόρων στους χρήστες, των τεχνικών που χρησιμοποιούν πληροφορίες για τα κέρδη διαδρομής ή τις απώλειες των χρηστών και των μεθόδων που ρυθμίζουν την τιμή P_0 που τίθεται ως στόχος για τη λαμβανόμενη ισχύ ενός eNB αντί να την κρατούν σταθερή.

Τα βασικά συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Οι τεχνικές ρύθμισης ισχύος που βασίζονται στις μετρήσεις των χρηστών παρουσιάζουν το μειονέκτημα του έξτρα κόστους ανταλλαγής σηματοδοσίας χωρίς παράλληλα να υπάρχει κάποια απευθείας σύνδεση μεταξύ των HeNBs και των MUEs. Από την άλλη, οι σταθμοί βάσης ελέγχουν πιο αποτελεσματικά την ισχύ καθώς λαμβάνονται υπόψη οι πραγματικές συνθήκες που αντιμετωπίζουν οι χρήστες και αποφεύγονται οι εσφαλμένες εκτιμήσεις.

- Οι κεντρικοποιημένες (centralized) τεχνικές ελέγχου ισχύος μπορούν σε μικρής κλίμακας δίκτυα να παρουσιάσουν καλύτερη απόδοση από τα αντίστοιχα κατανεμημένα σχήματα, βρίσκοντας αποτελεσματικά τις βέλτιστες λύσεις με χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Απαιτούν όμως τη χρήση μιας κεντρικής οντότητας και καθολικές πληροφορίες παρεμβολής μεταξύ των συνδέσεων, ενώ εισάγουν έξτρα σηματοδοσία και αυξάνουν τις καθυστερήσεις και τη συμφόρηση στο δίκτυο. Λόγω του αυξημένου μεγέθους των ετερογενών LTE δικτύων, του αποκεντρωμένου χαρακτήρα των femtocells και της αβεβαιότητας σχετικά με τη θέση και τον αριθμό των σταθμών βάσης τους, η χρήση κεντρικοποιημένων αλγορίθμων καθίσταται αναποτελεσματική. Προτιμάται λοιπόν η εφαρμογή κατανεμημένων τεχνικών για την αποφυγή συγκέντρωσης και επεξεργασίας πληροφοριών σε μια κεντρική οντότητα, κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα και το χρόνο επίλυσης του προβλήματος.

- Οι τεχνικές που απαιτούν γνώση της θέσης των χρηστών αυξάνουν μεν την πολυπλοκότητα του συστήματος καθώς απαιτείται ο προσδιορισμός μιας τεχνικής

εντοπισμού, παρέχουν όμως σημαντική βελτίωση στην απόδοση των χρηστών που βρίσκονται στα όρια των κυψελών.

- Οι τεχνικές που έχουν σχεδιαστεί για ετερογενή LTE δίκτυα και λαμβάνουν υπόψη τις παρεμβολές διαφορετικών επιπέδων εκτός από αυτές μεταξύ των macrocells. βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση των MUEs με το μειονέκτημα μιας μικρής υποβάθμισης στους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης των FUEs καθώς μειώνεται περαιτέρω το επίπεδο ισχύος εκπομπής των σταθμών βάσης των femtocells.

Πίνακας 5: Κατηγοριοποίηση σχημάτων ελέγχου ισχύος

Κατηγοριοποίηση υπαρχόντων σχημάτων ελέγχου ισχύος για μείωση των παρεμβολών			**Ενδεικτικές Αναφορές**
Κριτήριο	Τύπος παρεμβολής που λαμβάνεται υπόψη	Intercell Interference	[21], [24], [25]
		Cross-tier Interference	[13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [22], [26], [28], [30]
	Επίπεδο συντονισμού	Coordinated	[16], [17], [18], [22], [26], [30]
		Un-coordinated	[13], [14], [15], [19], [20], [21], [23], [24], [25], [27], [28], [29]
	Κατανεμημένη προσέγγιση	Centralized	[17], [26], [30]
		Distributed	[13], [14], [15], [16], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [27], [28], [29]
	Επιπλέον σχεδιαστικές απαιτήσεις	Division of UEs in groups	[18], [24], [25]
		Interference messages	[13]
		Assistance from UE's measurements	[17], [20], [26]
	Κριτήριο απόφασης αλλαγής ισχύος	Location Information	[14], [15], [17], [22], [24], [25], [28]
		QoE	[19]
		Path Loss/Gain	[16], [17], [25], [26], [27], [30]
		Macro-degradation Equalization	[16], [17]
		Resource allocation	[23], [29]
		Adjustable P_0	[28], [29], [30]

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	**Ελληνικός Όρος**
timeslot	χρονοθυρίδα
Fast Scheduling	γρήγορος χρονοπρογραμματισμός
paging	τηλεειδοποίηση
Authentication Centre	Κέντρο Πιστοποίησης
mobility management	Διαχείριση κινητικότητας
User Equipment	εξοπλισμός χρήστη
handover	Μεταπομπή
core network	Δίκτυο πυρήνα
Open Access	Ανοικτή Πρόσβαση
Close Access	Κλειστή Πρόσβαση
Hybrid Access	Υβριδική Πρόσβαση
co channel deployment	Εγκατάσταση κοινού καναλιού
decorrelating detector	Ανιχνευτής αποσυσχέτισης
cell planning	κυψελοειδής σχεδιασμός
power control	έλεγχος ισχύος
dedicated spectrum	αφιερωμένο φάσμα
throughput	ρυθμαπόδοση
Backhaul network	Δίκτυο κορμού
flat fading	επίπεδες διαλείψεις
coherence bandwidth	εύρος συσχέτισης
guard interval	διάστημα προστασίας
Cyclic prefix	κυκλικό πρόθεμα
symbol timing acquisition	απόκτηση χρονισμού συμβόλου
carrier frequency synchronization	συγχρονισμός συχνότητας φέροντος
sampling clock synchronization	συγχρονισμός δειγματοληψίας ρολογιού
transmit diversity	διαφορισμός εκπομπής
convolutional turbo coder	συνελικτικός turbo κωδικοποιητής
forward error correction	άμεση διόρθωση σφαλμάτων
control region	περιοχή ελέγχου
subframe	υποπλαίσιο
power headroom	περιθώριο ελέγχου ισχύος
Sounding Reference Symbol	σήμα αναφοράς ακρόασης
reference signal	Σημα αναφοράς
priority grouping	ομαδοποίηση προτεραιότητας
Heuristic algorithm	Ευρετικός αλγόριθμος

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

NTT	Nippon Telephone and Telegraph
NMT	Nordic Mobile Telephones
TACS	Total Access Communication Systems
AMPS	Advanced Mobile Phone System
FDMA	Frequency Division Multiple Access
TDMA	Time division multiple access
CDMA	Code division multiple access
GSM	Global System for Mobile Communications
BSS	Base Station Subsystem
NSS	Switching Network Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
BSC	Base Station Controller
MSC	Mobile Switching Centre
VLR	Visitor Location Register
HLR	Home Location Register
AC	Authentication Centre
EIR	Equipment Identity Register
VMS	Voice Mail Service
SMS	Short Message Service
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
GPRS	General Packet Radio Services
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
GPRS	General Packet Radio Service
SGSN	Serving GPRS Support Node
GGSN	Gateway GPRS Support Node
8PSK	Eight-Phase Shift Keying
PDC	Personal Digital Cellular
ITU	International Telecommunication Union
3GPP	3rd Generation Partnership Project
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
RNC	Radio Network Controller
HSPA	High Speed Packet Access
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
TTI	Transmission Time Interval
QAM	Quadrature Amplitude Mode
LTE	Long Term Evolution
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network

E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
OFDMA	orthogonal frequency division multiple access
SC-FDMA	single carrier orthogonal frequency division multiple access
FDD	Frequency Division Duplexing
TDD	Time Division Duplexing
SAE	System Architecture Evolution
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
RTT	Round-Trip Time
eNodeB	evolved NodeB
P-GW	Packet Data Network Gateway
S-GW	Serving Gateway
PDN	Packet Data Network
PCEF	Policy Control Enforcement Function
MME	Mobility Management Entity
CN	core network
PLMN	Public Land Mobile Network
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PCC	Policy and Charging Control
QoS	Quality of Service
HSS	Home Subscription Server
UE	User Equipment
NAS	Non Access Stratum
AS	Access Stratum
HeNB	Home eNodeB
CSG	Close Subscriber Group
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIC	Successive interference cancelation
PIC	Parallel interference cancelation
MUD	Multiuser detection
MMSE	minimum mean square error
RSCP	Received Signal Code Power
ICI	Inter Carrier Interference
MAI	Multiple Access Interference
FFR	Fractional Frequency Reuse
RR	Round Robin
PR	Proportional Fair
ASE	Area Spectral Efficiency
DSA	Dynamic Spectrum Access

PA	Power Allocation
RSSI	Received Signal Strength Information
DAB	Digital Audio Broadcast
DVB	Digital Video Broadcast
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform,
FFT	Fast Fourier Transform
CP	Cyclic Prefix
PAPR	peak-to-average power ratio
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
RB	Resource Block
RE	Resource Element
DM-RS	Demodulation Reference Signals
SRS	Sounding Reference Signal
PSS	Primary Synchronization Sequence
SSS	Secondary Synchronization Sequence
PBCH	Physical Broadcast Channel
SFBC	Space Frequency Block Code
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
TB	Transport Block
SIB	System Information Blocks
PMCH	Physical Multicast Channel
MBMS	Multimedia Broadcast and Multicast Services
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
DCI	Downlink Control Information
CCE	Control Channel Elements
REG	Resource Element Groups
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
CFI	Control Frame Indicator
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PCID	Physical Cell Identity
CQI	Channel Quality Indicator
AWGN	Additive white Gaussian noise
HIRZ	High Interference Reference Zone
GNSS	Global Navigation Satellite System
QoE	Quality of experience
COR	Constant Optimal Region
AUPP	Absolute Uplink Power Potential
RUPP	Relative Uplink Power Potential

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Amit Kumar, Dr. Yunfei Liu, Dr. Jyotsna Sengupta and Divya, Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G to 4G, vol. 1, December 2010, pp. 68-71

[2] http://radar.ee.auth.gr/Applied_Telecom_Systems/UMTS#head-a5b2eb275769d1f9e8b17986cd5cfaf87c735772 [Προσπελάστηκε 2/7/14]

[3] Γ. Μπιτζίδης, «Η μετάβαση από τις 3G στις 4G ασύρματες επικοινωνίες», ΔΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, 2011

[4] http://el.wikipedia.org/wiki/LTE [Προσπελάστηκε 5/7/14]

[5] http://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/DI304/Παρουσιάσεις/Εαρινό%202013/Lecture-02.pdf [Προσπελάστηκε 5/7/14]

[6] http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced [Προσπελάστηκε 5/7/14]

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/System_Architecture_Evolution [Προσπελάστηκε 5/7/14]

[8] H. Holma and A. Toskala, "LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced", Wiley & Sons, 2011; http://books.google.gr/books?id=X9XwEOxYnAkC&pg=PA33&lpg=PA33&dq=Holma+Policy+and+Charging+Rules+Function+(PCRF)+EXAMPLE+default+bearer+dedicated+bearers.&source=bl&ots=S3dXn6Axpr&sig=mCec6_7Hh69f4Jb_LDdFLem2EuA&hl=el&sa=X&ei=DB25U8H6B_CU0QXJ44HIAw&ved=0CB0Q6AEwAA#v=onepage&q=Holma%20Policy%20and%20Charging%20Rules%20Function%20(PCRF)%20EXAMPLE%20default%20bearer%20dedicated%20bearers.&f=false [Προσπελάστηκε 5/7/14]

[9] Talha Zahir, Kamran Arshad, Atsushi Nakata, and Klaus Moessner, Interference Management in Femtocells, IEEE communications surveys & tutorials, vol. 15, no. 1, 2013

[10] LTE in a Nutshell: The Physical Layer, Telesystem Innovations Inc., 2010; http://www.tsiwireless.com/docs/whitepapers/LTE%20in%20a%20Nutshell%20-%20Physical%20Layer.pdf [Προσπελάστηκε 15/6/14]

[11] 3GPP TS 36.213 version 10.1.0 Release 10, Physical layer procedures, 2011

[12] 3GPP TR 36.921 version 9.0.0 Release 9, FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis, 2010

[13] Zhenwei Wang , Wenhui Xiong, Caiping Dong, Jun Wang, Shaoqian Li, "A Novel Downlink Power Control Scheme in LTE Heterogeneous Network", Computational Problem-Solving (ICCP), 2011, pp. 241-245

[14] Tao Yang and Lu Zhang, "Approaches to Enhancing Autonomous Power Control at Femto under Co-channel Deployment of Macrocell and Femtocell", Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011, pp. 71-75

[15] Lin Yang and Pingping Wen, "Location Based Autonomous Power Control for ICIC in LTE-A Heterogeneous Networks", Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), 2011

[16] Julien Guillet, Lo¨ıc Brunel and Nicolas Gresset, "Downlink Femto-Macro ICIC with Blind Long-Term Power Setting", Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011, pp. 212-216

[17] Julien Guillet, Lo¨ıc Brunel and Nicolas Gresset, "Downlink Femto-Macro ICIC with Location-Based Long-Term Power Setting", Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), 2012

[18] Antonios Alexiou, Dimitrios Billios, Christos Bouras, "A Power Control Mechanism Based on Priority Grouping for Small Cell Networks", Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2013

[19] Dimitris Tsolkas, Eirini Liotou, Nikos Passas, and Lazaros Merakos, "The Need for QoE-driven Interference Management in Femtocell-Overlaid Cellular Networks"

[20] Fengming Cao and Zhong Fan, "Downlink Power Control for Femtocell Networks", Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2013

[21] Mohamad Yassin, Samer Lahoud, Marc Ibrahim, Kinda Khawam, "A Downlink Power Control Heuristic Algorithm for LTE Networks", Telecommunications (ICT), 2014, pp. 323-327

[22] Jing Li, "Uplink power control for heterogeneous networks", Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013, pp. 773-777

[23] Lu Ding, Jinwei He, Zhimin Liu, "A Novel Open Loop Power Control Method in LTE Uplink", Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2012

[24] Oleg Asenov, Pavlina Koleva, and Vladimir Poulkov, "Heuristic Approach to Dynamic Uplink Power Control in LTE", Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2013, 235-238

[25] Safa Essassi, Mohamed Siala and Sofiane Cherif, "Dynamic Fractional Power Control for LTE Uplink", Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011, pp.1606-1610

[26] Julien Guillet, Lo¨ıc Brunel and Nicolas Gresset, "Uplink Femto-Macro ICIC with Semi-Centralized Power Control", Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011, pp. 142-146

[27] Bilal Muhammad and Abbas Mohammed, “Uplink Closed Loop Power Control for LTE System: Performance evaluation with the open loop error, TPC command delay and power headroom reporting”, Emerging Technologies (ICET), 2010, pp. 88-93
[28] Jacek Gσra, Klaus I. Pedersen, Agnieszka Szufarska, Stanislaw Strzy, “Cell-Specific Uplink Power Control for Heterogeneous Networks in LTE”, Vehicular Technology Conference Fall (VTC), 2010
[29] Malek Boussif, Claudio Rosa, Jeroen Wigard and Robert Müllner, “Load Adaptive Power Control in LTE Uplink”, Wireless Conference (EW), 2010, pp. 288-293
[30] Motoki Morita, Takahiro Nobukiyo, Kojiro Hamabe, “Uplink Power Control Method for LTE Femtocells Based on Resource Usage Aggregation”, Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012, pp. 442-447