



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βιβλιογραφική επισκόπηση και συγκριτική ανάλυση
αλγορίθμων για την Αναζήτηση Κυψέλης σε δίκτυα
φεμτοκυψελών**

**Γιάννης Ν. Κονόμης
Αθανάσιος Η. Σωτηρίου**

**Επιβλέποντες: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής
Διονύσης Ξενάκης, Διδάκτορας**

ΑΘΗΝΑ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βιβλιογραφική επισκόπηση και συγκριτική ανάλυση αλγορίθμων για την Αναζήτηση
Κυψέλης σε δίκτυα φεμτοκυψελών

Γιάννης Ν. Κονόμης
Α.Μ.:1115200700206
Αθανάσιος Η. Σωτηρίου
Α.Μ.: 1115200600228

Επιβλέποντες: **Λάζαρος Μεράκος**, Καθηγητής
Διονύσης Ξενάκης, Διδάκτορας

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία εξέλιξη του τομέα των Τηλεπικοινωνιών, καθώς και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, δημιούργησε διακριτές ανάγκες για αποδοτικούς αλγορίθμους αυξημένης πολυπλοκότητας. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η διαδικασία της αναζήτησης κυψέλης. Η αναζήτηση κυψέλης είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα κινητό συντονίζεται και συγχρονίζεται με ένα γειτονικό κυψελοειδή σταθμό βάσης με στόχο την αναγνώριση του και την μέτρηση διαφόρων χαρακτηριστικών του, όπως η ισχύς του σήματος του. Βάση της συγκεκριμένης αναζήτησης είναι η μέτρηση σημάτων πιλότων που εκπέμπουν οι σταθμοί – βάσεις με προκαθορισμένο τρόπο. Σε επίπεδο δικτύου επηρεάζεται σημαντικά η διαχείριση και η απόφαση μεταπομπών. Στα δίκτυα φεμτοκυψελών, η υποβοήθηση της αναζήτησης κυψέλης στο τερματικό είναι εξαιρετικά δύσκολη, καθώς αυτές εγκαθίστανται με ακαθόριστο τρόπο στο δίκτυο δίχως σχεδιασμό από τον πάροχο. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης πτυχιακής γίνεται επισκόπηση και συγκριτική ανάλυση των αλγορίθμων αναζήτησης κυψέλης σε δίκτυα φεμτοκυψελών.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Τηλεπικοινωνίες

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Φεμτοκυψέλες, αναζήτηση κυψέλης, LTE Advanced, ενεργειακή αποδοτικότητα, Multiple Input And Multiple Output

ABSTRACT

The rapid evolution of telecommunications and mobile networks, created distinct needs for efficient algorithms of increased complexity. This thesis aims to analytically study the process of cell search. Cell search is a process, in which a cell-phone is coordinated and synchronized with an adjacent honeycomb base station in order to identify various characteristics such as the strength of the signal. The basis of this search is to measure pilot signals emitted from power stations - bases in a predetermined manner. At the network level, the transmission management and decision are significantly influenced. In femtocell networks, aiding cell search at the terminal is extremely difficult, as they are installed in an unprepared manner in the network and not being designed by a provider. In the context of this thesis an overview and comparative analysis of cell search algorithms in femtocells networks will be conducted. Then a validation of results will be achieved through simulation.

SUBJECT AREA: Telecommunications

KEYWORDS: Femtocells, cell search, LTE Advanced, energy efficiency, Multiple Input And Multiple Output

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Καθ. Λάζαρο Μεράκο κυρίως για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε, και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Διονύση Ξενάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του και για το πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για την περάτωση της παρούσας εργασίας. Οι σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του μας κατεύθυναν με σωστό τρόπο για την επίλυση διάφορων θεμάτων. Τέλος, θέλουμε να εκφράσουμε ένα τεράστιο ευχαριστώ στις οικογένειές μας, για την στήριξη και την εμπιστοσύνη που μας έχουν δείξει όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	10
1.1 Εισαγωγή	10
1.2 Ιστορική Ανασκόπηση	10
1.4 Οι αυξημένες προϋποθέσεις IMT	13
1.5 Οι τεχνολογίες του LTE	14
1.5.1 OFDM	14
1.5.2 MIMO	14
1.5.3 Κωδικοποίηση TURBO.....	15
1.5.4 Δυναμικές Τεχνικές Σύνδεσης - Προσαρμογής	15
1.6 Επισκόπηση έκδοσης 8 & 9 του LTE.....	15
1.7 Το δίκτυο LTE - Advanced	15
1.7.1 Συνάθροιση φερουσών	16
1.7.2 Βελτιωμένη υποστήριξη πολλαπλών κεραιών.....	17
1.7.3 Βελτιωμένη υποστήριξη ετερογενών αναπτύξεων.....	18
1.7.4 Αναμετάδοση	19
1.7.5 Ενεργειακή Αποδοτικότητα.....	20
1.7.6 Οι μεταγενέστερες εκδόσεις.....	25
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΦΕΜΤΟΚΥΨΕΛΕΣ.....	27
2.1 Ιστορική ανασκόπηση Φεμτοκυψελών	27
2.2 Η γένεση της σύγχρονης φεμτοκυψέλης	27
2.3 Σύγχρονη Έρευνα πάνω στις Φεμτοκυψέλες.....	29
2.4 Συγχρονισμός	29
2.5 Διαχείριση παρεμβολών	30
2.5.1 Παρεμβολή εντός του ίδιου επιπέδου.....	31
2.5.2 Παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών επιπέδων	33
2.6 Διαχείριση κινητικότητας.....	36
2.6.1 Αναγνώριση κυψέλης.....	36
2.6.2 Έλεγχος πρόσβασης	39
2.6.3 Αναζήτηση κυψέλης.....	40
2.6.4 Επιλογή/Επανεπιλογή κυψέλης	43
2.6.5 Απόφαση μεταπομπής (HO).....	45
2.6.6 Εκτέλεση μεταπομπής (HO)	46
3. ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΦΕΜΤΟΚΥΨΕΛΩΝ.....	49
3.1 Εισαγωγή	49

3.2 Ερευνητικές Προκλήσεις	50
3.2.1 Τεχνικές Προκλήσεις	50
3.2.2 Οικονομικά και ρυθμιστικά θέματα.....	51
3.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση	52
3.3.1 Κινητικότητα και Ανακάλυψη φεμτοκυψέλης στα δίκτυα 3G UMTS.....	52
3.3.2 Αλγόριθμος Ενεργοποίησης/Απενεργοποίησης Σταθμού Βάσης με χρήση MIMO και Χωρικής Διαμόρφωσης.....	55
3.3.3 Συνοπτική περιγραφή υπάρχοντων αλγορίθμων στην βιβλιογραφία.....	59
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	62
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	64
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Η εξέλιξη των ασύρματων προτύπων κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες [1]	10
Εικόνα 2. Συνάθροιση φερουσών στην έκδοση 10 του LTE [3].....	16
Εικόνα 3. Ανάπτυξη ετερογενών συστημάτων με μια μακρο-κυψέλη να επικαλύπτει πολλαπλές μικρο-κυψέλες [2]	18
Εικόνα 4. Διάγραμμα Αναμετάδοσης στο LTE – Advanced [2].....	20
Εικόνα 5. Ενεργειακή κατανάλωση ενός παρόχου κινητής τηλεφωνίας [2]	21
Εικόνα 6. Κατανάλωση εξωτερικής ενέργειας ενός συστήματος αναφοράς για ένα γενικό RBS [2]	23
Εικόνα 7. Τύποι παρεμβολής σε δίκτυο φεμτοκυψελών 2 επιπέδων	32
Εικόνα 8. Σενάριο παρεμβολής εντός του ίδιου επιπέδου δύο γειτονικών φεμτοκυψελών	33
Εικόνα 9. Σενάριο παρεμβολής μεταξύ επιπέδων ανάμεσα σε μια φεμτοκυψέλη και μία μακροκυψέλη	35
Εικόνα 10. Παράδειγμα ανάπτυξης φεμτοκυψελών	38
Εικόνα 11. Σηματοδότηση αναζήτησης και μέτρησης κυψέλης στο LTE-A	43
Εικόνα 12. Σηματοδότηση της εκτέλεσης μεταπομπής σε έναν HeNB.....	48
Εικόνα 13. Σχεδιασμός πολυεπίπεδου beacon.....	54
Εικόνα 14. Απεικόνιση της περιοχής κάλυψης ενός πολυεπίπεδου beacon	54
Εικόνα 15. Το προτεινόμενο μοντέλο του κυψελοειδούς συστήματος [22]	56
Εικόνα 16. Μέση ρυθμαπόδοση σε σχέση με την ενεργειακή αποδοτικότητα για έναν αστικό μακρο-σταθμό βάσης με διαφορετικές ακτίνες	58
Εικόνα 17. Τροφοδοσία συναρτήσει του μέσου ρυθμού δεδομένων	58
Εικόνα 18. Μέσος ρυθμός δεδομένων συναρτήσει της ενεργειακής αποδοτικότητας.....	59

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έγινε με αφορμή της πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η ραγδαία άνοδος στην χρήση έξυπνων συσκευών καθώς και η κοινωνική δικτύωση δημιούργησαν νέες ανάγκες για αποδοτικούς αλγόριθμους. Συνεπώς αφού παρουσιαστούν κάποια ιστορικά στοιχεία σχετικά με τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, στην συνέχεια γίνεται μια αναλυτική βιβλιογραφική επισκόπηση σε μερικούς από τους σημαντικότερους αλγόριθμους αναζήτησης κυψέλης και πιο συγκεκριμένα στο δίκτυο φεμτοκυψελών. Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή συντελείται μια επανάσταση των δεδομένων των συσκευών κινητής τηλεφωνίας [1]. Με την μαζική επέκταση των έξυπνων κινητών (smartphones), των ταμπλετών (tablets), των φορητών υπολογιστών, οι χρήστες άρχισαν να απαιτούν υπηρεσίες και εφαρμογές που υπερβαίνουν κατά πολύ την απλή φωνητική λειτουργία. Η ραγδαία αύξηση της χρήσης των δεδομένων, προήλθε από της υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης, την περιήγηση στο ίντερνετ, την προβολή βίντεο και μουσικής. Υπήρξε έτσι, η ανάγκη για την δημιουργία των επόμενων προτύπων ασύρματης επικοινωνίας.

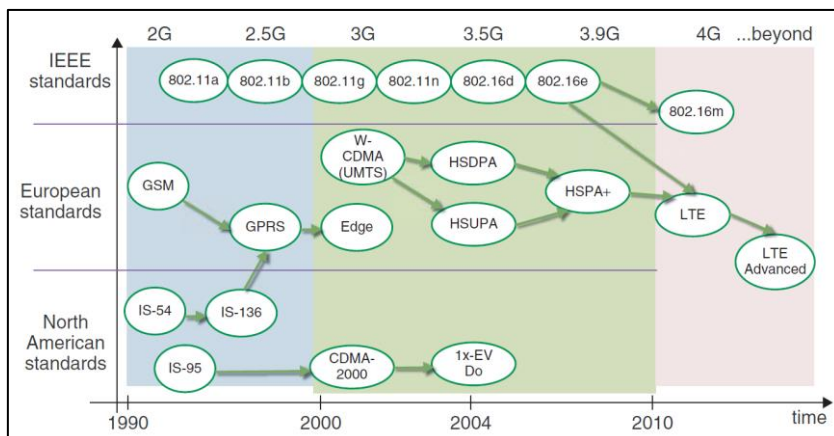
Ως αποτέλεσμα, τα νέα πρότυπα που αναπτύχθηκαν θα έπρεπε να είναι ικανά να παρέχουν ροές δεδομένων και χωρητικότητα δικτύου που να υποστηρίζουν σε παγκόσμιο επίπεδο τις πλούσιες εφαρμογές πολυμέσων.

Το LTE (Long Term Evolution) και το LTE – Advanced δημιουργήθηκαν για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της εποχής. Οι σκοποί των συγκεκριμένων συστημάτων είναι: α) βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος β) βελτίωση της κάλυψης γ) ευελιξία στις λειτουργίες ευρυζωνικότητας δ) βελτιωμένη φασματική απόδοση ε) μείωση λειτουργικού κόστους ζ) υποστήριξη πολλαπλών κεραιών και η) απρόσκοπτη ενοποίηση με τα υπάρχοντα συστήματα κινητών επικοινωνιών.

Το LTE και το LTE – Advanced αποτελούν τους εκπρόσωπους της λεγόμενης 4^{ης} γενιάς ασύρματων συστημάτων και θεωρούνται ως μια «οργανική» εξέλιξη των προκατόχων τους της 3^{ης} γενιάς. Ωστόσο από άποψη της τεχνολογίας μετάδοσης αντιπροσωπεύουν μια δραστική αποχώριση από το παρελθόν. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί μία σύντομη ιστορική επισκόπηση των ασύρματων προτύπων, έτσι ώστε να παρουσιαστεί η προέλευση των προτύπων LTE.

1.2 Ιστορική Ανασκόπηση

Κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχουν εισαχθεί διάφορων τύπων πρότυπα κινητής τηλεφωνίας όπως το 2G, το 3G καθώς και το παρών 4G, ενώ αναμένεται αυτή η εξέλιξη να συνεχιστεί. Η εξέλιξη των δικτύων μπορεί να διαφανεί στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1. Η εξέλιξη των ασύρματων προτύπων κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες [1]

Η βασική λειτουργία των προτύπων 2G ήταν η υποστήριξη της κινητής τηλεφωνίας και των φωνητικών εφαρμογών. Το πρότυπο 3G σηματοδότησε την αρχή της επανάστασης των πακέτων δεδομένων και την υποστήριξη του ίντερνετ, των μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου καθώς και άλλες υπηρεσίες πελάτη - εξυπηρετητή. Τα πρότυπα 4G θα εξυπηρετούν όλα τα IP πακέτα δεδομένων και θα υποστηρίξει την εκρηκτική ζήτηση για εφαρμογές αναβαθμισμένης ευρυζωνικότητας όπως κινητές υπηρεσίες τύπου video – on – demand. Ιστορικά τα πρότυπα κινητής τηλεφωνίας έχουν αναπτυχθεί από κοινοπραξίες παρόχων δικτύων και φορείς ξεχωριστά στην Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη καθώς και άλλων περιοχών του κόσμου. Η δεύτερη γενιά των ψηφιακών συστημάτων κινητών επικοινωνιών εισήχθησαν στις αρχές του 1990. Η τεχνολογία που υποστηρίζει τα συστήματα 2G ήταν τύπου μεταγωγής κυκλώματος. Το GSM (Global System for Mobile Communications) στην Ευρώπη και το IS-54 (Interim Standard 54) στην Βόρεια Αμερική ήταν μεταξύ των πρώτων 2G προτύπων. Και τα δύο πρότυπα είχαν ως βάση την τεχνολογία TDMA (Time Division Multiple Access). Στην TDMA ένα στενό κανάλι επικοινωνίας υποδιαιρείται σε έναν αριθμό χρονοθυρίδων και πολλαπλούς χρήστες όπου μοιράζονται το φάσμα στις καταχωρημένες θυρίδες. Σε σχέση με τους δείκτες δεδομένων, τα GSM συστήματα υποστηρίζουν φωνητικές υπηρεσίες μέχρι 13kbps και υπηρεσίες δεδομένων έως και 9,6 kbps [1].

Το πρότυπο GSM αργότερα μετεξελίχθηκε στο GPRS (Generalized Packet Radio Service), όπου υποστήριζε μια ροή δεδομένων έως 171,2kbps. Το πρότυπο GPRS σηματοδότησε την εισαγωγή των ασύρματων δικτύων διασπασμένου πυρήνα (split – core wireless networks), σύμφωνα με τα οποία η μεταγωγή πακέτων επέτρεπε την μετάδοση δεδομένων και η τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος υποστήριζε την μετάδοση της φωνής. Η τεχνολογία GPRS εξελίχθηκε μετέπειτα στο EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), το οποίο εισήγαγε ένα σχήμα διαμόρφωσης υψηλότερου ποσοστού (8-PSK, Phase Shift Keying) και ενίσχυσε περαιτέρω τον ρυθμό δεδομένων στην ταχύτητα των 384kbps [1].

Στην Βόρεια Αμερική, η εισαγωγή του προτύπου IS-95, σημείωσε την πρώτη εμπορική ανάπτυξη της τεχνολογίας CDMA (Code Division Multiple Access). Η CDMA βασίζεται σε μια τεχνική άμεσης εξάπλωσης του φάσματος, όπου πολλοί χρήστες μοιράζονται ένα εύρος ζώνης με χρήση ορθογώνιων κωδικών εξάπλωσης. Το IS-95 χρησιμοποιεί ένα εύρος ζώνης 1,2284MHz που επιτρέπει 64 κανάλια φωνής ανά κυψέλη, με ανώτατο ρυθμό δεδομένων 14,4 kbps ανά θεμελιώδες κανάλι. Η αναθεώρηση του προτύπου σε IS-95-B έγινε με σκοπό να υποστηρίξει την μετάδοση πακέτων δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Με την εισαγωγή του νέου συμπληρωματικού κώδικα η ταχύτητα ρυθμού δεδομένων έφτασε τα 115,2 kbps. Στην Βόρεια Αμερική, το 3GPP2 (Third Generation Partnership Project 2) ήταν ο φορέας προτυποποίησης που εγκαθίδρυσε τις τεχνικές προδιαγραφές και τα πρότυπα για 3G συστήματα κινητής τηλεφωνίας με βάση την εξέλιξη της CDMA τεχνολογίας. Από 1997 μέχρι το 2003, ο φορέας 3GPP2 ανέπτυξε μια οικογένεια προτύπων βασισμένων στο αρχική IS-95 που περιείχαν τα 1xRTT, 1x-EV-DO (Evolved Voice Data Only) και EV-DV (Evolved Data and Voice). Το πρότυπο 1xRTT διπλασίασε την χωρητικότητα του IS-95 προσθέτοντας 64 επιπλέον κανάλια πετυχαίνοντας ρυθμό δεδομένων 307 kbps. Τα πρότυπα 1x-EV-DO και 1x-EV-DV πέτυχαν ρυθμούς δεδομένων 2,4 - 3,1 Mbps μέσω της εισαγωγής μια σειράς χαρακτηριστικών όπως της προσαρμοστικής διαμόρφωσης (adaptive modulation), HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), TURBO κωδικοποίηση και του ταχύτερου χρονοπρογραμματισμού βασισμένου σε μικρότερα πλαίσια.

Το 3GPP ήταν ο αντίστοιχος φορέας προτυποποίησης που διαχειρίζονταν τα Ευρωπαϊκά πρότυπα κινητής τηλεφωνίας και αργότερα μετεξελίχθηκε σε έναν παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης. Ο συγκεκριμένος φορέας ήταν υπεύθυνος για την

καθιέρωσης των τεχνικών προδιαγραφών των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 3G και έπειτα. Το 3GPP ξεκίνησε να εργάζεται σε μια προσπάθεια προτυποποίησης με σκοπό να πετύχει τους στόχους που τέθηκαν από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών διεθνών Κινητών Τηλεπικοινωνιών (έργο ITU IMT-2000). Ο στόχος του συγκεκριμένου έργου ήταν η μετάβαση από το πρότυπο 2G TDMA που ήταν βασισμένο στην τεχνολογία GSM στο πρότυπο 3G ευρείας ζώνης βασισμένο στην CDMA τεχνολογία που αποκαλούνταν UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Το UMTS αντιπροσώπευε μια δραστική αλλαγή στις κινητές επικοινωνίες. Προτυποποιήθηκε το 2001 και ονομάστηκε Έκδοση 4 του 3GPP προτύπου. Το σύστημα UMTS μπορούσε να πετύχει ανώτατο ρυθμό δεδομένων 1,92 Mbps. Ως αναβάθμιση στο UMTS, το HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) προτυποποιήθηκε το 2002 ως έκδοση 5 του 3GPP. Οι ανώτατες ταχύτητες των 14,4 Mbps που προσφέρθηκαν από το συγκεκριμένο πρότυπο, έκαναν δυνατό τον ταχύτερο χρονοπρογραμματισμό με μικρότερα υπο-πλαίσια και την χρήση του 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) σχήματος διαμόρφωσης. Το HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) προτυποποιήθηκε το 2004 ως έκδοση 6 του 3GPP με μέγιστη ταχύτητα 5,76 Mbps. Και τα δύο πρότυπα, είναι γνωστά ως HSPA (High Speed Packet Access), όπου και μετέπειτα αναβαθμίστηκαν στην έκδοση 7 γνωστή και ως HSPA+ ή MIMO (Multiple Input Multiple Output) HSDPA. Το πρότυπο HSPA+ μπορούσε να φτάσει ταχύτητες τις τάξης των 84 Mbps και ήταν το πρώτο πρότυπο που εισήγαγε την τεχνική 2 X 2 MIMO καθώς και ένα ακόμα υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης το 64QAM. Τα ανεπτυγμένα χαρακτηριστικά που εισήχθησαν αρχικά ως μέρος των προτύπων 3G της Βορείου Αμερικής, ενσωματώθηκαν στο HSPA και στο HSPA+. Αυτά τα χαρακτηριστικά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αφορούν την προσαρμοστική διαμόρφωση, το HARQ, την TURBO κωδικοποίηση και τον ταχύτερο χρονοπρογραμματισμό [1].

Μια άλλη σημαντική τεχνολογία που υπήρξε κινητήριος δύναμη για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και φασματική αποδοτικότητα είναι το WLAN (Wireless Local Area Network). Ο βασικός σκοπός των προτύπων WLAN ήταν να παρέχουν σε στατικούς χρήστες που βρίσκονταν σε κτίρια (σπίτια και γραφεία) με αξιόπιστες και υψηλής ταχύτητας συνδέσεις. Καθώς τα παγκόσμια πρότυπα κινητής τηλεφωνίας βρίσκονταν στο στάδιο της εξέλιξης τους, ο διεθνής οργανισμός IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) ανέπτυξε διεθνή πρότυπα για τα WLAN και τα WMANs (Wireless Metropolitan Area Networks). Με την εισαγωγή μιας οικογένειας προτύπων WiFi (802.11a/b/g/n) και WiMAX (802.16d/e/m), η IEEE εγκαθίδρυσε την ορθογώνια διαίρεση συχνότητας OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ως μια υποσχόμενη και καινοτόμα τεχνολογία διεπαφής αέρα. Το 2006, η IEEE προτυποποίησε το νέο πρότυπο WiMAX (IEEE 802.16m) που εισήγαγε ένα ασύρματο ευρυζωνικό σύστημα πακέτων δεδομένων. Μεταξύ των χαρακτηριστικών του WiMAX είναι τα επεκτάσιμα εύρη ζώνης μέχρι 20 MHz, υψηλότερες ανώτερες ταχύτητες στην ροή δεδομένων και καλύτερα προφίλ ειδικής αποδοτικότητας σε σχέση με τα αντίστοιχα UMTS και HSPA εκείνη την εποχή. Αυτή η μετεξέλιξη ουσιαστικά ξεκίνησε την προσπάθεια από το 3GPP για την εισαγωγή νέων ασύρματων προτύπων κινητής τηλεφωνίας που θα μπορούσαν να ανταγωνιστούν την τεχνολογία WiMAX. Αυτή η προσπάθεια οδήγησε στην προτυποποίηση του LTE προτύπου.

1.3 Εισαγωγή στο δίκτυο LTE

Το LTE (Long Term Evolution) and LTE-Advanced είναι τα τελευταία πρότυπα κινητών τηλεπικοινωνιών που έχουν αναπτυχθεί από το Third Generation Partnership Project (3GPP). Τα συγκεκριμένα πρότυπα αντιπροσωπεύουν μια καθοριστική αλλαγή

στην εξέλιξη της κινητής τεχνολογίας. Στην παρούσα δεκαετία, οι υποδομές των δικτύων και τα κινητά τερματικά έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να υποστηρίζουν τα LTE πρότυπα. Καθώς τα συγκεκριμένα συστήματα εξαπλώνονται σε κάθε γωνιά του πλανήτη, το όραμα της παγκόσμιας ευρυζωνικότητας για την πρόσβαση κινητής τεχνολογίας γίνεται πραγματικότητα.

Το LTE και το LTE – Advanced έχουν κληρονομήσει αρκετά στοιχεία από τα προηγούμενα πρότυπα 3GPP και πιο συγκεκριμένα τα UMTS και HSPA, και υπό αυτό το πρίσμα μπορούν να θεωρηθούν ως η εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών. Ωστόσο με σκοπό να καλυφθούν οι προϋποθέσεις IMT που αναφέρονται στην συνέχεια, καθώς και με σκοπό να διατηρηθεί η ανταγωνιστικότητα με το πρότυπο WiMAX, το πρότυπο LTE έπρεπε να κάνει μια ριζική αποχώρηση από την τεχνολογία CDMA που περιείχονταν στα προηγούμενα πρότυπα. Οι εργασίες για την προτυποποίηση του LTE ξεκίνησαν το 2004 και οδήγησαν σε μία ευρείας κλίμακας νέα αρχιτεκτονική των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ύστερα από τέσσερα χρόνια διαβουλεύσεων και με συνεισφορές από εταιρείες τηλεπικοινωνιών και φορέων διαδικτυακής προτυποποίησης από όλο τον κόσμο, η προτυποποίηση του LTE (3GPP Έκδοση 8) ολοκληρώθηκε το 2008. Η έκδοση 8 του προτύπου LTE μετεξελίχθηκε στην έκδοση 9 με μικρές τροποποιήσεις και στην συνέχεια στην έκδοση 10, που είναι γνωστή και ως LTE – Advanced. Με μέγιστη ρυθμό δεδομένων 1 Gbps, το LTE – Advanced εγκρίθηκε από την ITU ως IMT- advanced τεχνολογία.

1.4 Οι αυξημένες προϋποθέσεις IMT

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) είχε δημοσιεύσει μια σειρά απαιτήσεων για τον σχεδιασμό των κινητών συστημάτων. Οι πρώτες συστάσεις είχαν κυκλοφορήσει το 1997 και αποκαλούνται IMT – 2000 (International Mobile Telecommunications). Οι συστάσεις αυτές περιείχαν μια σειρά από στόχους για τις προδιαγραφές διασύνδεσης των συχνοτήτων. Τα 3G συστήματα κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατά με αυτές τις συστάσεις. Καθώς τα 3G συστήματα εξελίσσονταν, έτσι και οι απαιτήσεις του IMT – 2000 υποβάλλονταν σε πολλαπλές ενημερώσεις [1].

Το 2007, η ITU δημοσίευσε μια νέα σειρά συστάσεων που έθεσαν τον πήχη αρκετά υψηλότερα και παρείχαν απαιτήσεις για IMT – Advanced συστήματα. Τα IMT – Advanced συστήματα αντιπροσωπεύουν τις απαιτήσεις για κατασκευή πραγματικών παγκόσμιων ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Τέτοιου είδους συστήματα μπορούν να παρέχουν πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα πακέτων δεδομένων προηγμένων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Πιο συγκεκριμένα υποστηρίζουν εφαρμογές χαμηλής και υψηλής κινητικότητας, ευρύ φάσμα ρυθμού δεδομένων, καθώς και δυνατότητες για υψηλής ποιότητας πολυμεσικές εφαρμογές. Οι νέες απαιτήσεις δημοσιεύθηκαν για να τονώσουν την έρευνα και την ανάπτυξη, επιφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην επίδοση και την ποιότητα των υπηρεσιών των υφιστάμενων 3G συστημάτων.

Ένα από τα εξέχοντα χαρακτηριστικά του IMT- Advanced ήταν οι ενισχυμένες απαιτήσεις για ρυθμούς δεδομένων (100Mbps για υψηλή κινητικότητα και 1Gbps για χαμηλή κινητικότητα). Αυτές οι προϋποθέσεις καθορίστηκαν ως στόχοι προς έρευνα. Το LTE – Advanced πρότυπο καθώς και το WiMAX που αναπτύχθηκε από την IEEE είναι τα πιο γνωστά πρότυπα για να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις του IMT - Advanced.

1.5 Οι τεχνολογίες του LTE

Οι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιεί το LTE και η μετεξέλιξη του είναι οι εξής: α) OFDM β) MIMO γ) Κωδικοποίηση TURBO και δ) Δυναμικές τεχνικές σύνδεσης προσαρμογής (Dynamic link – adaptation techniques) [1].

1.5.1 OFDM

Οι κύριοι λόγοι που το LTE επέλεξε την τεχνολογία OFDM ως βασικό σύστημα μετάδοσης, είναι οι ακόλουθοι: α) ευρωστία στο κανάλι εξασθένησης πολλαπλής διαδρομής (multipath fading channel) β) υψηλή φασματική απόδοση γ) χαμηλή πολυπλοκότητα στην εφαρμογή και δ) δυνατότητα για παροχή ευέλικτων ευρών ζώνης και υποστήριξη προηγμένων χαρακτηριστικών όπως ο χρονοπρογραμματισμός βάση συχνοτήτων, η μετάδοση MIMO και ο συντονισμός παρεμβολών. Το OFDM είναι ένα σχήμα μετάδοσης πολλαπλών φερουσών. Η κύρια ιδέα, είναι ότι υποδιαιρεί την μεταδιδόμενη πληροφορία σε ένα κανάλι ευρείας ζώνης στο πεδίο της συχνότητας και ευθυγραμμίζει τα σύμβολα δεδομένων με πολλαπλά ορθογώνια υποκανάλια στενής ζώνης (narrowband) που είναι γνωστά και ως υποφέρουσες. Όταν η συχνότητα του διάκενου μεταξύ των υποφερουσών είναι σχετικά μικρή, τότε ένα σχήμα μετάδοσης OFDM μπορεί να αναπαραστήσει ένα επιλεκτικό ως προς την συχνότητα κανάλι εξασθένησης ως μια συλλογή επίπεδων υποκαναλιών εξασθένησης στενής ζώνης. Αυτό με την σειρά επιτρέπει στο OFDM να προσφέρει έναν έξυπνο και απλό τρόπο για τον υπολογισμό της συχνότητας απόκρισης του καναλιού με βάση την μετάδοση γνωστών δεδομένων – σημάτων αναφοράς. Με έναν καλό υπολογισμό του καναλιού απόκρισης στον δέκτη, είναι δυνατή η ανάκτηση της καλύτερης εκτίμησης του εκπεμπόμενου σήματος με την χρήση ενός ισοσταθμιστή συχνότητας χαμηλής πολυπλοκότητας. Ο ισοσταθμιστής κατά μια έννοια αντιστρέφει την απόκριση της συχνότητας του σε κάθε υποφέρουσα.

1.5.2 MIMO

Η MIMO είναι μια από τις βασικές τεχνολογίες που αναπτύσσονται στα LTE πρότυπα. Με βαθιές ρίζες στα στην έρευνα των κινητών επικοινωνιών, οι τεχνικές MIMO εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα από την χρήση πολλαπλών κεραιών με σκοπό να επιτευχθούν οι φιλόδοξοι στόχοι των προτύπων LTE από απόψεως μέγιστων ρυθμών δεδομένων και διακίνησης. Οι μέθοδοι MIMO μπορούν να βελτιώσουν τις κινητές επικοινωνίες με δύο διαφορετικούς τρόπους α) με την επαύξηση της ταχύτητας διακίνησης δεδομένων και β) με αύξηση της αξιοπιστίας της επικοινωνιακής ζεύξης. Οι αλγόριθμοι MIMO που χρησιμοποιούνται στα LTE πρότυπα μπορούν να χωριστούν σε 4 ευρύτερες κατηγορίες: α) υποδοχής ποικιλομορφίας β) ποικιλομορφία μεταδόσεως γ) σχηματισμών δέσμης (beamforming) και δ) χωρικής πολυπλεξίας. Στην ποικιλομορφία μετάδοσης και στο beamforming, μεταδίδονται πλεονάζοντες πληροφορίες σε διαφορετικές κεραιές. Έτσι, με αυτές τις μεθόδους δεν γίνεται συμβολή στον ρυθμό μετάδοσης, ωστόσο προσδίδεται μεγαλύτερη ευρωστία στην διασύνδεση των επικοινωνιών. Στην χωρική πολυπλεξία ωστόσο, το σύστημα μεταδίδει ανεξάρτητες σημαντικές πληροφορίες σε διαφορετικές κεραιές. Αυτός ο τύπος MIMO μπορεί να ενισχύσει σε σημαντικό βαθμό τον ρυθμό δεδομένων μια τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης. Το πρότυπο LTE παρέχει πολλαπλές διαμορφώσεις μετάδοσης μέχρι και τέσσερις κεραιές στις downlink προδιαγραφές του. Το LTE – Advanced επιτρέπει την χρήση έως 8 κεραιές για την downlink μετάδοση.

1.5.3 Κωδικοποίηση TURBO

Η κωδικοποίηση TURBO είναι μια εξέλιξη της συνελκτικής κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται σε όλα προηγούμενα πρότυπα με εντυπωσιακά αποτελέσματα κοντά στην χωρητικότητα των καναλιών. Η κωδικοποίηση TURBO εισήχθη αρχικά το 1993 και έχει εφαρμοστεί σε 3G UMTS και HSPA συστήματα. Στο πρότυπο LTE, η κωδικοποίηση TURBO είναι ο μοναδικός μηχανισμός κωδικοποίησης καναλιών για την επεξεργασία των δεδομένων των χρηστών. Οι LTE TURBO κωδικοποιητές έρχονται με πολλές βελτιώσεις, με στόχο να καταστούν πιο αποτελεσματικοί κατά την εφαρμογή τους. Αυτή η πολύ απλή λύση, επιτρέπει την μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των LTE TURBO αποκωδικοποιητών χωρίς να επιφέρουν μειώσεις στην απόδοση τους [1].

1.5.4 Δυναμικές Τεχνικές Σύνδεσης - Προσαρμογής

Η προσαρμογή σύνδεσης (ή ζεύξης) ορίζεται ως μια συλλογή τεχνικών για την αλλαγή και την προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης ενός συστήματος κινητής επικοινωνίας ώστε να ανταποκρίνεται με καλύτερα στην δυναμική φύση του καναλιού επικοινωνίας. Ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετική διαμόρφωση και τεχνικές κωδικοποίησης (προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση), αλλάζοντάς τον αριθμό των κεραιών εκπομπής ή λήψης (προσαρμοστική MIMO) και το εύρος ζώνης μετάδοσης.

1.6 Επισκόπηση έκδοσης 8 & 9 του LTE

Η εισαγωγή της πρώτης έκδοσης του προτύπου LTE ήταν το αποκορύφωμα για περίπου 4 χρόνια δουλειάς του 3GPP. Μετά από μια διεξοδική μελέτη διαφορετικών τεχνολογιών ικανών για την κάλυψη των απαιτήσεων που τέθηκαν για το LTE, αποφασίστηκε ότι η τεχνολογία μετάδοσης στον αέρα θα βασιστεί στην OFDM στο downlink και στην SC-FDM στο uplink. Οι πλήρεις προδιαγραφές, συμπεριλαμβάνουν διάφορους τύπους MIMO που ενσωματώθηκαν στο πρότυπο. Η πρώτη έκδοση του LTE προτύπου 3GPP έκδοση 8 κυκλοφόρησε τον Δεκέμβριο του 2008. Η έκδοση 9 έγινε τον Δεκέμβριο του 2009 και περιείχε σχετικά μικρές βελτιώσεις, όπως αναμετάδοση πολυμέσων (Multimedia Broadcast) και οι υπηρεσίες πολλαπλής διανομής (Multicast Services), υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, βελτιωμένες λειτουργίες για κλήσεις εκτάκτου ανάγκης και υποστήριξη σταθμών βάσης που υποστηρίζουν πολλαπλά πρότυπα [1].

Σημειώνεται η χρήση του OFDM στο πεδίο των συχνοτήτων επιτρέπει πιο αποδοτικές λειτουργίες ενίσχυσης, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα για μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Την ίδια στιγμή, η χρήση του OFDM κατά το downlink συνδυασμένη με το SC-FDM στο πεδίο των συχνοτήτων στο uplink ελαχιστοποιεί την πολυπλοκότητα των τερματικών του δέκτη (downlink) καθώς και του εκπομπού (uplink) μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα όλου του συστήματος [2].

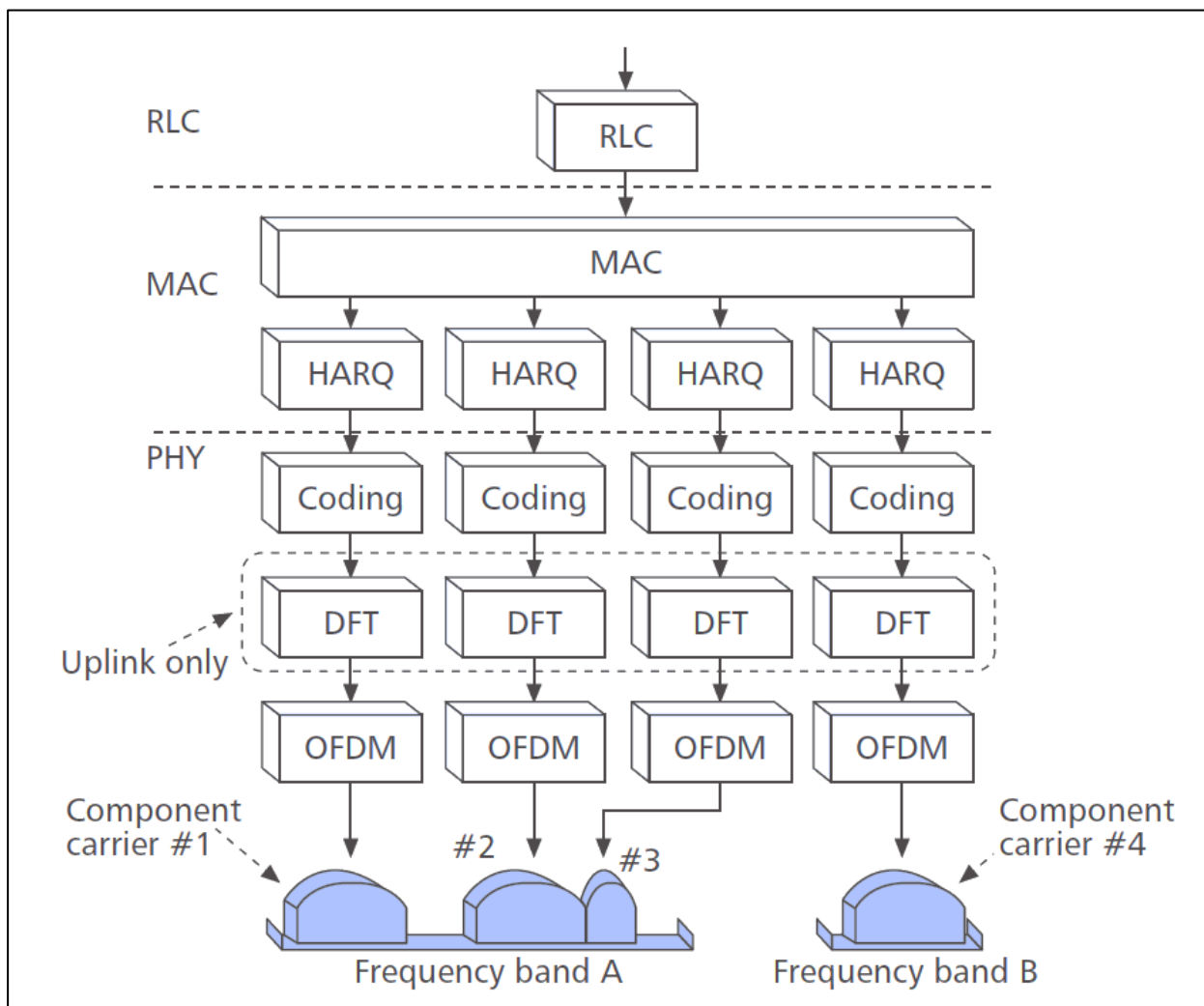
1.7 Το δίκτυο LTE - Advanced

Η έκδοση 10, γνωστή και ως LTE – Advanced, αποτελεί την μετεξέλιξη του LTE για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης. Όπως προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη έκδοση περιέχει όλα τα προηγούμενα χαρακτηριστικά των εκδόσεων 8 & 9 ενώ περιέχει αρκετά νέα χαρακτηριστικά όπως η συνάθροιση φερουσών, βελτιωμένη υποστήριξη πολλαπλών κεραιών και βελτιωμένη υποστήριξη ετερογενών εγκαταστάσεων. Ένα δίκτυο που ανήκει στην έκδοση 10 μπορεί να επικοινωνεί με παλιότερες εκδόσεις. Ενώ

είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα περισσότερα χαρακτηριστικά της έκδοσης 10, μπορούν να οριστούν στο δίκτυο μέσω απλών αναβαθμίσεων λογισμικού.

1.7.1 Συνάθροιση φερουσών

Η έκδοση 8 παρέχει εκτεταμένη υποστήριξη στην εγκατάσταση κατανομών φάσματος για διάφορα χαρακτηριστικά, με εύρος ζώνης που κυμαίνεται από 1,4 έως 20 MHz τόσο σε συζευγμένες όσο και σε μη-συζευγμένες μπάντες συχνοτήτων. Στην έκδοση 10, το εύρος ζώνης μετάδοσης επεκτάθηκε ακόμα περισσότερο μέσω της χρήσης συνάθροισης φερουσών, όπου πολλαπλά στοιχεία φερουσών συναθροίζονται και χρησιμοποιούνται από κοινού για την μετάδοση προς ένα κινητό τερματικό. Έτσι, έως πέντε φέρουσες μπορούν να συναθροιστούν, επιτρέποντας την μετάδοση για εύρος ζώνης έως 100 MHz. Κάθε φέρον στοιχείο χρησιμοποιεί την έκδοση 8 [3].



Εικόνα 2. Συνάθροιση φερουσών στην έκδοση 10 του LTE [3]

Όσον αφορά την θέση της συχνότητας των διαφορετικών στοιχείων, τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μπορούν να προσδιοριστούν: α) Συνάθροιση μεταξύ διαφορετικών ευρών (intra-band aggregation) με συνεχόμενες φέρουσες (π.χ. η συνάθροιση του #2 και του #3 στην παρακάτω εικόνα) β) Συνάθροιση μεταξύ εσωτερικών ευρών (inter-band aggregation) για το ζεύγος #1 & #4 και γ) Συνάθροιση μεταξύ διαφορετικών ευρών με μη-συνεχόμενες φέρουσες (ζεύγος #1 & #2).

Από την άποψη της βασικής ζώνης, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των υπάρχουσών περιπτώσεων, ενώ όλες υποστηρίζονται από την έκδοση 10 του LTE. Ωστόσο η πολυπλοκότητα της υλοποίησης των ραδιοσυχνοτήτων είναι κατά πολύ διαφορετική και λιγότερο πολύπλοκη σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Παρόλο που η αξιοποίηση του κατακερματισμένου φάσματος και η επέκταση του συνολικού εύρους ζώνης πέραν των 20 MHz είναι δύο σημαντικές χρήσεις της συνάθροισης φερουσών, υπάρχουν επιπλέον σενάρια όπου η συγκεκριμένη τεχνική είναι χρήσιμη εντός του συνεχόμενου φάσματος των 20 MHz. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ετερογενής ανάπτυξη που θα συζητηθεί παρακάτω. Ο χρονοπρογραμματισμός και τα αιτήματα αναμετάδοσης υβριδικής αυτόματης επανάληψης διαχειρίζονται ανεξάρτητα για κάθε φέρων στοιχείο.

Επιπλέον, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ο αποκαλούμενος ο χρονοπρογραμματισμός δια-φερουσών (cross-carrier scheduling), όπου η απόφαση χρονοπρογραμματισμού μεταδίδεται στο τερματικό μέσω ενός άλλου φέροντος στοιχείο από τα αντίστοιχα δεδομένα [3].

Με σκοπό την μείωση την κατανάλωση ρεύματος στο τερματικό, εάν αυτό μπορεί να πραγματοποιήσει συνάθροιση φερουσών, δέχεται μόνο ένα φέρων στοιχείο, το κύριο φέρων στοιχείο.

1.7.2 Βελτιωμένη υποστήριξη πολλαπλών κεραιών

Το LTE περιλαμβάνει μια ποικιλομορφία κατερχόμενης ζεύξης (downlink diversity) βασισμένη στην τεχνική της μπλοκ κωδικοποίησης του χώρου της συχνότητας (SFBC – Space Frequency Block Coding) για την περίπτωση δύο κεραιών εκπομπής, καθώς και σε συνδυασμό με την τεχνική FSTD (Frequency Shift Time Diversity) για τέσσερις κεραιές. Επιπρόσθετα, κατά την προ-κωδικοποίηση της κατερχόμενης ζεύξης, συμπεριλαμβάνεται και η πιθανότητα για πολύ-επίπεδη μετάδοση (χωρική πολυπλεξία). Στην έκδοση 8 του LTE έως και τέσσερις στρώσεις επιτρέπονται για την μετάδοση [3].

Οι τεχνικές πολλαπλών κεραιών βασίζονται στα ειδικά για την κυψέλη σήματα αναφοράς για αποδιαμόρφωση, καθώς και για την απόκτηση ανάδρασης για την κατάσταση του κάθε καναλιού από το τερματικό προς τον σταθμό βάσης. Η υποστήριξη αυτή ενισχύθηκε σε δυεπίπεδη αναμετάδοση στην έκδοση 9.

Ο σχηματισμός δέσμης είναι μια ακόμα σημαντική τεχνική που χρησιμοποιείται για περισσότερες από τέσσερις κεραιές, για αμοιβαία μετάδοση αμφίδρομης επικοινωνίας με διαχωρισμό ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης με την χρήση διαφορετικών χρονοθυρίδων για το ίδιο εύρος συχνοτήτων.

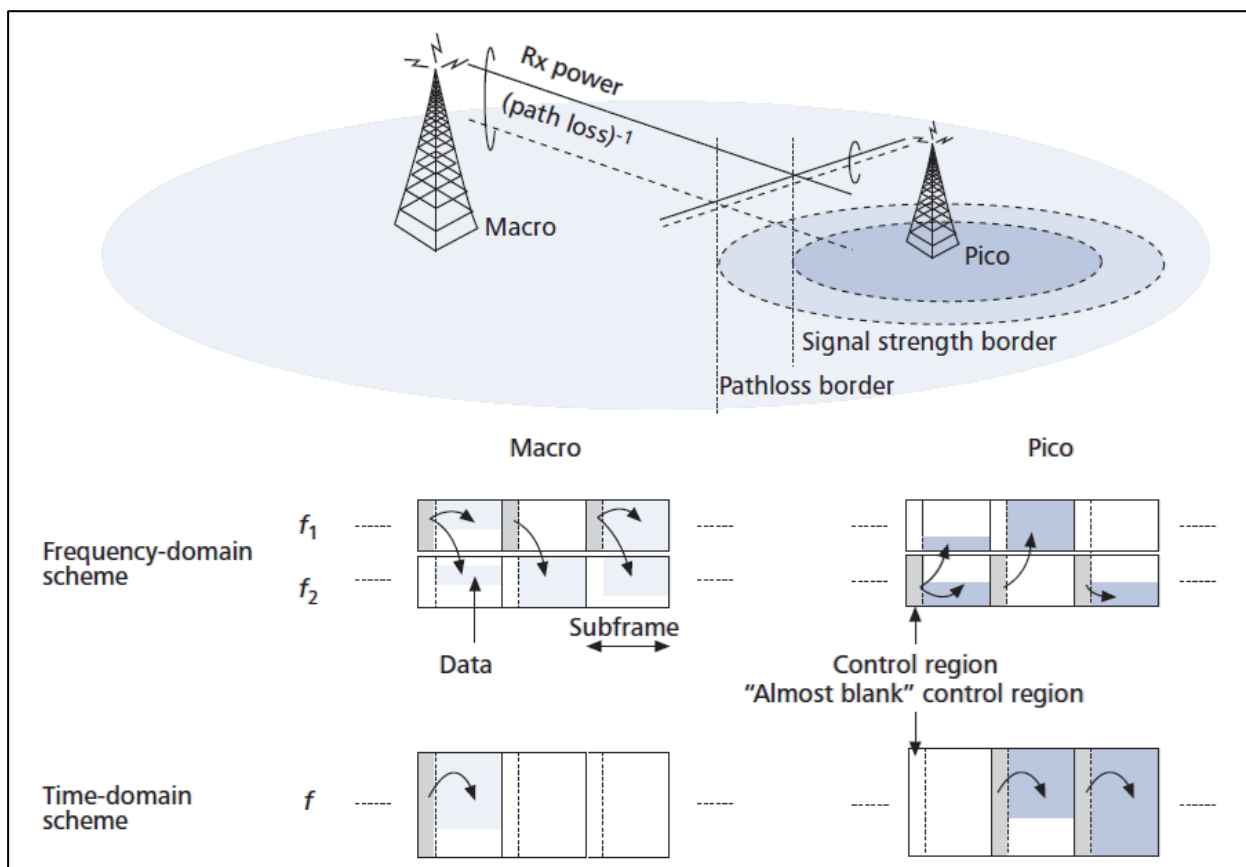
Στην έκδοση 10, η χωρική πολυπλεξία κατερχόμενης ζεύξης έχει επεκταθεί έτσι ώστε να υποστηρίζει μέχρι και 8 επίπεδα αναμετάδοσης μαζί με ένα ενισχυμένο σήμα αναφοράς. Επιπρόσθετα η ανάδραση της πληροφορίας κατάστασης του καναλιού (CSI – Channel State Information) βασίζεται σε ένα ξεχωριστό σετ σημάτων αναφοράς που μεταδίδονται στην κυψέλη, γνωστά και ως CSI σήματα αναφοράς. Αυτού του είδους τα σήματα έχουν αρκετά «αραιή» συχνότητα (κάθε $12^{\text{η}}$ υποφέρουσα αντιστοιχεί σε 180 KHz), με τακτική αναμετάδοση από όλες τις κεραιές του σταθμού βάσης. Η περιοδικότητα είναι διαμορφώσιμη, αλλά συνήθως έχει την τιμή 1/10 msec [3].

Ο διαχωρισμός του σήματος αναφοράς που υποστηρίζει την αποδιαμόρφωση από υποστηρικτικό κανάλι εκτίμησης κατάστασης υποβοηθά στην μείωση του εναέριου σήματος αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για υψηλούς βαθμούς χωρικής πολυπλεξίας, επιτρέπει την εφαρμογή διαφόρων συστημάτων σχηματισμού δέσμης. Η πολυπλεξία

ανερχόμενης ζεύξης έως τέσσερα στρώματα, είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό της έκδοσης 10 [3].

1.7.3 Βελτιωμένη υποστήριξη ετερογενών αναπτύξεων

Καθώς οι δυνατότητες για την βελτιωμένη απόδοση των ζεύξεων ή την αύξηση της ισχύς μετάδοσης περιορίζονται, η υποστήριξη υψηλών ρυθμών δεδομένων για απαιτητικού χρήστες απαιτεί μια ανεπτυγμένη (και άρα πιο πυκνή) δομή. Μια απλοϊκή πύκνωση ενός υπάρχοντος (μακρο) δικτύου είναι η μία πιθανότητα, αλλά σε σενάρια που αναπτύχθηκαν όπου οι χρήστες είναι αρκετοί, μια ελκυστική προσέγγιση είναι η συμπλήρωση μιας (μακρο) κυψέλης παρέχοντας βασική κάλυψη με πολλαπλή με χαμηλής κατανάλωσης πικο-κυψέλες όπου χρειάζεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι μια ετερογενής ανάπτυξη με δύο ή περισσότερα επίπεδα κυψελών.



Εικόνα 3. Ανάπτυξη ετερογενών συστημάτων με μια μακρο-κυψέλη να επικαλύπτει πολλαπλές πικο-κυψέλες [2]

Η έκδοση 10 του LTE παρέχει κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά, βελτιώνοντας την υποστήριξη ετερογενών αναπτύξεων. Σε μια ετερογενή ανάπτυξη, η διασύνδεση των κυψελών (π.χ. σε ποια κυψέλη θα πρέπει να συνδεθεί το τερματικό;) παίζει σημαντικό ρόλο. Από άποψη ρυθμού δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης, είναι επωφελές να υπάρξει διασύνδεση της κυψέλης με μικρότερο μονοπάτι απώλειας, σε σχέση με την διασύνδεση μιας κυψέλης με την ισχυρότερη ληφθείσα κατερχόμενη ζεύξη.

Οι στρατηγικές διασύνδεσης των κυψελών σε μια ετερογενή σύζευξη δεν μπορεί να θεωρηθεί τριτοβάθμια και η συνολική απόδοση του δικτύου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Παρ' όλα αυτά κάθε στρατηγική σύνδεσης των κυψελών δεν βασίζεται αποκλειστικά στην μεγιστοποίηση της ποιότητας του σήματος της ληφθείσας

κατερχόμενης ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα η περιοχή κάλυψης της ανερχόμενης ζεύξης μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την περιοχή κάλυψης της κατερχομένης ζεύξης, υποδηλώνοντας ότι υπάρχει μια περιοχή περιμετρικά του κόμβου χαμηλής ισχύος όπου η αναμετάδοση της κατερχόμενης ζεύξης από τον κόμβο χαμηλής ισχύος σε ένα τερματικό υπόκειται σε αυστηρές παρεμβολές από την μακρο-κυψέλη [3].

Με την μέθοδο συντονισμού δια-κυψελικών παρεμβολών (ICIC – Intercell Interference Coordination), διαφορετικές κυψέλες μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με το ποιες συχνότητες πρόκειται να χρονοπρογραμματίσουν αναμεταδόσεις στο κοντινό μέλλον, έτσι μειώνονται ή και αποφεύγονται ολοκληρωτικά οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελών. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο ή λιγότερο δυναμικά συντονίζοντας την χρήση των πόρων μεταξύ των επιπέδων των κυψελών αποφεύγοντας τις επικαλύψεις στην χρήση των πόρων.

Ο έλεγχος σηματοδότησης σε κάθε υποπλάισιο είναι μια προβληματική διαδικασία, καθώς καλύπτει το εύρος ζώνης της συνολικής κυψέλης και δεν υπόκειται στην μέθοδο συντονισμού των διακυψελικών παρεμβολών. Με σκοπό να αντιμετωπιστεί η συγκεκριμένη διαδικασία, η έκδοση 10 του LTE παρέχει βελτιώσεις για τον διαχωρισμό του ελέγχου σηματοδότησης για διαφορετικά επίπεδα κυψελών είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας.

Από την στιγμή που στην έκδοση 10 χρησιμοποιείται χρονοπρογραμματισμός διαφερούσων, οι πόροι μπορούν να αξιοποιηθούν για την αναμετάδοση δεδομένων, μέσω του συντονισμού διακυψελικών παρεμβολών.

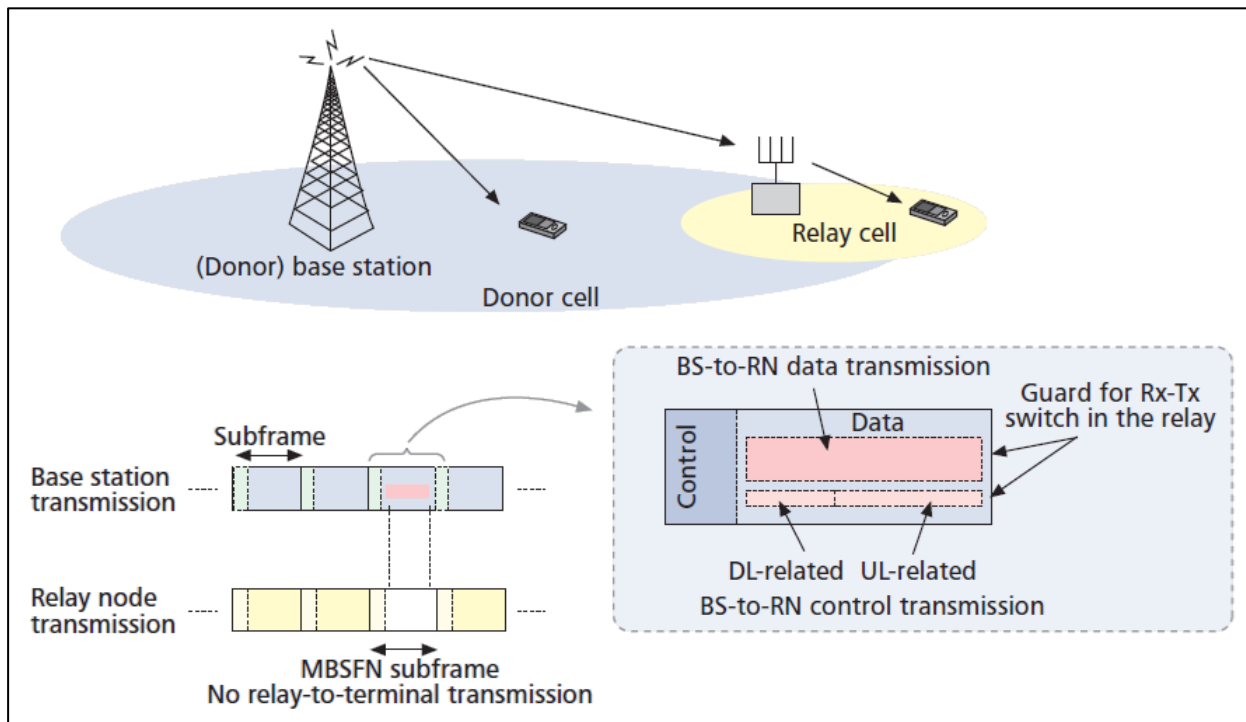
Λαμβάνοντας υπόψιν πως τα τερματικά μπορούν να συνδεθούν σε έναν κόμβο χαμηλής κατανάλωσης, με τον κόμβο να λειτουργεί από τον εκάστοτε πάροχο, αντίστοιχα προβλήματα παρεμβολών μπορούν να προκληθούν και από τον «σταθμό βάσης» ενός χρήστη που μπορεί να βρίσκεται στο σπίτι του. Για τέτοιες περιπτώσεις αποδίδεται ο όρος κλειστές ομάδες συνδρομητών (CSGs – Closed Subscriber Groups), όπου συνήθως αναφερόμαστε σε περιπτώσεις όπου η πρόσβαση σε τέτοιου είδους σταθμούς βάσης χαμηλής κατανάλωσης περιορίζεται σε ένα μικρό αριθμό τερματικών, όπως για παράδειγμα μια οικογένεια που ζει σε ένα σπίτι. Οι κλειστές ομάδες συνδρομητών οδηγούν σε επιπρόσθετα σενάρια παρεμβολών. Για παράδειγμα, ένα τερματικό που βρίσκεται κοντά αλλά δεν συνδέεται στον σταθμό βάσης του σπιτιού, θα υπαχθεί σε ισχυρές παρεμβολές και πιθανώς να μην μπορεί διαβεί την μακρο-κυψέλη. Στην ουσία, η παρουσία ενός σταθμό βάσης ενός σπιτιού μπορεί να προκαλέσει ένα διάκενο κάλυψης στο μακρο-δίκτυο του παρόχου, ένα πρόβλημα που είναι αρκετά ανησυχητικό καθώς οι σταθμοί βάσης των σπιτιών δεν ελέγχονται από τον πάροχο. Παρομοίως η υποδοχή στον σταθμό βάσης των σπιτιών μπορεί να επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την αναμετάδοση της ανερχόμενης ζεύξης από το τερματικό που συνδέεται με την μακρο-κυψέλη [3].

Ο χειρισμός παρεμβολών μεταξύ των κλειστών ομάδων συνδρομητών, που συνήθως στερούνται συστημάτων συντονισμού, θα μπορούσαν να βασιστούν σε κατανομημένους αλγόριθμους για τον έλεγχο ισχύος και την κατάτμηση των πόρων μεταξύ των κυψελών.

1.7.4 Αναμετάδοση

Η έκδοση 10 του LTE έχει την δυνατότητα επέκτασης των ραδιοσυχνοτήτων πρόσβασης του LTE με την υποστήριξη της λειτουργικότητας αναμετάδοσης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Με την αναμετάδοση, το τερματικό επικοινωνεί με το δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης, οπότε συνδέεται ασύρματα σε ένα μια κυψέλη

– δωρητή (donor cell) χρησιμοποιώντας της τεχνολογία διεπαφής ραδιοσυχνοτήτων του LTE.



Εικόνα 4. Διάγραμμα Αναμετάδοσης στο LTE – Advanced [2]

Με την τεχνική της αναμετάδοσης του 3GPP, ο κόμβος αναμετάδοσης θα λειτουργεί ως μια τυπική κυψέλη από άποψης τερματικών. Στην έκδοση 10 του LTE ένα διάκενο υπάρχει στην επικοινωνία αναμεταδότη-προς-τερματικό ώστε να επιτρέψει την λήψη μετάδοσης μεταξύ δωρητή – προς –αναμεταδότη με χρήση των υπο-πλαισίων MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network).

Δεδομένου ότι ο αναμεταδότης απαιτείται να αναμεταδίδει σήματα αναφοράς ειδικά για την κυψέλη για το πρώτο μέρος ενός υποπλαισίου MBSFN, δεν μπορεί να δέχεται τυπικά σήματα ελέγχου από την δότρια κυψέλη. Έτσι στην έκδοση 10, ορίζεται ένα νέο κανάλι ελέγχου, που μεταδίδεται μετέπειτα στο υποπλαίσιο όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, με σκοπό να παράσχει έλεγχο σηματοδότησης από την δότρια κυψέλη προς τον αναμεταδότη [3].

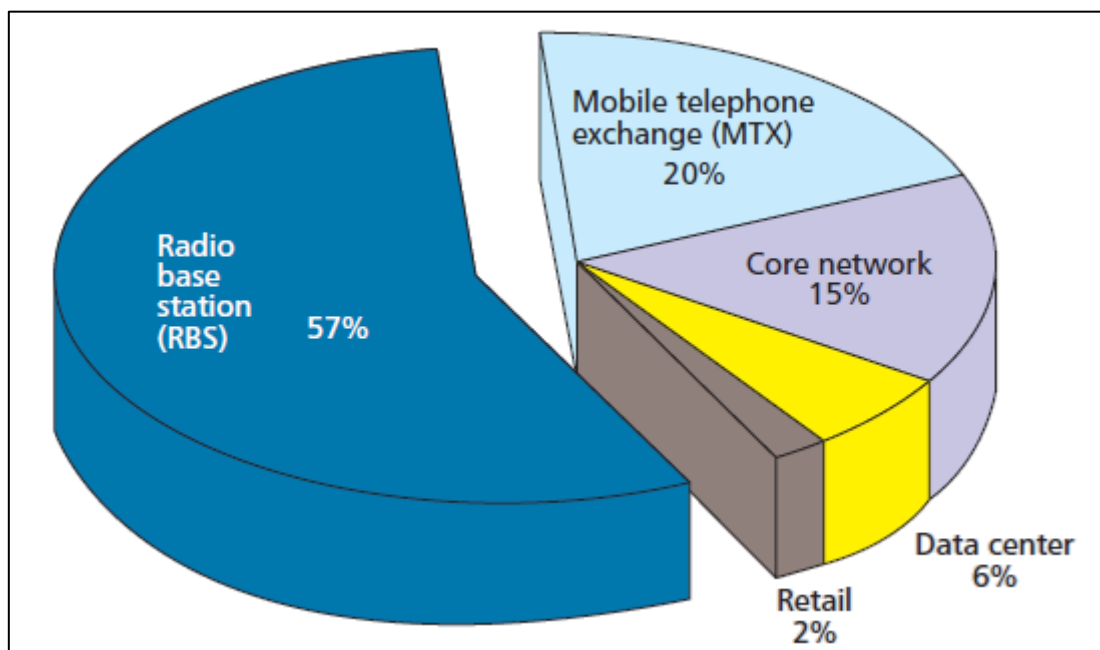
1.7.5 Ενεργειακή Αποδοτικότητα

Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις στην κατανάλωση ενέργειας, όπως για παράδειγμα το γεγονός πως οι κινητές συσκευές θα ξεπεράσουν τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ως το πιο κοινό μέσο πρόσβασης για το διαδίκτυο. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, περισσότερες ασύρματες υποδομές θα πρέπει να αναπτυχθούν με μεγαλύτερες απαιτήσεις ενέργειας. Ταυτόχρονα εφαρμογές με εντατική χρήση δεδομένων, ξεκινούν να κυριαρχούν στις κινητές υπηρεσίες των χρηστών. Ο όγκος των δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί κατά 10 μονάδες κάθε πέντε χρόνια, που συνδέονται με 16-20 % αύξηση της ενέργειας κατανάλωσης [4].

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των ασύρματων δικτύων πρόσβασης, τα οποία σε ένα γενικότερο βαθμό αφορούν κάθε ασύρματο

σύστημα που χρησιμοποιεί σταθμούς βάσης ραδιοσυχνότητας (RBSs - Radio Base Stations) ή σημεία πρόσβασης που συνδέονται με κινητές συσκευές στον πυρήνα του δικτύου ή του ίντερνετ. Οι λόγοι για να επικεντρωθεί κανείς στα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης είναι οι παρακάτω: α) Από την στιγμή που τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα ασύρματα δίκτυα στον κόσμο, οι ενεργειακά αποδοτικές λύσεις αναμένεται να βελτιώσουν δραστικά και την ενεργειακή αποδοτικότητα ολόκληρου του τομέα ΤΠΕ β) Παραδοσιακά τα πρότυπα των δικτύων ασύρματης πρόσβασης εστίαζαν το ενδιαφέρον τους στην απόδοση διακίνησης δεδομένων. Μόνο πρόσφατα η ενεργειακή αποδοτικότητα ξεκίνησε να αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή. Σημαντικές μελέτες απαιτούνται για να ισοροπήσουν την απόδοση και την ενεργειακή αποδοτικότητα. γ) Η ζήτηση από τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας για ενεργειακή αποδοτικότητα είναι επείγουσα με σκοπό να απολαύσουν μια καλύτερη εμπειρία.

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, οι σταθμοί βάσης ραδιοσυχνότητας αποτελούν την κύρια πηγή κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο ενός παρόχου κινητής τηλεφωνίας. Στην συνέχεια θα αναλυθούν μερικές ήπιες μέθοδοι για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στους σταθμούς βάσης ραδιοσυχνότητας, με έμφαση στο LTE. Οι ήπιες μέθοδοι, σημαίνουν πως δεν προβαίνουν σε κάποια αναβάθμιση σε επίπεδο υλικού, αλλά επαναρυθμίζουν τις παραμέτρους στα πρωτόκολλα και εφαρμόζουν αναβαθμισμένες αρχιτεκτονικές και στρατηγικές ανάπτυξης για ενεργειακή αποδοτικότητα.



Εικόνα 5. Ενεργειακή κατανάλωση ενός παρόχου κινητής τηλεφωνίας [2]

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης της ενεργειακής αποδοτικότητας είναι η απόδοση ανά μονάδα κατανάλωσης ενέργειας. Τέτοιου είδους γνωστές μετρικές είναι οι πράξεις κινητής υποδιαστολής ανά δευτερόλεπτο (FLOPS – Floating Point Operations Per Second) στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος, οι εκατομμύρια εντολές ανά δευτερόλεπτο (MIPS – Million Instructions Per Second) στα υπολογιστικά συστήματα και bits ανά δευτερόλεπτο στα συστήματα επικοινωνίας.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα στα συστήματα επικοινωνίας δεν είναι ένα απλό ζήτημα. Η θεωρία πληροφορικών και κωδίκων, μπορεί να αποκαλύψει μερικές πτυχές σχετικά με την υπάρχουσα πολυπλοκότητα. Σύμφωνα με τον τύπο του Shannon, η

ενεργειακή αποδοτικότητα ενός συστήματος επικοινωνίας βασισμένη στο πρόσθετο λευκό Γκαουσιανό θόρυβο (AWGN – Additive White Gaussian Noise) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\eta_{EA} = \frac{R}{P} = \frac{B}{P} \log_2 \left(1 + \frac{P}{BN_0} \right), \text{ Εξ. 1}$$

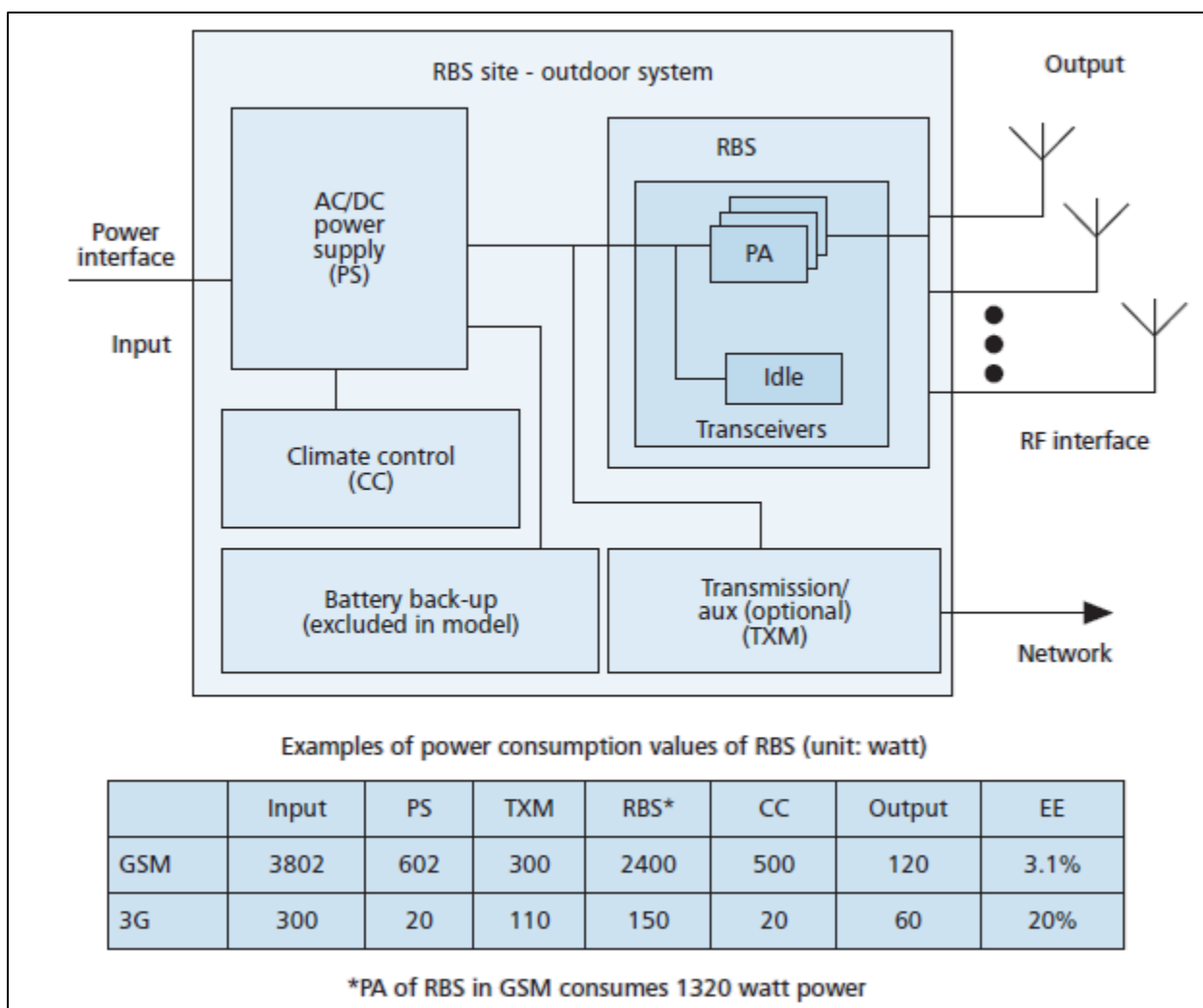
Όπου EA είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα, R είναι ο ρυθμός bit των πληροφοριών, P είναι η λαμβανόμενη ισχύς, B είναι το εύρος ζώνης, και N_0 η πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου. Η μονάδα της ενεργειακή αποδοτικότητας είναι τα bits ανά Joule που δείχνουν τις μεταδιδόμενες μονάδες πληροφορίας για κάθε μια ενεργειακή μονάδα. Η παραπάνω εξίσωση δείχνει πως εάν η N_0 είναι σταθερή, τότε η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι συνάρτηση πυκνότητας ισχύος P/B. Μερικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από την ανωτέρω εξίσωση είναι οι ακόλουθες: α) Η ενεργειακή αποδοτικότητα δεν αυξάνεται μονοτονικά με το B ή το P. Σε ένα πρακτικό σύστημα όπου το εύρος ζώνης είναι μια λιγότερο «εύκαμπτη» παράμετρος, η μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος είναι σχετικά δύσκολο να επιτευχθεί. β) Για ένα δεδομένο ρυθμό R, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης, απαιτείται λιγότερη ενέργεια. Εάν το εύρος ζώνης είναι άπειρο, η απαιτούμενη ενέργεια είναι σταθερή σε $P = N_0 R \ln 2$. Αυτό μας δίνει μια ιδέα για την σχέση εύρους ζώνης και ενέργειας. γ) Ο στόχος για την βελτιστοποίηση της απόδοσης έρχεται σε αντίθεση με την ενεργειακή αποδοτικότητα. Και η εξισορρόπηση αυτών των δύο στόχων περιπλέκει τον σχεδιασμό του συστήματος. Σημειώνεται εδώ, πως στην πραγματικότητα τα κυκλώματα ενός συστήματος θα μετατρέψουν μια σημαντική ποσότητα ενέργειας σε θερμότητα [4].

Σε πολλά συστήματα κινητής τηλεφωνίας έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται το μοντέλο ενεργειακής αποδοτικότητας για τον εξοπλισμό του δικτύου ασύρματης πρόσβασης, όπως προτάθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI – European Telecommunications Standards Institute). Ο εξοπλισμός που προτείνεται για ένα RBS αφορά την τροφοδοσία ρεύματος, τον έλεγχο του κλίματος, τα συστήματα αναμετάδοσης, την εφεδρική μπαταρία καθώς και άλλο βοηθητικό εξοπλισμό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα μοντέλο εξωτερικής αναφοράς ενός συγκεντρωμένου RBS.

Η συνολική ενεργειακή απόδοση ενός 3G RBS είναι 20%. Οι ενισχυτές ισχύος παραμένει ακόμα ένα μεγάλο πρόβλημα για την συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα. Όπως είναι επίσης γνωστό η κατανάλωση ενέργειας ενός RBS, δεν κλιμακώνεται ανάλογα με την κυκλοφορία των δεδομένων αλλά διατηρείται σε υψηλό επίπεδο. Η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την μείωση του χρόνου λειτουργίας των ενισχυτών ισχύος, με την συρρίκνωση του εύρους ζώνης ή και ακόμη του κλεισίματος μιας RBS περιοχής. Επιπλέον, λιγότερα σήματα αναφοράς είναι απαιτητά για μικρότερες τιμές εύρους ζώνης. Αυτό μειώνει με την σειρά του την γενική κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα όταν το εύρος ζώνης ενός καναλιού αλλάζει από τα 10 MHz σε 5 MHz, η ισχύς μετάδοσης μπορεί να μειωθεί κατά 3 db. Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι για την μείωση του εύρους ζώνης: α) με την συρρίκνωση του εύρους ζώνης αλλά την διατήρηση της συχνότητας των φερουσών και β) με την συρρίκνωση του εύρους ζώνης και την αλλαγή της συχνότητας φερουσών [4].

Ένα άλλο σημαντικό θέμα σχετικά με την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι η μείωση του αριθμού των κεραιών. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στο πεδίο του χώρου. Η λειτουργία της βασίζεται στην περίπτωση όπου ο φόρτος κίνησης δεδομένων μιας κυψέλης παραμένει σχετικά μικρός. Η μείωση

των κόμβων ενέργειας μειώνει και την συνολική εξαγόμενη ενέργεια και μειώνει το μέγεθος της κυψέλης. Η προσέγγιση της μείωσης του αριθμού των κεραιών, δύναται να οδηγήσει σε μια υποβάθμιση των προσφερόμενων υπηρεσιών ή και διακοπή των προσφερόμενων υπηρεσιών, καθώς απαιτείται μια αναδιαμόρφωση της κεραιάς.



Εικόνα 6. Κατανάλωση εξωτερικής ενέργειας ενός συστήματος αναφοράς για ένα γενικό RBS [2]

Μια άλλη γνωστή μέθοδος για την επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας είναι το σβήσιμο μιας κυψέλης. Σε μια προσέγγιση σε επίπεδο συστήματος, όταν αυτό δουλεύει σε μια περιοχή που καλύπτεται από πολλαπλές κυψέλες που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης ραδιοσυχνότητας, δεν απαιτείται η τροποποίηση των δομικών στοιχείων του χαμηλότερου επιπέδου των RBS. Αντίστοιχα όταν υπάρχει ανάγκη η κυψέλη μπορεί να ανοίγει. Υπάρχουν δύο τρόποι για το άνοιγμα/κλείσιμο μιας κυψέλης: α) μέσω της απευθείας σηματοδότησης μεταξύ των RBS και β) έναν έλεγχο αποκλειστικό για το επίπεδο λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης. Μια ειδική περίπτωση για την μέθοδο του κλεισίματος μιας κυψέλης είναι η ιεραρχική δομή της κυψέλης (HCS – Hierarchical Cell structure), σύμφωνα με την οποία πάντοτε ανοιχτές μακρο-κυψέλες έχουν αναπτυχθεί για την βασική κάλυψη και μικρο/πτικο – κυψέλες να χρησιμοποιούνται για την δυναμικότητα ισχύος. Οι κυψέλες για την δυναμικότητα ισχύος, λειτουργούν μόνο όταν το φορτίο κυκλοφορίας είναι μεγάλο στις μακρο-κυψέλες. Σημειώνεται εδώ όμως πως ενώ η προσέγγιση απενεργοποίησης των κυψελών προσπαθεί να κρατά μια καλή ισορροπία μεταξύ της απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας, έχει αρκετούς περιορισμούς. Πρώτον, η συχνή εναλλαγή

ανοικτής – κλειστής κυψέλης επηρεάζει τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου θα πρέπει να περιορίζεται σε έναν ημιστατικό τρόπο. Δεύτερον, η απενεργοποίηση των κυψελών μπορεί να μειώσει τον χρόνο ζωής των μπαταριών των εξυπηρετούμενων μονάδων των χρηστών, καθώς θα πρέπει να συνδεθούν με άλλες κυψέλες που βρίσκονται σε μακρύτερη απόσταση. Τρίτον, εάν το σβήσιμο μιας κυψέλης δημιουργήσει ακάλυπτες περιοχές, οι εναπομείναντες ενεργές κυψέλες χρειάζεται να αυξήσουν την ισχύ τους για να καλύψουν την συγκεκριμένη περιοχή. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα μπορεί να εξουδετερώσει την όποια εξοικονόμηση ενέργειας [4].

Μία καινοτόμος προσέγγιση για την ενεργειακή αποδοτικότητα είναι η πολυεπίπεδη δομή. Η πολυεπίπεδη δομή είναι ένας συνδυασμός διαφορετικών συστημάτων και δικτύων για την εξυπηρέτηση ίδιων κινητών συσκευών. Τα επίπεδα επιτρέπεται να χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης ραδιοσυχνότητας. Σε μια δυεπίπεδη δομή, όπου οι μακροκυψέλες σχηματίζουν το ένα επίπεδο και οι φεμτοκυψέλες το άλλο, όσο οι φεμτοκυψέλες αναπτύσσονται αρκετά κοντά στον εξοπλισμό των χρηστών, απαιτείται λιγότερη ενέργεια μετάδοσης για την ίδια ποιότητα υπηρεσιών. Έτσι είναι λογικό για τις συσκευές ενός χρήστη να μεταβαίνουν σε μια φεμτοκυψέλη όταν αυτό είναι εφικτό για την εξοικονόμηση ενέργειας. Οι φεμτοκυψέλες θα αναλυθούν λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο στην συνέχεια.

Επιπλέον μια μακρο-κυψέλη, μπορεί να μειώσει επιπλέον την κατανάλωση ενέργειας με την εκφόρτωση του φόρτου κυκλοφορίας των δεδομένων στις φεμτοκυψέλες, και μετέπειτα με την εφαρμογή τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας στο επίπεδο των μακρο-κυψελών. Τα στοιχεία μιας μακρο-κυψέλης καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα αντίστοιχα μιας φεμτοκυψέλης. Διαφορετικά από τα ιεραρχικά συστήματα, δεν υπάρχει περιορισμός στην ανάπτυξη, αλλά εξαρτάται από τον στενό συντονισμό, μεταξύ των επιπέδων για την επίτευξη συνύπαρξης και εξοικονόμησης ενέργειας. Η πολυεπίπεδη δομή χρησιμοποιεί ευέλικτες αρχιτεκτονικές για την βελτιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας, του φάσματος και άλλων πόρων. Πιο συγκεκριμένα συντονίζει με δυναμικό τρόπο την κυκλοφορία των φορτίων μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων του συστήματος και αναδιαμορφώνει τα διαφορετικά στρώματα για την κάλυψη των απαιτήσεων των υπηρεσιών και την αυτόματη επίτευξη ενεργειακών στόχων. Οι αλγόριθμοι εκφόρτωσης φορτίου διαχείρισης κινητικότητας αποτελούν τα κλειδιά για την επίτευξη της εξοικονόμησης ενέργειας σε μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική [4].

Μια άλλη προσέγγιση αφορά αυτήν της χρήσης υβριδικών τεχνικών. Οι υβριδικές τεχνικές έχουν ως στόχο να μειώσουν τον χρόνο διακοπών και την αναμόρφωση της σηματοδότηση των συστημάτων, καθώς και την αποφυγή του αντικτύπου στα επιδόσεις των τερματικών των χρηστών.

Για ένα σύστημα επικοινωνίας είναι σημαντικό να σημειωθεί πως μια βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, δεν θα πρέπει να υπονομεύει την απαιτούμενη ποιότητα παροχής υπηρεσιών. Απαιτείται δηλαδή, μια ισορροπία μεταξύ της επίδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας. Η πρόκληση για την μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η κατανάλωση ενέργειας να είναι ανεξάρτητη του εξοπλισμού και του φορτίου. Κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη η κατανάλωση πόρων: α) στον χρόνο β) στην συχνότητα και γ) στο πεδίο του χώρου.

1.7.6 Οι μεταγενέστερες εκδόσεις

Το 4G του 3GPP, αναμένεται να φτάσει τους 2 δισεκατομμύρια χρήστες μέχρι το 2018. Η έκδοση του LTE-Advanced όπως έχει προαναφερθεί εισήγαγε μια σειρά από καινοτομίες όπως είναι η συνάθροιση φερουσών, η υποστήριξη πολλαπλών κεραιών και οι δυνατότητες αναμετάδοσης. Το 3GPP μετά την ολοκλήρωση της έκδοσης 10 ξεκίνησε να εργάζεται για την επόμενη έκδοση που περιλαμβάνει λειτουργίες όπως ο συντονισμός πολλαπλών σημείων (CoMP – Coordination Multi-Point) εκπομπής/υποδοχής, η ενισχυμένη υποστήριξη ετερογενών εγκαταστάσεων, καθώς και ενισχυμένη απόδοση για τα τερματικά των χρηστών. Το επόμενο βήμα για το 3GPP ήταν μετάβαση σε μια νέα εποχή τηλεπικοινωνιών με σημαντικές αναβαθμίσεις για την μετέπειτα εξέλιξη των LTE. Οι στόχοι για τις εκδόσεις 12 και έπειτα αφορούν: α) την ενισχυμένη χωρητικότητα β) βελτιωμένη εμπειρία για τους τελικούς χρήστες γ) αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα δ) μειωμένο κόστος ε) καλύτερη υποστήριξη για εφαρμογές διαφορετικού τύπου δεδομένων και ζ) βελτιστοποίηση οπισθόζευξης. Επιπρόσθετα, διαφορετικού τύπου σενάρια απαιτείται να αναπτυχθούν ώστε να καλύψουν τις ανάγκες τις νέας εποχής. Πιο συγκεκριμένα οι κύριες περιοχές ενδιαφέροντος είναι: α) η βελτιωμένη τοπική πρόσβαση β) η βελτίωση λειτουργίας πολλαπλών κεραιών γ) ανεπτυγμένη υποστήριξη επικοινωνιών τύπου μηχανής (MTC – Machine Type Communications) δ) η απευθείας επικοινωνία συσκευής – προς – συσκευή [2].

Για την κάλυψη σε τοπικό επίπεδο, η πυκνότητα του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη συμπληρωματικών κόμβων χαμηλής ισχύος υπό την κάλυψη ενός υπάρχοντος επιπέδου μακρο-κόμβου. Ένα τέτοιο σχήμα θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ετερογενή ανάπτυξη. Οι χαμηλής ισχύος κόμβοι, μπορούν να παρέχουν υψηλής χωρητικότητας κυκλοφορία και βελτιωμένη εμπειρία εξυπηρέτησης σε τοπικό επίπεδο (πχ. σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους), ενώ την ίδια στιγμή το μακρο - επίπεδο μπορεί να προσφέρει μια πλήρη κάλυψη της περιοχής. Έτσι, το επίπεδο των κόμβων χαμηλής κατανάλωσης, μπορεί επίσης να αναφέρεται στην περιοχή τοπικής πρόσβασης, ενός μακρο-επίπεδο στην ευρύτερη περιοχή. Το LTE, ήδη από την απαρχή του ήταν ικανό να παρέχει υψηλή απόδοση για σενάρια ευρύτερης περιοχής, συμπεριλαμβάνοντας και την πρόσβαση τοπικής περιοχής. Ωστόσο, με τους περισσότερους χρήστες να είναι στατικοί ή να μετακινούνται αργά, υπάρχει μια αυξημένη ανάγκη να επικεντρωθεί η έρευνα προς τις υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε ημι-στατικές καταστάσεις [5].

Στο μέλλον, το φάσμα συχνοτήτων αναμένεται είναι διαθέσιμο σε μεγαλύτερες συχνότητες 3,5 GHz και άνω, καθώς οι χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται από υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και άλλου είδους. Όπως αναμένεται στον σχεδιασμό των μεταγενέστερων εκδόσεων οι ζώνες υψηλότερης συχνότητας θα διαχωρίζονται για την τοπική πρόσβαση, ενώ το μακρο-επίπεδο θα λειτουργεί στις χαμηλότερες συχνότητες [2].

Τα υφιστάμενα τερματικά, δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον φόρτο του δικτύου και συνδέονται σε ένα δίκτυο WLAN όταν αυτό είναι διαθέσιμο, ανεξάρτητα με το ποια τεχνολογία είναι προτιμότερη από την σκοπιά του τελικού χρήστη. Το 3GPP στην έκδοση 12, μελετά μηχανισμούς σηματοδότησης για την υποστήριξη του ελέγχου του δικτύου πρόσβασης των ραδιοσυχνοτήτων. Σκοπός είναι η μεγαλύτερη αλληλεπίδραση μεταξύ WLAN και LTE [6].

Στην έκδοση 12 η υποστήριξη πολλαπλών κεραιών αναμένεται να επεκταθεί. Πιο συγκεκριμένα οι ενεργές συστοιχίες κεραιών αναμένεται να υποστηρίζουν τρισδιάστατους σχηματισμούς δέσμης (3D beamforming), μαζικά συστήματα MIMO και βελτιστοποιήσεις στην ανάδραση των καναλιών πληροφορίας [2].

Η ελαχιστοποίηση σημάτων εκπομπής που βρίσκονται συνεχώς ενεργά, είναι ένας από τους πιο σημαντικούς σκοπούς των μεταγενέστερων εκδόσεων με σκοπό την ενεργειακή αποδοτικότητα που περιγράφηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα από τα ζητούμενα, είναι να επιτρέπεται στους σταθμούς βάσης να κλείνουν τα κυκλώματα μετάδοσης όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση. Για να μπορέσουν να επιτευχθούν οι συγκεκριμένες δυνατότητες ένας νέος τύπος φερουσών χρειάζεται η λεπτή ή αδύνατη φέρουσα (lean carrier). Με τον συγκεκριμένο τύπο θα είναι δυνατή ενεργειακή βελτίωση, η μείωση του επιπέδου των παρεμβολών για μικρά και μεσαία φορτία, βελτιώνοντας έτι την ευρύτερη αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Καθώς η εξέλιξη της τεχνολογίας προχωράει προς συνεχώς συνδεδεμένες με το ίντερνετ συσκευές, που αλληλοεπιδρούν και διαμοιράζουν πληροφορίες, μια τεράστια ανάπτυξη αναμένεται να υπάρξει στις συσκευές επικοινωνίας. Οι συσκευές που χρησιμοποιούν την σύνδεση του δικτύου, θα τείνουν να γίνουν διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Ενώ ο αριθμός τους αναμένεται κατά πολύ να ξεπεράσει την ανθρωποκεντρική επικοινωνία των έξυπνων κινητών και των ταμπλετών. Με σκοπό την προετοιμασία για ένα τέτοιο σενάριο η 3GPP επισήμανε την περιοχή των επικοινωνιών τύπου μηχανής (MTC – Machine Type Communication) ως ιδιαίτερως σημαντική για μελλοντικές βελτιώσεις. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό σε ένα τέτοιο σενάριο, η ζωή των μπαταριών θα πρέπει να μειωθεί στο ελάχιστο δυνατόν ιδιαίτερο όσον αφορά την κατανάλωση που προέρχεται από την επικοινωνία τους. Η πρόκληση σε αυτή την νέα εποχή είναι η διαχείριση του μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών σε μια κυψέλη και συνεπώς η αποφυγή υπερφόρτωσης [2].

Η επικοινωνία συσκευής – προς – συσκευή (D2D - Device 2 Device), συχνά και αποκαλούμενη ως επικοινωνίες άμεση λειτουργίας, αναφέρεται σε ασύρματες συσκευές κοντινές μεταξύ τους όπου επικοινωνούν κατά το πρότυπο peer – to peer χωρίς την εμπλοκή μια δομής κυψέλης. Σε ένα τέτοιο σενάριο, τα τερματικά που βρίσκονται σε εγγύτητα, οι πληροφορίες εναλλάσσονται μέσω απευθείας σύνδεση χωρίς την εκπομπή και την λήψη μέσω ενός κυψελοειδούς σταθμού βάσης. Η εγγύτητα των τερματικών και αυτού του είδους η επικοινωνία, μπορεί να πετύχει τους στόχους των υψηλών ρυθμών μετάδοσης, χαμηλές καθυστερήσεις και χαμηλές καταναλώσεις ενέργειας. Η 3GPP μελετά την εφικτότητα των λύσεων που βασίζονται στην D2D επικοινωνία, σε καταστάσεις όπου τμήματα του δικτύου έχουν γίνει μη διαθέσιμα ή δυσλειτουργικά. Έτσι με την αντιμετώπιση αυτού του είδους των προβλημάτων, οι D2D επικοινωνίες για ειδικές ζώνες φάσματος μπορούν να παράσχουν βιωσιμότητα στον συγκεκριμένο τύπο επικοινωνίας [6].

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΦΕΜΤΟΚΥΨΕΛΕΣ

2.1 Ιστορική ανασκόπηση Φεμτοκυψελών

Η ιδέα των μικρών κυψελών υπάρχει για σχεδόν 3 δεκαετίες [7]. Αρχικά, ο όρος «μικρές κυψέλες» χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος της κυψέλης σε μια μητροπολιτική περιοχή, όπου μία μακροκυψέλη (της τάξεως χιλιομέτρων σε διάμετρο) υποδιαιρείται σε έναν αριθμό μικρότερων κυψελών με μειωμένη ισχύ μετάδοσης, που είναι γνωστές ως μητροπολιτικές μακροκυψέλες ή μικροκυψέλες και έχουν ακτίνα αρκετές εκατοντάδες μέτρα. Ταυτόχρονα, κυψελοειδής αναμεταδότες ή «ενισχυτές» είχαν αρχίσει να ερευνώνται ως εναλλακτική λύση για μικρούς σταθμούς βάσης. Αυτές οι συσκευές που επαναμεταδίδουν, προορίζονται να βοηθήσουν στη βελτίωση της ποιότητας του σήματος σε φτωχές περιοχές κάλυψης, μειώνοντας παράλληλα το κόστος με το να μην απαιτούν ενσύρματες οπισθοζεύξεις. Ωστόσο, η επαναχρησιμοποίηση του παραχωρούμενου φάσματος για την οπισθοζεύξη περιόρισε το μέγεθος του δυνατού ρυθμού απόδοσης και ως εκ τούτου, αυτοί οι αναμεταδότες δεν ήταν ούτε χρήσιμοι για η χωρητικότητα του συστήματος, ούτε εύκολο να αναπτυχθούν. Στη δεκαετία του 1990, ένας πρόγονος των πικοκυψελών άρχισε να εμφανίζεται, με τα μεγέθη των κυψελών να κυμαίνονται από δεκάδες έως περίπου εκατό μέτρα. Αυτές οι "παραδοσιακά" μικρές κυψέλες χρησιμοποιήθηκαν για την πλήρωση της χωρητικότητας και της κάλυψης. Δηλαδή όταν η μακρο-διείσδυση ήταν ανεπαρκής για να παρέχει μια πιο αξιόπιστη σύνδεση ή όπου η μακροκυψέλη ήταν υπερφορτωμένη. Αυτοί οι τύποι των μικρών κυψελών ήταν ουσιαστικά μια μικρότερη εκδοχή του μακρο-σταθμού βάσης και απαιτούσαν συγκριτικό σχεδιασμό, διαχείριση και διεπαφές δικτύου. Παρόμοια με τη σημερινή έννοια των φεμτοκυψελών, υπήρξε ένα ελάχιστο γνωστό έργο της τηλεπικοινωνιακής βιομηχανίας στις αρχές του 1990 υπό την ηγεσία των Southwest Bell και Panasonic, οι οποίες ανέπτυξαν μια εσωτερική λύση που έμοιαζε με φεμτοκυψέλη που επαναχρησιμοποιούσε το ίδιο φάσμα με τις μακροκυψέλες και χρησιμοποιούσε ενσύρματη οπισθοζεύξη (T1 ή PSTN) [8]. Ωστόσο, εκείνη την εποχή υπήρχε έλλειψη παρουσίας της IP οπισθοζεύξης και το επίπεδο ολοκλήρωσης δεν είχε ακόμη επιτευχθεί για το κρίσιμο σημείο όπου ένας σταθμός βάσης θα μπορούσε να μικρογραφηθεί. Όπως και οι άλλες τεχνολογίες μικρών κυψελών που προ-αναφέρθηκαν, ήταν από τεχνικής απόψεως ένα βήμα μπροστά, αλλά οικονομικά ανεπιτυχής, διότι το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας ενός μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών αντιστάθμιζε τα όποια πλεονεκτήματα.

2.2 Η γένεση της σύγχρονης φεμτοκυψέλης

Ένας νέος τρόπος σκέψης εισήχθη σχετικά με την εγκατάσταση και την διαμόρφωση των κυψελοειδών συστημάτων, που άρχισαν να αντιμετωπίζουν τα λειτουργικά και οικονομικά θέματα της ανάπτυξης τους. Αυτές οι ιδέες έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε οικιακού τύπου φεμτοκυψέλες, όπου τα ζητήματα κόστους όμως αυξάνονται. Μια φεμτοκυψέλη είναι θεμελιωδώς διαφορετική από τις παραδοσιακές μικρές κυψέλες, που έχουν ανάγκη να είναι πιο αυτόνομες και αυτο-προσαρμοζόμενες. Επιπλέον, η διασύνδεση της οπισθοζεύξης στο κυψελοειδές δίκτυο (το οποίο είναι βασισμένο στην χρήση IP και είναι πιθανόν να υποστηρίζει χαμηλότερους ρυθμούς και

μεγαλύτερη διάρκεια από ότι το πρότυπο X2, που συνδέει μακροκυψέλες και πικοκυψέλες) επιβάλλει τη χρήση των φεμτοκυψελών και άλλων νέων υποδομών δικτύου για την σωστή διακόμιση και εξυπηρέτηση της κίνησης δεδομένων, από και προς νέους σταθμούς βάσης. Ίσως πιο σημαντική από την ανάγκη παροχής καλύτερης κυψελοειδούς κάλυψης για οικιακή χρήση, κατέστη η ανάγκη για μια νέα κυψελοειδής αρχιτεκτονική με χωρητικότητα τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη λόγω της έκρηξης των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Ο πιο βιώσιμος τρόπος για να καλυφθεί αυτό το πρόβλημα είναι να μειωθεί το μέγεθος της κυψέλης, έτσι ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί η χωρική συχνότητα, εκτός εάν οι άφθονες (και ανέξοδες) συχνότητες στα δεκάδες GHz μπορούν να αξιοποιηθούν για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, γεγονός το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο [9].

Παράλληλα με την κλιμάκωση των απαιτήσεων δεδομένων, αρκετές τεχνολογικές και κοινωνικές τάσεις έχουν καταστήσει τις χαμηλού κόστους φεμτοκυψέλες μία βιώσιμη λύση. Αυτές περιλαμβάνουν την μεγάλη διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος των ενσύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων με το διαδίκτυο. Η ανάπτυξη των 4G κυψελοειδών OFDMA προτύπων που βασίζονται στο IP ,παρέχουν μια καλύτερη πλατφόρμα για πολλαπλά στρώματα φεμτοκυψελών από τα αντίστοιχα 3G-CDMA δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν κύκλωμα μεταγωγής (η οπισθόζευξη των φεμτοκυψελών είναι εγγενώς IP). Η ασταμάτητη ενσωμάτωση hardware και software κατέστησε προβλέσιμο το να υπάρξει ένας πλήρως λειτουργικός χαμηλής ισχύος σταθμός βάσης στο εύρος τιμής των 100 δολαρίων. Οι μικρές κυψέλες έχουν γίνει πρόσφατα ένα θέμα έρευνας που παρουσιάζει ενδιαφέρον όπως αποδεικνύεται από μία σημαντική αύξηση σε δημοσιεύσεις σε αυτήν την επιστημονική περιοχή, και από το γεγονός ότι η τεχνολογία των μικρών κυψελών έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές απλές ιδέες διάσπασης κυψελών που προαναφέραμε [7]. Για παράδειγμα, ο αριθμός των δημοσιεύσεων των οποίων το θέμα περιλαμβάνει τους όρους φεμτοκυψέλης ή φεμτοκυψέλες που βρίσκονται στην βάση δεδομένων IEEE έχει αυξηθεί από 3 το 2007 σε 10 το 2008, 51 το 2009, 116 το 2010, και εξακολουθεί να επιταχύνεται. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ξεκινήσει τη χρηματοδότηση της έρευνας των φεμτοκυψελών, για παράδειγμα το project ICT-4- 248523 BeFEMTO, το οποίο επικεντρώνεται στην ανάλυση και ανάπτυξη τεχνολογιών LTE / LTE-A συμβατών με Φεμτοκυψέλες.

Σήμερα, η προηγμένη δυνατότητα αυτο-διαμόρφωσης και αυτο-βελτιστοποίησης επιτρέπει στις μικρές κυψέλες να αναπτυχθούν από το τελικό χρήστη κατά τρόπο plug-and-play, και να είναι σε θέση να ενσωματωθούν οι ίδιοι αυτόματα σε υπάρχοντα μακροκυψελοειδή δίκτυα. Αυτό ήταν ένα σημαντικό βήμα για να καταστεί δυνατή η μεγάλης κλίμακας εγκατάσταση μικρών κυψελών. Ως αποτέλεσμα πλέον παρατηρούμε την επιτυχημένη εμπορική ανάπτυξη των φεμτοκυψελών. Στις ΗΠΑ, η Sprint Nextel ξεκίνησε την διεθνή διάθεση φεμτοκυψελών το 2008, με την Verizon και την AT & T να ακολουθούν το παράδειγμά της το 2009 και το 2010, αντίστοιχα. Στην Ευρώπη, η Vodafone ξεκίνησε την πρώτη ανάπτυξη φεμτοκυψελών το 2009 στο Ηνωμένο Βασίλειο, και στη συνέχεια και σε άλλες χώρες. Στην Ασία, οι Softbank mobile, China Unicom και NTT DoCoMo την υποστήριξη φεμτοκυψελών το 2009. Σύμφωνα με το Φόρουμ Femto, η χρήση των φεμτοκυψελών αυξήθηκε κατά 60% κατά το δεύτερο τρίμηνο του 2011 σε 31, συμπεριλαμβανομένων οκτώ από τα 10 καλύτερων παγκόσμιων γκρουπ χειριστών κινητής τηλεφωνίας.

2.3 Σύγχρονη Έρευνα πάνω στις Φεμτοκυψέλες

Σήμερα, υπάρχει μία αυξανόμενη τάση της έρευνας σχετικά με φεμτοκυψέλες, της οποίας μερικά αξιοσημείωτα πρώτα αποτελέσματα θα αναφερθούν ακολούθως. Τα πρώτα αποτελέσματα της προσομοίωσης των φεμτοκυψελών παρουσιάστηκαν από τον H. Claussen στα Bell Labs (Ηνωμένο Βασίλειο) [10], τα οποία επεκτάθηκαν στην αυτοβελτιστοποίηση και τις στρατηγικές πολλαπλών κεραιών λίγο αργότερα. Από ακαδημαϊκής πλευράς, ένα πρώιμο έργο περιλάμβανε νέα μαθηματικά μοντέλα και ανάλυση και ασχολείται ειδικά με τα προβλήματα παρεμβολής δικτύων ανερχόμενης ζεύξης(uplink) που βασίζονται στην τεχνολογία CDMA με κλειστή πρόσβαση. Αυτό το μοντέλο και η προσέγγιση προσαρμόστηκε και στην κατερχόμενη ζεύξη(downlink) με πολλαπλές κεραιές. Άλλο πρώιμο έργο από το UCLA πρότεινε προσαρμοζόμενο έλεγχο πρόσβασης για τον περιορισμό του προβλήματος παρεμβολών μεταξύ επιπέδων, στο οποίο δόθηκε περαιτέρω ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα σε επόμενο στάδιο. Ακόμα ερευνήθηκε η χωρητικότητα των Φεμτοκυψελών αντίστροφης σύνδεσης (reverse link ή RL), μοντελοποιώντας τις μεταξύ των κυψελών παρεμβολές ως μία τυχαία Γκαουσιανή μεταβλητή [11]. Παρόλα αυτά ένα τέτοιο μοντέλο είναι πιθανόν να μην είναι ακριβές για συστήματα κινητής τηλεφωνίας με φεμτοκυψέλες.

Επιπλέον ερευνήθηκαν υποβοηθούμενες από τον χρήστη προσεγγίσεις για τη βελτιστοποίηση των παρεμβολών και εμφανίστηκαν νέες τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών τόσο κατερχόμενης όσο και ανερχόμενης ζεύξης φεμτοκυψελών που λειτουργούν βάσει του πρωτοκόλλου πρόσβασης πακέτων υψηλής ταχύτητας (HSPA - High Speed Packet Access). Με αυτόν τον τρόπο αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές ανάλυσης για τη βελτίωση της βελτιστοποίησης των συστημάτων φεμτοκυψελών τύπου WCDMA. Αρκετές έρευνες έχουν λάβει υπόψιν επίσης το συντονισμό παρεμβολών στα συστήματα βασισμένα στην τεχνολογία OFDMA [11], συμπεριλαμβανομένων της ομοκαναλικής παρεμβολής, την διαχείριση των παρεμβολών και τις στρατηγικές αποφυγής παρεμβολών. Ακόμα η έρευνα πάνω στην διαχείριση της κινητικότητας και του ελέγχου πρόσβασης για τις φεμτοκυψέλες, έδειξε πως ο έλεγχος πρόσβασης μπορεί να θεωρηθεί ως μια αποτελεσματική μορφή αποφυγής παρεμβολών.

Βασισμένες πάνω σε αυτές τις προηγούμενες συνεισφορές, νέες τεχνολογίες έχουν εμφανιστεί κατά την πάροδο του χρόνου, των οποίων τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά θα συζητηθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

2.4 Συγχρονισμός

Σε ένα ασύρματο σύστημα, ο χρονισμός και συγχρονισμός έχει μεγάλη σημασία. Ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής χρησιμοποιείται για το εσωτερικό ρολόι του συστήματος, που βοηθά στην ακριβή ευθυγράμμιση των πακέτων μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Επίσης βοηθά στη διατήρηση ευθυγράμμισης συγκεκριμένης συχνότητας. Το σφάλμα συγχρονισμού και χρονισμού μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές μεταξύ σύμβολων (Inter Symbol Interference ή ISI) στα OFDM συστήματα [12]. Ο κρυσταλλικός ταλαντωτής είναι το κύριο τμήμα της στοίβας καταμέτρησης FAP (Femtocell Access Point)ως προς το κόστος του. Οι καλής ποιότητας ταλαντωτές είναι ακριβοί, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος των φεμτοκυψελών. Ο συγχρονισμός των φεμτοκυψελών μπορεί επίσης να επιτευχθεί μέσω του οπισθόζευξης Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL). Οι FAP χρησιμοποιούν το ADSL για την σύνδεση με το ρολόι του κεντρικού δικτύου χειριστών και τη χρήση του ρολογιού έτσι ώστε να συγχρονιστούν οι ίδιοι. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξουν απρόβλεπτες καθυστερήσεις στην σύνδεση στο internet, λόγω της μεταβλητότητας της κίνησης δεδομένων και κατά συνέπεια λάθη στον

συγχρονισμό. Το IEEE 1588 προσδιορίζει το Πρωτόκολλο Ακρίβειας Χρόνου (Precision Time Protocol ή PTP) για το συγχρονισμό ανεξάρτητων ρολογιών με διαφορετική ακρίβεια. Ωστόσο, το πρότυπο IEEE 1588 κάνει ακόμα σφάλματα συγχρονισμού μεταξύ του master ρολογιού και του slave ρολογιού. Αυτό είχε σαν συνέπεια να δημιουργηθεί ένας νέος αλγόριθμος βελτιωμένου συγχρονισμού, βασιζόμενος στο IEEE 1588, στον οποίο λαμβάνεται υπόψη η ασυμμετρία και τις ενδεχόμενες μετατοπίσεις στον χρονισμό αφαιρούνται [13].

Μια άλλη προσέγγιση για να λυθεί το πρόβλημα του συγχρονισμού θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένας δέκτη GPS μέσα στην φεμτοκυψέλη. Οι υπηρεσίες GPS θα χρησιμοποιούνται για να παρέχουν το χρονισμό και συγχρονισμό στην φεμτοκυψέλη κάτι το οποίο θα ήταν μια οικονομικώς αποδοτική λύση. Το GPS θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί και για σκοπούς εντοπισμού, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παρέχονται στον χρήστη τοπικά νέα και πληροφορίες. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η θέση της φεμτοκυψέλης θα είναι γνωστή, το οποίο θα είναι πολύ χρήσιμη. Οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης στη διαχείριση παρεμβολών στην περίπτωση των δικτυωμένων φεμτοκυψελών. Ωστόσο, το μειονέκτημα στην χρήση GPS για εσωτερικούς χώρους είναι πως το σήμα GPS επιδέχεται σημαντική εξασθένηση και μπορεί να μην είναι σε θέση να παρέχει ακριβή συγχρονισμό. Οι περισσότερες περιοχές σήμερα λαμβάνουν καλής ποιότητας τηλεοπτικές μεταδόσεις και αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη συγχρονισμού των φεμτοκυψελών. Οι φεμτοκυψέλες μπορούν να έχουν έναν ενσωματωμένο προηγμένο δέκτη τηλεόρασης, ο οποίος να παρέχει ακριβή χρονισμό και συγχρονισμό.

Μία φεμτοκυψέλη μπορεί επίσης να βοηθηθεί από τις γειτονικές της φεμτοκυψέλες προκειμένου να είναι συγχρονισμένη με το υπόλοιπο δίκτυο. Μία τέτοια μέθοδος συγχρονισμού πλαισίου για BS φεμτοκυψελών σε TDD συστήματα χρησιμοποιεί μεταδόσεις από οποιουσδήποτε γειτονικούς BSs για την επίτευξη του συγχρονισμού. Σε άλλη μία παρόμοια προσέγγιση, το σήμα εισόδου των γειτονικών φεμτοκυψελών χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση του frame των φεμτοκυψελών. Ο χρονισμός και ο συγχρονισμός είναι μια πρόκληση κλειδί για τις φεμτοκυψέλες και έξυπνοι αλγόριθμοι χρειάζεται να αναπτυχθούν για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης.

2.5 Διαχείριση παρεμβολών

Αυτή είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις για την ανάπτυξη φεμτοκυψελών με μεγάλη πυκνότητα. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι φορείς προτιμούν την ανάπτυξη συνδυαστικών καναλιών φεμτοκυψελών για να αυξήσουν επαρκώς την συνολική χωρητικότητα, με αποτέλεσμα να προκαλείται το πρόβλημα της παρεμβολής. Όταν πολλές φεμτοκυψέλες και μακροκυψέλες χρησιμοποιούν το ίδιο τμήμα του φάσματος, μπορούν να προκαλέσουν παρεμβάσεις η μία στην άλλη.

Λόγω της ανάπτυξης των μικρών εσωτερικών σταθμών βάσης, η κυψελοειδής αρχιτεκτονική αλλάζει και τώρα αποτελείται από δύο βαθμίδες ή στρώματα. Η πρώτη βαθμίδα ή στρώμα είναι το συμβατικό μακροκυψελοειδές δίκτυο, ενώ η δεύτερη βαθμίδα ή στρώμα είναι το δικτύου φεμτοκυψελών. Η νέα αρχιτεκτονική έτσι ονομάζεται αρχιτεκτονική δικτύου δύο στρώσεων ή δύο επιπέδων. Το νέο επίπεδο, που ονομάζεται επίπεδο φεμτοκυψέλης είναι μια απρογραμματίστη και τυχαία κατανομή από φεμτοκυψέλες. Αυτό έχει έναν αριθμό πλεονεκτημάτων όσον αφορά την χωρητικότητα, την κάλυψη και την ποιότητα, ωστόσο, η νέα αυτή αρχιτεκτονική φέρνει στο φως νέα προβλήματα και σχεδιαστικές προκλήσεις. Ανάμεσα σε αυτές τις προκλήσεις, η

διαχείριση παρεμβολών είναι αυτή με την μεγαλύτερη σημασία. Η φεμτοκυψέλη προτιμάται να αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας τεχνικές συνδυαστικών καναλιών, τα οποία χρησιμοποιούν τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων με τις μακροκυψέλες, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό το γεγονός ως συνέπεια, ανεγείρει σοβαρές προκλήσεις όσον αφορά την διαχείριση των παρεμβολών.

Αυτή η ενότητα εξηγεί τα βασικά είδη των παρεμβολών που αντιμετωπίζονται στην αρχιτεκτονική του δικτύου σε δύο επίπεδων. Θα εξηγηθούν τα προβλήματα παρεμβολών που αντιμετωπίζονται τόσο στο uplink όσο και στο downlink. Η ανάπτυξη των φεμτοκυψελών γίνεται κυρίως στις τεχνολογίες CDMA και OFDMA. Ως εκ τούτου, οι παρεμβολές που αντιμετωπίζουν οι εν λόγω δύο τεχνολογίες είναι πιο λεπτομερείς σε αυτή την ενότητα.

Η αρχιτεκτονική των δύο βαθμίδων μας δίνει τη δυνατότητα να χωρίσουμε την παρεμβολή σε δύο βασικούς τύπους: α) Παρεμβολή εντός του ίδιου επιπέδου και β) Παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών επιπέδων

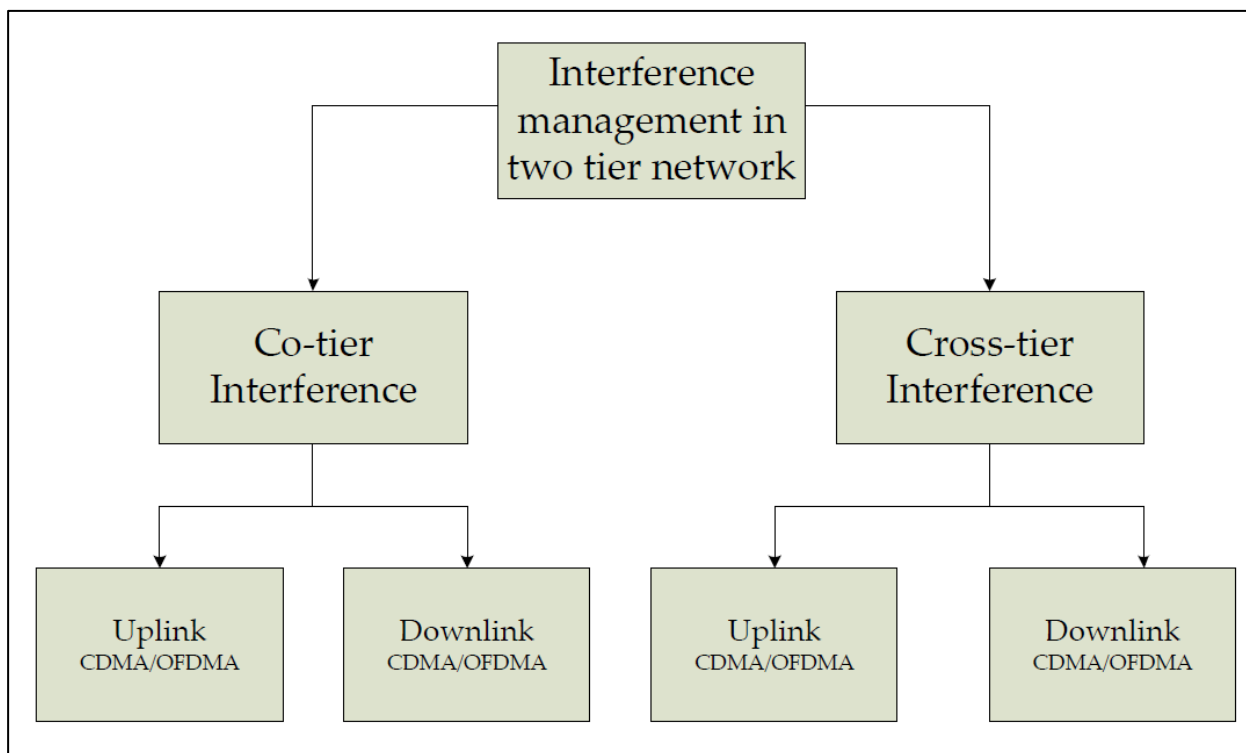
2.5.1 Παρεμβολή εντός του ίδιου επιπέδου

Αυτού του είδους τη παρεμβολή αναφέρεται την παρεμβολή που προκαλείται από τα στοιχεία του δικτύου που ανήκουν στην ίδια βαθμίδα ή στρώμα του δικτύου. Στην περίπτωση των φεμτοκυψελών, είναι η παρεμβολή που προκαλείται σε μία φεμτοκυψέλη από μία άλλη όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Συνήθως οι φεμτοκυψέλες που προκαλούν παρεμβολές η μία στην άλλη έχουν άμεση γειτνίαση, καθώς η μεταξύ τους απόσταση είναι πολύ μικρή. Η ανάπτυξη των φεμτοκυψελών είναι τυχαία με αποτέλεσμα αυτές να μπορούν να αναπτυχθούν πολύ κοντά η μία στην άλλη, σε διαμερίσματα, όπου ο διαχωρισμός τους από έναν τοίχο μπορεί να μην είναι αρκετός για να αποφευχθεί η πρόκληση παρεμβολών. Στην περίπτωση που η ανάπτυξη γίνεται με μεγάλη πυκνότητα, όπου μπορεί να υπάρχει ένας αριθμός γειτονικών παρεμβολών, η συνολική παρεμβολή που παρατηρείται στις φεμτοκυψέλες μπορεί να είναι υψηλότερη από ό, τι οποιοδήποτε από τις επιμέρους παρεμβολές. Για να δημιουργηθεί μια σύνδεση επικοινωνίας, η τιμή SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio) θα πρέπει να είναι πάνω από ένα ορισμένο όριο. Εάν η τιμή SINR σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία φεμτοκυψέλης ήταν χαμηλότερη από ένα συγκεκριμένο όριο λόγω παρεμβολών εντός του ίδιου επιπέδου, θα ήταν αδύνατο να δημιουργηθεί μια σύνδεση επικοινωνίας και, συνεπώς, θα είχαμε δημιουργία μιας νεκρής ζώνης. Το κατώφλι της τιμής του SINR συνήθως ορίζεται από την τεχνολογία ραδιοδιεπαφής που χρησιμοποιείται και μπορεί να είναι διαφορετική για διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service ή QoS) [12].

Οι μέθοδοι πρόσβασης που χρησιμοποιούνται στις φεμτοκυψέλες έχουν τεράστιο αντίκτυπο στην συνολική παρεμβολή. Η παρεμβολή εντός του ίδιου επιπέδου είναι πιο σοβαρή στην μέθοδο της κλειστής πρόσβασης σε σύγκριση με την μέθοδο της ανοιχτής πρόσβασης. Λόγω αυτού του γεγονότος, οι νεκρές ζώνες στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτήν της ανοιχτής πρόσβασης. Οι νεκρές ζώνες εξαρτώνται επίσης από τις QoS απαιτήσεις της κάθε υπηρεσίας. Εάν μία υπηρεσία απαιτεί υψηλότερο SINR, μπορεί να μην είναι δυνατή η παροχή της υπηρεσίας κοντά στο παράθυρα ή τα άκρα μιας φεμτοκυψέλης. Έτσι, η νεκρές ζώνες για τέτοιου είδους υπηρεσίες θα είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με άλλες υπηρεσίες που δεν απαιτούν συγκριτικά υψηλό SINR. Οι παρεμβολές ανερχόμενης ζεύξης εντός του

ίδιου επιπέδου προκαλούνται από τον εξοπλισμό χρήστη (User Equipment ή UE) της φεμτοκυψέλης που λειτουργεί ως πηγή των παρεμβολών σε γειτονικά FAPS. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα CDMA, οι UEs των άμεσων γειτνιαζόντων φεμτοκυψελών είναι η κύρια πηγή των παρεμβολών ανερχόμενης ζεύξης.

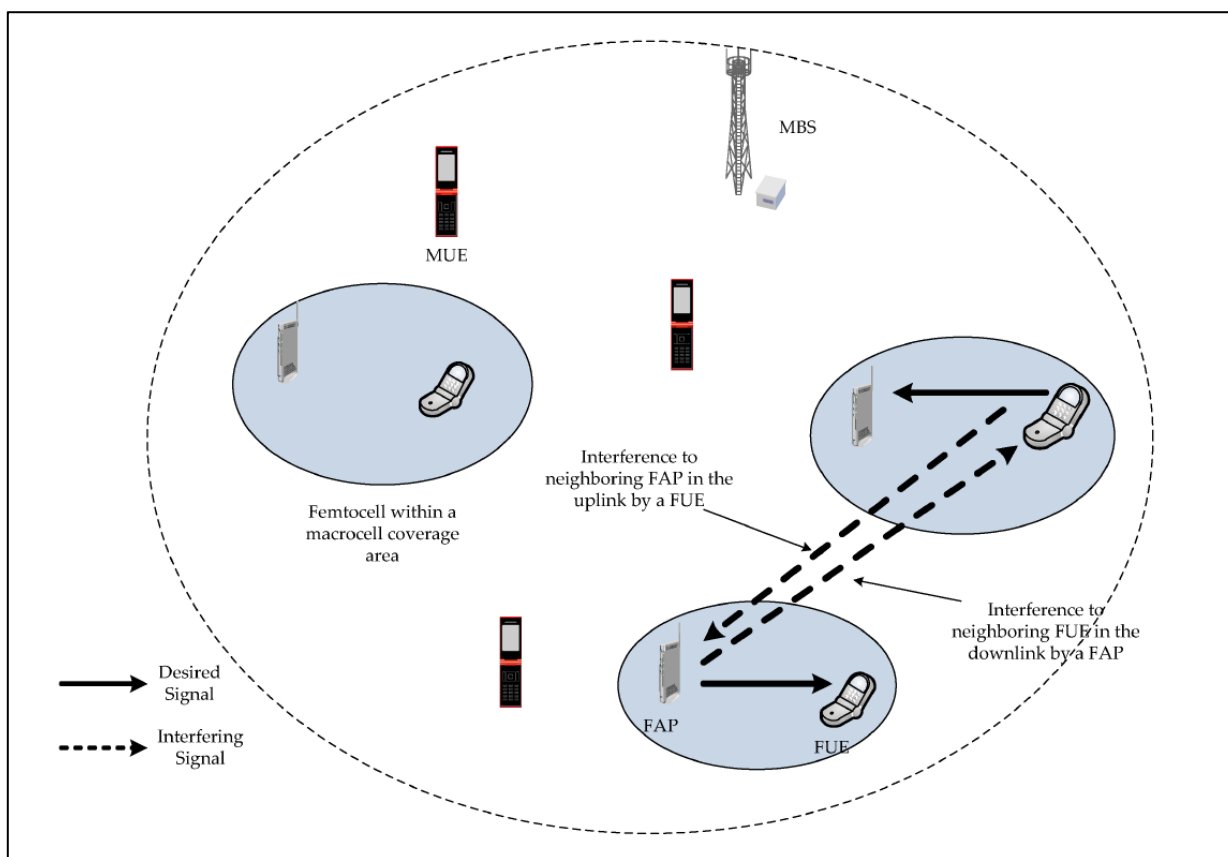
Εάν ένα UE σε μία γειτονική φεμτοκυψέλη εκπέμπει με υψηλή ισχύ, αυτό θα επηρεάσει την φεμτοκυψέλη-θύμα και η απόδοση της θα υποβαθμιστεί. Στην περίπτωση αυτή, ένα FAP πρέπει να επιβάλει όρια ισχύος για τα UEs του, προκειμένου να ελέγξει τη στάθμη θορύβου στα γειτονικά FAPS. Το σύστημα 3G όπως το UMTS και το High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) εφαρμόζουν ευφυείς τεχνικές ελέγχου ισχύος με σκοπό να περιορίσουν την παρεμβολή ανερχόμενης ζεύξης. Σε αυτά τα συστήματα, το FAP είναι σε θέση να ανιχνεύει το ραδιοπεριβάλλον και να συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με οποιαδήποτε κοντινό UEs μιας φεμτοκυψέλης. Στη συνέχεια, θέτει τις ισχύεις εκπομπής των UEs του με βάση τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν. Στην περίπτωση των φεμτοκυψελών OFDMA, το FAP πρέπει να ανιχνεύσει το περιβάλλον για συγκεκριμένα υπό-κανάλια. Εάν ένα UE απαιτούσε ορισμένο αριθμό υπό-καναλιών ανάλογα με τις QoS, το FAP θα πρέπει στη συνέχεια να καταναίμει τα επιμέρους κανάλια, τα οποία βρίσκονται σε χαμηλότερο επίπεδο παρεμβολών.



Εικόνα 7. Τύποι παρεμβολής σε δίκτυο φεμτοκυψελών 2 επιπέδων

Σε σύγκριση με το σύστημα CDMA, το σύστημα OFDMA παρέχει καλύτερες πιθανότητες στην αποφυγή παρεμβολών λόγω του χωρισμού του φάσματος σε μικρά υπο-κανάλια. Οι παρεμβολές κατερχόμενης ζεύξης εντός του ίδιου επιπέδου προκαλούνται από ένα FAP, το οποίο είναι η πηγή παρεμβολών καθώς προκαλεί παρεμβολές στους UEs των γειτονικών φεμτοκυψελών [14]. Εξαιτίας της κοντινής ανάπτυξης των φεμτοκυψελών, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα διαρροών ρεύματος μέσα από τα παράθυρα, τις πόρτες και τα μπαλκόνια. Αυτές οι διαρροές ενέργειας προκαλούν παρεμβολές στα γειτονικά UEs, με αποτέλεσμα σε ένα σύστημα CDMA, να

αυξάνεται το επίπεδο θορύβου και να δημιουργούνται νεκρές ζώνες γύρω από την φεμτοκυψέλη. Για την αποφυγή τέτοιων παρεμβολών γίνεται χρήση δυναμικών τεχνικών ελέγχου στα FAPS. Αυτός ο έλεγχος ισχύος γίνεται όλο και πιο σημαντικός στην περίπτωση των φεμτοκυψελών κλειστής πρόσβασης επειδή ένας UE σε αυτήν την περίπτωση δεν εξυπηρετείται από τα ισχυρότερα FAP, αλλά από εκείνο στο οποίο έχει εγγραφεί. Παρόμοια με την περίπτωση της ανερχόμενης ζεύξης, το FAP στην κατερχόμενη ζεύξη θα πρέπει να είναι σε θέση να αισθάνεται το περιβάλλον του και να προσαρμόζει ανάλογα την ισχύ του. Στην περίπτωση των φεμτοκυψελών OFDMA, αυτό βασίζεται και πάλι στην κατανομή των επιμέρους καναλιών. Εάν διαφορετικά υπό-κανάλια χρησιμοποιούνται από την πηγή των παρεμβολών καθώς και την φεμτοκυψέλη θύμα, θα πρέπει να γίνει αποφυγή παρεμβολών.



Εικόνα 8. Σενάριο παρεμβολής εντός του ίδιου επιπέδου δύο γειτονικών φεμτοκυψελών

2.5.2 Παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών επιπέδων

Αυτός ο τύπος παρεμβολής προκαλείται από στοιχεία δικτύου που ανήκουν σε μία διαφορετική βαθμίδα ή στρώμα του δικτύου. Για παράδειγμα, ένα FAP μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στην κατερχόμενη ζεύξη ενός κοντινού UE μιας μακροκυψέλης όπως μπορούμε να δούμε στην **εικόνα 3**. Επίσης ο UE μιας μακροκυψέλης μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στην ανερχόμενη ζεύξη ενός κοντινού FAP. Έτσι οι φεμτοκυψέλες θα μπορούσαν να προκαλέσουν πολλές παρεμβολές στους γείτονες που χρησιμοποιούν υπηρεσίες μακροκυψελών για εσωτερικούς σκοπούς.

Αυτό το πρόβλημα γίνεται περισσότερο σοβαρό στην περίπτωση της κλειστής πρόσβασης. Οι UEs των μακροκυψελών θα λαμβάνουν ισχυρά σήματα από έναν κοντινό γείτονα, στον οποίο δεν επιτρέπεται η πρόσβαση και έτσι θα υπάρξουν τεράστιες νεκρές ζώνες γύρω από την φεμτοκυψέλη. Για να αντιμετωπιστεί η παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών επιπέδων, επίσης προτείνεται η διαίρεση του φάσματος. Ωστόσο, αυτό είναι μια λιγότερο αποτελεσματική τεχνική, καθώς το φάσμα κοστίζει και δεν είναι επαρκές σε ποσότητα. Στην περίπτωση που είχαμε ξεχωριστό τμήμα του φάσματος για την βαθμίδα των φεμτοκυψελών, δεν θα υπήρχε καμία παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών επιπέδων. Ωστόσο, εάν η ζώνες είναι γειτονικές στο πεδίο της συχνότητας, μπορεί να υπάρξει παρεμβολή γειτονικών καναλιών. Ως εκ τούτου, απαιτείται προσπάθεια για να μειωθεί και αυτού του είδους παρεμβολή. Η παρεμβολή ανερχόμενης ζεύξης μεταξύ διαφορετικών επιπέδων μπορεί να υπάρξει και όταν ένας UE μιας φεμτοκυψέλης δρα ως πηγή παρεμβολής στον σταθμό βάσης (base station ή BS) της μακροκυψέλης.

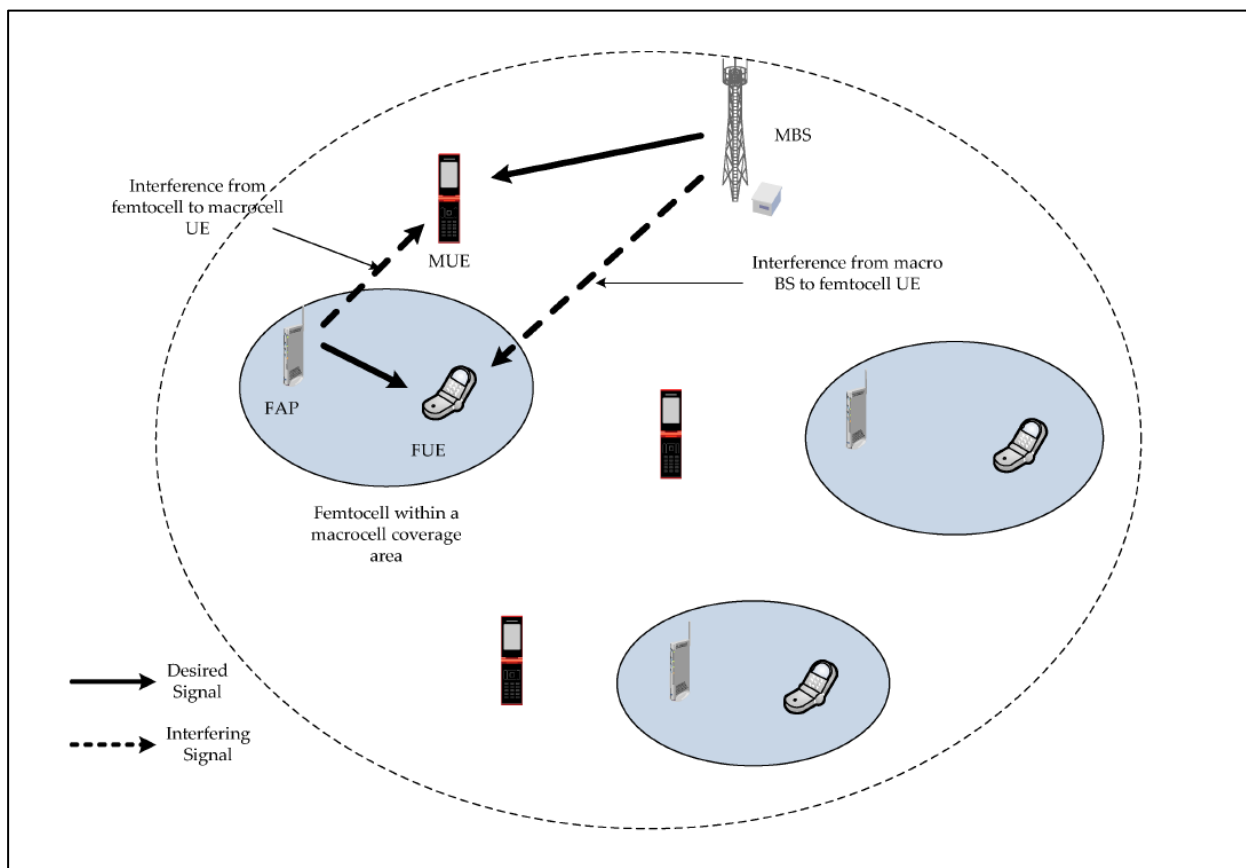
Στην περίπτωση ενός συστήματος CDMA, ο έλεγχος ισχύος χρησιμοποιείται προκειμένου να αποτρέψει τον UE της φεμτοκυψέλης από το να προκαλέσει παρεμβολές στον BS της μακροκυψέλης. Το FAP θα πρέπει να αισθάνεται το περιβάλλον και να μην απαιτεί περισσότερη ισχύ από τους UEs του. Οι UEs φεμτοκυψελών είναι συνήθως κοντά στο FAP και δεν μεταδίδουν σε αρκετά υψηλή ισχύ για να προκαλέσουν παρεμβολές στους BS μακροκυψελών. Στη περίπτωση της ανοικτής πρόσβασης, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν σε οποιοδήποτε επίπεδο, ανάλογα με την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος εκείνης της στιγμής. Αυτό καταστεί δυνατή τη χρήση της ελάχιστης δυνατής ενέργειας από της φεμτοκυψέλης και τις μακροκυψέλης και ως εκ τούτου οι παρεμβολές μειώνονται.

Μια άλλη περίπτωση παρεμβολής ανερχόμενης ζεύξης μεταξύ διαφορετικών επιπέδων είναι όταν ένας UE μακροκυψέλης μεταδίδει σε υψηλή ισχύ κοντά σε μία φεμτοκυψέλη, προκαλώντας παρεμβολές στο FAP [12]. Οι φεμτοκυψέλης υπό κανονικές συνθήκες είναι απομονωμένες, λόγω της διαπερατότητας του τοίχου, αλλά ακόμα και έτσι σε ορισμένες περιπτώσεις ο UE μακροκυψέλης μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στην φεμτοκυψέλη.

Στην περίπτωση των συστημάτων OFDMA, μπορεί να υπάρξουν οι ίδιοι δύο τύποι παρεμβολής ανερχόμενης ζεύξης. Ο πρώτος τύπος παρεμβολής όπως ορίζεται παραπάνω για τα συστήματα CDMA μπορεί επίσης να προκύψει και σε συστήματα OFDMA αν η φεμτοκυψέλη βρίσκεται κοντά στον BS της μακροκυψέλης. Αν ένας UE φεμτοκυψέλης μεταδίδει με υψηλή ισχύ σε ορισμένα υπό- κανάλια κοντά σε έναν BS μακροκυψέλης, αυτά τα υπό-κανάλια αχρηστεύονται για τον BS της μακροκυψέλης και ως εκ τούτου, η συνολική απόδοση μειώνεται. Στην περίπτωση αυτή, η ισχύς του UE της φεμτοκυψέλης θα πρέπει να περιοριστεί και θα πρέπει να υπάρχει ένα ανώτατο όριο ισχύος μετάδοσης. Στη δεύτερη περίπτωση παρεμβολών, όπου ένας UE μακροκυψέλης μεταδίδει με υψηλή ισχύ, λόγω του ότι είναι μακριά από τον σταθμό βάσης της μακροκυψέλης, η φεμτοκυψέλη θα πρέπει να δεσμεύσει διαφορετικά υπό-κανάλια για την αποφυγή παρεμβολών. Η παρεμβολή ανερχόμενης ζεύξης μεταξύ διαφορετικών επιπέδων μπορεί ακόμα να προκληθεί από ένα FAP σε κοντινή απόσταση με έναν UE μακροκυψέλης. Στην περίπτωση της λειτουργίας κλειστής πρόσβασης, η περιοχή γύρω από την φεμτοκυψέλη γίνεται νεκρή ζώνη για τον UE της μακροκυψέλης. Μπορεί να υπάρξει διαρροή ισχύος μέσω των παραθύρων και πορτών από ένα εσωτερικό FAP σε έναν κοντινό UE μακροκυψέλης.

Στην περίπτωση του συστήματος CDMA που γίνεται χρήση συνδυαστικών καναλιών υπάρχει ανάγκη για τον δυναμικό έλεγχο ισχύος, λόγω των μεταβαλλόμενων συνθηκών. Ο δυναμικός έλεγχος ισχύος μπορεί να εφοδιάζει τα FAPS με μια ποικιλία από επιλογές και ως εκ τούτου να μειώνονται οι παρεμβολές. Αν η φεμτοκυψέλη βρίσκεται κοντά στον BS της μακροκυψέλης, το μέγεθος της φεμτοκυψέλης θα συρρικνωθεί εξαιτίας της παρεμβολής από τον BS. Σε αυτήν την περίπτωση, οι UEs των φεμτοκυψελών μπορούν να έχουν κάλυψη μόνο όταν βρίσκονται πολύ κοντά στο FAP.

Στην περίπτωση, όπου ένας UE φεμτοκυψέλης είναι κοντά στο παράθυρο ενός σπιτιού που έχει FAP, είναι πιθανό ότι ο UE κοντά στο παράθυρο θα συνδεθεί με τον BS της μακροκυψέλης αντί του εσωτερικού FAP. Το φόρουμ Femto διερευνηθεί ένα τέτοιο σενάριο και προκύπτει ότι η ταχύτητα των 14,4 Mbps μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση HSDPA φεμτοκυψελών, όταν ο UE της φεμτοκυψέλης βρίσκεται 250 μέτρα από μία μακροκυψέλη και 1000 μέτρα από μία μακροκυψέλη. Στην περίπτωση του συστήματος OFDMA φεμτοκυψελών, η διαχείριση παρεμβολής κατερχόμενης ζεύξης ως επί το πλείστον εξαρτάται από την κατανομή των υπό-καναλιών. Το FAP δεν θα προκαλέσει καμία παρεμβολή σε έναν UE μακροκυψέλης, αν αυτός χρησιμοποιεί ένα διαφορετικό σύνολο υπό-καναλιών



Εικόνα 9. Σενάριο παρεμβολής μεταξύ επιπέδων ανάμεσα σε μια φεμτοκυψέλη και μία μακροκυψέλη

2.6 Διαχείριση κινητικότητας

Η υποστήριξη φεμτοκυψελών απαιτεί την ανάπτυξη περισσότερο περίπλοκων διαδικασιών διαχείρισης κινητικότητας (Movement Management ή MM) για να αντιμετωπίσει: α) την πυκνή διάταξη του δικτύου β) τις μικρές ακτίνες των κυψελών γ) τον έλεγχο πρόσβασης απασχόλησης του συστήματος δ) την απρογραμμάτιστη ανάπτυξη του συστήματος

Η πυκνή διάταξη του δικτύου και η μικρή ακτίνα των κυψελών ενισχύουν τις αρνητικές επιπτώσεις της κινητικότητας των χρηστών, διευρύνουν τον αριθμό των υποψηφίων κυψελών κατά τη διάρκεια της φάσης μεταπομπής (HandOver ή HO) λήψης αποφάσεων και αυξάνουν τις πιθανότητες μεταπομπής ακόμη και για χρήστες χαμηλής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του ελέγχου πρόσβασης μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση του SINR για τα επίπεδα των μακροκυψελών και φεμτοκυψελών κάτω από συγκεκριμένα σενάρια παρεμβολών, για παράδειγμα όταν ένας κοντινός ενεργός χρήστης δεν είναι μέλος μιας κλειστής πρόσβασης φεμτοκυψέλης. Εκτός από την αύξηση των παρεμβολών στις θέσεις των κυψελών, η απρογραμμάτιστη ανάπτυξη φεμτοκυψελών κάνει και τη διαδικασία διαχείρισης κινητικότητας πιο πολύπλοκη από πολλές απόψεις, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι η κυψέλη-εξυπηρετητής δεν είναι σε θέση να παρέχει μία πλήρη λίστα των γειτονικών κυψελών στους κινητούς UEs.

Η διαχείριση κινητικότητας επικεντρώνεται στις φάσεις: α) Αναγνώρισης κυψέλης β) Ελέγχου πρόσβασης γ) Αναζήτησης κυψέλης δ) Επιλογή/Επανεπιλογή κυψέλης ε) Απόφασης μεταπομπής (HO) στ) Εκτέλεσης μεταπομπής (HO)

2.6.1 Αναγνώριση κυψέλης

Η διαδικασία αναγνώρισης κυψέλης περιλαμβάνει τους μηχανισμούς και τα αναγνωριστικά που χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό των φεμτοκυψελών από τις μακροκυψέλες ή / και από άλλες φεμτοκυψέλες [15]. Παρά το γεγονός ότι η πρόσθετη επιβάρυνση που απαιτείται για την μετάδοση των μοναδικών αναγνωριστικών της εκάστοτε κυψέλης μέσω του δικτύου φαίνεται αμελητέα, σε μακροπρόθεσμο επίπεδο μπορεί να είναι αρκετά υψηλό δεδομένου ότι: α) οι πληροφορίες αναγνώρισης των κυψελών θα πρέπει να εκπέμπονται σε συχνή και περιοδική βάση για την εξασφάλιση της συστηματικής λήψης από τους κόμβους του δικτύου και β) τα υφιστάμενα πρότυπα διαχέουν αυτή η πληροφορία με πολύπλοκο τρόπο στα κανάλια εκπομπής για να μειωθεί η επιβάρυνση των πόρων που απαιτούνται για την εκπομπή.

Για το σκοπό αυτό, τα κυψελοειδή συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως έναν περιορισμένο αριθμό από Physical Cell Identities (PCI) στο δίκτυο για να καταστεί δυνατή η ταυτοποίηση των κυψελών σε τοπική κλίμακα. Λαμβάνοντας υπόψη το περιορισμένο εύρος τιμών των PCI και τον μεγάλο αριθμό των μικρών κυψελών εντός της κάλυψης της μακροκυψέλης, αναμένεται έντονη επαναχρησιμοποίηση των PCI υπό την παρουσία φεμτοκυψελών. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση των PCIs καθιστά ανέφικτο για τις οντότητες του δικτύου να προσδιορίσουν επακριβώς τις κυψέλες-στόχους βασιζόμενες μόνο στις μετρήσεις που παρέχονται από τα κινητά τερματικά, γιατί η λίστα μέτρησης του σήματος μπορεί να περιλαμβάνει μετρήσεις για διαφορετικές κυψέλες με το ίδιο PCI. Επιπλέον, η απρογραμμάτιστη ανάπτυξη των φεμτοκυψελών εμποδίζει την ανάθεση τιμών PCI με έναν ικανοποιητικό τρόπο, και αναδεικνύει την ανάγκη για

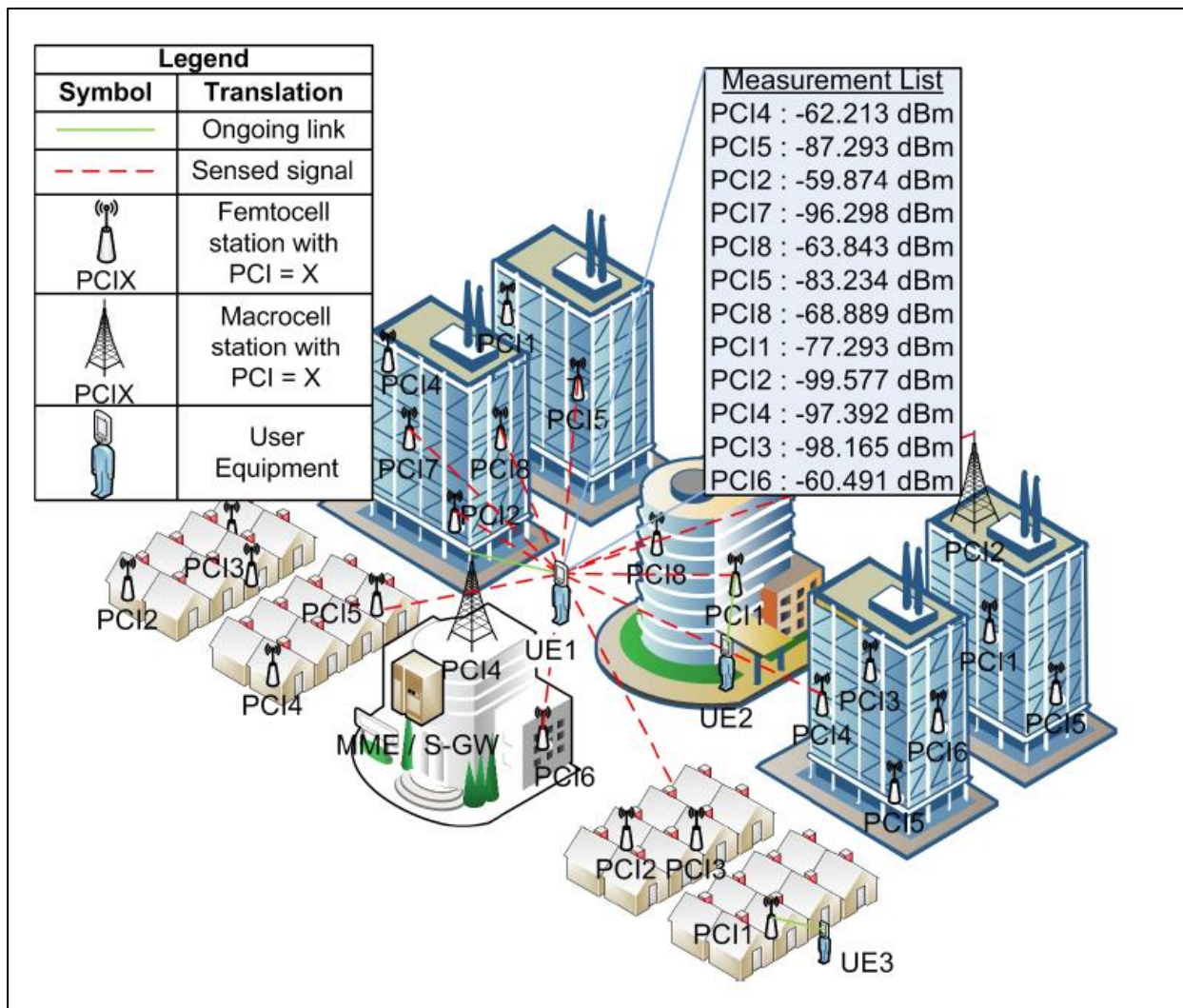
κατανεμημένους αλγορίθμους επιλογής PCI στις φεμτοκυψέλες. Ένας έξυπνα-ενισχυμένος αλγόριθμος επιλογής PCI μπορεί να βελτιώσει την κατανομή των PCI σε τοπική κλίμακα. Παρόλα αυτά, το περιορισμένο εύρος τιμών του PCI μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα πάλι πρόβλημα σύγχυσης των PCI.

Υποθέτοντας ένα εύρος PCI από 8 τιμές, δηλαδή, να PCI1...PCI8, το Σχ. 3 απεικονίζει ένα στιγμιότυπο του προβλήματος σύγχυσης των PCI υπό την παρουσία φεμτοκυψελών. Ο UE1 επιστρέφει στην μακροκυψέλη από την οποία εξυπηρετείται με αναγνωριστικό PCI4, την λίστα των μετρήσεων, η οποία περιέχει περισσότερες από μία κυψέλες με το ίδιο PCI, όπως για παράδειγμα υπάρχουν μια μακροκυψέλη και μία φεμτοκυψέλη με PCI2. Κατά συνέπεια, η κυψέλη που εξυπηρετεί δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει ποια από τις κυψέλες με PCI2 θα πρέπει να μεταπεμφθεί τον UE1.

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε η φάση της αναγνώριση κυψέλης περιλαμβάνει δύο βασικές προκλήσεις: α) πώς να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις από την επαναχρησιμοποίηση των PCI χρησιμοποιώντας κατανεμημένους αλγόριθμους επιλογής PCI και β) ποιες διαδικασίες μπορούν να εγγυηθούν την μοναδική ταυτοποίηση των κοντινών κυψελών από πλευράς σχεδιασμού συστήματος.

Αναφερόμενοι στην πρώτη πρόκληση, η σύγχρονη βιβλιογραφία περιλαμβάνει διάφορους αλγορίθμους για την επιλογή PCI. Παρόλα αυτά, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να υποστηριχθεί ένας έξυπνα ενισχυμένος και κατανεμημένος αλγόριθμος επιλογής PCI φεμτοκυψελών. Για παράδειγμα θα μπορούσε να γίνει η χρήση γνωστικών και συνδυαστικών προσεγγίσεων. Αναφερόμενοι στην δεύτερη πρόκληση, μερικές λύσεις του προβλήματος περιλαμβάνουν τη χρήση: α) Ιεραρχικής δόμησης των κυψελών β) Χρήσης αναγνωριστικών ταυτότητας (ID) χωριστού δικτύου Public Land Mobile Network (PLMN) γ) Κράτησης του φορέα δ) Κράτησης των PCI ε) Προσεγγίσεις ανώτερου επιπέδου.

Η Ιεραρχική δόμηση των κυψελών επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να ταξινομήσει τις κυψέλες σε διαφορετικά στρώματα και να τους αναθέσει διαφορετικές προτεραιότητες. Η ξεχωριστή προσέγγιση PLMN ID χρησιμοποιεί μια διαφορετική ταυτότητα PLMN για κάθε επίπεδο των κυψελών, για παράδειγμα, ένα για το επίπεδο μακροκυψελών, ένα για αυτό των φεμτοκυψελών, και ούτω καθεξής. Η προσεγγίσεις της κράτησης φορέα και PCI διακρατούν ένα απόθεμα από ένα συγκεκριμένο σύνολο συχνότητων ή PCI του φορέα για κάθε επίπεδο, τα οποία μεταδίδονται στους κόμβους του δικτύου μέσω μηνύματα εκπομπής. Τέλος, οι προσεγγίσεις ανώτερου επιπέδου περιλαμβάνουν την απόκτηση των ολικών μοναδικών αναγνωριστικών κυψέλης (Cell Global Identifiers ή CGI), τα οποία ωστόσο σηματοδοτούνται συνήθως σε λιγότερο συχνή βάση.



Εικόνα 10. Παράδειγμα ανάπτυξης φεμοκυψελών

Ας εστιάσουμε τώρα στην διαδικασία αναγνώριση κυψέλης στο σύστημα LTE-A. Το σύστημα LTE-A χρησιμοποιεί ένα σύνολο από 504 PCI τιμές, οι οποίες αποδίδονται στους ενισχυμένους κόμβους B (Enhanced Node B ή ENBs) με χρήση είτε κεντρικών είτε κατανεμημένων αλγορίθμων ανάθεσης. Πιο αναλυτικά, το σύστημα LTE-A προσφέρει ένα πλαίσιο επιλογής PCI που βασίζεται στην αυτο-διαμόρφωση. Η λειτουργία διοίκησης και συντήρησης (Operation Administration, and Maintenance ή OAM) του συστήματος αποστέλλει στον (H)eNB μια συγκεκριμένη τιμή PCI στην κεντρική προσέγγιση, ή μια λίστα τιμών PCI για να επιλέξει στην κατανεμημένη προσέγγιση. Στην κατανεμημένη προσέγγιση, ο (H)eNB μπορεί να αποφύγει την χρήση PCIs τα οποία έχουν αναφερθεί από τους UEs, ή από τους γειτονικούς (H) eNB μέσω της διεπαφής X2, ή που αποκτώνται μέσω άλλων μεθόδων βασιζόμενες στον τρόπο ανάπτυξης του συστήματος. Το LTE-A πρότυπο αν και παρέχει μερικές προτάσεις για το πώς η επιλογή PCI μπορεί να πραγματοποιηθεί, η υλοποίηση κατανεμημένων αλγορίθμων επιλογής PCI είναι ένα ανοιχτό ζήτημα.

Επιστρέφοντας στο πρόβλημα σύγχυσης των PCI, το LTE-A το αποκαθιστά μέσω της διαμόρφωσης των UEs για να αποκτήσει ένα μοναδικό E-UTRAN παγκόσμιο αναγνωριστικό κυψέλης (E-UTRAN Cell Global Identifier ή ECGI) από τις κυψέλες-στόχους. Ωστόσο, τα ECGIs αποκτούνται μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως όταν ζητηθεί από την κυψέλη-εξυπηρετητή, λόγω της αυξημένης καθυστέρησης που

απαιτείται (έως 80 ms). Για την περαιτέρω βελτίωση της διαδικασίας αναγνώριση κυψέλης, το σύστημα LTE-A μπορεί να κάνει κράτηση ενός εύρους τιμών PCI ή συχνοτήτων φερουσών αποκλειστικά για χρήση από τις φεμτοκυψέλες και να μεταδώσει τις πληροφορίες αυτές μέσω μηνυμάτων μπλοκ πληροφοριών συστήματος (System Information Block ή SIB). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το διακρατούμενο φάσμα PCI ισχύει μόνο για τη συχνότητα του PLMN όπου ο UE έλαβε τις πληροφορίες αυτές και ισχύει για το μέγιστο χρονικό διάστημα των 24ων ωρών μέσα σε ολόκληρο το PLMN.

2.6.2 Έλεγχος πρόσβασης

Ο έλεγχος πρόσβασης είναι καίριας σημασίας στην ανάπτυξη φεμτοκυψελών, δεδομένου ότι οι αυτές χρησιμοποιούν την ευρυζωνική οπισθοζευξη (backhaul) και υποστηρίζουν σχετικά λίγους χρήστες. Η τρέχουσα βιβλιογραφία [16]προσδιορίζει τρεις μεθόδους πρόσβασης φεμτοκυψελών: α) την κλειστή β) την ανοιχτή και γ) την υβριδική

Στην μέθοδο κλειστής πρόσβασης μόνο μια περιορισμένη ομάδα χρηστών επιτρέπεται να εγκατασταθεί και να αξιοποιήσει τον σταθμό της φεμτοκυψέλης. Έτσι με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αποκλειστική χρησιμοποίηση των πόρων μόνο για εγγεγραμμένους χρήστες. Κάτω από ορισμένες περιπτώσεις παρεμβολών ωστόσο, η μη – ευκαμψία αυτής της μεθόδου μπορεί να υποβαθμίσει σοβαρά την επίδοση του SINR τόσο για τους εγγεγραμμένους όσο και για τους μη εγγεγραμμένους χρήστες, λόγω της παρεμβολής μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων.

Η αρνητική αυτή επίδραση μετριάζεται στην λειτουργία ανοικτής πρόσβασης, όπου όλοι οι χρήστες επιτρέπεται να χρησιμοποιούν τον σταθμό της φεμτοκυψέλης. Παρ'όλα αυτά, οι μικρές ακτίνες των κυψελών σε συνδυασμό με την ελευθερία αυτής της μεθόδου υποδεικνύουν τη χρήση μιας πιο εξελιγμένης διαχείρισης κινητικότητας, για την πρόληψη του αυξημένου ποσοστού εμφάνισης μεταπομπών και της διευρυμένης σηματοδότησης. Δεδομένου ότι οι φεμτοκυψέλες υποστηρίζουν σχετικά λίγους χρήστες, η διατήρηση ενός αποδεκτού ποσοστού αποτυχίας μεταπομπών, παρουσιάζονται δυσκολίες στην λειτουργία ανοικτής πρόσβασης.

Η υβριδική πρόσβαση ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα τόσο της κλειστής όσο και της ανοικτής λειτουργίας πρόσβασης. Παρόλο που επιτρέπει την υποστήριξη σε μη εγγεγραμμένους χρήστες, παρέχει ταυτόχρονα πρόσβαση κατά προτεραιότητα στους εγγεγραμμένους χρήστες. Ωστόσο, απαιτούνται προηγμένοι αλγόριθμοι αποφάσεων μεταπομπής, ελέγχου αποδοχής χρηστών και προγραμματισμού για αυτήν την προσέγγιση. Καθώς με αυτόν τον τρόπο ίσως να μπορέσει να υποστηριχθεί πιο αποτελεσματικά η πρόσβαση των μη εγγεγραμμένων χρηστών, ενώ ταυτόχρονα να διατηρηθεί ο δείκτης «ποιότητα εμπειρίας» (Quality of Experience ή QoE) για αυτούς. Από την πλευρά της διαχείρισης κινητικότητας, ο έλεγχος πρόσβασης περιπλέκει την υποστήριξη των φεμτοκυψελών σε 3 πτυχές. Πρώτον, οι UEs θα πρέπει να γνωρίζουν σε ποιες φεμτοκυψέλες μπορούν να έχουν πρόσβαση και δεύτερον οι σταθμοί των φεμτοκυψελών θα πρέπει να επιτρέπουν σε χρήστες με κοντινή απόσταση να προσδιορίζουν τον τύπο πρόσβασης που υποστηρίζουν. Και τα δύο αυτά βήματα απαιτούνται: α) για την αποφυγή της εκκίνησης μιας μεταπομπής σε μη – προσβάσιμες φεμτοκυψέλες και β) για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και της καθυστέρησης που απαιτείται για την ταυτοποίησή τους. Τρίτον, μια αξιόπιστη οντότητα του δικτύου θα πρέπει να επικυρώνει την κατάσταση μέλους των κινητών τερματικών

πριν αποκτήσουν πρόσβαση στους σταθμούς των φεμτοκυψελών. Αυτή η οντότητα θα πρέπει να βρίσκεται στο δίκτυο-πρόσβασης ή στο δίκτυο - πυρήνα, ενώ η διαδικασία ελέγχου πρόσβασης πρέπει να πραγματοποιηθεί με έναν ασφαλή και αναστρέψιμο τρόπο.

Στο πλαίσιο των συστημάτων LTE-A, ο UE θεωρείται μέρος μίας κλειστής ομάδας χρηστών(CSG - Closed Subscriber Group) είτε για την περίπτωση που του επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει ένα συγκεκριμένο σύνολο φεμτοκυψελών κλειστής πρόσβασης (κυψέλες CSG), είτε αν λάβει προτεραιότητα εξυπηρέτησης σε ένα συγκεκριμένο σύνολο φεμτοκυψελών υβριδικής πρόσβασης (υβριδικές κυψέλες). Για να καταστεί δυνατή η ταυτοποίηση του τύπου πρόσβασης και του CSG που υποστηρίζουν, οι HeNBs μεταδίδουν έναν δείκτη CSG και την ταυτότητα CSG (CSG ID). Ο δείκτης CSG έχει τεθεί σε «αληθής» για κυψέλες CSG και «ψευδής» για υβριδικά κύτταρα. Από την άλλη μεριά, οι πληροφορίες CSG ID μεταδίδονται από όλες τις κυψέλες E-UTRAN σε ένα καθορισμένο χρονοδιάγραμμα εντός του SIB τύπου 1 [17]. Αν και οι υβριδικές κυψέλες είναι προσβάσιμες ως κυψέλες CSG στους εγγεγραμμένους UEs, εμφανίζονται ως φυσιολογικές κυψέλες σε όλους τους υπόλοιπους UEs. Εκτός αυτού, οι UEs έχουν επίγνωση των κυψελών CSG στις οποίες μπορούν να έχουν πρόσβαση με τη διατήρηση μίας λίστας CSG. Η οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (MME - Mobility Management Entity) είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση του ελέγχου πρόσβασης στους UE πριν από την πρόσβαση στις κυψέλες CSG, με βάση τα αποθηκευμένα δεδομένα εγγραφής CSG για τα UEs. Ως αποτέλεσμα, η σηματοδότηση εκτέλεσης μεταπομπών διέρχεται πάντα από την MME και την διασύνδεση S1, εκτός εάν λαμβάνει μέρος μία εκτέλεση μεταπομπής βασιζόμενη σε X2.

2.6.3 Αναζήτηση κυψέλης

Η αναζήτηση κυψέλης είναι η διαδικασία σύμφωνα με την οποία ο UE αποκτά συγχρονισμό χρόνου και συχνότητας με μία κοντινή κυψέλη, προκειμένου να την αναγνωρίσει και να μετρήσει την ποιότητα του σήματος της. Η φάση μέτρησης αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της κινητικότητας μέσα στις κυψέλες και εκτελείται σε πιλοτικά σήματα ή σήματα αναφοράς που μεταδίδονται από τις κυψέλες σε ένα προκαθορισμένο χρόνο με συγκεκριμένη συχνότητα. Η αναζήτηση κυψέλης συνήθως προκαλείται από γεγονότα που σχετίζονται με την ποιότητα του σήματος από την κυψέλη που εξυπηρετεί ή τις γειτονικές κυψέλες. Για παράδειγμα, όταν η ισχύς του σήματος της κυψέλης που εξυπηρετεί πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι, ενώ εκτελείται κατά τη διάρκεια περιόδων αδράνειας κατερχόμενης ζεύξης (DL - downlink) ή ανερχόμενης ζεύξης (UL - uplink), που παρέχονται είτε από την ασυνεχή υποδοχή (DRX - Discontinuous Reception) ή από τον προγραμματισμό πακέτων (δηλαδή, μετρήσεων υποβοηθούμενων από τα χάσματα). Εάν ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αναζήτησης ενισχύει την ακρίβεια της μέτρησης και αυξάνει τον αριθμό των αναγνωρισμένων κυψελών, τότε διαταράσσει την συνέχεια της παροχής υπηρεσιών και αυξάνει την ενέργεια κατανάλωσης στους UEs.

Σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας φεμτοκυψελών, η αναζήτηση κυψέλης είναι απαιτητική από πολλές πλευρές. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος από τις κοντινές φεμτοκυψέλες, μπορεί να υπόκεινται σε γρήγορες μεταβολές οφειλόμενες στην χαμηλή ισχύ μετάδοσης. Για το σκοπό αυτό, η διαδικασία αναζήτησης κυψέλης πρέπει να ενεργοποιηθεί, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συχνές αλλά περιττές μετρήσεις. Από την

άλλη πλευρά, ακόμη αν και τυπικά το δίκτυο παρέχει μια λίστα γειτονικών κυψελών (NCL – Neighbor Cell List) για να βοηθήσει την αναζήτηση κυψέλης στους UEs, η εισερχόμενη κινητικότητα στις φεμτοκυψέλες είναι απίθανο να υποβοηθηθεί από τις πληροφορίες αυτές. Αυτό προκύπτει από τα ακόλουθα γεγονότα: α) η χρήση των φεμτοκυψελών υπόκεινται στον έλεγχο πρόσβασης, δηλαδή, η NCL θα πρέπει να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις εγγραφές των UE β) οι φεμτοκυψέλες εγκαθίστανται και διευθύνονται από τους καταναλωτές με τυχαίο τρόπο, δηλαδή οι ιδιοκτήτες μπορούν να τις εγκαταστήσουν ή να τις απεγκαταστήσουν, να ενεργοποιήσουν ή να απενεργοποιήσουν την φεμτοκυψέλη, ακόμα και να αλλάξουν την υποστηριζόμενη μέθοδο πρόσβασης γ) περιορισμένος αριθμός γειτονικών κυψελών μπορούν να σηματοδοτηθούν στο πλαίσιο της NCL, στην συγκεκριμένη περίπτωση έως 32.

Ως εκ τούτου, η υποστήριξη των φεμτοκυψελών υποδεικνύει μία μετάβαση των διαδικασιών αναζήτησης κυψέλης από τον τύπο ελέγχου βάσει δικτύου σε τύπο ελέγχου βάσει UE, η οποία μπορεί να βασιστεί στη χρήση συνεργατικών και γνωστικών στρατηγικές ραδιοσυχνοτήτων. Επιπρόσθετα, παρόμοιες προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μιας πλήρους NCL σε μακροκυψέλες και τους σταθμούς φεμτοκυψελών, για να μειωθεί περαιτέρω η διάρκεια και να ενισχυθεί η ακρίβεια της διαδικασίας αναζήτησης κυψέλης. Για παράδειγμα οι γειτονικές κυψέλες να μπορούν να μοιραστούν τα NCLs τους. Η ανάγκη για πιο εξελιγμένες στρατηγικές DRX και στρατηγικές προγραμματισμού πακέτων είναι επιτακτική για την υποστήριξη της αναζήτησης φεμτοκυψέλης. Διατηρώντας παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας και τα κόστη μετάδοσης της ποιότητας υπηρεσιών (QoS - Quality of Service), την συντήρηση και την ποιότητας εμπειρίας (QoE - Quality of Experience) σε αποδεκτά επίπεδα. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις για την παρακολούθηση του NCL [18] και του DRX [19] από την μεριά των φεμτοκυψελών. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την κάλυψη των απαιτήσεων της απόδοσης των φεμτοκυψελών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης η έρευνα που έχει γίνει και πάνω στο θέμα της αυτόνομης αναζήτησης κυψέλης βασισμένης στους UEs (παρουσία φεμτοκυψελών) είναι ακόμα στα αρχικά στάδια.

Σε επόμενο στάδιο θα αναλυθεί η διαδικασία αναζήτησης κυψέλης για φεμτοκυψέλες στα συστήματα LTE-A. Η E-UTRAN αναζήτηση κυψέλης βασίζεται στην ακολούθηση των πρωτευόντων και δευτερευόντων σημάτων συγχρονισμού στην κατεύθυνση της κατερχόμενης ζεύξης. Αυτά τα σήματα μεταδίδονται μέσω των κεντρικών 72 υπο-φερουσών του πρώτου και του έκτου υπο-πλασίου για κάθε πλαίσιο. Δύο βασικές μετρήσεις ποιότητας του σήματος υποστηρίζονται στους UEs: α) το σύμβολο αναφοράς λαμβανόμενης ισχύς (RSRP – Reference Symbol Received Power) και β) το σύμβολο αναφοράς λαμβανόμενης ποιότητας (RSRQ – Reference Symbol Received Quality) [20].

Και οι δύο αυτές μετρήσεις εκτελούνται επί των σημάτων αναφοράς (RS – Reference Signals) της κατερχόμενης ζεύξης που μεταδίδονται από μία E-UTRAN κυψέλη σε προκαθορισμένους χρόνους και συχνότητες. Στα συστήματα LTE - A εφαρμόζονται διάφορες προσεγγίσεις αναζήτησης κυψέλης, ανάλογα με το αν ο UE είναι σε κατάσταση σύνδεσης ή σε κατάσταση αδράνειας. Όταν ο UE βρίσκεται σε κατάσταση σύνδεσης, η E-UTRAN διαδικασία αναζήτησης κυψέλης βασίζεται στη διαμόρφωση που παρέχεται από το δίκτυο. Το σύστημα LTE-A υποστηρίζει τόσο τα κριτήρια αναφοράς που προκαλούνται από συμβάντα, όσο και αυτά από περιοδικές μετρήσεις, ενώ μαύρες λίστες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για αποτρέψουν

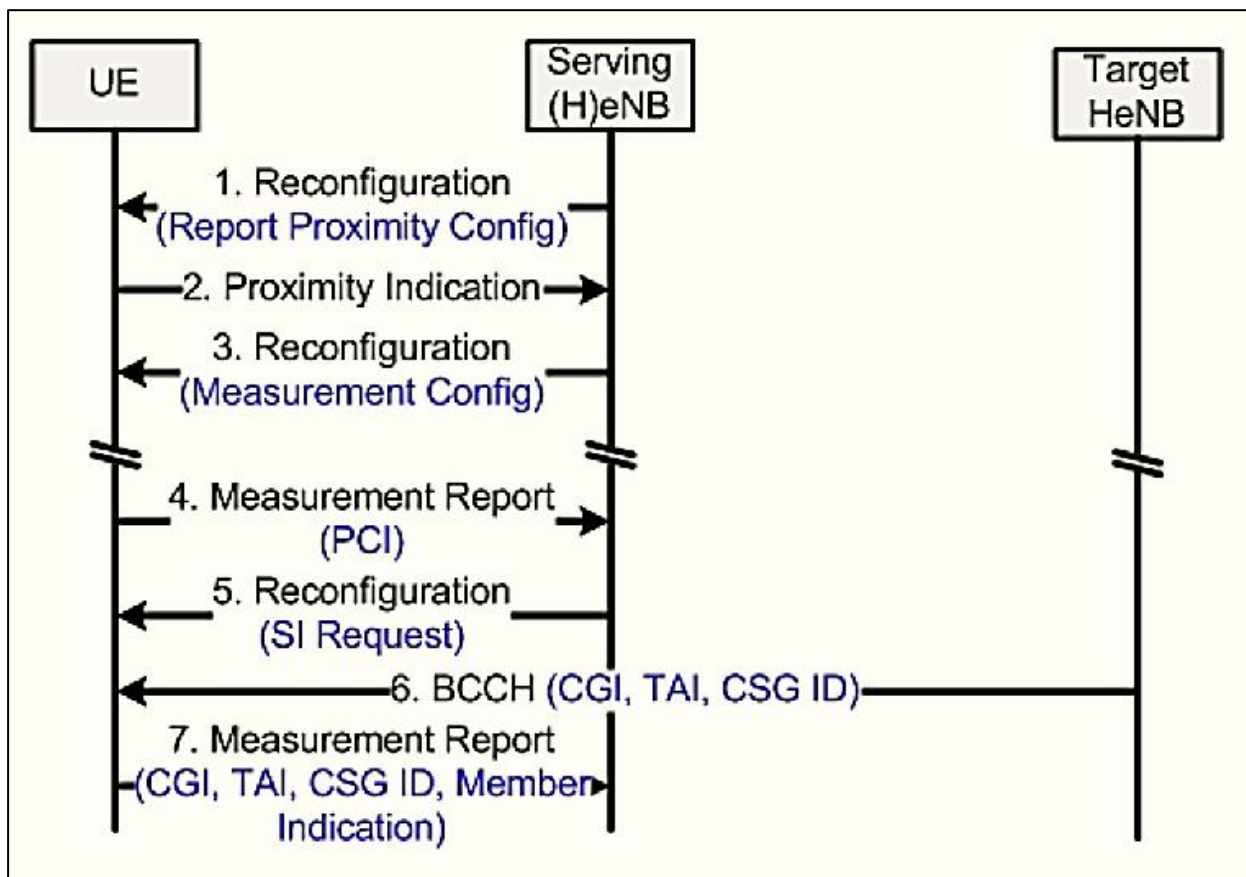
τους UE από τη μέτρηση συγκεκριμένων γειτονικών κυψελών. Η κυψέλη LTE-A που εξυπηρετεί, δεν είναι υποχρεωμένη να παρέχει στους UEs πληροφορίες για γειτονικές κυψέλες, ωστόσο, θα πρέπει τουλάχιστον να υποδεικνύει την φέρουσα συχνότητα των διάφορων συχνοτήτων των γειτονικών κυψελών. Μια NCL μπορεί επίσης να παρέχεται για τον χειρισμό ειδικών περιπτώσεων κινητικότητας μεταξύ των κυψελών και την μεταφορά στους UEs, καθώς και ειδικών παραμέτρων κυψέλης που σχετίζονται με την αναζήτηση κυψέλης και την φάση μέτρησης. Η αναζήτηση (κυψέλης) για CSG και υβριδικές κυψέλες στην συνδεδεμένη κατάσταση, είναι διαφορετική από την (κανονική) E-UTRAN διαδικασία αναζήτησης κυψέλης σε ένα συγκεκριμένο σημείο: στην χρήση της εκτίμησης εγγύτητας. Η εκτίμηση εγγύτητας πρωτοεμφανίστηκε στην έκδοση 9 του LTE. Σύμφωνα με την διαδικασία αναζήτησης κυψέλης, η κυψέλη - εξυπηρετητής διαμορφώνει τον UE για να παρέχει μια ένδειξη εγγύτητας (δηλαδή ότι βρίσκεται κοντά σε μια προσβάσιμη CSG ή υβριδική κυψέλη) με βάση την αυτόνομη διαδικασία αναζήτησης κυψέλης. Αφού γίνει η λήψη μιας ένδειξης εγγύτητας, η κυψέλη - εξυπηρετητής μπορεί να διαμορφώσει την UE έτσι ώστε να εκτελέσει την μέτρηση ποιότητας του σήματος και να αποκτήσει τις πληροφορίες συστήματος της νέας κυψέλης.

Η αναζήτηση κυψέλης και η διαδικασία μέτρησης των φεμτοκυψελών στα συστήματα LTE-A, απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Αρχικά, η κυψέλη – εξυπηρετητής διαμορφώνει τον UE με την βοήθεια ενός ελέγχου ένδειξης εγγύτητας (βήμα 1^ο). Έπειτα χρησιμοποιώντας αυτόνομες διαδικασίες αναζήτησης, ο UE προσδιορίζει την παρουσία μιας κοντινής φεμτοκυψέλης και επιστρέφει μία αναφορά στην κυψέλη – εξυπηρετητή (βήμα 2^ο). Κατά συνέπεια, η κυψέλη-εξυπηρετητής διαμορφώνει τον UE, έτσι ώστε να μετρά και να αναφέρει την ποιότητα του σήματος του HeNB στόχου (βήματα 3 και 4, αντίστοιχα). Σε επόμενο στάδιο, η κυψέλη-εξυπηρετητής ρυθμίζει τον UE (βήμα 5) έτσι ώστε να αποκτήσει τις πληροφορίες συστήματος (SI) του HeNB στόχου (βήμα 6) μέσω του καναλιού ελέγχου εκπομπής (BCCH - Broadcast Control Channel). Η διαδικασία αναζήτησης κυψέλης ολοκληρώνεται όταν ο UE αναφέρει τις πληροφορίες συστήματος (SI) που απέκτησε στην κυψέλη-εξυπηρετητή (βήμα 7). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα βήματα 4 έως 6 χρησιμοποιήθηκαν για την αναγνώριση κυψέλης. Όταν ο UE είναι σε κατάσταση αδράνειας, η αναζήτηση (κυψέλης) για CSG κυψέλες βασίζεται σε μία αυτόνομη λειτουργία UE αναζήτησης που η ίδια καθορίζει πότε και που να ψάξει, χωρίς να υποβοηθείται από τις πληροφορίες δικτύου σχετικά με τις συχνότητες που είναι αφιερωμένες στις κυψέλες CSG. Για να μπορέσει να βοηθηθεί η λειτουργία αναζήτησης σε μικτούς φορείς, δηλαδή φορείς που χρησιμοποιούνται από ENBs και από HeNBs, όλες οι CSG κυψέλες μεταδίδουν ένα εύρος τιμών PCI που προορίζεται μόνο για χρήση CSG. Αυτή η πληροφορία μπορεί προαιρετικά να μεταδίδεται και από μη-CSG κυψέλες, ενώ ισχύει για μέγιστο χρονικό διάστημα 24 ωρών και μόνο για τη συχνότητα PLMN που λήφθηκε.

Σημειώνεται εδώ πως τα συστήματα LTE-A υποστηρίζουν και την χειροκίνητη επιλογή CSG κυψέλης, ενώ η αυτόνομη λειτουργία αναζήτησης CSG κυψελών μπορεί να απενεργοποιηθεί εάν η λίστα διαθέσιμων CSG του UE είναι άδεια. Επίσης σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, η κυψέλη-εξυπηρετητής μπορεί να παρέχει στον UE την NCL με τις CSG κυψέλες, όπως για παράδειγμα όταν το δίκτυο έχει σκοπό να ξεκινήσει μία αναζήτηση CSG κυψέλης στον UE.

Η αναζήτηση (κυψέλης) για υβριδικές κυψέλες σε κατάσταση αδράνειας ακολουθεί την τυπική διαδικασία μιας E-UTRAN αναζήτησης κυψέλης, όπου η κυψέλη-

εξυπηρετητής στηρίζεται στον UE για να ανιχνεύσει γειτονικές κυψέλες και δείχνει μόνο τις συχνότητες των φερουσών κυψελών γειτονικών συχνοτήτων. Σημειώνεται ότι με την εφαρμογή της αυτόνομης λειτουργίας αναζήτησης και τη χρήση του διαχωρισμού PCI, οι πληροφορίες παραμένουν ελεύθερες από το πρότυπο LTE-A.



Εικόνα 11. Σηματοδότηση αναζήτησης και μέτρησης κυψέλης στο LTE-A

2.6.4 Επιλογή/Επανεπιλογή κυψέλης

Η επιλογή κυψέλης αναφέρεται στη διαδικασία προσάρτησης, όπου ο UE είναι αδρανής και δεν έχει στρατοπεδεύσει σε μία κυψέλη, όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της φάσης ενεργοποίησης του UE ή μετά από απώλεια κάλυψης του δικτύου. Αντίθετα, η επανεπιλογή κυψέλης αναφέρεται στην διαδικασία κινητικότητας μεταξύ των κυψελών, κατά την οποία ο UE είναι αδρανής και έχει ήδη στρατοπεδεύσει σε μία κυψέλη. Για να γίνει χρήση της επιλογής κυψέλης, ο UE αναζητεί όλες τις ζώνες συχνοτήτων του κυψελοειδούς συστήματος, εντοπίζει τις κυψέλες που λειτουργούν σε κάθε συχνότητα –φορέα και ακολουθεί μια διαδικασία τυχαίας πρόσβασης για να εγκατασταθεί στην πιο κατάλληλη κυψέλη. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αποθηκευμένες πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συντομευθεί η φάση επιλογής κυψέλης. Εκτός από τη χρήση της ποιότητας σήματος ως κύριο κριτήριο, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν επιπλέον κριτήρια και περιορισμοί, όπως για παράδειγμα η χρήση των μαύρων λιστών που συμπεριλαμβάνουν συγκεκριμένες κυψέλες ή περιοχές παρακολούθησης. Από την άλλη πλευρά, η επανεπιλογή κυψέλης βασίζεται στη μέτρηση της ποιότητας σήματος των κοντινών κυψελών και στην χρήση : α) κριτηρίων

κατάταξης κυψελών, β) προτεραιοτήτων των συχνοτήτων οι οποίες παρέχονται από το δίκτυο και γ) άλλα κριτήρια βελτιστοποίησης συγκεκριμένα για τους UEs [21].

Η διαδικασία επανεπιλογής κυψέλης μπορεί να υποβοηθείται από το δίκτυο με μία NCL, ενώ μπορεί επίσης να βελτιστοποιηθεί κάνοντας χρήση των αποθηκευμένων πληροφοριών στην UE. Υπάρχουν δύο σημαντικές προκλήσεις προς διερεύνηση, όσον αφορά την απόδοση της επιλογής/επανεπιλογής κυψέλης παρουσία των φεμτοκυψελών: α) ο βέλτιστος το σχηματισμός των περιοχών εντοπισμού (Tracking Areas ή TA) και β) η χρήση ειδικών στρατηγικών επιλογής/επανεπιλογής κυψέλης για τις φεμτοκυψέλες.

Αναφερόμενοι στην πρώτη πρόκληση, είναι γνωστό ότι το κυψελοειδές δίκτυο παρακολουθεί τους UEs που βρίσκονται σε αδράνεια με τη χρήση TAs, δηλαδή μιας ομάδας γειτονικών κυψελών. Οι TAs χρησιμοποιούνται για να ενημερωθεί ο UE σε περίπτωση μιας εισερχόμενης φωνητικής κλήσης ή μιας σύνδεσης πακέτων δεδομένων. Η χρήση των μεγάλων TA μειώνει την σηματοδότηση επιλογής/ επανεπιλογής κυψέλης και τα κόστη κατανάλωσης ενέργειας στους UE (δηλαδή λιγότερο συχνή ενημέρωση των TA), ωστόσο αυξάνει την σηματοδότηση, την κατανάλωση ενέργειας, και τα κόστη εκπομπών από στην πλευρά του δικτύου. Η επίτευξη μιας αποδεκτής απόδοσης μεταξύ αυτών των δύο σημείων είναι ακόμη πιο δύσκολη υπό την παρουσία φεμτοκυψελών, όπου το κυψελοειδές δίκτυο αποτελείται από τυχαία και μη-ομοιόμορφα εγκατεστημένους σταθμούς μικρού μεγέθους. Σχετικά με τη δεύτερη πρόκληση, η επιλογή/επανεπιλογή κυψέλης βασίζεται συνήθως στην κατάταξη κυψέλης ή στην ανάθεση των απόλυτων προτεραιοτήτων συχνότητας. Ωστόσο, η υποστήριξη των φεμτοκυψελών υποδεικνύει τη χρήση πιο περίπλοκων στρατηγικών επιλογής/επανεπιλογής κυψέλης έτσι ώστε να ελαφρυνθεί η βαθμίδα των μακροκυψελών με την αύξηση της χρήσης υποδομών των φεμτοκυψελών. Οι στρατηγικές αυτές θα πρέπει να προβλέπουν τα γενικά κόστη σηματοδότησης και καθυστέρησης, για την επιλογή/επανεπιλογή κυψέλης και να προσαρμόζονται στα ειδικά χαρακτηριστικά των φεμτοκυψελών, όπως για παράδειγμα κατά τον έλεγχο πρόσβασης και την γρήγορη αλλαγή του ασύρματου μέσου. Οι αποθηκευμένες ή προσωρινά αποθηκευμένες πληροφορίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την επιτάχυνση της διαδικασίας επιλογής/επανεπιλογής κυψέλης και για τον αποτελεσματικό χειρισμό του αυξημένου αριθμού των υποψηφίων κυψελών. Στα συστήματα LTE-A, η επιλογή κυψέλης για υβριδικές κυψέλες αποτελείται από την αναζήτηση στις ζώνες συχνοτήτων E-UTRA, προσδιορίζοντας την ισχυρότερη κυψέλη για κάθε συχνότητα – φορέα και διαβάζοντας το SI για την απόκτηση των αντίστοιχων ταυτοτήτων PLMN. Με βάση αυτή τη λειτουργία, ο UE προσδιορίζει μία κυψέλη η οποία: α) ικανοποιεί τα κριτήρια επιλογής κυψέλης β) έχει μια ταυτότητα PLMN (που ανήκει στις επιτρεπόμενες PLMN ταυτότητες του UE) γ) δεν περιλαμβάνεται στη μαύρη λίστα δ) δεν ανήκει σε απαγορευμένη TA.

Εάν δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί μία τέτοια κυψέλη, ο UE εγκαθίσταται σε ένα κελί που πληροί τις δύο πρώτες προϋποθέσεις. Εκτός από τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, η επιλογή κυψέλης για CSG κυψέλες μπορεί να βασίζεται επιπλέον στην αυτόνομη λειτουργία αναζήτησης UE και στην λίστα των διαθέσιμων CSG του UE.

Η επανεπιλογή κυψέλης στα δίκτυα LTE-A μπορεί να συνοψισθεί ως ακολούθως. Για την διαδικασία της επανεπιλογής κυψέλης εντός συχνότητας, ο UE χρησιμοποιεί την

κατάταξη των κυψελών, ενώ για την επανεπιλογή μεταξύ της συχνότητας ο UE βασίζεται στις απόλυτες προτεραιότητες της συχνότητας που μεταδίδονται στις πληροφορίες του συστήματος. Δηλαδή χρησιμοποιούνται UE στην συχνότητα με την υψηλότερη διαθέσιμη προτεραιότητα. Το LTE-A επιτρέπει τη χρήση ειδικών παραμέτρων επίπεδου για γειτονικές κυψέλες μεταξύ των συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα μια συγκεκριμένη μετατόπιση για κάθε κυψέλη. Οι ειδικές παράμετροι για την επανεπιλογή κυψέλης, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν όταν παρέχεται μία NCL από την κυψέλη – εξυπηρετητή, όπως για παράδειγμα η χρήση των παραμέτρων επανεπιλογής εξαρτώμενων από την ταχύτητα. Οι παράμετροι επανεπιλογής κυψέλης ισχύουν για όλους τους UE σε μία κυψέλη, εκτός εάν επιπλέον διαμορφώσεις είναι σε ισχύ, όπως η χρήση παραμέτρων επανεπιλογής εξαρτώμενων από την ταχύτητα. Παρόμοια με την επιλογή κυψέλης, η επανεπιλογή κυψέλης για CSG κυψέλες βασίζεται στην λειτουργία αυτόνομης UE αναζήτησης και στην λίστα διαθέσιμων CSG του UE. Μια NCL με CSG κυψέλες μπορεί επίσης να σηματοδοτείται στον UE, προκειμένου να χειριστεί ειδικές περιπτώσεις κινητικότητας μεταξύ κυψελών. Τέλος τα δίκτυα LTE-A υποστηρίζουν επίσης την χειροκίνητη επιλογή/επανεπιλογή κυψέλης σε CSG ή υβριδικές κυψέλες.

2.6.5 Απόφαση μεταπομπής (HO)

Η μεταπομπή κυψέλης αποτελείται από το σύνολο των αποφάσεων και των διαδικασιών σηματοδότησης που είναι απαραίτητες για να μεταφερθούν οι τρέχουσες συνδέσεις ενός UE, από την τρέχουσα κυψέλη εξυπηρετητή σε μία άλλη κυψέλη. Το κομμάτι της απόφασης μιας μεταπομπής κυψέλης, αναφέρεται ως φάση απόφασης μεταπομπής, ενώ το κομμάτι της σηματοδότησης ως η φάση της εκτέλεσης μεταπομπής. Σε γνωστά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, η φάση απόφασης μεταπομπής εκτελείται στην κυψέλη-εξυπηρετητή και βασίζεται στις μετρήσεις ποιότητας σήματος που παρέχονται από τον UE, δηλαδή έχουμε ένα είδος UE-υποβοηθούμενο και ελεγχόμενο από το δίκτυο μεταπομπής. Η φάση της απόφασης μεταπομπής χρησιμοποιείται τυπικά για να ελαφρύνει την μεγάλη συμφόρηση στις μακροκυψέλες και τη βελτίωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος στους κινητούς UEs. Ο αντίκτυπος της φάσης απόφασης μεταπομπής είναι ακόμη πιο έντονος με την παρουσία φεμτοκυψελών, λόγω της μικρής εμβέλειας των επικοινωνιών, την πυκνότερη διάταξη δικτύου και την ταχεία διακύμανση του περιβάλλοντος των ραδιοσυχνοτήτων. Για το σκοπό αυτό, εκτός από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στους UEs, στην φάση απόφασης μεταπομπής θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψιν: α) τα αποκλίνοντα επίπεδα παρεμβολών στα σημεία που βρίσκονται οι κυψέλες β) τις ανισοτήτες της ισχύς μετάδοσης για τα σήματα αναφοράς (Reference Signals ή RS) των σταθμών των μακροκυψελών και των φεμτοκυψελών και γ) οι αυξημένη ευαισθησία της κινητικότητα των χρηστών.

Η απόφαση μεταπομπής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κόμβων του δικτύου και την διαχείριση των παρεμβολών σε μακροσκοπικό επίπεδο, δηλαδή χωρίς τη χρήση ελέγχου ισχύος ή διαχείρισης παρεμβολής και πόρων του δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι απόφασης μεταπομπής για το δίκτυο δύο επιπέδων μακροκυψέλης-φεμτοκυψέλης. Η συντριπτική πλειοψηφία των υφιστάμενων αλγορίθμων δίνει περισσότερη προτεραιότητα στην πρόσβαση των φεμτοκυψελών από ότι στην πρόσβαση των μακροκυψελών με βάση

την ισχύ του σήματος, την ταχύτητα του UE ή κριτήρια βασιζόμενα στην κυκλοφορία του δικτύου. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η επίδραση των αλγορίθμων μεταπομπής στην κατανάλωση ενέργειας, στις παρεμβολές, στην χωρητικότητα του συστήματος και την σηματοδότηση του δικτύου δεν έχει διερευνηθεί εκτενώς. Από την άλλη πλευρά, η συντριπτική πλειοψηφία των υφιστάμενων αλγορίθμων απόφασης μεταπομπής επικεντρώνεται στο σενάριο απόφασης μεταπομπής στο ίδιο επίπεδο και χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ισχυρότερης κυψέλης (Strongest Cell ή SC) για την απόφαση μεταπομπής σε διαφορετικά επίπεδα, δηλαδή για μεταπομπές μακροκυψέλης – μακροκυψέλης και φεμτοκυψέλης – φεμτοκυψέλης. Ωστόσο, ο αλγόριθμος SC δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική ισχύ μετάδοσης στα RS των υποψήφιων κυψελών, ούτε το επίπεδο παρεμβολών στις θέσεις των κυψελών. Μια άλλη αδυναμία των υφιστάμενων προσεγγίσεων, είναι η παραδοχή απλοϊκών διατάξεων δικτύου. Η λήψη αποφάσεων μεταπομπής ειδικά για τις φεμτοκυψέλες, αναδεικνύει μια σειρά από ερευνητικές προκλήσεις.

Η ενεργοποίηση της φάσης απόφασης μεταπομπής θα πρέπει να επανεκτιμηθεί προσεκτικά στο πλαίσιο των φεμτοκυψελών, όπως και η χρήση άλλων χαρακτηριστικών των απαιτήσεων IMT – Advanced. Επιπρόσθετα, αντί της χρησιμοποίησης της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος ως πρωταρχικό κριτήριο, η φάση απόφασης μεταπομπής στις φεμτοκυψέλες θα πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψιν τις πραγματικές παρεμβολές ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency ή RF) και την ισχύ μετάδοσης του RS στις θέσεις των κυψελών, προκειμένου να διατηρήσουν ένα αποδεκτό SINR στους UEs. Η επίτευξη μιας καλής ισορροπίας μεταξύ της εκμετάλλευσης των ευκαιριών αξιοποίησης των φεμτοκυψελών και η διατήρηση μιας χαμηλής πιθανότητας μεταπομπής είναι μερικοί επιπλέον κρίσιμοι τομείς. Ακόμα, η βελτιστοποίηση των παρεμβολών και της κατανάλωσης ενέργειας στους κόμβους του δικτύου, θα πρέπει να ενσωματωθεί στο πλαίσιο της φάσης απόφασης μεταπομπής. Από την άλλη πλευρά, πιο εξελιγμένα μοντέλα ανάλυσης απαιτούνται για να γίνει ο έλεγχος της απόδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων όσον αφορά τις επιδόσεις τους στο SINR, τις παρεμβολές, την κατανάλωση ενέργειας και την απόδοση.

2.6.6 Εκτέλεση μεταπομπής (HO)

Η εκτέλεση μεταπομπής αποτελείται από όλες τις απαραίτητες διαδικασίες σηματοδότησης για την εκτέλεση της μετακίνησης μεταξύ των κυψελών, όταν ο UE είναι σε συνδεδεμένη κατάσταση. Κατά την παρουσία των φεμτοκυψελών, απαιτούνται αυξημένα κόστη σηματοδότησης και καθυστέρησης για την εκτέλεση της μεταπομπής υπό την προϋπόθεση ότι: α) οι φεμτοκυψέλες συνδέονται με τον πυρήνα του δικτύου μέσω της ευρυζωνικής οπισθοζεύξης του χρήστη και β) το φορτίο σηματοδότησης περνά μέσα από επιπλέον οντότητες του δικτύου, π.χ. μια οντότητα ελέγχου πρόσβασης ή πύλη φεμτοκυψέλης (GateWay ή GW).

Περισσότερο πολύπλοκες διαδικασίες σηματοδότησης απαιτούνται επίσης για την ενσωμάτωση των ειδικών διαδικασιών για τις φεμτοκυψέλες στην φάση της εκτέλεσης μεταπομπής, όπως είναι η αυτόνομη αναζήτηση, η ανάλυση PCI και ο έλεγχος πρόσβασης. Το ίδιο ισχύει και όταν ο αναπτυσσόμενος αλγόριθμος απόφασης μεταπομπής χρησιμοποιεί ένα εμπλουτισμένο σύνολο παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση της κυψέλης - στόχου. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για τη βελτίωση της ενσύρματης κυψελοειδούς οπισθοζεύξης, από την

πλευρά των φεμτοκυψελών. Η ανάπτυξη των GWs των φεμτοκυψελών, είναι μια ευρέως αποδεκτή λύση για την ενίσχυση της εκτέλεσης μεταπομπής με έναν κλιμακούμενο και αναστρέψιμο τρόπο.

Στη συνέχεια, θα συνοψιστούν τα πιθανά σενάρια εκτέλεσης μεταπομπής με χρήση φεμτοκυψελών και θα γίνει μια επισκόπηση των διαδικασιών σηματοδότησης για την ανάπτυξη στο δίκτυο LTE-A. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα σενάρια εκτέλεσης μεταπομπής στο δίκτυο LTE-A δύο επιπέδων μακροκυψέλης - φεμτοκυψέλης και δείχνει την χρησιμοποιούμενη διασύνδεση ανάλογα με: α) τον τύπο της κυψέλης-εξυπηρετητή β) τον τύπο της κυψέλης – στόχου και γ) την ανάγκη χρήσης ελέγχου πρόσβασης. Σημειώνεται εδώ πως ο έλεγχος πρόσβασης, δεν ισχύει για τα σενάρια εκτέλεσης μεταπομπής 1 και 2 (διότι η κυψέλη στόχος είναι ένα eNB) και πως στο σενάριο μεταπομπής 3 η κυψέλη - εξυπηρετητής μπορεί να είναι είτε ένας eNB είτε ένας HeNB. Τα σενάρια εκτέλεσης μεταπομπής 1 και 2 δεν απαιτούν διαδικαστικές βελτιώσεις για το σύστημα LTE - A, δεδομένου ότι οι κλασικές διαδικασίες E - UTRAN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μεταπομπή σε ένα eNB. Αντίθετα, η εισερχόμενη κινητικότητα στις φεμτοκυψέλες (δηλαδή τα σενάρια εκτέλεσης μεταπομπής 3, 4 και 5) απαιτεί την χρήση της εκτίμησης εγγύτητας (proximity), την επίλυση του προβλήματος της σύγχυσης PCI και την χρήση του ελέγχου πρόσβασης (σενάριο 3).

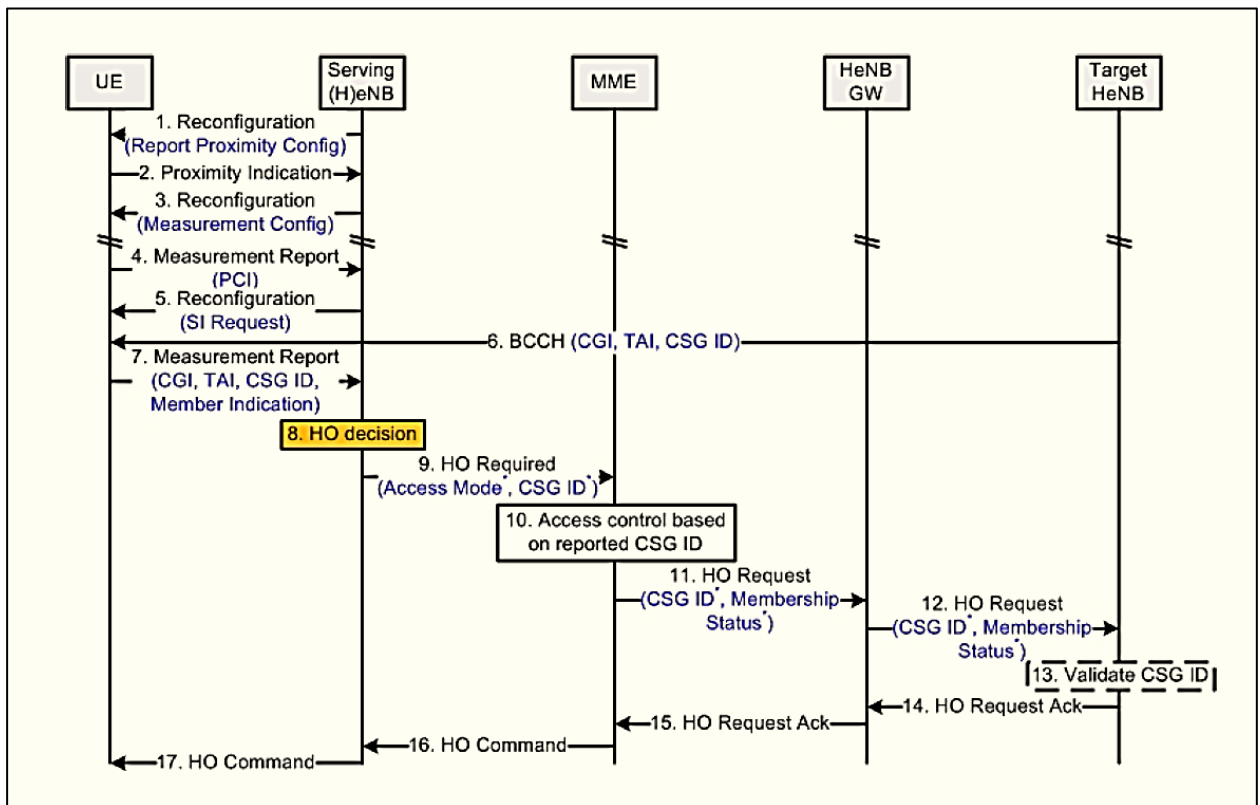
Πίνακας 1. Σενάρια εκτέλεσης Μεταπομπής σε δίκτυο LTE-A 2 επιπέδων μακροκυψέλης-φεμτοκυψέλης

Σενάριο Μεταπομπής	Κυψέλη-Εξυπηρετητής	Κυψέλη-Στόχος	Έλεγχος Πρόσβασης	Τύπος Μεταπομπής	Διεπαφή εκτέλεσης Μεταπομπής
1	eNB	eNB	Δεν εφαρμόζεται	Τυπικό E-UTRAN	X2
2	HeNB	eNB	Δεν εφαρμόζεται	Εξερχόμενος στον HeNB	S1
3	(H)eNB	HeNB	εφαρμόζεται	Εισερχόμενος στον HeNB	S1
4	eNB	HeNB	εφαρμόζεται	Εισερχόμενος στον HeNB	S1
5	HeNB	HeNB	εφαρμόζεται	Εισερχόμενος στον HeNB	X2/S1

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η πιο περίπλοκη διαδικασία σηματοδότησης εκτέλεσης μεταπομπής, για την εισερχόμενη κινητικότητα σε ένα HeNB. Δηλαδή το σενάριο εκτέλεσης μεταπομπής 3. Η φάση της αναζήτησης και η καταμέτρηση κυψέλης γίνεται στα βήματα 1 έως 7, τα οποία εφαρμόζουν τον έλεγχο ένδειξης εγγύτητας (βήματα 1 - 2), την μέτρηση ποιότητας σήματος αίτησης ή αναφοράς (στάδιο 3 - 4) και την αναγνώριση κυψέλης (βήματα 5 - 7). Με βάση την έκβαση της απόφασης μεταπομπής, στο βήμα 8, το (H)eNB-εξυπηρετητής περιλαμβάνει την ECGI και το αναγνωριστικό CSG του HeNB στόχου σε ένα μήνυμα αίτησης μεταπομπής το οποίο αποστέλλεται στην MME (βήμα 9). Εάν ο HeNB στόχος είναι μία υβριδική κυψέλη, ο τύπος πρόσβασης επίσης περιλαμβάνεται στο μήνυμα. Η MME επικυρώνει την κατάσταση μέλους του UE στην HeNB-στόχο στο στάδιο 10 και εφόσον δεν ισχύουν οι περιορισμοί ελέγχου πρόσβασης, ένα μήνυμα αίτησης μεταπομπής προωθείται στην HeNB-στόχο (βήματα 11 - 12), συμπεριλαμβανομένου του αναγνωριστικού CSG. Η HeNB στόχος επαληθεύει ότι το CSG ID της αναφοράς συμφωνεί με το CSG ID

εκπομπής και διαφυλάσσει το σύνολο των απαιτούμενων πόρων για το UE (βήμα 13). Ανάλογα με τον υποστηριζόμενο τύπο πρόσβασης και την κατάσταση μέλους του UE, μπορεί να γίνει εκχώρηση πόρων του δικτύου με βάση την προτεραιότητα στο βήμα 13. Η διαδικασία εκτέλεσης μεταπομπής συντελείται στα βήματα 14 - 17, όπου ο HeNB – στόχος αναγνωρίζει το αίτημα μεταπομπής στην MME (βήματα 14 έως 15), η MME στέλνει ένα μήνυμα εντολής μεταπομπής προς (H)eNB-εξυπηρετητή (βήμα 16) και το (H)eNB ειδοποιεί τον UE για να ξεκινήσει την μεταπομπή του προς τον HeNB-στόχο (βήμα 17).

Σημειώνεται πως η διαδικασία σηματοδότησης για τη στήριξη του σενάριο εκτέλεσης μεταπομπής 4 είναι παρόμοια με εκείνη που ακολουθείται στην παρακάτω εικόνα, με τη διαφορά ότι το στάδιο του ελέγχου πρόσβασης βασιζόμενο στην MME παραλείπεται (βήμα 10). Το ίδιο ισχύει και για το σενάριο εκτέλεσης μεταπομπής 5, όπου επιπροσθέτως, η διεπαφή X2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανταλλαγή αιτήσεων/εντολών μεταπομπής μεταξύ του HeNB εξυπηρετητή στόχου, προκειμένου να μειωθεί το απαιτούμενο κόστος σηματοδότησης και καθυστέρησης.



Εικόνα 12. Σηματοδότηση της εκτέλεσης μεταπομπής σε έναν HeNB

3. ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΦΕΜΤΟΚΥΨΕΛΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα, το πρώτο βήμα της συσκευής ενός χρήστη είναι να αναζητήσει μια κυψέλη, πριν από κάθε εκπομπή ανερχόμενης ζεύξης. Στην περίπτωση του LTE και του LTE – Advanced, υπάρχουν ειδικά φυσικά σήματα στο πλαίσιο της κατερχόμενης ζεύξης για να διευκολύνουν την συγκεκριμένη διαδικασία. Αυτά είναι τα σήματα πρωτοβάθμιου συγχρονισμού (PSS – Primary Synchronization Signal) και τα σήματα δευτεροβάθμιου συγχρονισμού (SSS – Secondary Synchronization Signal). Η ανίχνευσή των σημάτων πρωτοβάθμιου συγχρονισμού είναι υψηλής σημασίας για την απόκτηση του αρχικού πλαισίου συγχρονισμού των ραδιοσυχνοτήτων. Έπειτα η ανίχνευση των σημάτων δευτερεύοντος συγχρονισμού μπορούν να διεξαχθούν με ευκολία, επιλύοντας έτσι τον συγχρονισμό των ραδιοσυχνοτήτων για την εκπομπή των σημάτων κατερχόμενης ζεύξης.

Κατά την ανάπτυξη των προδιαγραφών του LTE, πολλοί ερευνητές εξέτασαν τον σχεδιασμό των σημάτων συγχρονισμού με διαφορετικές προσεγγίσεις. Βασικός στόχος τους ήταν η βελτιστοποίηση του χρόνου αναζήτησης της κυψέλης.

Η φεμτοκυψέλη (ονομάζεται επίσης και Home NodeB) είναι ο όρος που γενικά χρησιμοποιείται για έναν σταθμό βάσης χαμηλής ισχύος τοποθετημένο σε εσωτερικούς χώρους για την παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας μέσα στο σπίτι, την επιχείρηση ή περιβάλλον hotspot. Συνήθως ένας Home NodeB (η HeNB) είναι συνδεδεμένο στο Internet και το δίκτυο της εταιρεία κινητής τηλεφωνίας μέσω ενός router DSL ή καλωδιακού modem. Τα βασικά πλεονεκτήματα των φεμτοκυψελών μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- εξαιρετική εμπειρία χρήστη στο σπίτι (μέσω της καλύτερης κάλυψης για φωνή και της υψηλότερης απόδοσης των δεδομένων)
- ελάφρυνση του φορτίου της κυκλοφορίας από το μακρο-κυψελοειδές δίκτυο και μείωση του κόστους ανάπτυξη υποδομών [22] [14].

Μία πρόκληση για την ανάπτυξη φεμτοκυψελών είναι η ανακάλυψη των φεμτοκυψελών. Δηλαδή, για έναν UE που φθάνει στο σπίτι μπορεί να μην του είναι δυνατόν να βρει και να στρατοπεδεύσει στην φεμτοκυψέλη αν αρχικά βρισκόταν σε μία μακροκυψέλη με διαφορετική συχνότητα από αυτήν της φεμτοκυψέλης, και η ποιότητα της μακροκυψέλης είναι καλή. Για να διευκολυνθεί η ανακάλυψη των φεμτοκυψελών, η μετάδοση Sintersearch από το μακρο-δίκτυο πρέπει να ρυθμιστεί υψηλή πράγμα το οποίο επηρεάζει όλους τους UEs στο δίκτυο.

Τα ετερογενή δίκτυα (ή HetNets) όπως τα long term evolution (LTE) (ή, ακριβέστερα, LTE-advanced) συστήματα στοχεύουν στην ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος από πολλές απόψεις. Συγκεκριμένα, η βελτίωση των επιδόσεων κάλυψης και απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με την ανάπτυξη κόμβων χαμηλής ισχύος, όπως πικοκυψέλες και φεμτοκυψέλες σε μια διάταξη μακροκυψελών. Οι συχνές εγκαταστάσεις και αφαιρέσεις κόμβων χαμηλής ισχύος που επιβάλλονται από τις περιστάσεις μπορεί να απαιτούν ετερογενή δίκτυα αυτό-οργάνωσης με τα οποία εύκολα επιτυγχάνεται η απλοποιημένη διαδικασία εγκατάστασης συστήματος, η συντήρηση και η αυτόνομη προσαρμογή στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον δικτύου [23] [24]. Συγκεκριμένα, η κατανομή των φυσικών αναγνωριστικών κυψελών (PCI), η διαμόρφωση και η διαχείριση των γειτονικών κυψελών, και η βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων των παραμέτρων μεταπομπής παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τα τρέχοντα θέματα της έρευνας στα δίκτυα

αυτό-οργάνωσης [24] [25]. Κάθε NodeB(eNB) εξελεγμένου καθολικού επίγειου δικτύου ράδιο-πρόσβασης (evolved universal terrestrial radio access network ή E-UTRAN) διαθέτει μία λίστα NCL που περιλαμβάνει τα PCIs των γειτονικών κυψελών, με τα PCI να είναι βασικές και απαιτούμενες πληροφορίες για την διαδικασία της μεταπομπής. Η ακρίβεια της λίστας NCL επηρεάζει την απόδοση της μεταπομπής σημαντικά από την στιγμή που η μεταπομπή σε μία κυψέλη που δεν βρίσκεται μέσα στην NCL θα προκαλέσει την καθυστέρηση της μεταπομπής. Από την άλλη πλευρά, η συντήρηση των λανθασμένων πληροφοριών ανιχνευμένων κυψελών στα αποτελέσματα της λίστας NCL έχει ως αποτέλεσμα τα αυξημένα παράπλευρα κόστη στο σύστημα. Ως εκ τούτου, είναι επιθυμητή μια ακριβής διαμόρφωση και συντήρηση της αρχικής λίστας NCL.

Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών, η ενεργειακή αποδοτικότητα στα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, προσέλκυσε μεγάλη προσοχή στην έρευνα. Το ενδιαφέρον αυτό, προήλθε για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους. Από την πλευρά των παρόχων, ένας αποτελεσματικός τρόπος για την μείωση του κόστους λειτουργίας είναι μέσω της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, τα αυξανόμενα στοιχεία για την ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, οδηγεί στην έρευνα για ενεργειακά αποδοτικές λύσεις στην ασύρματη επικοινωνία.

3.2 Ερευνητικές Προκλήσεις

Με βάση τα μοντέλα που στο πλαίσιο της συγκεκριμένης πτυχιακής, καθώς και τις αναφορές σχετικά με τα πρότυπα και τις ιστορικές τάσεις, σε αυτή την ενότητα μπορούμε να στρέψουμε την προσοχή μας σε κάποιες από τις νέες προκλήσεις που προκύπτουν στην ανάπτυξη φεμτοκυψελών. Έτσι θα εστιάσουμε τόσο στα τεχνικά όσο και σε οικονομικά και ρυθμιστικά θέματα. Αναλυτικά οι ερευνητικές προκλήσεις παρουσιάζονται στην εργασία [33].

3.2.1 Τεχνικές Προκλήσεις

- 1) **Συντονισμός Παρεμβολής.** Ίσως η πιο σημαντική και ευρέως συζητηθείσα πρόκληση στην ανάπτυξη φεμτοκυψελών είναι η δυνατότητα ισχυρότερων, λιγότερο προβλέψιμων και πιο ποικίλων παρεμβολών. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν οι φεμτοκυψέλες έχουν αναπτυχθεί στο ίδιο φάσμα με εξωτερικά ασύρματα δίκτυα, αλλά μπορεί επίσης να προκύψει ακόμα και όταν οι φεμτοκυψέλες βρίσκονται σε διαφορετική, αλλά γειτονική ζώνη συχνοτήτων λόγω της out-of-band ακτινοβολίας, ιδιαίτερα σε πυκνές αναπτύξεις.
- 2) **Διασύνδεση κυψέλης και Πόλωση (Biasing).** Μια βασική πρόκληση σε ένα ετερογενές δίκτυο με μια ευρεία ποικιλία μεγεθών των κυψελών είναι η αντιστοίχιση των χρηστών στους κατάλληλους σταθμούς βάσης. Ο πιο προφανής τρόπος είναι να εκχωρείται κάθε χρήστης στον σταθμό βάσης με το ισχυρότερο σήμα. Ωστόσο, προσομοιώσεις και δοκιμές έχουν δείξει ότι μια τέτοια προσέγγιση δεν αυξάνει τη συνολική απόδοση ικανοποιητικά, επειδή πολλές από τις μικρές κυψέλες θα έχουν συνήθως λίγους ενεργούς χρήστες. Αυτό παρακινεί την πόλωση των χρηστών, σύμφωνα με την οποία οι χρήστες ωθούνται ενεργά σε μικρές κυψέλες. Η πόλωση των χρηστών είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη στα δίκτυα OFDMA, δεδομένου ότι ο πολωμένος χρήστης μπορεί να εκχωρεί πόρους στην μακροκυψέλη, έτσι ώστε οι παρεμβολές να είναι ανεκτές.
- 3) **Η κινητικότητα και ομαλή μεταπομπή.** Δεδομένου ότι η περιοχή κάλυψης μιας δεδομένης φεμτοκυψέλης είναι μικρή, είναι σημαντικό να μπορεί να

υποστηρίζει ανεπαίσθητες μεταπομπές από και προς τις φεμτοκυψέλες και να παρέχει συνεχή συνδεσιμότητα μέσα σε ένα δίκτυο ευρείας περιοχής. Σε αυτά τα σενάρια μεταπομπής περιλαμβάνονται φεμτο – μακρο (εξερχόμενη κινητικότητα), μακρο – φεμτο (εισερχόμενη κινητικότητα) και ενδεχομένως, φεμτο-σε-φεμτο . Με το τελευταίο να συμβαίνει σε αναπτύξεις επιχειρήσεων ή σε μεγάλους κοινόχρηστους χώρους.

- 4) **Δίκτυα αυτο-οργάνωσης.** Τα δίκτυα φεμτοκυψελών είναι μοναδικά στο γεγονός πως έχουν εγκατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από τους πελάτες ή ιδιωτικές επιχειρήσεις συχνά με έναν ad hoc τρόπο χωρίς την παραδοσιακή διαδικασία: σχεδιασμό RF, επιλογή τοποθεσίας, εγκατάσταση και συντήρηση από τον χειριστή. Επιπλέον, δεδομένου ότι ο αριθμός των φεμτοκυψελών αναμένεται να είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από των μακροκυψελών, η χειροκίνητη εγκατάσταση και συντήρηση του δικτύου απλά δεν είναι επεκτάσιμη με οικονομικά αποδοτικό τρόπο για μεγάλες αναπτύξεις φεμτοκυψελών. Οι φεμτοκυψέλες πρέπει να υποστηρίζουν ουσιαστικά την plug-and-play λειτουργία, με αυτόματη διαμόρφωση και προσαρμογή του δικτύου

3.2.2 Οικονομικά και ρυθμιστικά θέματα

Παρόλο που η ανάπτυξη των φεμτοκυψελών δεν ήταν τόσο μεγάλη όπως προβλέφθηκε από τις πιο αισιόδοξες αρχικές μελέτες της αγοράς, οι αρχικές πωλήσεις των φεμτοκυψελών ωστόσο ήταν εντυπωσιακές. Ακόμη και με αυτήν την αναμενόμενη επιτυχία, οι φεμτοκυψέλες θα εκπροσωπήσουν μόνο ένα πολύ μικρό μερίδιο της συνολικής αγοράς των κυψελών. Το αν οι φεμτοκυψέλες μπορούν να παίξουν κυρίαρχο ρόλο στην ανάπτυξη δικτύων δεν εξαρτάται μόνο από τις τεχνικές προκλήσεις που συζητήθηκαν παραπάνω, αλλά σε μια σειρά βασικών οικονομικών ερωτημάτων και ζητημάτων αγοράς.

- 1) **Υπόθεση Χειριστή Επιχείρησης (Operator Business Case).** Η βασική θεώρηση είναι ότι το κόστος της ίδιας της φεμτοκυψέλης σε μεγάλο βαθμό αντισταθμίζεται από την εξοικονόμηση πόρων από την εκφόρτωση κυκλοφορίας από τα μακροκυψελοειδή δίκτυα.
- 2) **Κίνητρα Συνδρομητή και ISP.** Με τις φεμτοκυψέλες, ο επιχειρηματίας δεν είναι ο μόνος παίκτης με οικονομικό ρίσκο στο δίκτυο: οι συνδρομητές και οι επιχειρήσεις, καθίστανται υπεύθυνοι για την εγκατάσταση των φεμτοκυψελών ενώ οι ιδιωτικοί ISPs παρέχουν το backhaul. Σε αντίθεση με τον πάροχο, τα οικονομικά κίνητρα για τις ομάδες αυτές είναι λιγότερο σαφή.
- 3) **Φεμτοκυψέλες εναντίον WiFi και Whitespace.** Οι φεμτοκυψέλες προσφέρουν μια πολύ διαφορετική προσέγγιση από αυτήν του WiFi και ιδιαίτερα του Whitespace. Οι φεμτοκυψέλες παρέχονται από φορείς διαχείρισης ασύρματων ως διαχειριζόμενη υπηρεσία σε σχέση με την υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας που προσφέρεται από το WiFi και ενδεχομένως από το Whitespace. Το Whitespace και το WiFi ανταγωνίζονται για το ασύρματο φάσμα του σπιτιού και ως εκ τούτου με συσκευές streaming βίντεο υψηλής ευκρίνειας σε πολλαπλές ζώνες, καθώς και με ασύρματα ηχεία, τηλεχειριστήρια και baby-monitors. Όλα αυτά κάνουν το σπίτι του μέλλοντος να έχει συμφόρηση στις ζώνες WiFi. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι πρόσφατες δοκιμές που συνδυάζουν τας ασύρματα μόντεμ WiFi και 3G έδειξε πως οι 2 αυτές τεχνολογίες θα μπορούσαν να συνδυαστεί για να επωφεληθούν αμφότερες με την περαιτέρω βελτίωση της ροής δεδομένων και τη συνολική αξιοπιστία. Με λίγα λόγια, βλέπουμε ότι το WiFi

και οι φεμτοκυψέλες μπορούν να λειτουργήσουν ως συμπληρωματικές προσεγγίσεις για τη μετακίνηση δεδομένων εκτός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και αναμένονται να είναι επιτυχείς στα στο μέλλον.

- 4) **Ρυθμιστικές πτυχές.** Οι φεμτοκυψέλες παρουσιάζουν πολλές μοναδικές ρυθμιστικές προκλήσεις, ιδίως επειδή ο διαχειριστής χάνει μερικό από τον άμεσο έλεγχο του σημείου πρόσβασης συγκριτικά με τον έλεγχο του σταθμού βάσης στα παραδοσιακά δίκτυα διαχείρισης μέσω διαχειριστή. Άλλα ρυθμιστικά θέματα αφορούν το φάσμα. Από την στιγμή που οι φεμτοκυψέλες μπορούν να συνυπάρξουν στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων με τις μακροκυψέλες, δεν υπάρχει ανάγκη για ειδική κράτηση φάσματος συχνοτήτων για τις φεμτοκυψέλες.

3.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Σε αυτο το κεφάλαιο θα γίνει μια βιβλιογραφική επισκόπηση μερικών από τους σημαντικότερους αλγόριθμους που υπάρχουν στην βιβλιογραφία σχετικά με την αναζήτηση κυψέλης, τις φεμτοκυψέλες και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Αρχικά παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις μελέτης, η πρώτη αφορά την κινητικότητα και την ανακάλυψη φεμτοκυψέλης μέσα στα δίκτυα 3G UMTS. Ενώ η δεύτερη αφορά έναν τον αλγόριθμο ενεργοποίησης/απενεργοποίησης σταθμού Βάσης με χρήση MIMO και χωρική διαμόρφωσης. Σημειώνεται εδώ πως η δεύτερη λύση μπορεί να εφαρμοστεί στο σύνολο των σταθμών βάσης (μακροκυψέλες, μικροκυψέλες, πικοκυψέλες και φεμτοκυψέλες). Ενώ μετέπειτα γίνεται συνοπτική επισκόπηση υπάρχουσων αλγόριθμων από την βιβλιογραφία που στόχευαν στα ακόλουθα ερευνητικά πεδία: α) μείωση της ευρύτερης πολυπλοκότητας του συστήματος β) επίτευξη ευρωστίας γ) ακύρωση παρεμβολών δ) ταχύτητα μετάδοσης/λήψης/αναζήτησης κυψέλης ε) καταπολέμηση της εξασθένησης και του θορύβου και ζ) ενεργειακή αποδοτικότητά.

3.3.1 Κινητικότητα και Ανακάλυψη φεμτοκυψέλης στα δίκτυα 3G UMTS

Βασική Ιδέα. Στην εργασία αυτή μελετάται ένα συγκεκριμένο μοντέλο συστήματος και προτείνονται δυο παραλλαγές για την αναζήτηση κυψέλης, η πρώτη βασίζεται στην περιοδική αναζήτηση κυψελών από τον χρηστη ενώ η δεύτερη βασίζεται στην εκπομπή ενός χαμηλής ισχύος beacon που επιτρέπει στους χρηστες να αναγνωρίζουν τις φεμτοκυψέλες. Περαιτέρω μελετάται και η ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων συστήματος από το κατώφλιο (CRB - Cell Reselection Beacon), για το καλύτερο διαχωρισμό των φεμτοκυψελών από τις μακροκυψέλες.

Μοντέλο Συστήματος. Πυκνή αστική γειτονιά, περίπου 200 x 200 μέτρα, που αποτελείται από οκτώ κτίρια, τέσσερα τριώροφα και τέσσερα πενταόροφα. Σε κάθε όροφο υπάρχουν 10 διαμερίσματα, έξι υπνοδωμάτια των 1250 τετρ. ποδιών και τέσσερα υπνοδωμάτια των 625 τετρ. ποδιών κάνοντας το συνολικό αριθμό των διαμερίσματα στη γειτονιά 320. Σχετικά με τις διαδρομές κινητικότητας χρησιμοποιούνται τρεις τύποι υπαίθριος, διάδρομου και διαμερίσματος με σκοπό να μοντελοποιηθούν τα μοτίβα κίνησης αδρανών UEs μέσα στη γειτονιά, μέσα στα κτίρια, και εντός των διαμερισμάτων. Ενώ υπάρχουν οι ακόλουθες παραδοχές προσομοίωσης, για ένα σενάριο ανάπτυξης δύο συχνοτήτων στην οποία υποτίθεται μία F1 συχνότητα η οποία μοιράζεται από τις μακροκυψέλες και τις φεμτοκυψέλες και μία συχνότητα F2 η οποία χρησιμοποιείται μόνο από τις μακροκυψέλες. Για τις δύο συχνότητες θεωρείται

ότι είναι γειτονικές με μία αναλογία παρεμβολής γειτονικών καναλιών (ACIR - Adjacent Channel Interference Ratio) των 33dB. Μια φεμτοκυψέλη είναι προσβάσιμη μόνο στον δικό της HUE (Home User Equipment), και όχι σε άλλους HUEs ή μακρο UEs (Mues). Για την ανάλυση αυτή, οι μακρο-NodeBs (MNBs) θεωρούνται να είναι κατά 50% φορτωμένοι πράγμα που σημαίνει ότι μεταδίδουν 50% της πλήρους ισχύος (δηλ 40dBm). Θεωρείται επίσης ότι το 10% της πλήρους ισχύος και για τα MNBs και τα HNBs. Η φεμτο-διείσδυση θεωρείται ότι είναι 5% στα άκρα της κυψέλης και 2,5% μέσα στην κυψέλη. Η επίδραση αποδυνάμωσης του σήματος επίσης προσομοιώνεται και προστίθεται στο μονοπάτι απώλειας. Η παράμετρος Qoffset έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε: α) Η F1 συχνότητα να είναι ο πάροχος στρατοπέδευσης και β) Να δίνεται υψηλότερη προτεραιότητα στους HNBs από ότι στους MNBs όταν ένας UE είναι σε λειτουργία αδράνειας και εκτελεί επανεπιλογή κυψέλης.

Μέθοδος 1η: Βελτιστοποίηση Εξοπλισμού χρήστη. Μια λύση που μπορεί να εγγυηθεί την ανακάλυψη φεμτοκυψέλης χωρίς να προκαλεί υπερβολική αναζήτηση κυψέλης είναι η ενίσχυση των UEs, με την οποία ένας UE εκτελεί περιοδικές αναζητήσεις μεταξύ-συχνοτήτων (interfrequency) κάθε λίγα λεπτά (π.χ., κάθε δύο έως πέντε λεπτά) ανεξάρτητα από την ποιότητα της κυψέλης εξυπηρετητή. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει πολύ καλή απόδοση ανακάλυψης φεμτοκυψέλης χωρίς την δημιουργία ανάγκης για αύξηση της ρύθμισης του μάκρο-Sintersearch. Μόλις ο UE βρίσκει μία φεμτοκυψέλη στην άλλη συχνότητα και η τιμή του CPICH Ec/Io είναι υψηλότερη από -12dB, ο UE θα επιχειρήσει να εφαρμόσει επανεπιλογή κυψέλης προς την νέα φεμτοκυψέλη.

Πλεονεκτήματα 1^{ης} Μεθόδου. Τα πλεονεκτήματα τις συγκεκριμένης μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

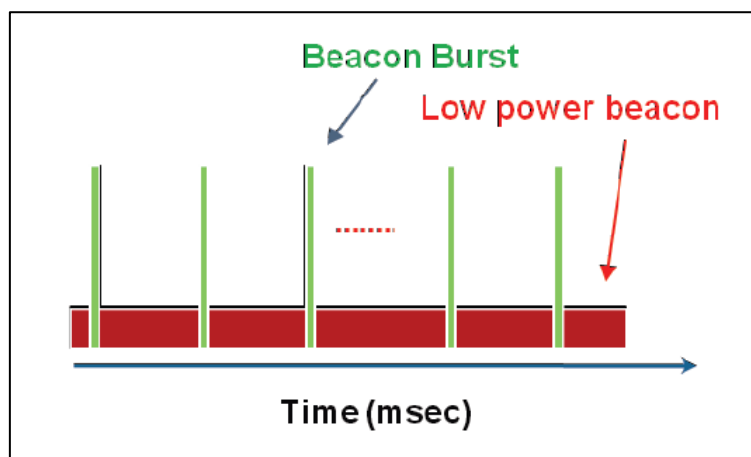
- Η απόδοση ανακάλυψης φεμτοκυψέλης των HUE έχει βελτιωθεί σημαντικά με την αργή αναζήτηση παρασκηνίου (SBS - Slow Background Search).
- Διευκόλυνση της ανακάλυψης φεμτοκυψέλης χωρίς να απαιτείται υψηλό μακρο-Sintersearch
- Ανίχνευση φεμτοκυψελών εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος

Μειονεκτήματα 1^{ης} Μεθόδου. Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος έχει και μειονεκτήματα που μπορούν να αποτυπωθούν παρακάτω:

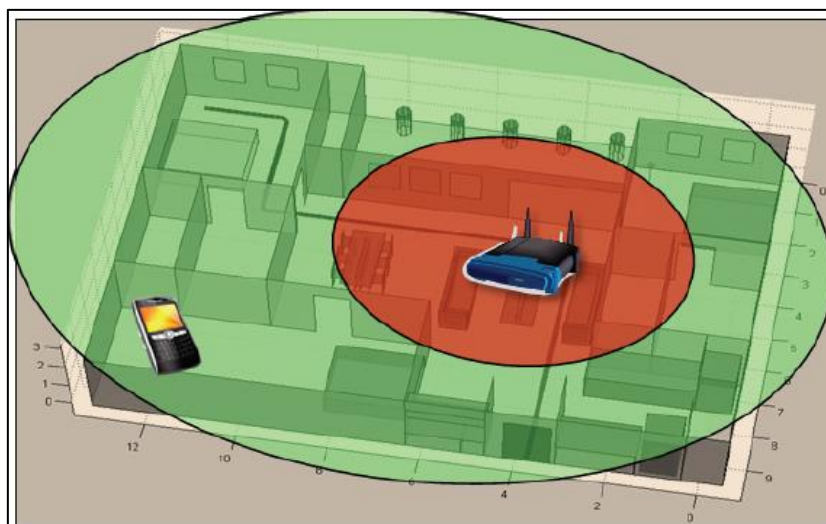
- Εάν η τιμή του Sintersearch είναι χαμηλή, ένας UE ο οποίος φθάνει σπίτι θα έχει δυσκολία να βρει τη δική του φεμτοκυψέλη στην άλλη συχνότητα. Έτσι αυτή πρέπει να είναι 12dB ή παραπάνω, έτσι ώστε να είναι εγγυημένη η ανακάλυψη της φεμτο-συχνότητας.
- Ισχύει μόνο για τους μελλοντικούς UEs και δεν λύνει το ζήτημα ανακάλυψης φεμτοκυψέλης για τα υπάρχοντα UEs.
- Οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση στην πλευρά του χρηστη καθώς ο χρηστης ψάχνει για κυψέλες περιοδικά

Μέθοδος 2η: Beacon Επανεπιλογής. Για να διευκολυνθεί η ανακάλυψη φεμτοκυψέλης χωρίς αύξηση του ορίου Sintersearch, η φεμτοκυψέλη μεταδίδει ένα σήμα φάρο στην συχνότητα μακροκυψέλης, η οποία μειώνει την CPICH Ec / Io της μακροκυψέλης έτσι ώστε να είναι χαμηλότερη από ό,τι η τιμή: Qqualmin + Sintersearch.

Έτσι ο UE θα εκτελέσει αναζήτηση κυψέλης μεταξύ συχνοτήτων, όταν σηματοδοτηθεί από τον φάρο, ακόμη και με χαμηλό Sintersearch (π.χ., 2dB). Λόγω του γεγονότος ότι από το φάρο μπορούν επίσης να προκληθούν παρεμβολές σε κοντινά MUEs, προτείνεται μία σχεδίαση beacon πολλαπλών επιπέδων όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Στον περισσότερο χρόνο, η φεμτοκυψέλη μεταδίδει με ένα φάρο χαμηλής ισχύος αλλά για μία μικρή χρονική στιγμή (μερικά msec) ανά διαστήματα ο beacon εκπέμπει σε υψηλότερη ισχύ. Ο beacon χαμηλής ισχύος εγγυάται πολύ γρήγορη επανεπιλογή κυψέλης σε φεμτοκυψέλη, όταν ο UE είναι σε πολύ κοντινή γειτνίαση από την φεμτο-συχνότητα (π.χ., εντός 45dB), ενώ ο beacon υψηλής ισχύος έχει ως στόχο την κάλυψη του συνόλου του διαμερίσματος/κατοικίας, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 18



Εικόνα 13. Σχεδιασμός πολυεπίπεδου beacon



Εικόνα 14. Απεικόνιση της περιοχής κάλυψης ενός πολυεπίπεδου beacon

Πλεονεκτήματα 2^{ης} Μεθόδου. Τα πλεονεκτήματα τις συγκεκριμένης μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Διευκόλυνση της ανακάλυψης φεμτοκυψέλης χωρίς να απαιτείται υψηλό μακρο-Sintersearch
- Δεν έχει καμία επίπτωση στην ποιότητα φωνής των μακρο-χρηστών

Μειονεκτήματα 2^{ης} Μεθόδου. Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος έχει και μειονεκτήματα που μπορούν να αποτυπωθούν παρακάτω:

- Το μοτίβο του beacon και η ισχύς μετάδοσης θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλή ανακάλυψη φεμτοκυψέλης ενώ ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές στους μακρο-χρήστες .
- Υπάρχουν μερικές σπάνιες περιπτώσεις, όπου ο UE πρέπει να περιμένει περίπου 5 λεπτά πριν επιτευχθεί επανεπιλογή σε φεμτοκυψέλη.
- Έχει μια μικρή επίπτωση στην απόδοση της HSDPA ροής δεδομένων των μακρο UEs στην περιοχή κάλυψης του beacon.

Βασικά Αποτελέσματα. Η εργασία ανέδειξε ως μια λύση για την αναζήτηση κυψελών, όπου ο UE να πραγματοποιεί περιοδικές δια-συχνοτικές αναζητήσεις μεταξύ συχνοτήτων ανεξαρτήτως του CPICH Ec / Io της κυψέλης-εξυπηρετητή και τις ρυθμίσεις Sintersearch. Αυτή η λύση λειτουργεί για τους μελλοντικούς UEs, αλλά αυτό δεν λύνει το ζήτημα ανακάλυψης φεμτοκυψέλης για τους υπάρχοντες UEs.

Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι η φεμτοκυψέλη να μεταδίδει σήματα beacon χαμηλής ισχύος σε μακρο-συχνότητα. Έχουμε προτείνει μια πολυεπίπεδη σχεδίαση beacon για την επίτευξη καλής ανακάλυψη φεμτοκυψέλης ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις παρεμβολές σε κοντινούς MUEs. Η εργαστηριακή εξέταση δείχνει ότι η προτεινόμενη λύση αυτής επιτρέπει την ανακάλυψη φεμτοκυψέλης χωρίς να χρειάζεται να αυξηθεί το Sintersearch. Επιπλέον, η προτεινόμενη λύση δεν έχει καμία επίπτωση στην ποιότητα φωνητικής κλήσης και έχει μικρή μόνο επίδραση στην ροή δεδομένων HSDPA των κοντινών UEs τα οποία βρίσκονται στην κάλυψη του beacon. Αυτό καθιστά τον φάρο επανεπιλογή κυψέλης μια αποτελεσματική τεχνική για την επίλυση του ζητήματος της ανακάλυψης φεμτοκυψέλης για τα υπάρχοντα UE, χωρίς αλλαγή της υφιστάμενης Sintersearch παραμέτρου του μακρο-δικτύου.

3.3.2 Αλγόριθμος Ενεργοποίησης/Απενεργοποίησης Σταθμού Βάσης με χρήση MIMO και Χωρικής Διαμόρφωσης

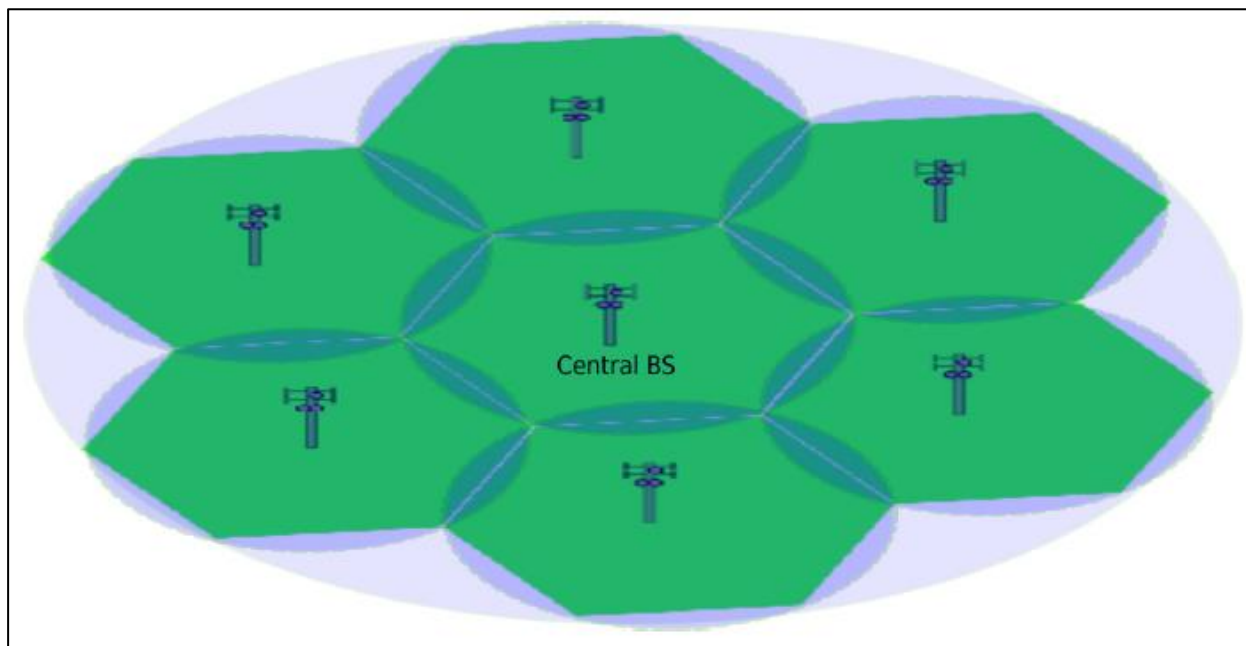
Βασική Ιδέα. Στην εργασία [22] προτείνεται ένας πρωτότυπος αλγόριθμος ανοίγματος – κλεισίματος του σταθμού βάσης προσαρμοστικού ρυθμού, το οποίο εφαρμόζει χωρική διαμόρφωση και τυπική MIMO. Σε γενικές γραμμές, η έξυπνη χρήση των σταθμών βάσης γίνεται ολοένα και σημαντικότερη. Η συγκεκριμένη λύση που προτείνεται μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλούς και διαφορετικούς τύπους σταθμών βάσης όπως μακροκυψέλη, μικροκυψέλη, πικοκυψέλη και φεμτοκυψέλη. Οι συγγραφείς μελετούνε επίσης θέματα που σχετίζονται με την αναζήτηση κυψέλης σε δίκτυα φεμτοκυψελών

Μοντέλο Συστήματος. Θεωρεί μια συστάδα σταθμών βάσης και βασισμένο στο μέσο ρυθμό δεδομένων, ο αλγόριθμος διαλέγει το σχήμα με την μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα ανάμεσα στην χωρικής διαμόρφωση και στο MIMO με μοναδική πληροφορία την κατάσταση του καναλιού στον δέκτη (MIMO-CSIR). Με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας (σε bits/J), ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν με την μέθοδο τους τον σταθμό βάσης σε συνδυασμό με την εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών τρόπων μετάδοσής (χωρική διαμόρφωση ή MIMO-CSIR). Και στις δύο περιπτώσεις, διασφαλίζονται ότι τα τερματικά των χρηστών, δεν θα υποστούν

κάποια μείωση στην ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) και στην εργοδικής χωρητικότητα (ergodic capacity).

Το κυψελοειδές μοντέλο που προτείνουν μπορεί να φανεί στην παρακάτω εικόνα. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, μια αστική γεωγραφική περιοχή φιλοξενεί 7 σταθμούς βάσης με απόσταση θέσεων d_{is} και ακτίνα κυψέλης $d_{c,r}$. Επικεντρώνοντας στην κατερχόμενη ζεύξη μπορούμε να υποθέσουμε ότι κάθε σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με N_t κεραιές και κάθε ένα από τα K τερματικά των χρηστών, είναι εφοδιασμένα με N_r κεραιές. Με σκοπό τον σχηματισμό ενός συστήματος πολλαπλών χρηστών, εφαρμόζεται TDMA, όπου σε κάθε χρονοθυρίδα, ένα τερματικό εξυπηρετείται από ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης που στοχεύει να παρέχει τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων.

Εκτός από την φασματική απόδοση και την ποιότητα υπηρεσιών που προσφέρεται από την ομοιόμορφη κατανομή των τερματικών στο δίκτυο, σημαντικό ενδιαφέρον προσδίδεται και στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Πιο συγκεκριμένα ο τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι μέσω του ανοίγματος – κλεισίματος των σταθμών βάσης σε συνδυασμό με ευφυές προσαρμοστικό σύστημα MIMO. Έτσι, γίνεται θεώρηση πως όλοι οι σταθμοί βάσης είναι συνδεδεμένοι με μία επεξεργαστική μονάδα η οποία αποφασίζει εάν ένας σταθμός βάσης είναι ενεργός ή όχι, ανάλογα με την κίνηση του δικτύου. Κάθε σταθμός βάσης έχει την δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ διαφορετικών τρόπων μετάδοσης μέσω της ενεργοποίησης του συνόλου των ραδιοσυχνοτήτων ή κρατώντας ανοικτά μόνο μια αλυσίδα ραδιοσυχνοτήτων (RF chain). Όταν χρησιμοποιούνται όλες οι ραδιοσυχνότητες, τότε ο τρόπος μετάδοσης είναι ο MIMO-CSIR. Ενώ όταν χρησιμοποιείται μόνο μία αλυσίδα ραδιοσυχνοτήτων τότε η μετάδοση γίνεται είτε μέσω χωρικής διαμόρφωσης είτε με SIMO (Single-Input Multiple-Output)



Εικόνα 15. Το προτεινόμενο μοντέλο του κυψελοειδούς συστήματος [22]

Αναλυτικά τα στάδια του Αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

- Στάδιο 1ο: Όταν η απαιτούμενη ταχύτητα δεδομένων είναι χαμηλή, μόνο ο κεντρικός σταθμός βάσης ενεργοποιείται μέσω χωρική διαμόρφωσης.
- Στάδιο 2ο: Όταν η απαιτούμενη ταχύτητα δεδομένων αυξάνεται και δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω χωρικής διαμόρφωσης, το σύστημα αναμετάδοσης του κεντρικού σταθμού βάσης αλλάζει σε MIMO – CSIR.
- Στάδιο 3ο: Όταν η απαιτούμενη ταχύτητα αυξάνεται περαιτέρω, και δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω του σταθμού βάσης, όλοι οι σταθμοί βάσης ενεργοποιούνται με χωρική διαμόρφωση.
- Στάδιο 4ο: Όταν η απαιτούμενη ταχύτητα πιάσει το μέγιστο, τότε όλοι οι σταθμοί βάσης ενεργοποιούνται με χρήση του MIMO – CSIR.

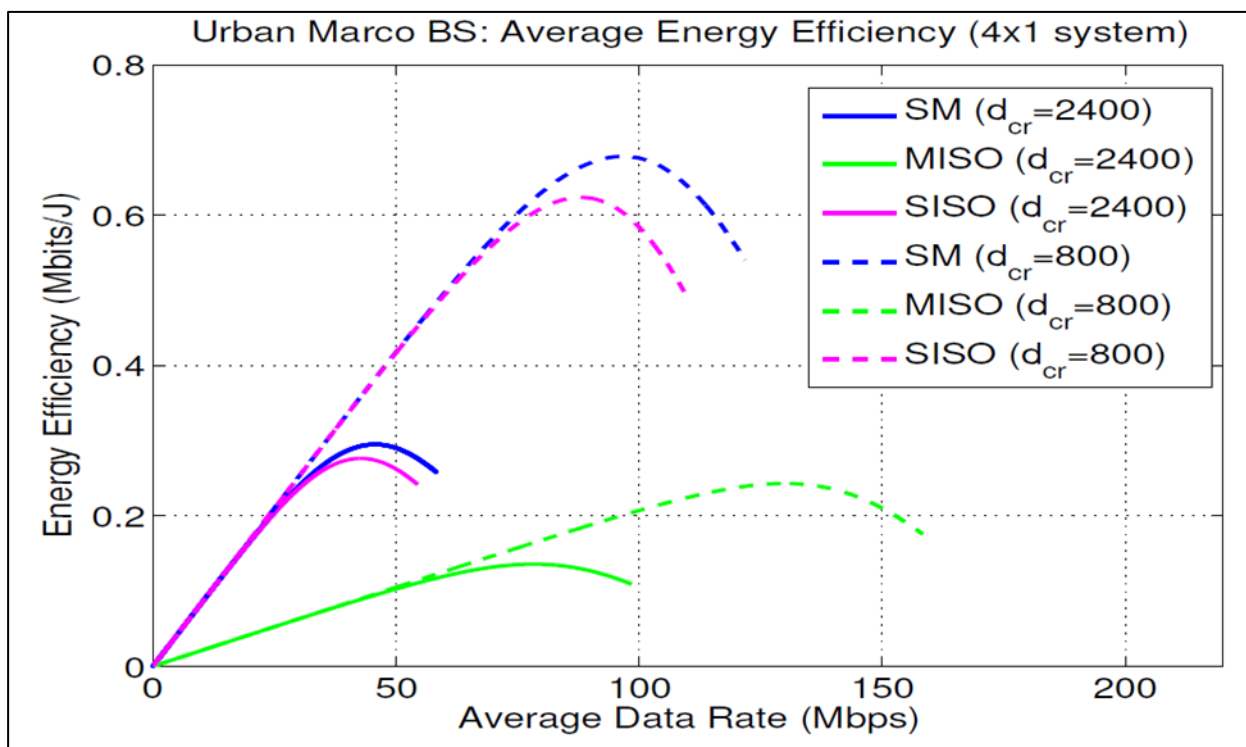
Το βασικό κίνητρο πίσω από το πρώτο στάδιο είναι ότι η γεωγραφική περιοχή που πρέπει να καλυφθεί από το κυψελοειδές δίκτυο εξυπηρετείται από τον κεντρικό σταθμό βάσης μέσω του ενεργειακά αποδοτικού σχήματος της χωρικής διαμόρφωσης. Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται MIMO-CSIR στον κεντρικό σταθμό βάσης ωστόσο επιτυγχάνεται μειωμένη ενέργεια καθώς δεν ενεργοποιούνται όλοι οι σταθμοί βάσης. Όταν ο κεντρικός σταθμός βάσης δεν είναι σε θέση να πετύχει τον επιθυμητό ρυθμό

δεδομένων, τότε όλοι οι σταθμοί ενεργοποιούνται μέσω της χωρικής διαμόρφωσης που είναι πιο ενεργειακά αποδοτική σε σχέση με το MIMO-CSIR. Τελικά αν δεν μπορεί να εξυπηρετήσει με την υπάρχουσα ταχύτητα, τότε όλοι οι σταθμοί βάσης ενεργοποιούνται με MIMO-CSIR.

Πλεονεκτήματα. Μέσω της χρήσης του θεμελιώδους ορίου της χωρητικότητας του Shannon και την ισχύ ενός σταθμού βάσης, αποδεικνύεται πως η χρήση της χωρικής διαμόρφωσης, σε έναν τέτοιο αλγόριθμο, προσφέρει σημαντικές βελτιστοποιήσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Με βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας, ανάλογα και με την χρήση των μέσων απαιτούμενων δεδομένων, ο αλγόριθμος μας επιτυγχάνει την ίδια ή καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα σε σύγκριση με τα χρησιμοποιούμενα συστήματα αναφοράς.

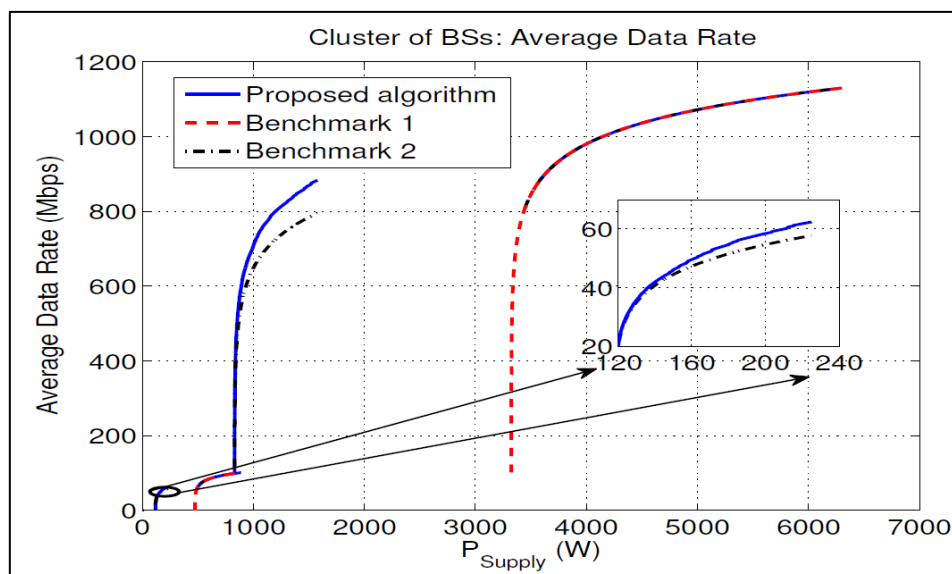
Μειονεκτήματα. Παρόλο που η διακυψελική παρεμβολή είναι έναν ένας περιοριστικός παράγοντας για τα κυψελοειδή δίκτυα, στην εργασία τους θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει μεταξύ των διαφορετικών κυψελών.

Βασικά Αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα η χωρική διαμόρφωση, προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα μεταξύ των παρουσιαζόμενων σχημάτων αναμετάδοσης. Επίσης παρατηρείται πως καθώς η ακτίνα των κυψελών μειώνεται, τότε η μέγιστη ενεργειακή αποδοτικότητα αυξάνεται ταχέως, λόγω της λιγότερο αυστηρής επίδρασης της απώλειας του καναλιού. Ως εκ τούτου, αναμένετε πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος θα ξεπεράσει σε απόδοση κάθε άλλο παρόμοιο σύστημα το οποίο δεν εφαρμόζει χωρική διαμόρφωση.



Εικόνα 16. Μέση ρυθμαπόδοση σε σχέση με την ενεργειακή αποδοτικότητα για έναν αστικό μακρο-σταθμό βάσης με διαφορετικές ακτίνες.

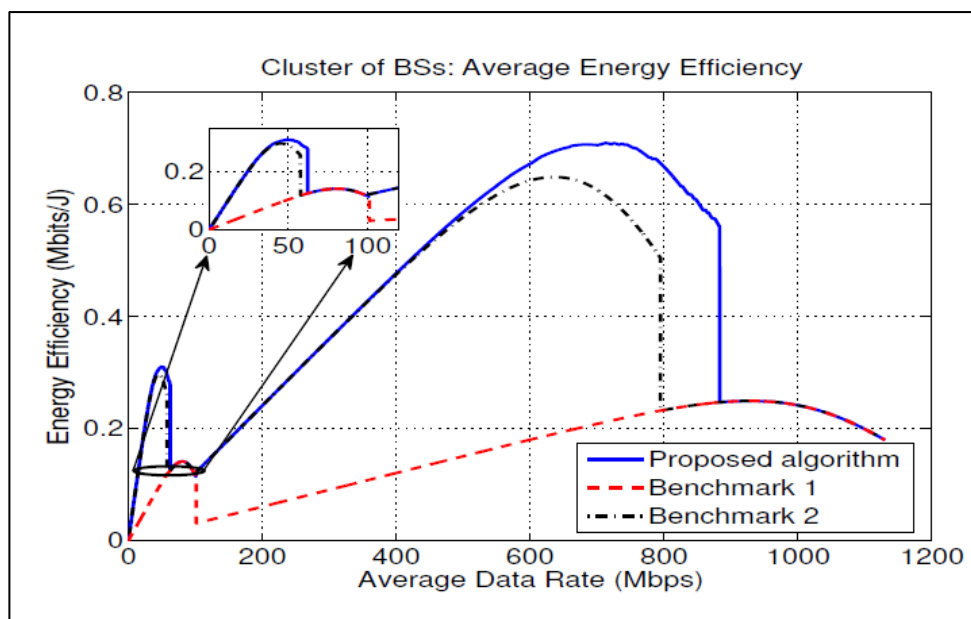
Επίσης στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως ο αλγόριθμος τους είναι σε θέση να προσφέρει την ίδια ρυθμαπόδοση με τα αντίστοιχα συστήματα, με περίπου την ίδια τροφοδοσία. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει σημαντικά την κατανάλωση του κυψελοειδούς δικτύου, όταν ο τρόπος μετάδοσης είναι η χωρική διαμόρφωση. Όταν η μετάδοση αλλάζει σε MISO-CSIR, τότε ο αλγόριθμος καταναλώνει όσο και τα υπάρχοντα συστήματα.



Εικόνα 17. Τροφοδοσία συναρτήσει του μέσου ρυθμού δεδομένων

Επιπρόσθετα, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σύγκριση του αλγορίθμου με άλλα συστήματα αναφοράς. Ο νέος αλγόριθμος επιτυγχάνει μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα, για μια περιοχή ρυθμών δεδομένων. Αυτό οφείλεται από το γεγονός πως ο αλγόριθμος επωφελείται από την απλή αναμετάδοση ραδιοσυχνοτήτων στην

χωρική διαμόρφωση. Επιπλέον, παρατηρείται πως όταν ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται, η ενεργειακή αποδοτικότητα του κυψελοειδούς συστήματος μεγιστοποιείται σε δύο σημεία: α) Σε περίπου 50 Mbps, όταν μόνο ο κεντρικός σταθμός βάσης είναι ενεργός και β) κατά περίπου 750 Mbps, όταν όλοι οι σταθμοί βάσης είναι ενεργοί. Αυτή η παρατήρηση υπογραμμίζει πως ο σύνθετος χρονοπρογραμματισμός μπορεί να εφαρμοστεί μεταξύ των διαφορετικών σταθμών βάσης με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος. Μια τέτοια μελέτη, είναι εκτός του πεδίου μελέτης και μπορεί να ληφθεί υπόψιν σε μελλοντικές εργασίες.



Εικόνα 18. Μέσος ρυθμός δεδομένων συναρτήσει της ενεργειακής αποδοτικότητας

3.3.3 Συνοπτική περιγραφή υπάρχοντων αλγορίθμων στην βιβλιογραφία

Στην εργασία [24] παρουσιάστηκε μια μέθοδος για την αναζήτηση κυψέλης στο LTE και LTE-Advanced με αρκετά μειωμένη πολυπλοκότητα. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της ανίχνευσης της διαμόρφωσης του κυκλικού προθέματος (CP – Cyclic prefix) στο πεδίο του χρόνου, είναι δυνατόν να μειωθούν τόσο οι διασυμβολικές παρεμβολές (ISI – Inter Symbolic Interference) όσο και οι παρεμβολές μεταξύ των φερουσών (ICI – Inter Carrier Interference), πρωτύτερα της αναγνώρισης των σημάτων συγχρονισμού που αφορούν αποκλειστικά την διαδικασία εύρεσης κυψέλης. Έτσι η αναγνώριση των σημάτων συγχρονισμού εκτελείται αποτελεσματικά στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ η πολυπλοκότητα του συστήματος μειώνεται, καθώς η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελαχιστοποιεί την αναγκαιότητα των προσαρμοζόμενων φίλτρων. Τα αποτελέσματα της έρευνας τους δείχνουν πως η διαδικασία εύρεσης κυψέλης επιτυγχάνεται διατηρώντας παράλληλα τον χρόνο αναζήτησης κυψέλης σε 3-5 ραδιο-πλαίσια.

Μια άλλη εργασία χαμηλής πολυπλοκότητας [25] έχει παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία με χαρακτηριστικά ευρωστίας. Σε σχέση με την κλασσική μέθοδο, όπου αξιοποιούνται οι ανιχνευτές αυτόματης συνεκτικότητας (auto coherent detectors) και η πολλαπλή συσχέτιση (cross correlation), ο αλγόριθμος τους χρησιμοποιεί μια μη-συνεκτική προσέγγιση (non - coherent) για τον υπολογισμό της αρχικής μετατόπισης συχνότητας. Ενώ παράλληλα, εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες των ακολουθιών Zadoff – Chu όπου η ανίχνευση της μέγιστης χρονικής στιγμής μετατοπίζεται κατά ένα μέγεθος συχνότητας. Έτσι, η ανίχνευση των σημάτων πρωτοβάθμιου συγχρονισμού θα μπορεί

να ευρεθεί ανεξαρτήτως της μετατόπισης συχνότητας στην διαδικασία της αναζήτησης κυψέλης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο που εισήγαγαν, παρουσιάζει ευρωστία, χαμηλότερη πολυπλοκότητα και αποτελεσματικότητα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους του LTE – Advanced.

Όπως είναι γνωστό, η αναζήτηση κυψέλης έχει συνήθως δύο λειτουργίες: α) η βασική – αρχική αναζήτηση κυψέλης και η κατάσταση ανεύρεσης/εντοπισμού. Η πρώτη έχει μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα ενώ η δεύτερη μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχει μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα έτσι ώστε να παρέχει αυξημένη χωρητικότητα μετάδοσης και λήψης. Στην εργασία [26] προτείνεται μια μέθοδος ακύρωσης παρεμβολών τόσο στην αρχική αναζήτηση κυψέλης όσο και στην κατάσταση ανεύρεσης/εντοπισμού. Μέσω της διαδικασίας της «ακύρωσης» των προ-ανιχνευθέντων καναλιών συγχρονισμού από τα ληφθέντα σήματα, η αποτελεσματικότητα της αναζήτησης βελτιώνεται για τις επόμενες κυψέλες – στόχους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν πως το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να προσφέρει βελτιωμένη απόδοση έναντι των συστημάτων που δεν χρησιμοποιούν ακύρωση παρεμβολών (interference cancelling). Καλύτερα αποτελέσματα παρατηρούνται για την δεύτερη κυψέλη που συνήθως είναι κρυπτόμενη στα σύγχρονα δίκτυα. Οι μικρές κυψέλες όπως αναμένεται θα χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την επίτευξη καλύτερης κάλυψης. Αυτό όμως θα μεγεθύνει την «ρύπανση» του συγχρονισμού των καναλιών. Ωστόσο, με την συγκεκριμένη μέθοδο παρουσιάζεται επίσης μια καλύτερη ανοχή.

Ακόμα όπως φαίνεται και στην έρευνα [27] είναι σημαντικό για τις κινητές συσκευές να χρησιμοποιούν αξιόπιστους και ισχυρούς αλγόριθμους για την αναζήτηση κυψέλης, δηλαδή τη διαδικασία για την ανίχνευση γειτονικών κυψελών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πιθανές υποψήφιες για μεταπομπή. Έτσι στην αυτή εργασία παρουσιάζεται μία καινοτόμα, χαμηλής πολυπλοκότητας, εύρωστη μεθοδολογία αναζήτησης κυψελών για δίκτυα LTE, καθώς γίνεται και σύγκριση με άλλες υπάρχουσες μεθόδους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μία non-coherent προσέγγιση και επομένως είναι ισχυρή κατά της εξάπλωσης Doppler και τις μετατοπίσεις φάσης λόγω στιγμιαίας αναντιστοιχίας του χρόνου δειγματοληψίας, η οποία την καθιστά κατάλληλη για χρήση σε συγχρονισμένα συστήματα LTE TDD, καθώς και σε σενάρια υψηλής ταχύτητας, όπως τρένα μεγάλης ταχύτητας.

Μία άλλη προσπάθεια έγινε από τους Liao κ.α. [28] για την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου αναζήτησης κυψέλης χαμηλής πολυπλοκότητας και αρχιτεκτονικής για το σήμα δευτεροβάθμιου συγχρονισμού σε συστήματα κατερχόμενη ζεύξης 3GPP LTE. Σε αυτήν την προσέγγιση, υπολογίστηκαν συσχετίσεις διαφορικού για την αφαίρεση συχνές ανεπιθύμητες παρενέργειες του καναλιού, έτσι ώστε δύο σύνολα σημάτων συγχρονισμού να μπορέσουν να συνδυαστούν γίνει ενίσχυση της ποιότητας ανίχνευσης. Για την επίτευξη χαμηλής πολυπλοκότητας, ακολουθήθηκε επίσης η κβαντοποίηση one-bit για την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των περιορισμένων offset στους δείκτες των δύο αλληλουχιών μέγιστου μήκους. Η αριθμητική πολυπλοκότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου της έρευνας είναι μειωμένη σημαντικά επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα παρόμοια απόδοση ανίχνευσης σε συγκρίσιμη με τους συμβατικούς αλγόριθμους.

Η γρήγορη αναγνώριση και ακριβής μέτρηση των πολλαπλών κυψελών που περιβάλλουν τον εξοπλισμό χρήστη (UE) είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση της κινητικότητας και του QoS των τελικών χρηστών. Στα συστήματα LTE και LTE-A, πολλαπλών κυψελών συχνά συγχρονίζονται με βάση τον χρόνο ή ακανόνιστη περιοδικότητα με αποτέλεσμα οι αδύναμες κυψέλες που επισκιάζονται από μία ισχυρή κύτταρα είναι δύσκολο να ανιχνευτούν. Έτσι στην μελέτη [29], παρουσιάζεται μια νέα

μέθοδος αναζήτησης και μέτρησης κυψέλης στην οποία η διασυσχέτισης (π.χ. των σημάτων συγχρονισμού) αξιοποιείται εκτενώς. Η βασική ιδέα είναι ότι η μετρική αναγνώρισης κυψέλης τροποποιείται ανάλογα με τη διασυσχέτιση μεταξύ της παρεμβαλλόμενης κυψέλης και της κυψέλης που πρόκειται να αναγνωρισθεί και / ή της ισχύς του σήματος των παρεμβαλλόμενων κυψελών έτσι ώστε ο αντίκτυπος του παρεμβολέα να καταστέλλεται. Ακόμα η ανάλυση και η προσομοίωση δείχνουν ότι η μέθοδος της έρευνας αυτής είναι απλή για στην εφαρμογή και ισχυρή ενάντια αναντιστοιχία παραμέτρων, την διακύμανση του καναλιού και την εξασθένηση του RF.

Η αναζήτηση και η ανεύρεση των γειτονικών κυψελών, είναι μια αρκετά σημαντική διαδικασία για την διαχείριση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, την μεταβίβαση και τον σταθμό βάσης. Στην έρευνα [18] παρουσιάζεται ένα γενικό πλαίσιο για την αναζήτηση γειτονικής κυψέλης (NCS – Neighboring Cell Search) στα LTE συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, αντλούνται επαρκείς μετρήσεις σήματος για αναζητήσεις γειτονικής κυψέλης, για διάφορες συνθήκες καναλιών και αναπτύσσονται αντίστοιχοι αλγόριθμοι για πολλαπλές παρατηρήσεις στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί στατιστικά μοντέλα για την αναζήτηση γειτονικής κυψέλης με ανάλυση πιθανοτήτων. Η απόδοση των αλγορίθμων, χαρακτηρίζεται από την άποψη του αριθμού των ανιχνευόμενων κυψελών, των πιθανοτήτων της ανίχνευσης κυψέλης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που διεξήγαγαν επιβεβαιώνει την αποδοτικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων.

Στην εργασία [30] παρουσιάζεται ένα σύστημα βασικής αναζήτησης κυψέλης στο LTE συστήματα που περιέχει δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, προτείνεται μια τροποποιημένη ανίχνευση εξομάλυνσης του πρωτεύοντος σήματος συγχρονισμού για την αντιμετώπιση της μετατόπισης της συχνότητας των φερουσών, των παρεμβολών ανερχόμενης ζεύξης. Μετά την εκτίμηση της τροποποιημένης ανίχνευσης εξομάλυνσης και την αντιστάθμιση, μια συνεκτική ανεύρεση του δευτερεύοντος σήματος συγχρονισμού υιοθετείται στο πεδίο των συχνοτήτων. Επιπλέον για την καταπολέμηση της εξασθένησης (fading) του καναλιού και του θορύβου, προτείνεται μια μέθοδος για τον δυναμικό συνδυασμό πρωτεύοντος και δευτερεύοντος σημάτων συγχρονισμού με πολλαπλά πλαίσια. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι πιο εύρωστη και αποτελεσματικής σε σχέση με τις υπάρχοντες συμβατικές προσεγγίσεις.

Η συνολική απόδοση του συγχρονισμού κυριαρχείται σε μεγάλο βαθμό από την εύρωστη εύρεση του πρωτεύοντος σήματος συγχρονισμού, που μπορεί να επιτευχθεί στον συμβατικό ανιχνευτή μη συνεκτικότητας μέσω της αυτό-συσχέτισης και της διασυσχέτισης των Zadoff-Chu ακολουθιών. Ωστόσο στους υπάρχοντες συμβατικούς αλγορίθμους, παρατηρείται μια σχετικά υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στην εργασία [31] εισηγούνται δύο νέοι ανιχνευτές σχεδόν ημίσειας πολυπλοκότητας (AHC – Almost Half-Complexity) και κεντρικής αυτοσυσχέτισης (CSC – Central Self Correlation) για την επίτευξη αξιόπιστης ανίχνευσης του πρωτεύοντος σήματος συγχρονισμού με αρκετά χαμηλότερη πολυπλοκότητα μέσω της αξιοποίησης της κεντρικής – συμμετρικής ιδιότητας των Zadoff – Chu ακολουθιών. Η πολυπλοκότητα του CSC ανιχνευτή μειώνεται σε 50% σε σχέση με τον AHC, επιτυγχάνοντας ακριβώς την ίδια ανίχνευση του πρωτεύοντος σήματος συγχρονισμού. Επίσης προτείνεται μια βελτίωση του CSC ανιχνευτή η CSCIns για την καταπολέμηση της μεγάλης μετατόπισης της συχνότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως με τον ανιχνευτή CSCIns το 90% του πρωτεύοντος σήματος συγχρονισμού μπορεί να επιτευχθεί εντός της διάρκειας των 80 ms ακόμα και για ένα περιβάλλον υψηλών δια-κυψελωδών παρεμβολών με SNR = - 10 db.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα δίκτυα των τηλεπικοινωνιών εξελίχθηκαν ραγδαίως τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα να δημιουργήσουν απαιτητικές ανάγκες για αποδοτικούς αλγορίθμους. Αυτό οφείλονταν στο γεγονός πως υπήρξε μια επανάσταση δεδομένων από συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Οι χρήστες χρησιμοποιούν πλέον υπηρεσίες που ξεπερνούν κατά πολύ την φωνητική λειτουργία. Σε αυτό συνέβαλαν και οι υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης πτυχιακής αναλύθηκαν εκτενώς τα υπάρχοντα δίκτυα τηλεπικοινωνιών και πιο συγκεκριμένα το LTE και το LTE-Advanced, καθώς και η διαδικασία της αναζήτησης κυψέλης. Αυτά τα δίκτυα δημιουργήθηκαν με σκοπό να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις που παρουσιάστηκαν και αποτελούν την λεγόμενη 4^η γενιά των ασύρματων συστημάτων. Η ανάπτυξη τους προήλθε από την μια σειρά συστάσεων που ονομαζόταν IMT-Advanced, για την υποστήριξη ευρέως φάσματος ανταλλαγής δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες. Κατά την ανάλυση των LTE παρουσιάστηκαν μερικές από τις κυριότερες τεχνολογίες που τις διέπουν όπως: OFDM, MIMO και η κωδικοποίηση TURBO. Επίσης υπήρξε ειδική αναφορά στις διαφορετικές εκδόσεις του LTE από την έκδοση 8 έως τις μεταγενέστερες εκδόσεις του 12.

Σχετικά με το δίκτυο LTE-Advanced υπήρξε εις βάθος ανάλυση των χαρακτηριστικών του όπως η συνάθροιση των φερουσών, η βελτιωμένη υποστήριξη πολλαπλών κεραιών, η βελτιωμένη υποστήριξη ετερογενών αναπτύξεων, οι τρόποι αναμετάδοσης καθώς και η ενεργειακή αποδοτικότητα. Το τελευταίο θέμα της ενεργειακής αποδοτικότητας είναι ένα από τα πιο κρίσιμα κεφάλαια του τομέα των τηλεπικοινωνιών. Η αύξηση του ρυθμού των δεδομένων έρχεται με παράλληλη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι πάροχοι, αλλά και οι χρήστες επιζητούν την όσο το δυνατόν χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να αναπτυχθούν μια σειρά από νέους αλγόριθμους με στόχο την μεγιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Έτσι αναπτύχθηκαν δομές, οι οποίες συχνά ήταν πολύ-επίπεδες, μεταξύ μακροκυψελών και φεμτοκυψελών με μικρότερη απαίτηση για ενέργεια μετάδοσης, διατηρώντας όμως την υπάρχουσα ποιότητα υπηρεσιών.

Οι φεμτοκυψέλες που στην πράξη είναι μικρότερες σε μέγεθος μακροκυψέλες, ανακαλύφθηκαν με σκοπό να καλύψουν την ανάγκη για μια καλύτερη κυψελοειδής κάλυψη για οικιακή (και όχι μόνο) χρήση. Εισήχθησαν οι έννοιες της φεμτοκυψέλης και των δικτύων που αυτές συγκροτούν. Η προηγμένη δυνατότητα τους για αυτό-διαμόρφωση και αυτό-βελτιστοποίηση επέτρεψε την ανάπτυξη των φεμτοκυψελών, καθώς παρείχαν έναν ευέλικτο τρόπο ενσωμάτωσης σε υπάρχοντα μακροκυψελοειδή δίκτυα.

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύονται οι φεμτοκυψέλες, τα χαρακτηριστικά τους, οι τεχνολογίες που τις διέπουν, ενώ παρουσιάστηκαν και οι τρόποι με τους οποίους μια κυψέλη συντονίζεται και συγχρονίζεται με γειτονικούς κυψελοειδείς σταθμούς βάσης. Επιπλέον παρουσιάστηκαν οι μεθοδολογίες για την διαχείριση και την μέτρηση μεταπομπών, την διαχείριση κινητικότητας, την αναγνώριση κυψέλης, την διαχείριση παρεμβολών, τον έλεγχο πρόσβασης και την επιλογή/επανεπιλογή κυψέλης. Τελικά, παρουσιάστηκαν σχετικοί αλγόριθμοι αναζήτησης κυψέλης στα δίκτυα φεμτοκυψελών.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν δύο περιπτώσεις προς μελέτη (study cases), ενώ έγινε συνοπτική περιγραφή επιπλέον υπάρχοντων αλγορίθμων στην βιβλιογραφία. Βασικοί στόχοι των αλγορίθμων αυτών ήταν: α) η μείωση της ευρύτερης πολυπλοκότητας του συστήματος β) Η επίτευξη ευρωστίας γ) η ακύρωση παρεμβολών δ) η ταχύτητα μετάδοσης/λήψης/αναζήτησης κυψέλης ε) η καταπολέμηση της εξασθένησης και του θορύβου και ζ) η ενεργειακή αποδοτικότητά. Σημειώνεται εδώ πως σε όλες τις περιπτώσεις διατηρείται η ποιότητα παροχής υπηρεσιών.

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

3GPP2	Third Generation Partnership Project 2
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AHC	Almost Half-Complexity
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCH	Broadcast Control Channel
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CGI	Cell Global Identifiers
CoMP	Coordination Multi-Point
CP	Cyclic Prefix
CRB	Cell Reselection Beacon
CSC	Central Self Correlation
CSG	Closed Subscriber Group
CSI	Channel State Information
D2D	Device 2 Device
DL	Downlink
DRX	Discontinuous Reception
ECGI	E-Utran Cell Global Identifier
EDGE	Enhanced Data Rates For Global Evolution
ENBs	Enhanced Node B
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EV-DO	Evolved Voice Data Only
EV-DV	Evolved Data And Voice
FAP	Femtocell Access Point
FLOPS	Floating Point Operations Per Second
FSTD	Frequency Shift Time Diversity
GPRS	Generalized Packet Radio Service
GSM	Global System For Mobile Communications
GW	Gateway
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request

HCS	Hierarchical Cell Structure
HeNB	Home Enhanced Node B
HO	Handover
HUE	Home User Equipment
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
ICI	Inter Carrier Interference
ICIC	Intercell Interference Coordination
IMT	International Mobile Telecommunications
IS-54	Interim Standard 54
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
MBSFN	Multicast Broadcast Single Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MIPS	Million Instructions Per Second
MM	Movement Management
MTC	Machine Type Communications
NCL	Neighbor Cell List
NCS	Neighboring Cell Search
OAM	Operation Administration
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PCI	Physical Cell Identities
PLMN	Public Land Mobile Network
PSK	Phase Shift Keying
PSS	Primary Synchronization Signal
PTP	Precision Time Protocol
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoE	Quality Of Experience
QoS	Quality Of Service
RBSs	Radio Base Stations
RF	Radio Frequency

RS	Reference Signals
RSRP	Reference Symbol Received Power
SBS	Slow Background Search
SC	Strongest Cell
SFBC	Space Frequency Block Coding
SIB	System Information Block
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal-To-Interference-Plus-Noise Ratio
SSS	Secondary Synchronization Signal
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UCLA	University of California, Los Angeles
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMANs	Wireless Metropolitan Area Networks
IEEE	Institute Of Electrical And Electronic Engineers
MME	Mobility Management Entity
TA	Tracking Areas

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] H. Zarrinkoub, Understanding LTE with Matlab, Massachusetts: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] D. Astely, E. Dahlman, G. Fodor, S. Parkvall, J. Sachs, "LTE release 12 and beyond [Accepted From Open Call]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 7, pp. 154-160, July 2013
- [3] S. Parkvall, A. Furuskar, E. Dahlman, "Evolution of LTE toward IMT-advanced," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 2, pp. 84-91, February 2011
- [4] Tao Chen, Yang Yang, Honggang Zhang, Haesik Kim, K. Horneman, "Network energy saving technologies for green wireless access networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 5, pp. 30-38, October 2011
- [5] C. Zhang, S. L. Ariyavisitakul, M. Tao, "LTE-Advanced and 4G wireless communications: Part 2," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 6, pp. 26-26, June 2012
- [6] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, 4G – LTE/LTEAdvanced for Mobile Broadband, *Academic Press*, 2011.
- [7] A.C. Stocker, "Small-cell mobile phone systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 33, no. 4, pp. 269-275, Nov. 1984
- [8] T. S. Rappaport, R. A. Brickhouse, "A simulation study of urban in-building cellular frequency reuse," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 1, pp. 19-23, Feb 1997
- [9] Pi Zhouyue, F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, June 2011
- [10] H. Claussen, "Performance of Macro- and Co-Channel Femtocells in a Hierarchical Cell Structure," *IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. 18th International*, pp. 1-5, 3-7 Sept. 2007
- [11] D. Das, V. Ramaswamy, "On the Reverse Link Capacity of a CDMA Network of Femto-cells," *IEEE in Sarnoff Symposium, 2008*, pp. 1-5, 28-30 April 2008
- [12] Su Huan, Kuang Linling, Lu Jianhua, "Interference avoidance in OFDMA-based femtocell network," *IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunication, 2009. YC-ICT '09.*, pp. 126-129, 20-21 Sept. 2009
- [13] Sungwon Lee, "An Enhanced IEEE 1588 Time Synchronization Algorithm for Asymmetric Communication Link using Block Burst Transmission," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 9, pp. 687-689, September 2008
- [14] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhariyal, N. Johnson, B. Raghothaman, A. Richardson, "Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 9, pp. 102-109, September 2009
- [15] X. Zhang, D. Zhou, Z. Xiao, E. Liu, J. Zhang, A. A. Glasunov, "Dynamic Group PCI Assignment Scheme," in *7th Internat. Conf. on Wirel. and Mobile Comm.*, 2011.
- [16] G. de la Roche, A. Valcarce, D. Lopez-Perez, Zhang Jie, "Access control mechanisms for femtocells," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, pp. 33-39, January 2010
- [17] 3GPP, «Radio Resource Control (RRC), Protocol specification» TS 36.331 V10.5.0, 2012.

- [18] Shen Yuan, Luo Tao, M. Z. Win, "Neighboring Cell Search for LTE Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 0908-919, March 2012
- [19] C. S. Bontu, E. Illidge, "DRX mechanism for power saving in LTE," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 6, pp. 48-55, June 2009
- [20] 3GPP, «Physical layer, Measurements,» TS 36.214 V10.1.0, 2011.
- [21] Hsin-Yi Lee, Yi-Bing Lin, "A cache scheme for femtocell reselection," *IEEE Communications Letters*, vol.14, no. 1, pp. 27-29, January 2010
- [22] A. Stavridis, S. Narayanan, M. Di Renzo, L. Alonso, H. Haas, C. Verikoukis, "A base station switching on-off algorithm using traditional MIMO and spatial modulation," *IEEE Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), 18th International Workshop*, pp. 68-72, 25-27 Sept. 2013
- [23] F. Meshkati, Y. Jiang, L. Grokop, S. Nagaraja, M. Yavuz, S. Nanda, "Mobility and Femtocell Discovery in 3G UMTS Networks," Qualcomm, 2010.
- [24] J. López-Martinez, "Low complexity cell search scheme for LTE and LTE-advanced," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 38, pp. 1502-1512, 2012.
- [25] Deng Bing, Wang Wenbo, Li Yubao, "A Novel Low Complexity Cell Search Algorithm for TD-LTE Advanced System," *IEEE 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pp. 1-5, 21-23 Sept. 2012
- [26] Youngkwon Ryu, Jeong Gon Kim, "Cell search for 3GPP LTE system using interference cancellation," *IEEE Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 579-584, 7-10 July 2015
- [27] B. Lindoff, T. Ryden, D. Astely, "A robust cell search algorithm for 3GPP LTE," *IEEE Wireless Conference*, pp. 303-307, 17-20 May 2009
- [28] Chia-Chun Liao, Pei-Yun Tsai, Tzi-Dar Chiueh, "Low-Complexity Cell Search Algorithm for Interleaved Concatenation ML-Sequences in 3GPP-LTE Systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 1, no. 4, pp. 280-283, August 2012
- [29] Wen Xu, Xiaojun Ma, "Correlation-based cell search and measurement for LTE and LTE-A," *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 3719-3724, 3-7 Dec. 2012
- [30] Yan Zhi, Sun Gang, Wang Xin, "A Novel Initial Cell Search Scheme in TD-LTE," *IEEE in Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-5, 15-18 May 2011.
- [31] Zhongshan Zhang, Jian Liu, Keping Long, "Low-Complexity Cell Search With Fast PSS Identification in LTE," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 4, pp. 1719-1729, 2012.
- [32] D. Xenakis, N. Passas, L. Merakos, C. Verikoukis, "Mobility Management for Femtocells in LTE-Advanced: Key Aspects and Survey of Handover Decision Algorithms," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 64-91, First Quarter 2014
- [33] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, M. C. Reed, "Femtocells: Past, Present, and Future," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 497-508, April 2012
- [34] T. Zahir, K. Arshad, A. Nakata, K. Moessner, "Interference Management in Femtocells," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 293-311, First Quarter 2013