



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Τεχνικές ελαχιστοποίησης παρεμβολών σε δίκτυα LTE και  
LTE-Advanced**

**Χρήστος Γ. Αγόρας**

**Επιβλέποντες:** **Αλωνιστιώτη Αθανασία**, Επίκουρος Καθηγήτρια  
**Χατζηκοκολάκης Κωνσταντίνος**, Υποψήφιος Διδάκτωρ  
**Σπαπής Παναγιώτης**, Υποψήφιος Διδάκτωρ

**ΑΘΗΝΑ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2013**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Τεχνικές ελαχιστοποίησης παρεμβολών σε δίκτυα LTE και LTE-Advanced.

**Χρήστος Γ. Αγόρας**

**A.M.: 1077**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:** **Αλωνιστιώτη Αθανασία**, Λέκτορας  
**Χατζηκοκολάκης Κωνσταντίνος**, Υποψήφιος Διδάκτωρ  
**Σπαπής Παναγιώτης**, Υποψήφιος Διδάκτωρ

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:** **Αλωνιστιώτη Αθανασία**, Επίκουρος Καθηγήτρια

Σεπτέμβριος 2013

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές ανάγκες έχουν οδηγήσει στην εξέλιξη των προτύπων για κινητές επικοινωνίες από το UMTS στο LTE από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) και άλλους οργανισμούς. Οι κυριότεροι στόχοι του LTE προτύπου είναι η παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, μειωμένες καθυστερήσεις και υψηλότερη απόδοση σε επίπεδο συστήματος σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά και δυνατότητα παροχής υπηρεσιών που απαιτούν μετάδοση μεγάλων όγκων δεδομένων ή αυστηρών περιορισμών σε καθυστερήσεις.

Οι ρυθμοί μετάδοσης που υπόσχεται το LTE δεν είναι πάντα εφικτοί σε πραγματικές συνθήκες καθώς εξαρτώνται από τις συνθήκες μετάδοσης. Οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης είναι χαμηλότεροι για τους χρήστες οι οποίοι βρίσκονται στα άκρα μιας κυψέλης και δέχονται παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες. Το αποτέλεσμα είναι οι συσκευές αυτές να υφίστανται μειωμένες ταχύτητες και να επηρεάζουν αρνητικά την συνολική απόδοση του συστήματος. Στην βιβλιογραφία, η ως επί των πλείστων προτεινόμενη τεχνική για την εξάλειψη των παρεμβολών είναι η τεχνική του συντονισμού των παρεμβολών. Η εργασία αυτή κάνει μια περιγραφή των συνθηκών εμφάνισης παρεμβολών που δέχεται ένας χρήστης και των τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπισή τους σε ομοιογενή δίκτυα και ετερογενή δίκτυα.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Κινητά Ευρυζωνικά Δίκτυα Τηλεφωνίας

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** LTE, LTE-Advanced, Συντονισμός Παρεμβολών, Διακυψελικές Παρεμβολές, Ετερογενή δίκτυα

## **ABSTRACT**

Modern telecommunication needs have led the development of standards for mobile communications from UMTS to LTE, by the 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) and other organizations. The main objectives of the LTE standard is to provide higher data rates, lower delays, higher system level performance compared to the previous generation and to be able to offer services that require transmission of large amounts of data or rigorous restrictions regarding delays.

The data rates that LTE promises are not always feasible in real systems as they depend on the transmission conditions. The actual transmission rates are lower for users located at the edge of the cells, where they receive interference from neighboring cells. As a result, those devices experience lower transmission rates and can adversely affect the overall system performance. The most proposed interference mitigation technique in the literature is Interference Coordination. This paper provides a description of the conditions in which interference occurs and the techniques that are proposed to mitigate them, on homogeneous and heterogeneous networks.

**SUBJECT AREA:** Mobile Broadband Networks

**KEYWORDS:** LTE, LTE-Advanced, Interference Coordination, Inter Cell Interference, Heterogeneous Networks

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί και το τέλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Σε αυτό το σημείο αισθάνομαι την ανάγκη να απευθύνω ευχαριστίες στα άτομα που με βοήθησαν κατά την διάρκειά τους.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επίκουρο καθηγήτριά μου, κα. Αθανασία Αλωνιστίωτη για την επίβλεψη της εργασίας, βοήθεια και την συμπαράστασή της για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στους υποψήφιους διδάκτορες κ. Παναγιώτη Σπαπή και Κωνσταντίνο Χατζηκοκολάκη για τις πολύτιμες συμβουλές, τις γνώσεις και την συμπαράστασή τους καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας. Η εκπόνησή της εργασίας αυτής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την βοήθειά τους.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση, υπομονή, ψυχική και υλική βοήθειά τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου όποτε τη χρειαζόμουν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και συνεργάτες μου για την αξέχαστη αυτή εμπειρία σπουδών.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

Χρήστος Γ. Αγόρας

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>LTE .....</b>	<b>16</b>
2.1	Ιστορική αναδρομή.....	16
2.2	Απαιτήσεις και στόχοι για το πρότυπο LTE .....	18
2.3	Τεχνικές μετάδοσης στο LTE .....	20
2.3.1	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA).....	20
2.3.2	Πολλαπλές κεραίες .....	22
2.4	Αρχιτεκτονική LTE .....	23
2.4.1	Δίκτυο Πυρήνα.....	24
2.4.2	Δίκτυο Πρόσβασης.....	26
2.4.3	Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS) και EPS Bearers.....	27
2.4.4	Διεπαφή S1 .....	28
2.4.5	Διεπαφή X2 .....	30
<b>3</b>	<b>ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ.....</b>	<b>32</b>
3.1	Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ράδιο-πόρων (Radio Resource Control, RRC) .....	34
3.1.1	Εκπομπή πληροφοριών συστήματος.....	34
3.1.2	Έλεγχος σύνδεσης (Connection Control) .....	34
3.1.3	Ασφάλεια και Διαχείριση συνδέσεων .....	35
3.1.4	Κινητικότητα και μετρήσεις .....	37
3.1.5	Επιλογή δικτύου και κυψέλης .....	37
3.2	Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol, PDCP).....	38
3.2.1	Συμπίεση και Αποσυμπίεση Επικεφαλίδων .....	39
3.2.2	Ασφάλεια.....	39
3.2.3	Handover.....	40
3.3	Πρωτόκολλο Ελέγχου Ράδιο-ζεύξης (Radio Link Control, RLC) .....	43
3.3.1	Transparent Mode (TM).....	43
3.3.2	Unacknowledged Mode (UM).....	44
3.3.3	Acknowledged Mode (AM) .....	45
3.4	Πρωτόκολλο Ελέγχου Μέσου Πρόσβασης (Medium Access Control, MAC) .....	46

3.4.1	Scheduler .....	48
3.4.2	Scheduling και UEs.....	48
3.4.3	Διαδικασία Τυχαίας Προσπέλασης (Random Access Procedure) και ευθυγράμμιση αποστολών χρήστη 49	
3.4.4	Διακοπτόμενη Λήψη (Discontinuous Reception, DRX) .....	49
<b>3.5</b>	<b>Φυσικό Επίπεδο .....</b>	<b>50</b>
3.5.1	Δομή Πόρων Μετάδοσης (Transmission Resource Structure).....	51
3.5.2	Paired and Unpaired Spectrum.....	53
<b>4</b>	<b>ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ (SCHEDULING) .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Προσαρμογή καναλιού .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Χρονοπρογραμματισμός.....</b>	<b>57</b>
4.2.1	Χρονοπρογραμματισμός στο downlink .....	60
4.2.2	Χρονοπρογραμματισμός στο uplink .....	64
4.2.3	Χρονοπρογραμματισμός για VoIP υπηρεσία.....	65
<b>5</b>	<b>LTE – ADVANCED.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Συνάθροιση Φερουσών (Carrier Aggregation) .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2</b>	<b>Μίκρο-Κυψέλες (Relay Nodes, Femtocells, Picocells) και ετερογενή δίκτυα.....</b>	<b>71</b>
5.2.1	Femtocells/Picocells.....	72
5.2.2	Αναμεταδότες (Relay Nodes).....	73
5.2.3	Ετερογενή δίκτυα (HetNets) .....	74
<b>6</b>	<b>ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ.....</b>	<b>76</b>
<b>6.1</b>	<b>Παρεμβολές στο LTE και LTE-Advanced .....</b>	<b>76</b>
6.1.1	Παρεμβολές στο LTE .....	76
6.1.2	Παρεμβολές στο LTE-Advanced .....	78
<b>6.2</b>	<b>Υποστήριξη για αντιμετώπιση παρεμβολών στο LTE/LTE-Advanced .....</b>	<b>82</b>
<b>6.3</b>	<b>Αλγόριθμοι αντιμετώπισης παρεμβολών .....</b>	<b>84</b>
6.3.1	Συντονισμός Διακυβελικών Παρεμβολών.....	85
6.3.2	Αντιμετώπιση Παρεμβολών στα HetNets.....	95
<b>7</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ICIC .....</b>	<b>102</b>

<b>7.1</b>	<b>Μελέτες και προτάσεις σε επίπεδο συστήματος .....</b>	<b>102</b>
<b>7.2</b>	<b>Νέες προτάσεις για αλγόριθμους ICIC .....</b>	<b>109</b>
<b>8</b>	<b>ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ICIC.....</b>	<b>130</b>
<b>9</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>139</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ .....</b>	<b>141</b>
	<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>148</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Χρονοδιάγραμμα για τα πρότυπα κινητών επικοινωνιών. [2].....	17
Εικόνα 2: Subcarriers για OFDMA και SC-FDMA. [2].....	20
Εικόνα 3: Διαχωρισμός subcarriers με FDMA (επάνω) και OFDMA (κάτω). [3].....	21
Εικόνα 4: Διάθεση πόρων για OFDM (αριστερά) και OFDMA (δεξιά). Τα διαφορετικά χρώματα αναπαριστούν διαφορετικούς χρήστες. [3] .....	21
Εικόνα 5: Εισαγωγή κυκλικού προθέματος κατά την μετάδοση OFDM συμβόλων στο κανάλι. [5] .....	22
Εικόνα 6: Τρόποι χρήσης πολλαπλών κεραιών στο LTE. [6].....	23
Εικόνα 7: Στοιχεία EPS δικτύου. [2] .....	24
Εικόνα 8: Κόμβοι δικτύου πρόσβασης. [7].....	26
Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική για EPS bearers. [2] .....	28
Εικόνα 10: Στοιβά πρωτοκόλλων για το User Plane (γκρίζο μέρος). [2] .....	32
Εικόνα 11: Στοιβά πρωτοκόλλων για το Control Plane. Το γκριζο μέρος αναφέρεται στα Access Stratum (AS) πρωτόκολλα. [2] .....	32
Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων Control Plane και User Plane. [2].....	33
Εικόνα 13: Κατάσταση RRC σύνδεσης σε σχέση με τις NAS καταστάσεις. [2].....	35
Εικόνα 14: Βήματα για την μετάβαση σε ECM-CONNECTED κατάσταση και δημιουργία συνδέσεων. [2].....	36
Εικόνα 15: Ράδιο-αρχιτεκτονική. [2] .....	37
Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων PDCP στο User Plane (αριστερά) και Control Plane (δεξιά). [2].....	39
Εικόνα 17: Lossless handover στο Uplink. [2] .....	41
Εικόνα 18: Lossless handover στο Downlink. [2] .....	42
Εικόνα 19: Βασικές λειτουργίες UM. [2] .....	44
Εικόνα 20: Βασικές λειτουργίες για το RLC AM. [2] .....	45
Εικόνα 21: Αρχιτεκτονική και βασικές λειτουργίες MAC επιπέδου. [2] .....	46
Εικόνα 22: HARQ λειτουργία MAC επιπέδου. [1] .....	47

Εικόνα 23: Λογικά κανάλια και κανάλια μεταφοράς για το DL (αριστερά) και UL (δεξιά). [2] .....	48
Εικόνα 24: Διακοπτόμενη λήψη (DRX). [2] .....	50
Εικόνα 25: Τοπογράφηση καναλιών για το Downlink (αριστερά) και Uplink (δεξιά). [1].	51
Εικόνα 26: Δομή πόρων μετάδοσης στο Downlink. [2] .....	52
Εικόνα 27: Resource Elements σε ένα Resource Block σε σχέση με το κυκλικό πρόθεμα. [1] .....	53
Εικόνα 28: Διαχείριση φάσματος στο LTE. [1] .....	54
Εικόνα 29: Δομή υπό-πλαισίων για FDD και TDD. [1] .....	54
Εικόνα 30: Καθυστέρηση μετάδοσης (a) και timing advance (b). [2].....	55
Εικόνα 31: Διάρκεια guard period για διασφάλιση ευθυγράμμισης στο uplink. [1] .....	56
Εικόνα 32: Τυπικό σενάριο μετάδοσης για πολλαπλούς χρήστες με μια κυψέλη. [2] ....	58
Εικόνα 33: Δομή ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού. [2] .....	59
Εικόνα 34: TDMA (a), FDMA (b), συνδυασμός TDMA και FDMA (c). [1].....	60
Εικόνα 35: Βήματα δέσμευσης και ανάθεσης πόρων στον CRA. ....	62
Εικόνα 36: Λίστες προτεραιοτήτων στον CRA. ....	64
Εικόνα 37: Εξέλιξη LTE προτύπου. [1] .....	67
Εικόνα 38: Χρήση συνάθροισης φερουσών μέσω FDD στο LTE-Advanced. Ο χρήστης B μπορεί να χρησιμοποιήσει όλες τις φέρουσες ενώ οι χρήστες A και μόνο μια από αυτές. [11].....	68
Εικόνα 39: Σενάρια συνάθροισης φερουσών στο LTE-Advanced. [11].....	69
Εικόνα 40: Χρήστη συστατικών φερουσών και κάλυψη καθεμίας. [11] .....	70
Εικόνα 41: cross carrier scheduling. [1] .....	71
Εικόνα 42: Αντιστοίχιση PDCCH και PUSCH/PDSCH κατά το cross-carrier scheduling. [1] .....	71
Εικόνα 43: Χρήση Relay Node στην άκρη μιας κυψέλης. [2] .....	73
Εικόνα 44: Σενάρια χρήσης των Relay Nodes. [2] .....	74
Εικόνα 45: Ανομοιογενές δίκτυο αποτελούμενα από femtocells, picocells και Relay Nodes. [5] .....	75

Εικόνα 46: Παρεμβολές στην σηματοδότηση σε ένα HetNet. [2].....	75
Εικόνα 47: Παρεμβολές από το γειτονικό σταθμό βάσης, καθώς το τερματικό πλησιάζει στο άκρο της κυψέλης. [12].....	77
Εικόνα 48: Σενάριο σύγκρουσης στο uplink. [5].....	78
Εικόνα 49: Παρεμβολές στο downlink και uplink ενός HetNet.....	80
Εικόνα 50: Αντιμετώπιση παρεμβολών σε HetNet μέσω Carrier Aggregation με χρήση cross-carrier scheduling. [1].....	81
Εικόνα 51: uplink σηματοδότηση μέσω X2 διεπαφής, για την αντιμετώπιση παρεμβολών. [1] .....	83
Εικόνα 52: downlink σηματοδότηση μέσω X2 διεπαφής, για την αντιμετώπιση παρεμβολών. [1].....	83
Εικόνα 53: ανάθεση εύρους ζώνης στο reuse 1 σχήμα. [12] .....	86
Εικόνα 54: reuse 1 σχήμα μετάδοσης, χωρίς παρεμβολές. [2] .....	86
Εικόνα 55: reuse 1 σχήμα μετάδοσης με παρεμβολές. [2].....	87
Εικόνα 56: Ανάθεση εύρους ζώνης στο reuse 3 σχήμα. [12] .....	87
Εικόνα 57: Ανάθεση πόρων στο PFR. [4].....	89
Εικόνα 58: Ανάθεση πόρων στο SFR με συνολική ισχύ μετάδοσης ίση με 3. [16] .....	90
Εικόνα 59: Ανάθεση πόρων στο SFFR σχήμα. [12].....	92
Εικόνα 60: Παρεμβολές και μειωμένη φασματική απόδοση στο SFR. [12].....	93
Εικόνα 61: Ανάθεση πόρων στο IFR. [12] .....	94
Εικόνα 62: Ανάθεση πόρων στο EFFR. [12].....	95
Εικόνα 63: Δομή ενός Almost Blank Subframe σε σχέση με ένα κανονικό. [12] .....	96
Εικόνα 64: Χρήση των ABS από το HeNB. [12].....	97
Εικόνα 65: μετάδοση με την χρήση Lightly-loaded subframes. [12].....	97
Εικόνα 66: Μετατόπιση OFDM συμβόλων σε ένα HeNB subframe. [12].....	98
Εικόνα 67: Μετάδοση με σίγαση OFDM συμβόλων και ABS subframe. [12].....	98
Εικόνα 68: Μετάδοση σε διαφορετικές ζώνες. [12] .....	101

Εικόνα 69: Εικόνα δικτύου στο one-way & two-way relaying (a) και shared-relaying (b). .....	103
Εικόνα 70: Μετάδοση στο two-way relaying κατά την πρώτη φάση (α) και δεύτερη φάση (β).....	104
Εικόνα 71: Εικόνα του δικτύου για το μοντέλο της μελέτης.....	106
Εικόνα 72: Βέλτιστη διάταξη των RelayNodes σε επίπεδα (tiers) ανά σενάριο μετάδοσης. ....	108
Εικόνα 73: Προτεινόμενη κατανομή εύρους ζώνης ανάμεσα στα macrocells/femtocells .....	110
Εικόνα 74: Κατανομή εύρους ζώνης στο προτεινόμενο σχήμα στα critical και non-critical regions.....	111
Εικόνα 75: Διαίρεση εύρους ζώνης σε τρία ίσα και ορθογώνια μέρη .....	111
Εικόνα 76: Διαίρεση της περιοχής κάλυψης ενός microcell σε μικρότερες, επιμέρους περιοχές. ....	113
Εικόνα 77: Αρχιτεκτονική προτεινόμενου framework.....	115
Εικόνα 78: Αντιστοίχιση πραγματικών υπηρεσιών σε εικονικές αναθέσεις χωρητικότητας (virtual partitions).....	116
Εικόνα 79: διαχωρισμός εύρους ζώνης με βάση το region .....	118
Εικόνα 80: Τρόπος χρήσης του εύρους ζώνης ανά περιοχή και τις παρεμβολές.....	119
Εικόνα 81: Εικονική περιοχή κάλυψης για CoMP μετάδοση μέσω RRHs.....	121
Εικόνα 82: Τροποποίηση υπάρχοντων σχημάτων για HetNets με femtocells.....	124
Εικόνα 83: Τοπολογία των RelayNodes και μετάδοση ανά timeslot.....	125
Εικόνα 84: Αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανισμών της CTRL αρχιτεκτονικής. ....	128

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κυριότεροι στόχοι για το LTE Release 8. [2].....	19
Πίνακας 2: Ρυθμίσεις Κυκλικού προθέματος. [5] .....	22
Πίνακας 3: Στόχοι για το LTE Release 10. [2].....	67
Πίνακας 4: Βήματα αλγορίθμου για την παραλλαγή του SFR σχήματος. [21].....	113

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για πρόσβαση στο δίκτυο από κινητές συσκευές και όχι μόνο, έχει υπάρξει ραγδαία και αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνει και την επόμενη δεκαετία, γεγονός που αποτυπώνεται και στο πλήθος των προτύπων για κινητές επικοινωνίες που έχουν αναπτυχθεί στο διάστημα αυτό. Η αυξανόμενη ζήτηση, εν μέρει από την ανάπτυξη των κινητών συσκευών και από την ανάγκη για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, οδηγεί στην ανάγκη για δίκτυα τα οποία θα μπορούν να καλύψουν την μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων και παροχή αξιόπιστης υπηρεσίας σε εφαρμογές που απαιτούν μικρές καθυστερήσεις όπως η Μετάδοση φωνής μέσω IP (Voice over IP, VoIP), βίντεο συνδιάσκεψη και παιχνίδια.

Το 3rd Generation Partnership Project και άλλοι οργανισμοί εργάζονται για την διαμόρφωση των προδιαγραφών και την υλοποίηση του επόμενου βήματος στις κινητές επικοινωνίες, την μακροπρόθεσμη εξέλιξη του τωρινού προτύπου HSPA στο Long Term Evolution (LTE) και την περαιτέρω ανάπτυξή του στο Long Term Evolution – Advanced (LTE-Advanced, LTE-A). Στόχος είναι η κάλυψη μελλοντικών αναγκών και η διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας του προτύπου. Το LTE αποτελεί ένα σημαντικό βήμα σε αυτή την κατεύθυνση με τις αρχικές επιδείξεις να λαμβάνουν χώρα το 2006 και την πρώτη εμπορική ανάπτυξη στο 2009.

Οι κυριότεροι στόχοι του LTE προτύπου είναι οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, μικρότερες καθυστερήσεις, μεγαλύτερη φασματική απόδοση, μειωμένο κόστος και απλούστερη αρχιτεκτονική. Η πρώτη έκδοση του LTE, Release 8, προσφέρει μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης έως 100Mbps στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και 50Mbps στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink), υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για τους χρήστες στα όρια των κυψελών, καθυστέρηση εγκαθίδρυσης σύνδεσης μικρότερη από 10ms, κλιμακωτό εύρος ζώνης από 1.25 έως 20MHz, ευέλικτη διαχείριση φάσματος και ομαλή διαλειτουργικότητα με προηγούμενα δίκτυα. Το LTE-Advanced Release 10 είναι το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη του LTE Release 8 και προσπαθεί να πετύχει μεγαλύτερους στόχους όπως ταχύτητες 500Mbps στο upload και 1Gbps στο download χρησιμοποιώντας Συνάθροιση Φερουσών (Carrier Aggregation, CA), ετερογενή δίκτυα, Συντονισμένη Πολύ-σημειακή μετάδοση (Coordinated Multi-Point, CoMP) και άλλες τεχνικές.

Η επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης μπορεί να επιτευχθεί είτε με επέκταση του εύρους ζώνης (bandwidth) είτε με πιο αποδοτική χρήση του υπάρχοντος εύρους ζώνης. Το πρώτο δεν είναι εύκολο δεδομένου του κόστους απόκτησης επιπλέον φάσματος, καθώς αυτό είναι περιορισμένο ίσως και δεσμευμένο για άλλες τεχνολογίες. Το περιορισμένο εύρος ζώνης σε συνδυασμό με την απαίτηση για μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων χρηστών ταυτόχρονα οδηγεί στην επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων από γειτονικές κυψέλες. Όταν δεν υπάρχει συντονισμός για την δέσμευση των συχνοτήτων ή/και έλεγχος ισχύος εκπομπής, οι χρήστες στα άκρα της κυψέλης δέχονται παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες. Το αποτέλεσμα είναι οι συσκευές αυτές να υφίστανται μειωμένους ρυθμούς μετάδοσης και να επηρεάζουν αρνητικά την συνολική απόδοση του συστήματος.

Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλοί τρόποι αντιμετώπισης των παρεμβολών αυτών όπως τεχνικές ακύρωσης (Interference Cancellation), διασποράς σε τυχαία κανάλια (Interference Randomization) ή συντονισμού (Interference Coordination). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα γίνει μια περιγραφή των τεχνικών συντονισμού που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπισή τους σε ομοιογενή δίκτυα και ετερογενή δίκτυα. Το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας είναι δομημένο ως εξής: στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι στόχοι και η αρχιτεκτονική του LTE προτύπου, στο τρίτο κεφάλαιο η στοίβα πρωτοκόλλων του LTE και στο τέταρτο οι βασικές αρχές του

χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης στο LTE. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το LTE – Advanced πρότυπο ως εξέλιξη του LTE, οι στόχοι που θέτει και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί για να τους πετύχει. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνθήκες που προκαλούν παρεμβολές τόσο σε LTE όσο και σε LTE-Advanced δίκτυα και οι κυριότερες τεχνικές ελαχιστοποίησής τους. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθεται ένας συγκριτικός πίνακας των παραπάνω τεχνικών.

## 2 LTE

Το κεφάλαιο αυτό κάνει μια ιστορική αναδρομή από τα δίκτυα πρώτης γενιάς μέχρι την εμφάνιση του LTE προτύπου και τις συνθήκες που οδήγησαν σε αυτό. Παραθέτει τους βασικούς του στόχους και τις κυριότερες τεχνολογίες που εφαρμόζει για την ικανοποίησή τους και τέλος παρουσιάζει συνοπτικά την αρχιτεκτονική του συστήματος κάνοντας μια σύντομη παρουσίαση των βασικότερων στοιχείων και διεπαφών επικοινωνίας τους.

### 2.1 Ιστορική αναδρομή

Το LTE αποτελεί το τελευταίο βήμα σε μια συνεχής εξέλιξη των κινητών τεχνολογιών προς την ανάπτυξη της επόμενης γενιάς τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Κατά την διάρκεια της εξέλιξής τους, η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησή τους υπήρξε όλο και πιο περίπλοκη. Έπαψε να αποτελεί εγχώριο ζήτημα και πέρασε στα χέρια διεθνών οργανισμών προτυποποίησης όπως το 3GPP.

Τα στάδια της εξέλιξης των κινητών τεχνολογιών μπορεί να χωριστεί σε γενιές, με την αρχή να αποτελεί η εφεύρεση των κυψελοειδών δικτύων για τα ενσύρματα δίκτυα, το 1947 από την AT&T. Το δίκτυο αυτό έκανε χρήση διαφορετική συχνότητας ανά κυψέλη αλλά απαιτούσε ακριβές συσκευές και μεγάλες απαιτήσεις ισχύς γι' αυτό και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο σε αμάξια.

Η μεγάλη εμπορική ανάπτυξη για τα κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνίας ξεκίνησε την δεκαετία του 1980, καθώς οι κινητές επικοινωνίες απέκτησαν διεθνές ενδιαφέρον. Το δίκτυο της γενιάς αυτής, το οποίο ονομάστηκε “δίκτυο πρώτης γενιάς” (First Generation), αποτελούνταν στην ουσία από ένα σύνολο ανεξάρτητων δικτύων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ονόματα ανά περιοχή, AMPS στην Αμερική, TACS σε μέρη της Ευρώπης, NMT στις σκανδιναβικές χώρες και J-TACS στην Ιαπωνία και το Hong Kong. Ήταν αναλογικό και μπορούσε να μεταφέρει μόνο φωνή και σχετικές υπηρεσίες. Δεν ήταν ιδιαίτερα αξιόπιστο και οι συσκευές συνέχιζαν να είναι ογκώδη.

Η έλευση της ψηφιακής τεχνολογίας κατά την δεκαετία του 1980 έφερε και την δυνατότητα ανάπτυξης ενός ψηφιακού συστήματος κινητών επικοινωνιών. Το δίκτυο δεύτερης γενιάς (2G) ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας διαφόρων διεθνών τηλεπικοινωνιακών φορέων. Στην Ευρώπη, υπό την επίβλεψη του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) προέκυψε το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communications, GSM) το οποίο έγινε γρήγορα διεθνές πρότυπο. Η ψηφιακή τεχνολογία ως αποτέλεσμα συσκευές με μεγαλύτερη διάρκεια μπαταρίας και μικρότερες σε μέγεθος, μεγαλύτερη χωρητικότητα για το δίκτυο και πιο αξιόπιστη υπηρεσία. Ενώ στην αρχή η μόνη υπηρεσία που προσέφερε ήταν φωνή, γρήγορα προστέθηκαν υπηρεσίες μεταφορά δεδομένων, όπως SMS. Οι βελτιώσεις του GSM που ακολούθησαν, General Packet Radio Service (GPRS) και EDGE, εισήγαγαν την έννοια της μεταγωγής πακέτου στα κινητά δίκτυα και μπορούσαν να παρέχουν πιο προηγμένες υπηρεσίες, ανοίγοντας τον δρόμο για τα δίκτυα τρίτης γενιάς.

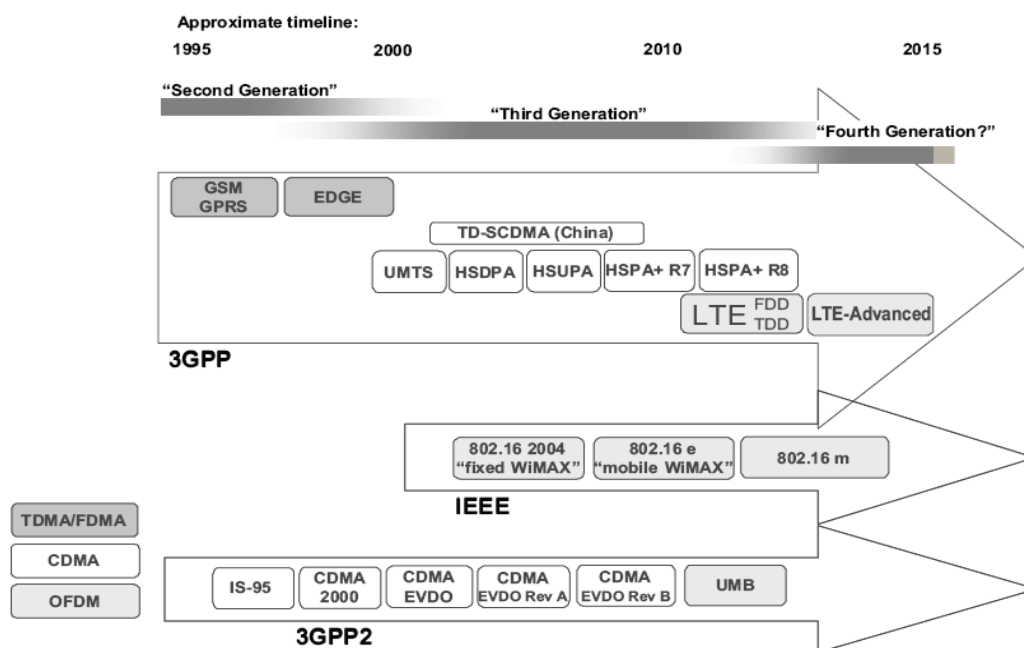
Η έλευση των δικτύων τρίτης γενιάς (3G), τα οποία χρησιμοποιούσαν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και την ράδιο-διεπαφή Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), έφερε και την ανάγκη για νέες υπηρεσίες και ενοποίηση των υπηρεσιών διαδικτύου στις κινητές επικοινωνίες. Βασικός στόχος ήταν η παροχή υπηρεσιών «οππουδήποτε» και «κάθε στιγμή», που σήμαινε ότι ένας χρήστης κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς μπορούσε να



μετακινηθεί οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμη κι' αν δεν υπήρχε κάλυψη από συστήματα τρίτης γενιάς αλλά άλλου είδους συστήματα.

Αν και μέχρι στιγμής, την διαχείριση της εξέλιξης των δικτύων τρίτης γενιάς την έχει αναλάβει ο 3GPP, αυτή ξεκίνησε σχεδόν παράλληλα με τα δίκτυα 2G, πολύ πριν την ίδρυσή του. Σημαντικό ρόλο στην διαδικασία αυτή έπαιξε το γεγονός της διεθνοποίησης των κινητών προτύπων. Ήδη από τα τέλη του 1980 η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) εργαζόταν στην ανάπτυξη ενός δικτύου τρίτης γενιάς, υπό την ονομασία IMT-2000. Παράλληλα, στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, είχαν ξεκινήσει εργασίες για την ανάπτυξη ενός προτύπου πολλαπλής πρόσβασης βασισμένο στο Wideband CDMA. Μέχρι την ίδρυση του 3GPP το 1998, οι προτάσεις της Ευρώπης και Ιαπωνίας συγχωνεύτηκαν στο πρότυπο Universal Mobile Telecommunication Services (UMTS), ως αποτέλεσμα της διαδικασίας προτυποποίησης του ETSI που είχε ξεκινήσει το 1996. [1]

Τον συντονισμό για την ανάπτυξη των προτύπων τρίτης γενιάς καθώς και η εξέλιξή τους σε αυτά της τέταρτης γενιάς γίνεται υπό την εποπτεία του ITU-R (International Telecommunications Union – Radio Communication Sector, ITU-R), υπό την ονομασία ITU-2000 και ITU-Advanced αντίστοιχα. Στόχος του είναι η κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών σε «οικογένειες προτύπων», σύνταξη προτάσεων για την ανάπτυξη και εξέλιξή τους και ο συντονισμός των σωμάτων προτυποποίησης που αναλαμβάνουν την υλοποίηση των προτάσεων αυτών, με τον 3GPP να αποτελεί την σημαντικότερο. Μία άλλη σημαντική αρμοδιότητα του ITU-R είναι ο καθορισμός του μέρους του φάσματος θα διατεθεί σε κάθε οικογένεια τεχνολογιών καθώς και πότε το διαθέσιμο bandwidth θα χρησιμοποιηθεί κατά ζεύγος και πότε άζευκτο.



Εικόνα 1: Χρονοδιάγραμμα για τα πρότυπα κινητών επικοινωνιών. [2]

Ο σημαντικότερος οργανισμός για την ανάπτυξη των δικτύων τρίτης γενιάς είναι ο 3GPP. Στην οικογένεια τεχνολογιών του 3GPP συμπεριλαμβάνονται οι τεχνολογίες 2G GSM/GPRS/EDGE που βασίζονται σε Πολύπλεξη Χρονικής Διαίρεσης Πολλαπλής Πρόσβασης (Time-Division Multiple Access, TDMA) και Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (Frequency-Division Multiple Access, FDMA), η οικογένεια 3G UMTS τεχνολογιών οι οποίες κάνουν χρήση του Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) και το LTE το οποίο βασίζεται στην Ορθογώνια Πολυπλεξία με Πολλαπλές Φέρουσες (Orthogonal Frequency-Division

Multiplexing, OFDM). Η εξέλιξη των υπολοίπων 3GPP τεχνολογιών συνεχίζει παράλληλα με το LTE. Η εξέλιξη του UMTS στα HSDPA και HSUPA συνεχίστηκε στα Release 5 και 6 αντίστοιχα, και είναι γνωστά ως Πρόσβαση Υψηλής Ταχύτητας Πακέτων δεδομένων (High Speed Packet Access, HSPA). Η επέκταση του HSPA συνεχίστηκε με το HSPA+ το οποίο πρόσθεσε υψηλότερης τάξης διαμόρφωσης και κεραίες Πολλαπλής Εισόδου, Πολλαπλής Εξόδου (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO). Το LTE επωφελείται από τις εξελίξεις στα δίκτυα τρίτης γενιάς αλλά επίσης προσθέτει απαιτήσεις όπως η απαίτηση να λειτουργεί με Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplex, FDD) και Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση χρόνου (Time Division Duplex, TDD) και την χρήση του σχήματος Σύγχρονη διαίρεση Χρόνου - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα (Time-Division Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA).

Από την πορεία της εξέλιξης των κινητών επικοινωνιών είναι φανερό ότι οδεύουν προς την δημιουργία ευέλικτων, packet-switched συστημάτων που μπορούν να προσφέρουν πολλαπλές υπηρεσίες με ποιότητα υπηρεσιών παρόμοιες με αυτές των ενσύρματων προτύπων. [2]

## 2.2 Απαιτήσεις και στόχοι για το πρότυπο LTE

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των κινητών συσκευών την τελευταία 20ετία σε συνδυασμό με το σύνολο των διαθέσιμων υπηρεσιών μέσω του Internet υπήρξαν οι βασικοί λόγοι για την μετάβαση στα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Η ανάγκη Internet υπηρεσιών στις κινητές συσκευές και η εξέλιξη των συστημάτων κινητών τεχνολογιών χαρακτηρίστηκε ως κινητή ευρυζωνικότητα (mobile broadband) και είχε ως στόχο την παροχή υπηρεσιών πάνω από το IP πρωτόκολλο. Η αρχή είχε γίνει από το GPRS το οποίο πρόσφερε την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων μέσω μεταγωγή κυκλώματος (circuit switched) συστήματος και συνεχίστηκε με το HSPA. Το LTE έχει σχεδιαστεί εξ αρχής να χρησιμοποιεί εξολοκλήρου μεταγωγή πακέτου (packet switched) και απλούστερη, επίπεδη (flat) αρχιτεκτονική. Η εξέλιξη του LTE συμπληρώνεται και από την εξέλιξη του βασικού δικτύου πυρήνα (core network) υπό την ονομασία System Architecture Evolution (SAE) το οποίο περιλαμβάνει το Evolved Packet Core (EPC). Το LTE και SAE μαζί αποτελούν το Evolved Packet System (EPS).

Οι στόχοι που έχουν τεθεί για την ανάπτυξη του LTE προτύπου μπορούν να αποτυπωθούν συνοπτικά ως εξής:

- **Εύρος Ζώνης:** κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 1.5, 2.5, 5, 10, 15 και 20 MHz.
- **Ρυθμός μετάδοσης:** Επίτευξη ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100Mbps στο downlink και 50Mbps στο uplink. Εξαρτάται από το εύρος ζώνης και το σύνολο των διαθέσιμων κεραιών για αποστολή. Ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης είναι δύσκολο να επιτευχθεί καθώς εξαρτάται από τις συνθήκες μετάδοσης, το πόσο κοντά βρίσκεται ένα κινητό στο σταθμό βάσης, τις παρεμβολές κτλ. Για τον λόγο αυτό το LTE έχει σχεδιαστεί εξ αρχής για να παρέχει απόδοση σε επίπεδο συστήματος.
- **Τρόπος λειτουργίας:** Το LTE θα πρέπει να λειτουργεί σε FDD και TDD.
- **Ρυθμαπόδοση (throughput):** 3-4 φορές μεγαλύτερο μέσο throughput χρήστη/MHz στο downlink και 2-3 φορές στο uplink, σε σύγκριση με τα HSDPA και HSUPA.

- **Φασματική Απόδοση:** 2-3 φορές μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σχέση με το HSDPA. Υπολογίζεται ως διαίρεση του μέγιστου ρυθμού λήψης με το διαθέσιμο εύρος ζώνης.
- **Καθυστέρηση:** Σε επίπεδο χρήστη απαιτείται μείωση της round-trip καθυστέρησης από τον χρήστη στο σταθμό βάσης στα 5ms- 10ms ενώ σε επίπεδο συστήματος η εγκαθίδρυση της σύνδεσης θα πρέπει επίσης να είναι σύντομη καθώς συμβάλει στη καλύτερη εμπειρία χρήσης και βελτιώνει την χρήση της μπαταρίας. Ο χρόνος αυτός ορίζεται ως ο χρόνος μετάβασης από την κατάσταση ‘αδρανής’ (RRC\_IDLE) στην κατάσταση ‘ενεργός’ (RRC\_CONNECTED) και πρέπει να είναι μικρότερος από 100ms. Οι καθυστερήσεις για το επίπεδο χρήστη ενδέχεται να είναι διαφορετικές ανάλογα με τον όγκο δεδομένων που μεταδίδεται στο δίκτυο και τις συνθήκες μετάδοσης.
- **Κινητότητα:** Δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες, 350km/h ή και 500km/h ανάλογα με το εύρος ζώνης, και βέλτιστη λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες (0-15km/h).
- **Κόστος και Διαλειτουργικότητα:** Δυνατότητα λειτουργίας σε συνδυασμό με υπάρχοντα UTRAN/GERAN συστήματα αλλά και άλλα μη-3GPP συστήματα. Θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει λειτουργία μεταπομπής (handover) από και προς τα συστήματα αυτά. Θα πρέπει να μην απαιτεί πολύπλοκες λειτουργίες από τις συσκευές των χρηστών για εξοικονόμηση ενέργειας
- **Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS):** Υποστήριξη από άκρο σε άκρο, ακόμη και για τους χρήστες στα άκρα της κυψέλης ποιότητας υπηρεσίας για τις απαιτητικές υπηρεσίες όπως η VoIP.

Πίνακας 1: Κυριότεροι στόχοι για το LTE Release 8. [2]

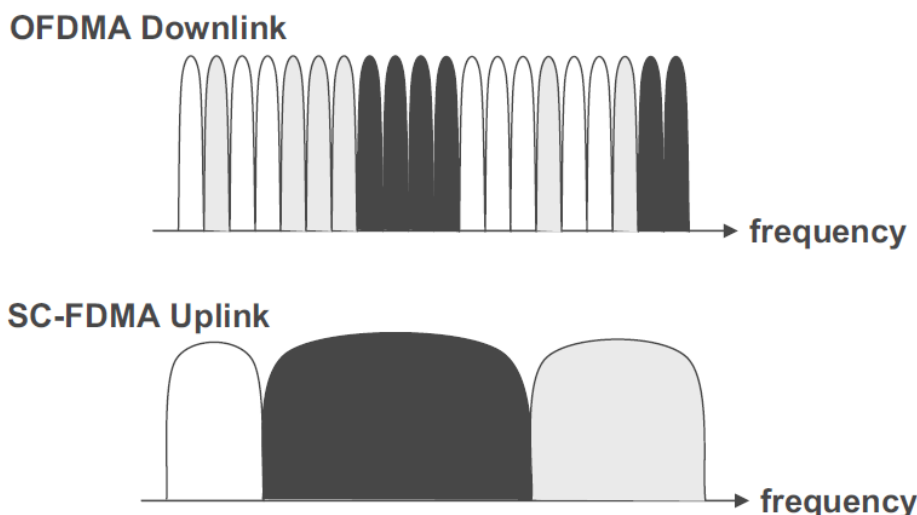
		Absolute Requirement	Release 6 (for comparison)
Downlink	Peak Transmission Rate	>100 Mbps	14.4 Mbps
	Peak Spectral Efficiency	>5 bps/Hz	3 bps/Hz
	Average Cell Spectral Efficiency	>1.6-2.1 bps/Hz/cell	0.53 bps/Hz/cell
	Cell Edge Spectral Efficiency	>0.04-0.06 bps/Hz/user	0.002 bps/Hz/user
	Broadcast Spectral Efficiency	>1 bps/Hz	N/A
Uplink	Peak Transmission Rate	>50Mbps	11Mbps
	Peak Spectral Efficiency	>2.5 bps/Hz	2 bps/Hz
	Average Cell Spectral Efficiency	>0.66-1.0 bps/Hz/cell	0.33 bps/Hz/cell
	Cell Edge Spectral Efficiency	>0.02-0.03 bps/Hz/user	0.001 bps/Hz/user
System	User Plane latency	<10 ms	
	Connection setup latency	<100 ms	
	Operating Bandwidth	1.4-20MHz	5MHz
	VoIP Capacity	>60 sessions/MHz/cell	

## 2.3 Τεχνικές μετάδοσης στο LTE

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων το LTE χρησιμοποιεί τεχνικές μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο οι οποίες μειώνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος και του εξοπλισμού των χρηστών (User Equipment, UE). Οι τεχνικές αυτές επιπλέον επιτρέπουν την ευέλικτη ανάπτυξη του ραδιοφάσματος σε υπάρχοντα ή νέα φάσματα, ειδικά στο LTE-A, και καθιστούν δυνατή την συνύπαρξη με άλλες 3GPP τεχνολογίες. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά η τεχνολογία Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) και η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (multiple antenna).

### 2.3.1 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Το LTE κάνει χρήση της OFDMA τεχνολογίας για το downlink και Διαίρεση Συχνότητας Μονής Φέρουσας Πολλαπλής Πρόσβασης (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) για το uplink.



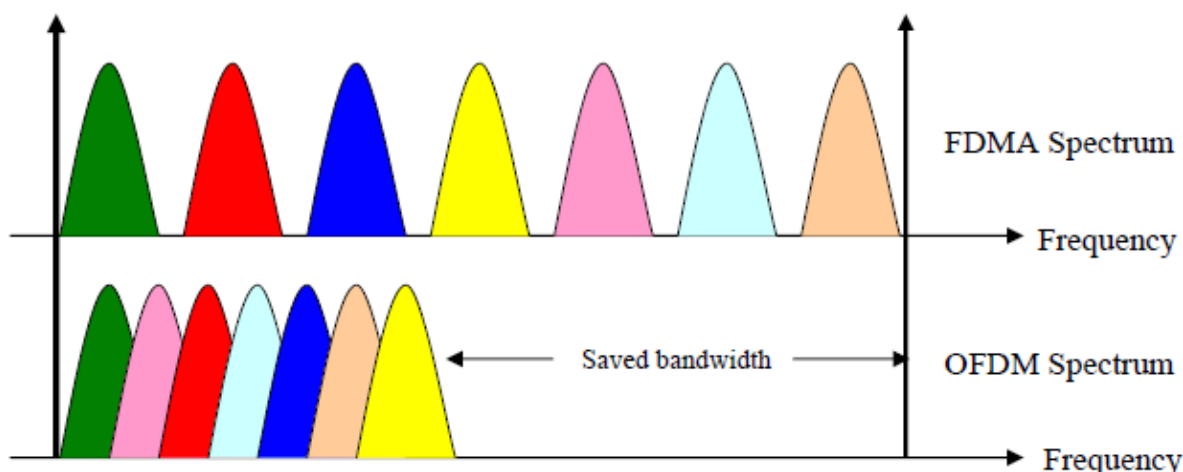
Εικόνα 2: Subcarriers για OFDMA και SC-FDMA. [2]

Το OFDMA βασίζεται στο OFDM για να προσφέρει πολλαπλή πρόσβαση. Το OFDM διαιρεί το εύρος ζώνης για μικρότερες φέρουσες (subcarriers) των 15kHz, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους και είτε μόνες τους είτε σε ομάδα να συνθέτουν ανεξάρτητες ροές (streams) μετάδοσης πληροφορίας. Στο OFDMA τα subcarriers μπορούν να μοιραστούν σε διαφορετικούς χρήστες, μόνα τους είτε ως σύνολο φερουσών, επιτρέποντας έτσι την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων από διαφορετικούς χρήστες αλλά και πιλοτικών συμβόλων (pilot symbols) και δεδομένων καναλιών ελέγχου (control channels) χωρίς παρεμβολές. Τα οφέλη της παραπάνω τεχνικής είναι πολλά [2]:

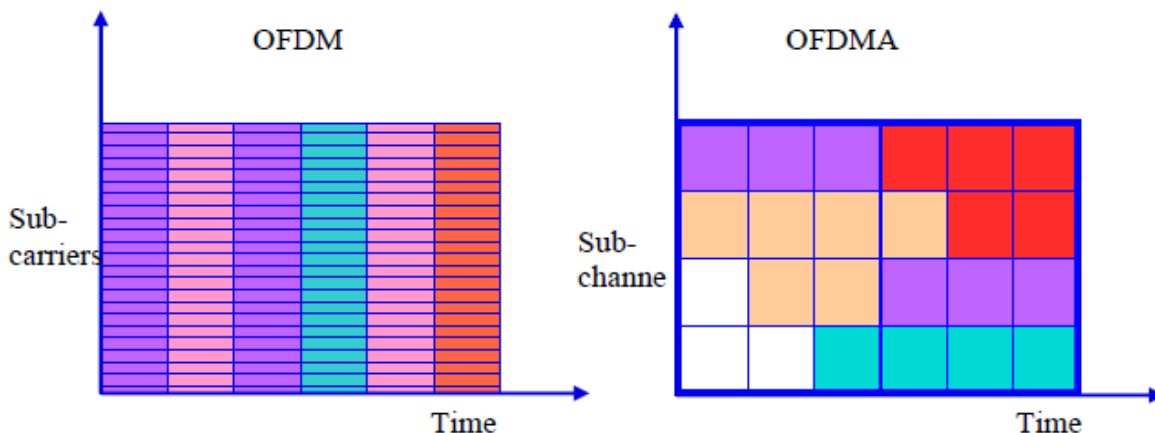
- Διαφορετικά κομμάτια του εύρους ζώνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να χρειαστούν αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος ή τον εξοπλισμό των χρηστών.
- Δέσμευση πόρων από διαφορετικά κομμάτια του εύρους ζώνης σε διαφορετικούς χρήστες και scheduling σαν να είχαμε ενιαίο φάσμα.

- Ευελιξία στην επαναχρησιμοποίηση συχνότητας (frequency reuse) και συντονισμό παρεμβολών.
- Ευρωστία από παρεμβολές και χρονική διασπορά σήματος.
- Επιτρέπει την κατασκευή δεκτών (receivers) με μικρή πολυπλοκότητα και κόστος.

Ιδιαίτερης σημασίας για την χρήση του OFDMA είναι το γεγονός ότι αξιοποιεί καλύτερα το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού σε σχέση με το FDM, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3. Η αρχή της ορθογωνιότητας των φερουσών συμβάλει στην καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης με το να απαλλάσσει τον διαχειριστή του δικτύου από την χρήση guard bands για τον διαχωρισμό των φερουσών.



Εικόνα 3: Διαχωρισμός subcarriers με FDMA (επάνω) και OFDMA (κάτω). [3]

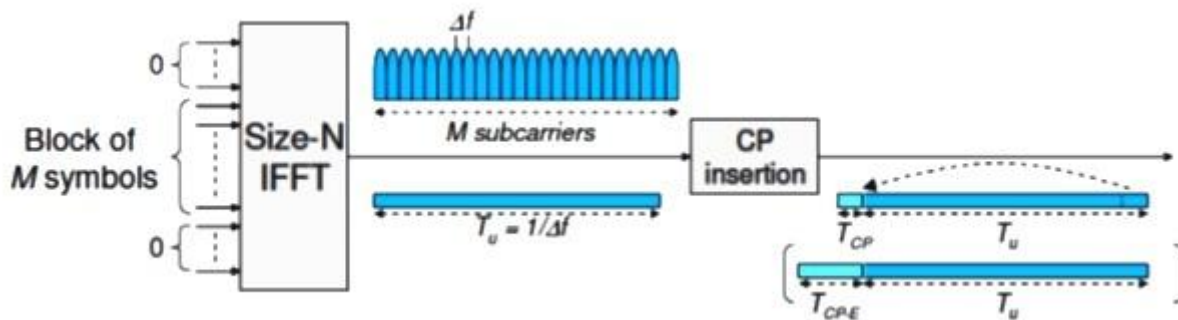


Εικόνα 4: Διάθεση πόρων για OFDM (αριστερά) και OFDMA (δεξιά). Τα διαφορετικά χρώματα αναπαριστούν διαφορετικούς χρήστες. [3]

Παρά τα οφέλη της, η OFDMA τεχνική έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Οι πομπές (transmitters), σε αντίθεση με τους δέκτες, έχουν μεγαλύτερη Αναλογία Μέγιστης-Μέσης Ισχύος (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) για ένα OFDM σήμα και αυτό αυξάνει το κόστος τους. Για τον λόγο αυτό το OFDMA χρησιμοποιείται στο downlink, αφού το κόστος ανάπτυξης ακριβών πομπών στους σταθμούς βάσης (Base Stations) από τον πάροχο του δικτύου είναι λιγότερο σημαντικό

από την ανάπτυξη ακριβών κινητών συσκευών. Αντίθετα με το downlink, στο uplink το υψηλό PAPR δεν μπορεί να καλυφθεί από τις ανάγκες των κινητών συσκευών σε ισχύ εκπομπής και διάρκεια μπαταρίας. Για αυτόν τον λόγο στο uplink χρησιμοποιείται το SC-FDMA το οποίο προσφέρει τις ίδιες ευελιξίες στην διαχείριση των συχνοτήτων αλλά με σημαντικά χαμηλότερες απαιτήσεις σε κατανάλωση ισχύος. [2] [4]

Κάθε μετάδοση στην ραδιο-διεπαφή μπορεί εν δυνάμει να υπόκειται σε διαφθορά και ένας λόγος για αυτό είναι η χρονική διασπορά του σήματος. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση παρεμβολών τόσο ανάμεσα στα OFDM σύμβολα αλλά και μεταξύ των φερουσών. Για να ευρωστία έναντι στην χρονική διασπορά σήματος τα OFDM σύμβολα προστατεύονται μέσω της τεχνικής Κυκλικό Πρόθεμα (cyclic-prefix insertion, CP) κατά την μετάδοση.



Εικόνα 5: Εισαγωγή κυκλικού προθέματος κατά την μετάδοση OFDM συμβόλων στο κανάλι. [5]

Στην τεχνική αυτή, το τελευταίο κομμάτι κάθε OFDM συμβόλου αντιγράφεται στην αρχή του, πριν την μετάδοση, αυξάνοντας το μέγεθος του κάθε συμβόλου και ελαττώνοντας την φασματική απόδοση. Η ευρωστία έναντι στην χρονική διασπορά εξασφαλίζεται εφ' όσον η διάρκεια της χρονική διασποράς είναι μικρότερη ή ίση της διάρκειας του cyclic prefix. Η διάρκεια του cyclic prefix μπορεί να οριστεί ως κανονική ή εκτεταμένη, ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης.

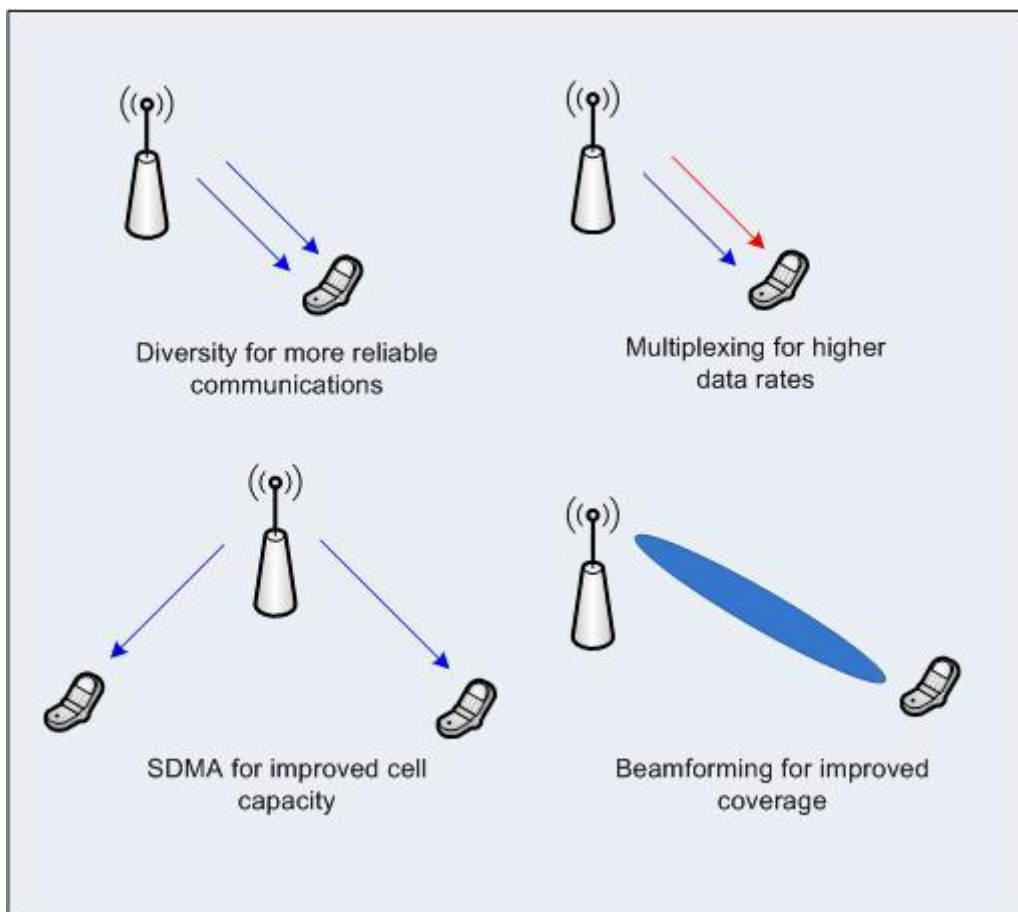
Πίνακας 2: Ρυθμίσεις Κυκλικού προθέματος. [5]

Ρύθμιση/Διάρκεια φέρουσας	Μήκος cyclic prefix	OFDM σύμβολα	
Κανονικό CP	15kHz	≈ 4,7μs	7
Εκτεταμένο CP	15kHz	≈16,7μs	6
	7,5kHz	≈33,3μs	3

### 2.3.2 Πολλαπλές κεραιές

Η χρήση πολλαπλών κεραιών επιτρέπει την εκμετάλλευση του χωρικού πεδίο (spatial-domain) πέρα από το πεδίο των συχνοτήτων και του χρόνου για την επίτευξη μεγαλύτερης φασματικής απόδοσης. Η εφικτή φασματική απόδοση από την χρήση πολλαπλών κεραιών είναι γραμμικά εξαρτώμενη από τον ελάχιστο αριθμό κεραιών εκπομπής και λήψης για μετάδοση σε κατάλληλες συνθήκες. Η χρήση πολλαπλών κεραιών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους και αν και θεωρητικά αυτοί έχουν διάφορα οφέλη, σε πραγματικές συνθήκες αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πολλαπλές κεραιές βασίζονται σε μια από τις τρεις βασικές τεχνικές που περιγράφονται παρακάτω. [2] [5]:





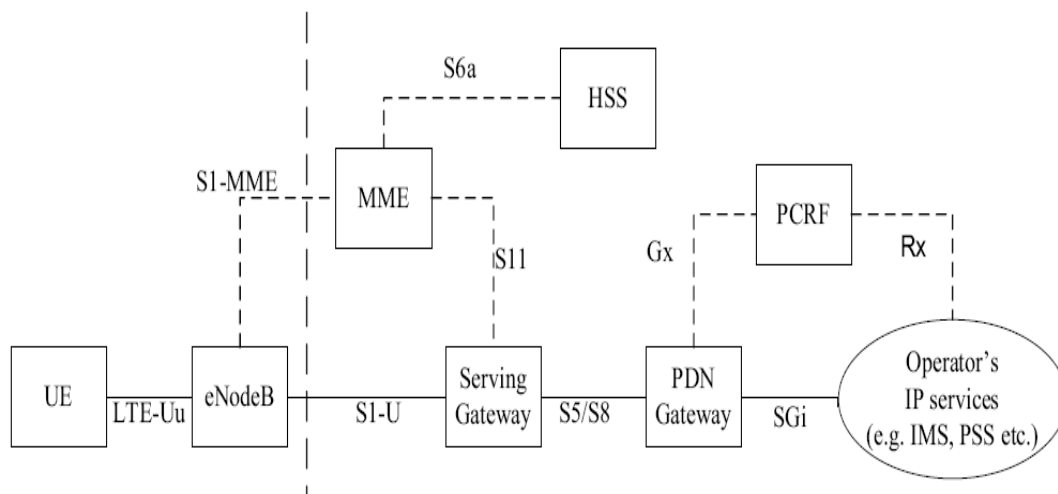
Εικόνα 6: Τρόποι χρήσης πολλαπλών κεραιών στο LTE. [6]

- 1) Κέρδος διαφορισμού (Diversity gain): Αξιοποίηση ποικιλομορφίας στο χώρο για πιο αξιόπιστη μετάδοση ενισχύοντας την ανθεκτικότητα της μετάδοσης ενάντια στην εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών (multipath fading).
- 2) Κέρδος συστοιχίας (Array gain): Συγκέντρωση ενέργειας σε μια ή περισσότερες κατευθύνσεις προς έναν ή περισσότερους χρήστες με σχηματισμό δέσμης (beamforming). Βελτιώνει την αντοχή στο θόρυβο με αποτέλεσμα την καλύτερη κάλυψη και εμβέλεια.
- 3) Χωρική Πολυπλεξία (Spatial Multiplexing): μετάδοση πολλαπλών ροών σε έναν ή περισσότερους χρήστες σε πολλαπλά επίπεδα στον χώρο. Μπορεί να βελτιώσει τον ρυθμό μετάδοσης ή την χωρητικότητα αν οι ροές μεταδίδονται προς έναν χρήστη ή πολλούς, αντίστοιχα.

## 2.4 Αρχιτεκτονική LTE

Το LTE δίκτυο έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει υπηρεσίες μέσω μεταγωγής πακέτου σε αντίθεση με τα προηγούμενα δίκτυα. Στόχος είναι η παροχή απρόσκοπτης Internet Protocol (IP) υπηρεσίας ανάμεσα σε μια συσκευή χρήστη και το Packet Data Network (PDN) χωρίς να προκαλεί διακοπές στις υπόλοιπες υπηρεσίες που παρέχονται στον χρήστη ακόμη και κατά την διάρκεια handover. Με τον όρο LTE καλύπτονται τόσο η εξέλιξη της ραδιοπρόσβασης η οποία καλείται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) όσο και η εξέλιξη των συστατικών του δικτύου που δεν αποτελούν τμήματα της ραδιο-επικοινωνίας (non-radio aspects) που καλύπτονται υπό τον όρο System Architecture Evolution (SAE) ο οποίο περιλαμβάνει και το Evolved Packet Core δίκτυο. Οι δύο αυτοί όροι, LTE και SAE, συνθέτουν το Evolved Packet System. Η

αρχιτεκτονική του LTE, σε υψηλότερο επίπεδο, αποτελείται από το δίκτυο κορμού και το δίκτυο πρόσβασης, με το E-UTRAN να αποτελεί το δίκτυο πρόσβασης και το EPC το δίκτυο κορμού. Το δίκτυο κορμού αποτελείται από πολλές λογικές οντότητες σε αντίθεση με το δίκτυο πρόσβασης το οποίο αποτελείται μόνο από το evolved NodeB (eNB), όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Στοιχεία EPS δικτύου. [2]

Το EPS βασίζεται στην έννοια του φορέα (EPS bearer) το οποίο αναφέρεται στην διακίνηση IP πακέτων από μια πύλη δεδομένων (data gateway) προς ένα UE. Ένα EPS bearer χαρακτηρίζεται από μια Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) από το οποίο εξαρτώνται και τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης ανάμεσα στο gateway και το UE. Η εγκαθίδρυση και ελευθέρωση των bearers γίνεται από το EPC και το E-UTRAN.

Το EPS παρέχει στον χρήστη πρόσβαση σε κάποιο gateway στο PDN μέσω του οποίου έχει πρόσβαση στο internet καθώς και σε υπηρεσίες όπως VoIP. Κάθε τέτοια υπηρεσία παρέχεται από κάποιο ή κάποια EPS bearers, το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από διαφορετικό QoS. Ένας χρήστης μπορεί ανά πάσα στιγμή να χρησιμοποιεί παραπάνω από μια υπηρεσίες, επομένως και bearers, για διαφορετικές υπηρεσίες πιθανώς και μέσω διαφορετικών gateways. Για παράδειγμα ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί μια VoIP υπηρεσία και παράλληλα να κάνει και web browsing ή μεταφορά κάποιου αρχείου μέσω FTP. Ένα bearer με το αντίστοιχο QoS του παρέχει την VoIP υπηρεσία ενώ ένα άλλο, best effort bearer, το web browsing ή την μεταφορά μέσω FTP. Επιπλέον, το δίκτυο θα πρέπει να παρέχει ασφάλεια και ιδιωτικότητα στον χρήστη.

Τα παραπάνω παρέχονται με την χρήση πολλαπλών οντοτήτων στο δίκτυο, το καθένα με τη δική του λειτουργία. Οι οντότητες αυτές συνδέονται μεταξύ τους μέσω κάποιας τυποποιημένης διεπαφής. Αυτό εξασφαλίζει δια λειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών. Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί η περιγραφή των οντοτήτων στο EPS δίκτυο και των υπηρεσιών που παρέχουν. Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή της στοίβας πρωτοκόλλων και των υπηρεσιών τους.

### 2.4.1 Δίκτυο Πυρήνα

Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των UEs και την διαχείριση των bearers τους. Οι κυριότεροι κόμβοι που αποτελούν το δίκτυο κορμού είναι:



- **Πύλη Δικτύου Δεδομένων (PDN Gateway, P-GW):** υπεύθυνο για την διάθεση IP διεύθυνσης στα UEs για την σύνδεση σε PDNs, την επιβολή του QoS σε Guaranteed Bit Rate (GBR) ροές και την χρέωση του χρήστη σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζει το PCRF. Φιλτράρει τα IP πακέτα που προορίζονται προς τον χρήστη σε ροές με διαφορετικά QoS με βάση τα Traffic Flow Templates (TFFs). Λειτουργεί, τέλος, ως σημείο αναφοράς (anchor) για την μετάβαση σε άλλα, μη 3GPP δίκτυα (CDMA200, WiMAX).
- **Πύλη Εξυπηρέτησης (Serving Gateway, S-GW):** Δρομολογεί και προωθεί τα IP πακέτα των χρηστών και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς όταν κατά την μετακίνηση, ο χρήστης συνδέεται σε άλλο eNB ή μεταβαίνει σε άλλο 3GPP δίκτυο όπως το GPRS ή UMTS (handover). Αποτελεί ενδιάμεσο κόμβο κατά την αποστολή δεδομένων από το PDN στον χρήστη και όταν ο χρήστης μεταβεί σε αδρανή κατάσταση (ECM-IDLE που περιγράφεται παρακάτω), η αποστολή δεδομένων σταματάει στο S-GW, το οποίο διατηρεί τις πληροφορίες για τα bearers και αποθηκεύει προσωρινά τα δεδομένα χρήστη (DL δεδομένα, UE context, IP bearers, network routing) καθώς το MME ξεκινά διαδικασία αποστολή μηνύματος τηλεειδοποίησης (paging) προς το UE για την επανεγκαθίδρυση των bearers. Εκτελεί επίσης δευτερεύουσες λειτουργίες όπως συλλογή δεδομένων για τον υπολογισμό της χρέωση του πελάτη, όπως όγκος διακινούμενων δεδομένων, και νόμιμη παρακολούθηση.
- **Διαχειριστής Κινητότητας (Mobility Management Entity, MME):** Διαχειρίζεται την αποστολή μηνυμάτων ανάμεσα στο UE και το CN και αποτελεί τον βασικό κόμβο για την σύνδεση ενός UE στο δίκτυο. Οι βασικές λειτουργίες του MME αφορούν την διαχείριση των bearers, η οποία περιλαμβάνει την εγκαθίδρυση, διατήρηση και αποδέσμευσή τους, και λειτουργίες που αφορούν την διαχείριση της σύνδεσης. Η διαχείριση της σύνδεσης περιλαμβάνει την εγκαθίδρυση σύνδεσης και αρχικοποίηση μηχανισμού ασφάλειας ανάμεσα στο UE και το δίκτυο. Η διαχείριση των bearers γίνεται από το στρώμα διαχείρισης συνεδρίας (session management layer) στη στοίβα πρωτοκόλλων του NAS ενώ η διαχείριση της σύνδεσης στο Στρώμα Διαχείρισης Σύνδεσης και Κινητότητας (connection or mobility layer).

Κατά την σύνδεση ενός UE στο δίκτυο, το MME διατηρεί πληροφορίες σχετικές με το UE (UE context). Για την αναγνώριση του συνόλου των πληροφοριών αυτών, ανατίθεται ένας μοναδικός αριθμός αναγνώρισης (S-TMSI) ανά UE. Το context που διατηρεί το MME περιλαμβάνει τις πληροφορίες συνδρομής του χρήστη, διαθέσιμα από το HSS. Η διατήρηση πληροφοριών για τον χρήστη βοηθάει στην γρηγορότερη εγκαθίδρυση των bearers εφ' όσον δεν χρειάζεται η μεσολάβηση του HSS κάθε φορά. Επίσης διατηρούνται δυναμικές πληροφορίες όπως η λίστα των τρεχόντων bearers και οι δυνατότητες της συσκευής χρήστη.

Για να μειωθεί το overhead από την διατήρηση των πληροφοριών του χρήστη στο E-UTRAN, όλα τα δεδομένα ενός UE διαγράφονται όταν αυτό μεταβεί σε αδρανή κατάσταση (EPS Connection Management IDLE, ECM-IDLE). Το MME διατηρεί τα δεδομένα αυτά. Όταν ένας χρήστης μετακινείται, ενημερώνει το δίκτυο με την νέα του τοποθεσία όταν μεταβεί εκτός της περιοχής εντοπισμού (Tracking Area, TA). Το MME είναι υπεύθυνο για την ενημέρωση της θέσης του UE όσο αυτό είναι σε αδρανή κατάσταση. Η θέση του UE θα πρέπει να είναι γνωστή για να υπάρξει επικοινωνία μαζί του για μετάβασή του σε ενεργή κατάσταση (ECM-ACTIVE). Όταν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή για ένα idle UE, το MME στέλνει ένα μήνυμα τηλεειδοποίησης σε όλα τα eNBs στο tracking area του χρήστη και τα eNBs στα συνδεδεμένα UEs. Όταν το UE λάβει το μήνυμα, εκκινεί

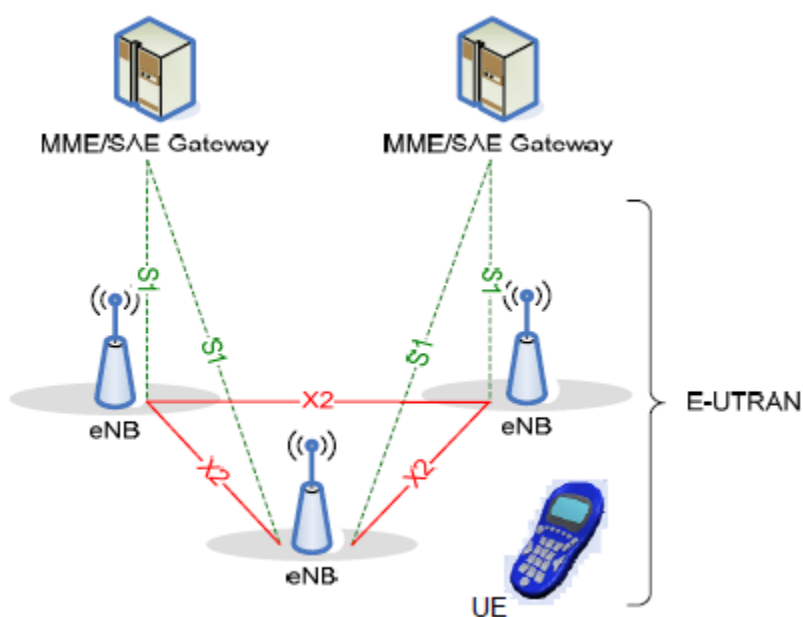
διαδικασία για μετάβαση σε ενεργή κατάσταση οπότε και το context του χρήστη και τα bearers δημιουργούνται ξανά μέσω του MME.

Επιπλέον, το MME είναι υπεύθυνο για την αμοιβαία πιστοποίηση των UEs και του δικτύου όταν ένας χρήστης εισέρχεται στο δίκτυο. Η διαδικασία πιστοποίησης παράγει τα κλειδιά με τα οποία κρυπτογραφούνται τα bearers.

- **Home Subscriber Server (HSS):** Περιέχει τις πληροφορίες σχετικά με το προφίλ συνδρομής του χρήστη στο δίκτυο όπως το QoS προφίλ, πιθανούς roaming περιορισμούς καθώς και τα PDNs στα οποία μπορεί να συνδεθεί ο χρήστης. Επιπλέον διατηρεί και κάποια δυναμική πληροφορία, όπως το MME στο οποίο είναι συνδεδεμένο ο χρήστης. Το HSS θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με κάθε MME στο δίκτυο προκειμένου να παρέχεται στον χρήστη η δυνατότητα να μετακινείται.
- **Πολιτική και Έλεγχος Χρέωσης (Policy Control and Charging Rules Function, PCRF):** Λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τις παρεχόμενες υπηρεσίες όσον αφορά το QoS τους και παρέχει πληροφορίες στο Policy Control Enforcement Function (PCEF) στο P-GW. Το PCRF παρέχει την QoS έγκριση βάσει του QoS class identifier και bitrates με βάσει τα οποία εξαρτάται πως θα αντιμετωπιστεί ένα flow στο PCEF και ότι αυτή η αντιμετώπιση θα είναι συνεπής με τα συνδρομητικό προφίλ του χρήστη.

## 2.4.2 Δίκτυο Πρόσβασης

Το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από έναν μόνο κόμβο, το eNB, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Για κανονική μετάδοση (όχι broadcast) δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός κόμβος στο E-UTRAN οπότε η αρχιτεκτονική είναι flat. Ένα eNB συνδέεται με άλλα eNBs μέσω της X2 διεπαφής και με το EPC μέσω της S1 διεπαφής και συγκεκριμένα με το MME μέσω της S1-MME και με το S-GW μέσω της S1-U διεπαφής. Το πρωτόκολλο ανάμεσα στα eNBs και το UE λέγεται Access Stratum (AS) πρωτόκολλο ενώ αυτό ανάμεσα στο UE και το EPC, Non Access Stratum (NAS).



Εικόνα 8: Κόμβοι δικτύου πρόσβασης. [7]

Το δίκτυο πρόσβασης είναι υπεύθυνο για την ραδιο-επικοινωνία των UEs με το δίκτυο κορμού και οι βασικές λειτουργίες του συνοψίζονται ως εξής:

- Διαχείριση Πόρων ραδιοεπικοινωνίας (Radio Resource Management, RRM): Περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες που αφορούν τα radio bearers συμπεριλαμβανομένου της δέσμησης και απελευθέρωσής τους, το scheduling και την δυναμική δέσμηση πόρων για τα UE για το DL και UL.
- Συμπύεση επικεφαλίδας (Header Compression): Συμπύεση επικεφαλίδων για τα IP πακέτα για αποδοτικότερη χρήση της ραδιο-διεπαφής.
- Ασφάλεια: Κρυπτογράφηση των δεδομένων που μεταδίδονται από την ραδιο-διεπαφή.
- Σύνδεση με EPC: Σηματοδότηση προς το MME και η διαδρομή που ακολουθεί ένα bearer προς το S-GW.

Όλες οι παραπάνω λειτουργίες υλοποιούνται στα eNBs, το καθένα από τα οποία μπορεί να διαχειρίζεται ένα σύνολο από κυψέλες. Η συγκέντρωση της διαχείρισης της ραδιο-διεπαφής από έναν κόμβο αποδεσμεύει από την ανάγκη ύπαρξης κεντρικού κόμβου ελέγχου (central radio controller), δημιουργώντας ένα κατακεκομμένο σύστημα χωρίς μοναδικά σημεία αποτυχίας (single points of failure). Το αρνητικό είναι ότι η έλλειψη τέτοιου κόμβου οδηγεί στην μεταφορά όλων των σχετικών δεδομένων ενός χρήστη κατά την αλλαγή eNB.

Σε ένα LTE δίκτυο, ένα σύνολο από CN κόμβους (MME/S-GW) μπορεί να συνδέεται με ένα σύνολο από eNBs σε μια γεωγραφική περιοχή μέσω δικτύου πλέγματος (mesh network). Ως εκ τούτου ένα eNB μπορεί να εξυπηρετείται από ένα σύνολο από MME/S-GWs. Το σύνολο των κόμβων δικτύου πυρήνα ονομάζεται MME/S-GW pool ενώ η περιοχή που καλύπτουν, pool area. Έτσι οι χρήστες μια περιοχής οι οποίοι εξυπηρετούνται από ένα eNB, μοιράζονται ένα σύνολο από MME/S-GW μοιράζοντας το φόρτο και αποκλείοντας τα single points of failure. Το user context παρ' όλα αυτά παραμένει ανά πάσα στιγμή σε ένα μόνο MME όσο ο χρήστης παραμένει στο pool area. Επιπλέον, κάθε χρήστης μπορεί να είναι συνδεδεμένος σε ένα μόνο eNB ανά πάσα στιγμή.

### 2.4.3 Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS) και EPS Bearers

Όπως περιεγράφηκε και παραπάνω, ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί παραπάνω από μια υπηρεσία ταυτόχρονα, το καθένα από τα οποία με τις δικές του απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας. Για παράδειγμα μπορεί να συνομιλεί μέσω VoIP ενώ ταυτόχρονα να κάνει και web browsing. Το μεν VoIP απαιτεί μικρές καθυστερήσεις και είναι ανεκτικό σε χαμένα πακέτα, το δε web browsing είναι ανεκτικό σε καθυστερήσεις αλλά όχι σε χαμένα πακέτα.

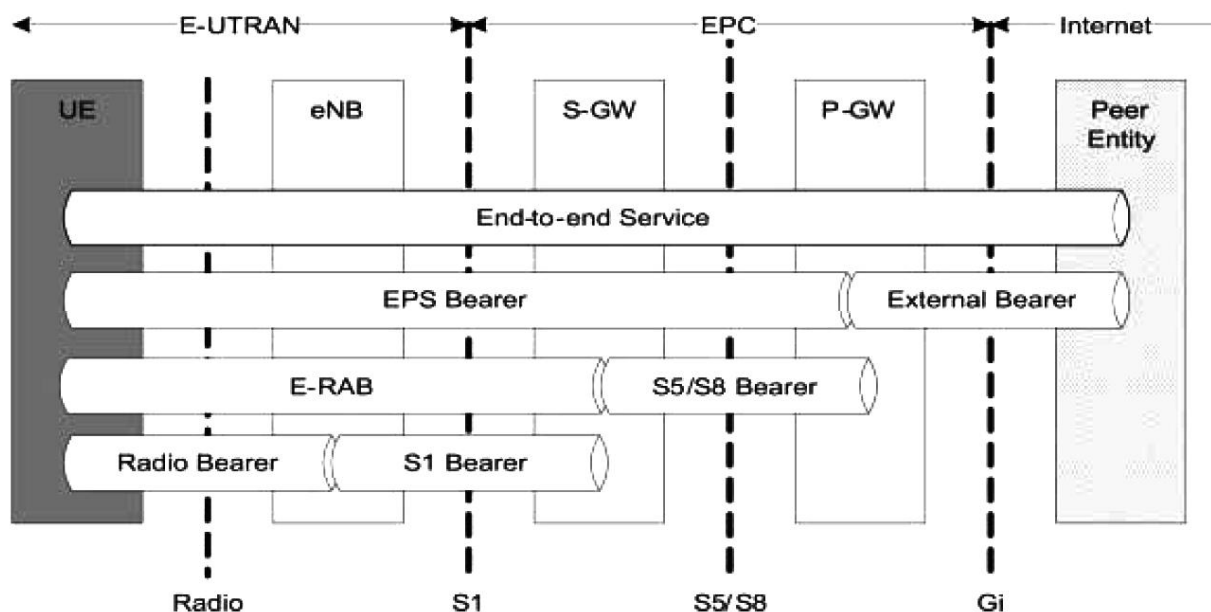
Είναι φανερό ότι τα πακέτα για κάθε υπηρεσία θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ανάλογα με το απαιτούμενο QoS. Για τον λόγο αυτό, το δίκτυο χρησιμοποιεί διαφορετικό bearer ανά απαιτούμενο QoS. Σε γενικές γραμμές, τα bearers κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες, Minimum Guaranteed BitRate (GBR) και Non-GBR.

Ως GBR bearer ορίζονται οι bearers που εγγυόνται ένα bit rate και για τους οποίους οι πόροι δεσμεύονται επί μονίμου βάσεως κατά την εγκαθίδρυση/τροποποίησή τους με βάση το αντίστοιχο bit rate. Αν οι πόροι επαρκούν, ένα GBR bearer μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερα bit rates αλλά μέχρι μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή bit rate (Maximum Bit Rate, MBR). Χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες όπως το VoIP. Ένας Non-GBR bearer από την άλλη δεν εγγυάται bit rate και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από

υπηρεσίες όπως το FTP ή web browsing. Ακολουθεί την best effort πολιτική του IP και οι πόροι δεν δεσμεύονται μόνιμα.

Κάθε bearer έχει και QoS Class Identifier (QCI) το οποίο προσδιορίζει την προτεραιότητα, την επιτρεπτή καθυστέρηση των πακέτων και τον επιτρεπόμενο ρυθμό απώλειας πακέτων (packet loss rate). Το QCI προσδιορίζει πως το eNB θα διαχειριστεί το bearer. Υπάρχουν μόνα λίγα τυποποιημένα QCIs ώστε να υπάρχει συνέπεια στην αντιμετώπιση των bearers από διαφορετικούς κατασκευαστές. Η τιμή προτεραιότητας και η επιτρεπόμενη καθυστέρηση καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας του επιπέδου RLC και το scheduling στο επίπεδο MAC για τα διακινούμενα πακέτα. Για παράδειγμα ένα πακέτο με μεγαλύτερη προτεραιότητα θα τοποθετηθεί για μετάδοση πριν από ένα πακέτο με μικρότερη προτεραιότητα.

Ως μέρος της διαδικασίας σύνδεσης ενός UE στο δίκτυο, ανατίθεται σε αυτό μια IP διεύθυνση από το P-GW και τουλάχιστον ένα bearer, το οποίο καλείται το εξ' ορισμού bearer (default bearer) και παραμένει ενεργό όσο το UE διατηρεί σύνδεση με το PDN. Σκοπός του default bearer είναι να παρέχει 'always-on' σύνδεση IP με το PDN. Επιπλέον bearers μπορούν να δημιουργηθούν, είτε μετά από απαίτηση κάποιας εφαρμογής του χρήστη είτε από το δίκτυο. Οι επιπλέον bearers μπορούν να είναι είτε GBR είτε Non-GBR αλλά ο default θα πρέπει να είναι Non-GBR μιας και η σύνδεσή του είναι μόνιμως ενεργή.



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική για EPS bearers. [2]

#### 2.4.4 Διεπαφή S1

Η S1 διεπαφή συνδέει τα eNBs με το EPC και μαζί με την X2 διεπαφή αποτελούν σημαντικό μέρος της σχεδίασης του δικτύου προς την κατεύθυνση των Αυτό-Οργανωμένων Δικτύων (Self-Organized Networks, SONs).

Στόχος ενός SON είναι η ελαχιστοποίηση της ανάγκης χρήσης ενός κεντρικού κόμβου ή ανθρώπινης παρέμβασης για την ρύθμιση του δικτύου, και υλοποιείται με την αυτοματοποίηση των αντίστοιχων λειτουργιών. Σημαντικό ρόλο αυτοματοποίηση των λειτουργιών παίζουν οι S1 και X2 διεπαφές καθώς και τα τερματικά των χρηστών.

Μια σημαντική λειτουργία για το δίκτυο αποτελεί η αυτόματη ρύθμιση των eNBs και των MMEs μέσω των διεπαφών S1 και X2. Κατά την εγκατάσταση ενός eNB στο δίκτυο, αυτό θα πρέπει να συνδεθεί με όλα τα MMEs που του υποδεικνύει ο πάροχος του δικτύου με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών όπως Tracking Area Ids και πιθανά διαφορετικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που μοιράζονται το δίκτυο. Επιπλέον, οι eNBs θα πρέπει να μπορούν να ανταλλάσσουν με γειτονικούς κόμβους, πληροφορία που αφορά τον φόρτο δικτύου, τις παρεμβολές και την handover λειτουργία. Τα παραπάνω υλοποιούνται μέσω της X2 διεπαφής. Μια επιπλέον σημαντική λειτουργία είναι η ανάθεση μοναδικών IDs σε κάθε κυψέλη σε μια ομάδα κυψελών. Ο εντοπισμός των διαθέσιμων IDs γίνεται μέσω της X2 διεπαφής. Κάθε eNB στέλνει στους γειτονικούς τους κόμβους τα IDs που χρησιμοποιούνται από τις κυψέλες του ίδιου και των γειτονικών του κόμβων. Έτσι κάθε eNB μπορεί να εντοπίσει ένα σύνολο από διαθέσιμα IDs χωρίς την ανάγκη κεντρικού κόμβου.

Η S1 διεπαφή αποτελείται από δυο μέρη, αυτό της διαχείρισης ελέγχου (control plane) και της διαχείρισης χρήστη (user plane). Το control plane αποτελεί μια στοίβα πρωτοκόλλων βασισμένη στο SCTP/IP πρωτόκολλο, το οποίο παρέχει αξιόπιστη μεταφορά μηνυμάτων σηματοδότησης, ενώ το user plane αποτελεί μια GTP/UDP/IP στοίβα πρωτοκόλλων.

Ένα eNB είναι ρυθμισμένο να περιέχει τις διευθύνσεις των MMEs στο pool area στο οποίο ανήκει. Η εγκατάσταση της S1 διεπαφής ανάμεσα σε ένα eNB και ένα MME ξεκινάει από το eNB όταν αυτό δημιουργεί μια σύνδεση με κάποιο από τα διαθέσιμα MMEs κατά την οποία διαπραγματεύεται ένας αριθμός συνδέσεων που θα μοιράζονται για την αποστολή της σηματοδότησης και των δεδομένων. Μετά το πέρας αυτής της αρχικοποίησης, το eNB και το MME ανταλλάσσουν πληροφορίες επιπέδου εφαρμογής, σχετικές με την λειτουργία του δικτύου. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ανταλλαγή των ταυτοτήτων των κόμβων στο tracking area. Το παραπάνω είναι μια σημαντική λειτουργία για την λειτουργία του δικτύου καθώς το tracking area αντιπροσωπεύει τις ζώνες στις οποίες το UE μπορεί να λάβει paging μήνυμα και πρέπει να είναι πάντα συνεπής ανάμεσα στους κόμβους τους δικτύου.

Μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης της σύνδεσης, η S1 διεπαφή παρέχει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Πληροφορία χρήστη (User context): ένας χρήστης ο οποίος έχει συνδεθεί σε ένα eNB σε ένα pool area, δημιουργεί user context στον αντίστοιχο κόμβο MME και συνεχίζει να χρησιμοποιεί τον κόμβο αυτόν όσο παραμένει στο pool area. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν ο χρήστης μεταβεί σε αδρανή κατάσταση όλη η πληροφορία του διαγράφεται από το δίκτυο σύνδεσης. Όταν ο ίδιος χρήστης συνδεθεί σε ένα άλλο eNB στο pool area, το user context του μεταφέρεται στο eNB από το MME. Κατά την διαδικασία αυτή δημιουργούνται και κάποια bearers, συμπεριλαμβανομένου και του default.
- Τηλεειδοποίηση (Paging): Για την μετάβαση ενός UE από αδρανή κατάσταση σε ενεργή, το MME στέλνει ένα paging μήνυμα στα eNBs που βρίσκονται στο tracking area στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται το UE και τα eNBs προωθούν το μήνυμα στο UE
- Κινητικότητα (Mobility): Υποστηρίζει κινητότητα εντός του δικτύου και ανάμεσα σε άλλα δίκτυα. Υπάρχουν δύο είδη κινητότητας εντός του LTE δικτύου για ένα ενεργό UE, η S1 κινητότητα και η X2 κινητότητα. Η X2 κινητότητα χρησιμοποιείται για την μετάβαση από το ένα eNB στο άλλο, εφ' όσον αυτά είναι συνδεδεμένα μέσω X2 διεπαφής. Όταν αυτή η σύνδεση δεν υπάρχει ή το eNB έχει ρυθμιστεί να εκτελεί S1 κινητότητα προς κάποιο άλλο eNB, εκτελείται τη S1 κινητότητα. Η διαδικασία αποτελείται από τρία βήματα, την προεργασία κατά την

οποία δεσμεύονται οι πόροι από το δίκτυο, την εκτέλεση της μετάβασης και την ολοκλήρωση.

- Διαχείριση φόρτου δικτύου (network load management): Στοχεύει στο να μοιράσει τον φόρτο του δικτύου ανάμεσα στα διαθέσιμα MMEs στο pool, ανάλογα με την χωρητικότητα του κάθε MME. Ο διαμοιρασμός του φόρτου στα MMEs γίνεται από το eNB το οποίο έχει γνώση των χωρητικότητων. Υπάρχουν τριών ειδών διαχειρίσεις φόρτου: διαμοιρασμός φόρτου (load balancing), υπερφόρτωσης (overload) και εξισορρόπησης (rebalancing) Στην κανονική διαχείριση, ένας MME κόμβος αυξάνει ή μειώνει προσωρινά την χωρητικότητά του ώστε να δεχτεί μεγαλύτερο/μικρότερο όγκο δεδομένων ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης, με σκοπό τον διαμοιρασμό του όγκου. Στην διαχείριση υπερφόρτωσης, όταν ένα MME δεχτεί παραπάνω όγκο δεδομένων από όσο μπορεί να διαχειριστεί, στέλνει ένα overload μήνυμα προς όλα τα eNBs να περιορίσουν την μετάδοση προς αυτό. Τέλος, στο τρίτο είδος ένα MME μπορεί να απορρίψει ένα μέρος των συνδεδεμένων UEs και να τα αναγκάσει να συνδεθούν σε άλλα MMEs ως εξισορρόπηση.

#### 2.4.5 Διεπαφή X2

Η X2 διεπαφή συνδέει τα eNBs μεταξύ τους. Η στοίβα πρωτοκόλλων control plane και user plane είναι ίδια με την S1 διεπαφή, με την εξαίρεση του επιπέδου εφαρμογή, το οποίο απλοποιεί την προώθηση των δεδομένων ανάμεσα στις δυο διεπαφές.

Η αρχικοποίηση της διεπαφής ξεκινάει όταν δυο eNBs θέλουν να ανταλλάξουν πληροφορία σηματοδότησης. Υπάρχουν δυο τύποι πληροφορίας που μπορούν να σταλούν μέσω της X2 διεπαφής, πληροφορία σχετικά με τον φόρτο/παρεμβολές και πληροφορία σχετική με handover. Οι τύποι αυτοί είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Το πρώτο βήμα της αρχικοποίησης αφορά τον εντοπισμό των γειτονικών eNBs και την εύρεση του καταλληλότερου από αυτούς. Μόλις βρεθεί ένας κατάλληλος γειτονικός κόμβος, ξεκινά η διαδικασία διαπραγμάτευσης των συνδέσεων και η ανταλλαγή πληροφορίας επιπέδου εφαρμογής, όπως και στο S1.

Η κινητότητα μέσω της X2 διεπαφής χρησιμοποιείται εξ' ορισμού εκτός κι' αν δεν έχει αρχικοποιηθεί η διεπαφή ανάμεσα στα eNBs ή το eNB προέλευσης έχει ρυθμιστεί να χρησιμοποιεί την S1 διεπαφή. Η διαδικασία του handover είναι ίδια με την S1 διαδικασία με τις εξής διαφορές:

- Το handover γίνεται μεταξύ eNBs
- Η προώθηση των δεδομένων μπορεί να γίνει ανά bearer για ελαχιστοποίηση των απωλειών, με βάση το QoS του καθένα.
- Το MME ενημερώνεται στο τέλος της διαδικασίας για να ενημερώσει την νέα διαδρομή για αποστολή πακέτων.
- Το eNB προορισμού προκαλεί την απελευθέρωση των πόρων του eNB προέλευσης.

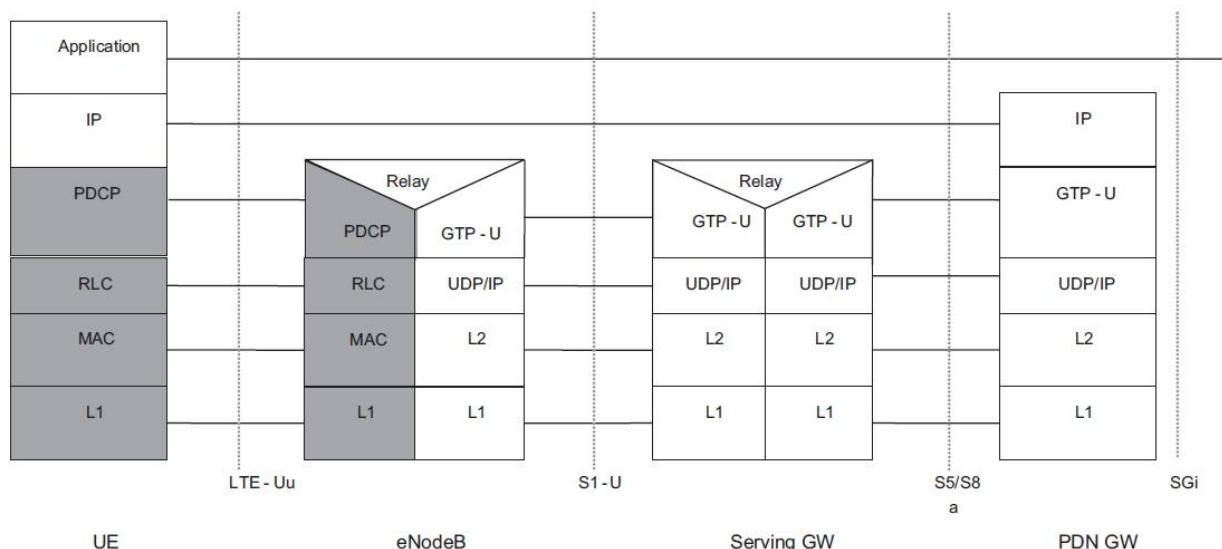
Η κινητότητα μέσω X2 μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με ανθεκτικότητα στην απώλεια πακέτων σε απρόσκοπτη (seamless), αν ελαχιστοποιεί τις διακοπές στην υπηρεσία κατά την κινητότητα, ή 'χωρίς απώλειες' (lossless) όταν δεν χάνει πακέτα. Τα στάδια της κινητότητας είναι ίδια με αυτά της S1 κινητότητας, προετοιμασία, μετάβαση και ολοκλήρωση και το eNB προέλευσης διαλέγει ποιο είδος handover θα υλοποιηθεί ανάλογα με το QoS του κάθε bearer. Κατά το seamless handover, το eNB προέλευσης μπορεί να αρχίσει να προωθεί στο eNB προορισμού τα πακέτα του χρήστη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στο νέο

eNB όσο το δυνατόν νωρίτερα. Κατά το lossless handover, το eNB προέλευσης θα στείλει στο eNB προορισμού και τα πακέτα που έχει στείλει στον χρήστη αλλά για τα οποία δεν έχει λάβει επιβεβαίωση. Επιπλέον, κατά την διαδικασία της κινητότητας αποστέλλεται μήνυμα σε παραπάνω από ένα eNBs για γρηγορότερη ανάκτηση σε περίπτωση αποτυχίας.

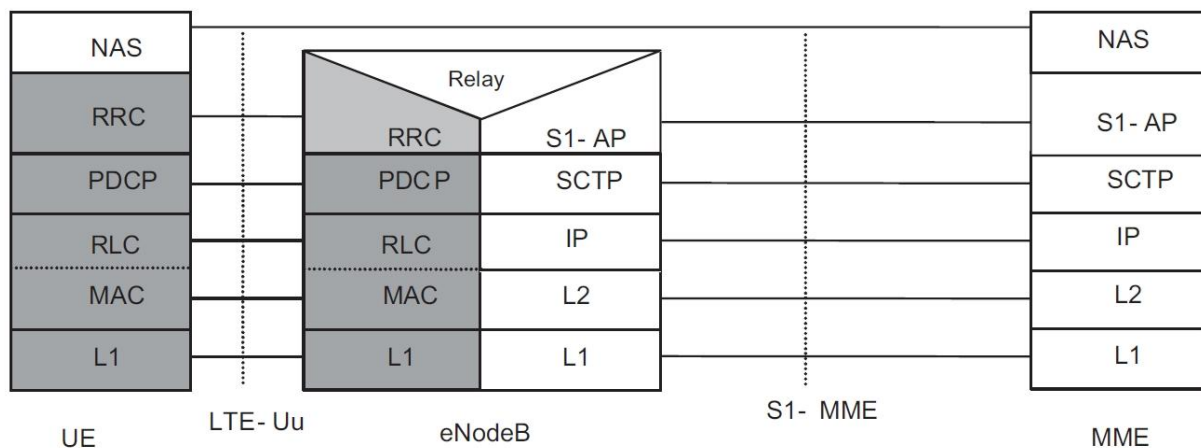
Η ανταλλαγή πληροφορίας σχετικά με τον φόρτο του δικτύου είναι κρίσιμη για το LTE καθώς η αρχιτεκτονική του είναι επίπεδη και δεν περιέχει κεντρικό κόμβο για την υπηρεσία αυτή. Η ανταλλαγή τέτοιας πληροφορίας εντάσσεται σε δυο κατηγορίες, πληροφορία σχετικά με τον φόρτο για την εξισορρόπησή του και σχετικά με την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Η εξισορρόπηση του φόρτου έχει σκοπό την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος με το να μοιράζει τον φόρτο σε κυψέλες με μικρότερη επιβάρυνση. Για τον σκοπό αυτό οι κυψέλες ανταλλάσσουν πληροφορία για την κατάσταση του καθενός. Για την αντιμετώπιση των παρεμβολών, το LTE χρησιμοποιεί ειδικές διαδικασίες μέσω της διεπαφής. Η αντιμετώπιση των παρεμβολών θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 6.

### 3 Στοιβά Πρωτοκόλλων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα πρωτόκολλα του LTE χωρίζονται στα User Plane (UP) και Control Plane (CP) πρωτόκολλα. Τα UP πρωτόκολλα έχουν να κάνουν με την μετάδοση δεδομένων του χρήστη (user data transmission) και τα CP με την μετάδοση σήματοδοσίας (signaling transmission). Η στοιβά πρωτοκόλλων για το UP παρουσιάζεται στην Εικόνα 10 και για το CP στην Εικόνα 11.



Εικόνα 10: Στοιβά πρωτοκόλλων για το User Plane (γκρίζο μέρος). [2]



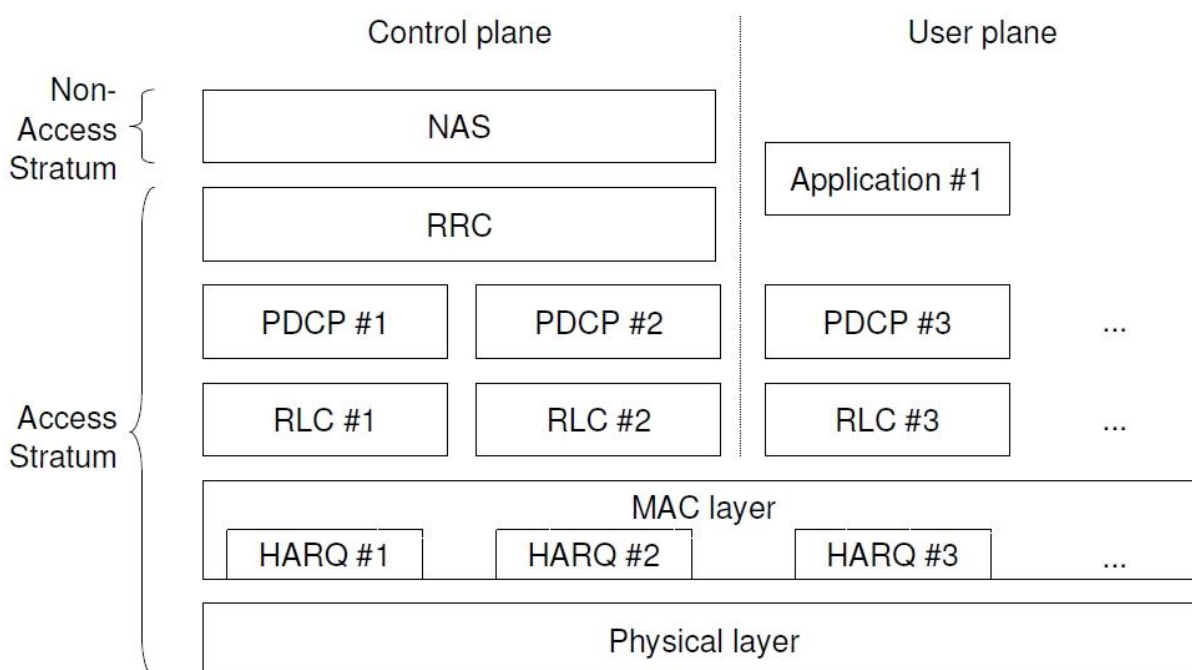
Εικόνα 11: Στοιβά πρωτοκόλλων για το Control Plane. Το γκριζο μέρος αναφέρεται στα Access Stratum (AS) πρωτόκολλα. [2]

Στην στοιβά πρωτοκόλλων για το CP, το υψηλότερου επιπέδου NAS χρησιμοποιεί τα χαμηλότερου επιπέδου AS πρωτόκολλα για να παρέχει λειτουργίες υψηλότερου επιπέδου σε αλληλεπίδραση με το δίκτυο. Τέτοιες λειτουργίες αφορούν την ενημέρωση του tracking area, το paging, την δημιουργία, διαχείριση και καταστροφή των bearers, πιστοποίηση χρηστών και την επιλογή του Δικτύου Κινητής Επικοινωνίας (Public Line Mobile Network, PLMN). Τα AS πρωτόκολλα προσφέρουν ραδιο-λειτουργίες οι οποίες σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από την κατάσταση ραδιο-λειτουργίας του UE, μέσω του RRC πρωτοκόλλου, η οποία μπορεί να είναι είτε σε αδρανή κατάσταση (RRC\_IDLE) ή ενεργή (RRC\_CONNECTED).



Οι λειτουργίες που μπορούν να εκτελεστούν κατά την διάρκεια της αδρανούς κατάστασης περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των κυψελών για την επιλογή ή επανεπιλογή του καλύτερου δυνατού, την παρακολούθηση του καναλιού για την paging διαδικασία, τον εντοπισμό εισερχόμενων κλήσεων και την παρακολούθηση αποστολής μηνυμάτων σχετικά με τις πληροφορίες του συστήματος (system information). Στην ενεργή κατάσταση η βασική λειτουργία είναι η δέσμευση επαρκών πόρων για την μεταφορά δεδομένων. Για την λειτουργία αυτή η συσκευή χρήστη παρακολουθεί το αντίστοιχο κανάλι στο οποίο μεταδίδεται η ενημέρωση για την δέσμευση πόρων σε επίπεδο χρόνου και συχνότητας, για κάθε μπλοκ μεταφοράς, το οποίο μεταδίδεται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους εκπομπής (Transmission Time Interval, TTI). Επιπλέον, στην κατάσταση αυτή η συσκευή χρήστη παρέχει στο δίκτυο δεδομένα σχετικά με την ποιότητα του καναλιού και τον όγκο των δεδομένων στο buffer αποστολής καθώς και την κατάσταση των γειτονικών κυψελών.

Από τις παραπάνω στρώσεις πρωτοκόλλων, τα AS πρωτόκολλα, με την εξαίρεση του RRC πρωτοκόλλου, είναι κοινά για το User Plane και Control Plane. Γενική αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων παρουσιάζεται στην Εικόνα 12.



**Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων Control Plane και User Plane. [2]**

Κατά την αποστολή, το κάθε στρώμα λαμβάνει ένα Πακέτο Δεδομένων Υπηρεσίας (Service Data Unit, SDU) από το παραπάνω στρώμα και παρέχει ένα Πακέτο Δεδομένων Πρωτοκόλλου (Protocol Data Unit, PDU) στο παρακάτω στρώμα. Για παράδειγμα το RLC στρώμα λαμβάνει PDCP SDUs από το PDCP στρώμα και παραδίδει στο MAC RLC PDUs. Κατά την λήψη πακέτων η αντίστροφη διαδικασία λαμβάνει χώρα, για παράδειγμα το RLC στρώμα λαμβάνει MAC SDUs και παραδίδει στο PDCP RLC PDUs. Τα PDU και SDU πακέτα καθώς και οι επικεφαλίδες τους είναι byte aligned.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή του RRC πρωτοκόλλου και στη συνέχεια των κοινών πρωτοκόλλων του Control Plane και User Plane.

### 3.1 Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ράδιο-πόρων (Radio Resource Control, RRC)

Το RRC πρωτόκολλο μεταφέρει NAS πληροφορία που αφορά όλους τους χρήστες (common NAS information) ή κάποιον συγκεκριμένο χρήστη (dedicated NAS information) και παρέχει ειδοποίηση προς τον χρήστη για εισερχόμενες κλήσεις. Οι βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου περιγράφονται στις ακόλουθες υποενότητες.

#### 3.1.1 Εκπομπή πληροφοριών συστήματος

Το σύστημα εκπέμπει περιοδικά πληροφορία απαραίτητη για τους χρήστες στο δίκτυο, η οποία περιέχει τις παραμέτρους πρόσβασης και λειτουργίας δικτύου. Η μετάδοση της πληροφορίας αυτής οργανώνεται σε μπλοκ πληροφοριών συστήματος (System Information Blocks, SIBs). Ειδικότερα, τα μπλοκ αυτά χωρίζονται στα Κύριο μπλοκ πληροφοριών (Master Information Block, MIB), Μπλοκ Πληροφοριών Συστήματος τύπου 1 (System Information Block type 1, SIB1), Μπλοκ Πληροφοριών Συστήματος τύπου 2 (System Information Block 2, SIB2) και τα SIB3 μέχρι SIB8. Το καθένα από αυτά περιέχει διαφορετικό σύνολο πληροφορίας. Συγκεκριμένα το MIB περιέχει πληροφορία απαραίτητη για την σύνδεση ενός UE στο δίκτυο, το SIB1 παραμέτρους απαραίτητες για την επιλογή/επανεπιλογή κυψέλης καθώς και πληροφορία σχετική με το scheduling των υπολοίπων SIBs, το SIB2 μεταφέρει κοινή πληροφορία για τα κανάλια εκπομπής και τα υπόλοιπα SIBs (SIB3 έως SIB 8) παραμέτρους για επιλογή κυψέλης σε άλλη συχνότητα, την ίδια συχνότητα ή σε άλλο δίκτυο.

Η αποστολή των παραπάνω παραμέτρων γίνεται μέσω του MIB RRC μηνύματος, του SIB1 RRC μηνύματος και System Information (SI) RRC μηνύματος. Ένα SI μήνυμα μπορεί να περιέχει ένα ή παραπάνω SIB μπλοκ. Τα δύο πρώτα να είναι απαραίτητα για την λειτουργία του δικτύου και τα υπόλοιπα προαιρετικά. Τα MIB και SIB1 μεταδίδονται περιοδικά ανά 40ms και 80ms αντίστοιχα ενώ τα SIB μηνύματα μπορούν να μεταδοθούν δυναμικά σε διαφορετικές περιόδους.

Η πληροφορία συστήματος μπορεί να αλλάζει μόνο σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους ανάλογα με την περίοδο τροποποίησης (modification period). Όταν πρόκειται να υπάρξει αλλαγή στις παραμέτρους του συστήματος, τα UEs ενημερώνονται είτε με paging μήνυμα είτε μέσω SIB1 μηνύματος. Οι χρήστες σε idle κατάσταση ενημερώνονται μέσω paging ενώ οι ενεργοί με οποιοδήποτε από τους παραπάνω τρόπους.

#### 3.1.2 Έλεγχος σύνδεσης (Connection Control)

Η διαχείριση της RRC σύνδεσης περιλαμβάνει όλα τα βήματα για την δημιουργία, διαχείριση και τερματισμό της σύνδεσης καθώς και την παραμετροποίηση των πρωτοκόλλων στα χαμηλότερα επίπεδα. Η παραπάνω διαδικασία ξεκινάει με την ενεργοποίηση μηχανισμού ασφάλειας ανάμεσα στους συνδεδεμένους κόμβους. Η διαδικασία δημιουργίας αρχικής σύνδεσης περιλαμβάνει την δημιουργία φορέων για μετάδοση σηματοδosis (Signaling Radio Bearers, SRBs) και μεταφοράς δεδομένων χρήστη (Data Radio Bearers, DRBs) καθώς και την παραμετροποίηση των πρωτοκόλλων χαμηλότερου επιπέδου ανάλογα με το QoS. Τέλος η διαχείριση σύνδεσης αναλαμβάνει και το handover.

### 3.1.3 Ασφάλεια και Διαχείριση συνδέσεων

Το πρώτο βήμα για την δημιουργία μιας RRC σύνδεσης ανάμεσα στο UE και το eNB είναι η δημιουργία ενός ασφαλούς καναλιού επικοινωνίας για την ανταλλαγή κλειδιών κρυπτογράφησης της επικοινωνίας. Ο μηχανισμός ασφαλείας στο LTE είναι ίδιος με το UMTS και GSM. Ο μηχανισμός ασφαλείας παρέχει κρυπτογράφηση (ciphering) για τα δεδομένα ελέγχου (RRC) και τα δεδομένα του χρήστη (DRBs) καθώς και έλεγχο ακεραιότητας (integrity protection) για τα δεδομένα ελέγχου (RRC). Η κρυπτογράφηση παρέχει ασφάλεια κατά της λήψης των πακέτων από τρίτους ενώ ο έλεγχος ακεραιότητας προστατεύει από εισαγωγή πακέτων και αντικατάστασή τους από κακόβουλους χρήστες. Οι παραπάνω μηχανισμοί ενεργοποιούνται πάντα από το RRC είτε κατά την δημιουργία της σύνδεσης ή ως μέρος του handover στο LTE από άλλο δίκτυο.

Η δημιουργία σύνδεσης εξαρτάται από την κατάσταση του UE στο NAS επίπεδο. Υπάρχουν δυο ειδών καταστάσεις, οι οποίες υποδεικνύουν την κατάσταση σύνδεσης του UE με την ραδιο-λειτουργικότητα και με το δίκτυο κορμού, η Διαχείριση Κινητικότητας στο EPS (EPS Mobility Management, EMM) και η Διαχείριση Σύνδεσης στο EPS (EPS Connection Management, ECM) αντίστοιχα. Η πρώτη κατάσταση δηλώνει το αν ο χρήστης έχει συνδεθεί σε κάποιο MME και η δεύτερη αν έχει συνδεθεί στο EPC. Η κατάσταση της RRC σύνδεσης σε σχέση με τις παραπάνω καταστάσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 13 παρακάτω.

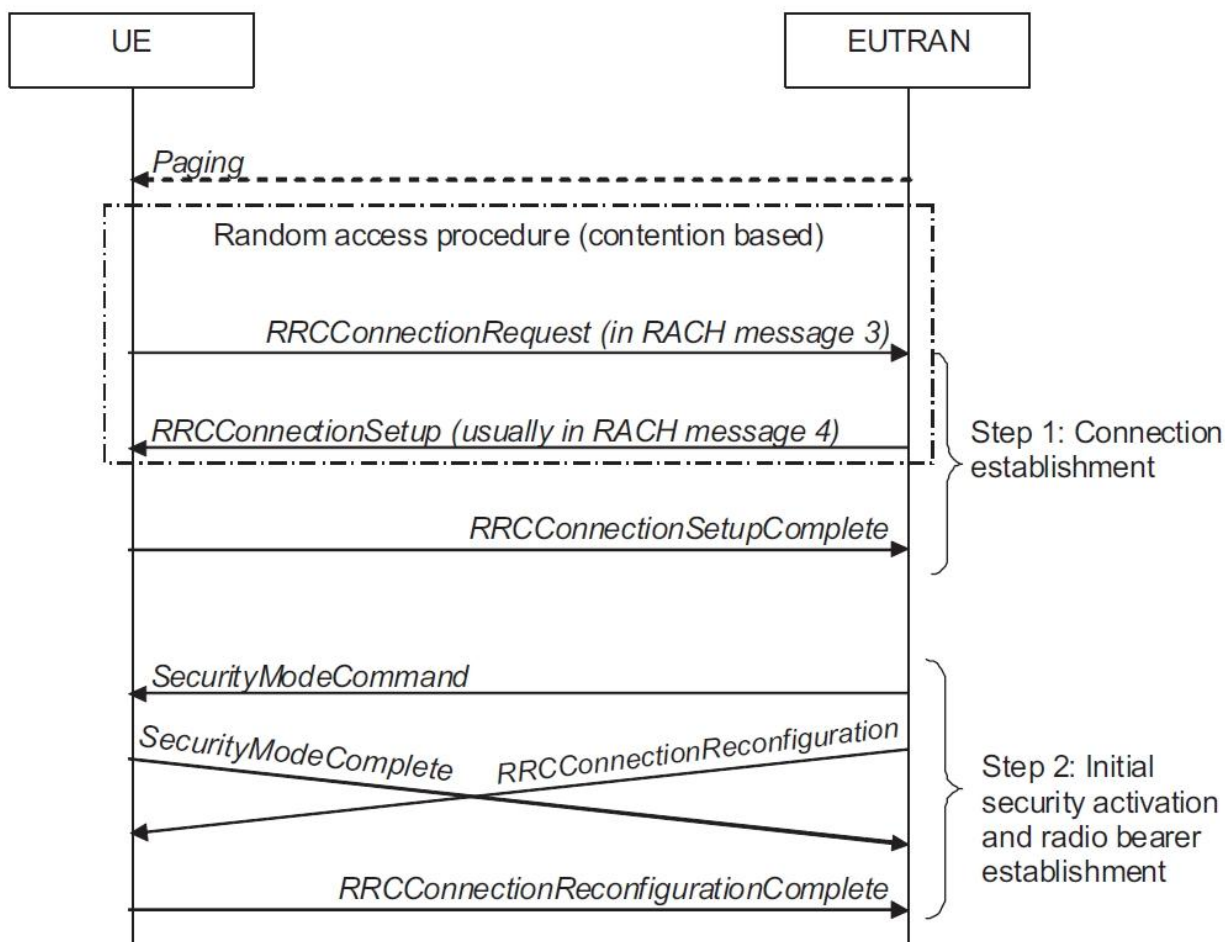
	1: Off	Attaching	2: Idle / Registered	Connecting to EPC	3: Active
EMM	DEREGISTERED		REGISTERED		
ECM	IDLE				CONNECTED
RRC	IDLE	CONNECTED	IDLE	CONNECTED	

Εικόνα 13: Κατάσταση RRC σύνδεσης σε σχέση με τις NAS καταστάσεις. [2]

Το UE μεταβαίνει σε κατάσταση ECM-CONNECTED από ECM-IDLE όταν είναι ενεργός και έχει δεδομένα για λήψη. Η μετάβαση αυτή, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του LTE, μπορεί να γίνει μέσα σε διάστημα 100ms οπότε το UE που λαμβάνει περιοδικά δεδομένα δεν χρειάζεται να μένει στην ECM-CONNECTED κατάσταση όλη των ώρα αν η υπηρεσία δέχεται καθυστερήσεις. Το πρώτο βήμα αυτής της μετάβασης περιλαμβάνει την μεταφορά του NAS μηνύματος στο eNB για την δημιουργία RRC σύνδεσης ανάμεσα στο UE και το eNB και το δεύτερο βήμα την δημιουργία S1 σύνδεσης ανάμεσα στο eNB και το MME. Η RRC σύνδεση στο πρώτο βήμα προορίζεται μόνο για ανταλλαγή σηματοδosis ελέγχου.

Κατά την αντίστροφη μετάβαση, από ECM-CONNECTED σε ECM-IDLE, η καταστροφή των συνδέσεων γίνεται επίσης αντίστροφα. Πρώτα αποδεσμεύεται η S1 σύνδεση και στη συνέχεια η RRC.

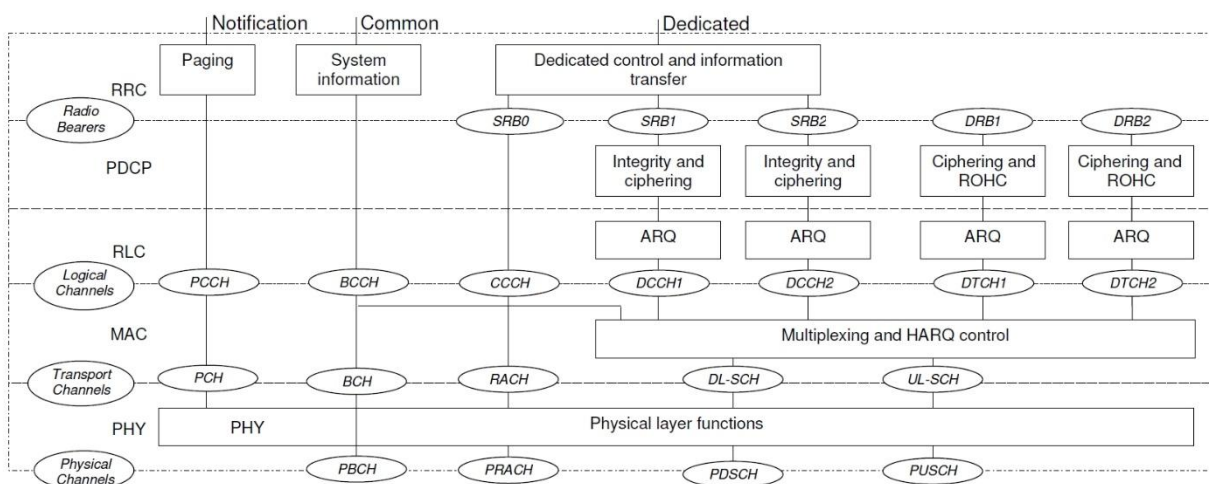
Η διαδικασία δημιουργίας των συνδέσεων κατά την μετάβαση στην κατάσταση ECM-CONNECTED φαίνεται στην Εικόνα 14.



**Εικόνα 14: Βήματα για την μετάβαση σε ECM-CONNECTED κατάσταση και δημιουργία συνδέσεων. [2]**

Ο λόγος για την εκκίνηση δημιουργίας σύνδεσης με το EUTRAN μπορεί να προέρχεται από τα υψηλά στρώματα του UE, για παράδειγμα λόγω paging. Αφού το UE αποκτήσει επαρκείς πόρους, στέλνει μήνυμα για δημιουργία σύνδεσης. Αν η αίτηση γίνει δεκτή από το EUTRAN, αυτό απαντάει με την δημιουργία σύνδεσης SRB1 για την αποστολή μηνυμάτων ελέγχου και τις βασικές παραμέτρους σύνδεσης. Το UE απαντάει με επιβεβαίωση η οποία περιλαμβάνει το αρχικό NAS μήνυμα, το PLMN και αν υπάρχει και το MME. Με βάση τα παραπάνω το eNB αποφασίζει τον κόμβο του CN με το οποίο θα δημιουργήσει την S1 σύνδεση. Σε δεύτερη φάση αρχικοποιείται ο μηχανισμός ασφάλειας ανάμεσα στο UE και το eNB και ακολουθεί η διαδικασία δημιουργίας σύνδεσης SRB2 και ενός η παραπάνω DRBs για μεταφορά δεδομένων χρήστη.

Η δημιουργία μιας DRB σύνδεσης αφορά τον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων ενός EPS bearer διαμέσου της ράδιο-λειτουργικότητας. Ένα EPS bearer αντιστοιχίζεται 1-1 με ένα DRB, ένα DRB αντιστοιχίζεται 1-1 με ένα Αποκλειστικό λογικό Κανάλι Μετάδοσης (Dedicated Traffic Channel, DTCH), όλα τα λογικά κανάλια αντιστοιχίζονται n-1 με το Κοινό Μεριζόμενο Κανάλι Μεταφοράς Ανερχόμενης/Κατερχόμενης ζεύξης (Downlink ή Uplink Shared Transport Channel, DL-SCH/UL-SCH) και αυτό 1-1 με το Φυσικό Μεριζόμενο Κανάλι Ανερχόμενης/Κατερχόμενης ζεύξης (Physical Downlink ή Uplink Shared Channel, PDSCH/PUSCH) όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 15: Ράδιο-αρχιτεκτονική. [2]**

Τέλος, η δημιουργία σύνδεσης DRB περιλαμβάνει και την ρύθμιση των παρακάτω πρωτοκόλλων PDCP, RLC, MAC και Physical ανάλογα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας. Τα πρωτόκολλα αυτά περιγράφονται παρακάτω.

### 3.1.4 Κινητικότητα και μετρήσεις

Όταν ένα UE βρίσκεται σε idle κατάσταση, η κινητικότητα υλοποιείται από τον ίδιο μέσω επανεπιλογής κυψέλης ενώ σε ενεργή κατάσταση η κινητικότητα υλοποιείται από το EUTRAN με επιλογή eNB και handover. Η επιλογή μιας κυψέλης στο LTE γίνεται επιλέγοντας αυτό με την καλύτερη ποιότητα ράδιο-επικοινωνίας διαφορετικά δημιουργεί σημαντικές παρεμβολές στους γειτονικούς χρήστες. Η επιλογή κυψέλης σε διαφορετικές τεχνολογίες μπορεί να γίνει με άλλα κριτήρια όπως οι δυνατότητες της συσκευής χρήστη κ.ά. Το EUTRAN παρέχει μια λίστα με τις συχνότητες και κυψέλες στις οποίες το UE μπορεί να συνδεθεί (white-list). Εναλλακτικά μπορεί να παρέχει μια λίστα με τις συχνότητες και τις κυψέλες τις οποίες το UE δεν πρέπει να χρησιμοποιήσει (black-list).

Στο LTE, μια συσκευή χρήστη μπορεί να συνδεθεί μόνο σε μια κυψέλη όποτε το handover είναι 'hard handover'. Αυτό σημαίνει ότι το eNB το οποίο ελέγχει την αρχική κυψέλη ζητάει από το eNB προορισμού να ετοιμαστεί για handover και αυτό δημιουργεί το RRC μήνυμα που χρειάζεται το UE για την εκκίνηση του handover, το οποίο φτάνει σε αυτό μέσω του αρχικού eNB.

Το EUTRAN μπορεί να ρυθμίσει το UE να παρακολουθεί και να αναφέρει σε αυτό διάφορα στοιχεία που χρειάζονται για την υλοποίηση της κινητικότητας. Το UE δέχεται από το EUTRAN ένα σύνολο παραμέτρων που ορίζουν τον τρόπο λειτουργίας της αναφοράς ρυθμίσεων και περιλαμβάνουν το αντικείμενο μέτρησης, για παράδειγμα τις συχνότητες, την περίοδο αναφοράς ή τα συμβάντα που θα προκαλούν την αποστολή της αναφοράς καθώς και το τι θα περιλαμβάνεται σε αυτή.

### 3.1.5 Επιλογή δικτύου και κυψέλης

Μετά την επιλογή ενός PLMN, το UE επιλέγει την κατάλληλη κυψέλη από την οποία θα εξυπηρετείται. Μετά την επιλογή κυψέλης το UE μπορεί να λάβει πληροφορία συστήματος όπως περιγράφηκε στο εδάφιο 3.1.1 και να εγγραφεί στο tracking area για να μπορεί να λάβει paging μηνύματα και εισερχόμενες κλήσεις. Μετά την ολοκλήρωση

της εγκατάστασης του UE σε μια κυψέλη, αυτό συνεχίζει να ελέγχει περιοδικά αν κάποια από τις γειτονικές κυψέλες είναι καταλληλότερη.

Οι κυψέλες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την υπηρεσία που ένα UE μπορεί να λάβει σε αυτά. Μια κατάλληλη (suitable) κυψέλη είναι κάποια στην οποία το UE λαμβάνει κανονική υπηρεσία, μια αποδεκτή (acceptable) κυψέλη είναι μια κυψέλη ενός διαφορετικού PLMN στην οποία έχει εγκατασταθεί ένα UE επειδή δεν έβρισκε κατάλληλη κυψέλη στο PLMN της επιλογής του. Σε μια τέτοια κυψέλη τη συσκευή χρήστη λαμβάνει περιορισμένη υπηρεσία και μπορεί να κάνει μόνο κλήσεις έκτακτης ανάγκης. Σε κάποιες κυψέλες η πρόσβαση των UEs, με κάποιες εξαιρέσεις, είναι απαγορευμένη (barred). Σε τέτοιες κυψέλες η συσκευή χρήστη δεν λαμβάνει υπηρεσία.

Η επιλογή του PLMN γίνεται από το NAS επίπεδο. Το AS επίπεδο παρέχει στο NAS μια λίστα με τα διαθέσιμα PLMNs η οποία μπορεί να παράγεται αυτόματα από το AS ή μετά από αίτηση του NAS. Στην τελευταία περίπτωση, τα UEs αναζητούν τις κυψέλες με το ισχυρότερο σήμα ανά φέρουσα και από τις κυψέλες ανακτούν την πληροφορία του αντίστοιχου PLMN. Αν το σύνολο αυτών των PLMNs ικανοποιούν κάποια κριτήρια, χαρακτηρίζονται ως 'υψηλής ποιότητα' και αναφέρονται στο NAS.

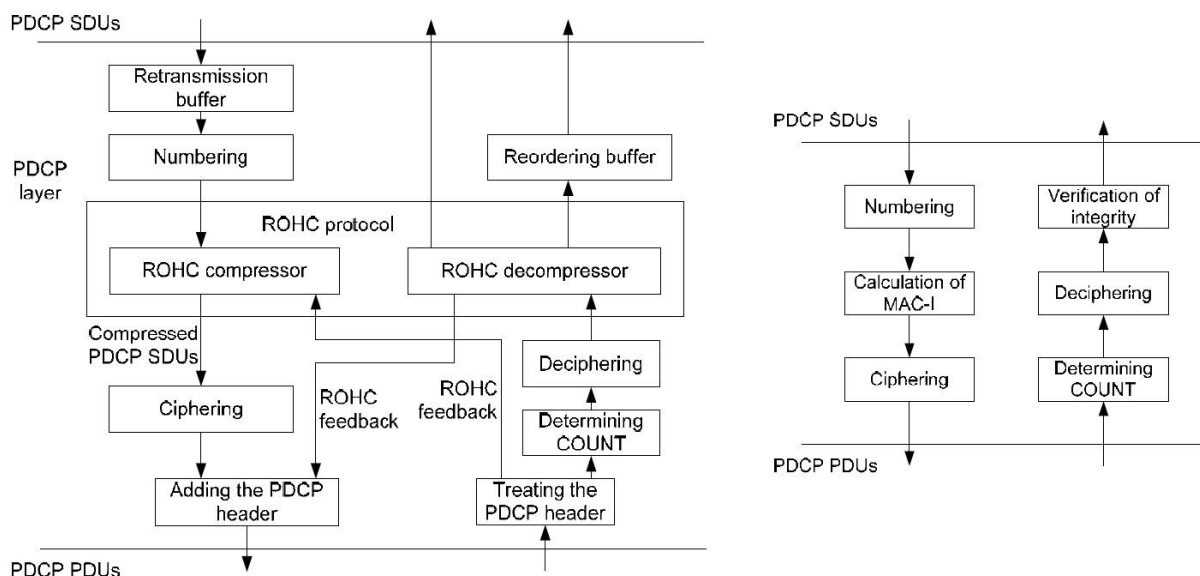
Για την επιλογή κυψέλης, το UE αναζητεί την κυψέλη με το ισχυρότερο σήμα για όλες τις φέρουσες και όλες τις τεχνολογίες πρόσβασης ράδιο-δικτύου (Radio Access Technologies, RATs) μέχρι να βρεθεί μια κατάλληλη κυψέλη. Η μόνη προϋπόθεση για την αναζήτηση είναι να είναι γρήγορη. Για την επιλογή μιας κυψέλης χρησιμοποιείται το κριτήριο επιλογής (S-criterion) το οποίο ορίζει ότι μια κυψέλη είναι κατάλληλη για επιλογή αν το σήμα στην λήψη είναι ισχυρότερο από ένα κατώφλι (threshold). Οι αναγκαίες παράμετροι για την επιλογή μιας κυψέλης μεταδίδονται μέσω SIB1 μηνυμάτων.

Η επανεπιλογή κυψέλης ξεκινάει τουλάχιστον ένα δευτερόλεπτο μετά την εγκατάσταση ενός UE σε μια κατάλληλη κυψέλη και αναζητά καταλληλότερες κυψέλες και τα αντίστοιχα PLMNs τους. Η επιλογή τους γίνεται με βάση την ποιότητα σήματος. Στην αρχή το UE αξιολογεί όλες τις συχνότητες, όλων των διαθέσιμων δικτύων και στη συνέχεια συγκρίνει την ποιότητα της ράδιο ζεύξης με τα αντίστοιχα κελία και τα ταξινομεί. Όταν βρεθεί κάποια καλύτερη κυψέλη, το UE ελέγχει την δυνατότητα εγκατάστασης σε αυτή. Αν η καλύτερη κυψέλη είναι απαγορευμένη, το UE την αφαιρεί από την λίστα των διαθέσιμων κυψελών προς επιλογή και ανάλογα με τον λόγο για τον οποίο είναι περιορισμένη και τις αντίστοιχες παραμέτρους, το UE μπορεί να αναζητήσει ή όχι την επόμενη κυψέλη.

### **3.2 Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol, PDCP)**

Οι βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου, με βάση το εκάστοτε bearer, είναι η συμπίεση και αποσυμπίεση επικεφαλίδων, οι λειτουργίες ασφάλειας και υποστήριξη handover. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11, υπάρχει μια PDCP 'οντότητα' (entity) ανά bearer. Το PDCP επεξεργάζεται δεδομένα χρήστη στο user plane και δεδομένα ελέγχου στο control plane. Η αρχιτεκτονική του είναι διαφορετική για το κάθε plane, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.





**Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων PDCP στο User Plane (αριστερά) και Control Plane (δεξιά). [2]**

### 3.2.1 Συμπίεση και Αποσυμπίεση Επικεφαλίδων

Προκειμένου να μπορεί να παρέχει υπηρεσίες φωνής (VoIP) με ποιότητα εφάμιλλη με εκείνη των circuit switched συστημάτων, απαιτείται η συμπίεση των IP/UDP/RTP πακέτων. Η συμπίεση/αποσυμπίεση γίνεται μέσω του Εύρωστη Συμπίεση Επικεφαλίδας (Robust Header Compression, ROHC) πρωτοκόλλου. Από την πληθώρα προφίλ συμπίεσης που έχουν σχεδιαστεί από το ομάδα Τακτική Δύναμη Μηχανικών Ίντερνετ (Internet Engineering Task Force, IETF), μια συσκευή χρήστη θα πρέπει να υλοποιεί τουλάχιστον ένα προφίλ για IP, UDP και RTP πακέτα, αν προσφέρει VoIP υπηρεσίες.

Το ROHC πρωτόκολλο επιτρέπει στον αποστολέα και τον λήπτη να αποθηκεύουν τις στατικές πληροφορίες των πακέτων που αποστέλλονται (IP διευθύνσεις) και να τις ενημερώνουν μόνο όταν αυτά ενημερώνονται. Για τα δυναμικά πεδία, όπως τα timestamps, μόνο η αλλαγή σε σχέση με μια χρονική περίοδο αναφοράς αποστέλλονται. Με τον τρόπο αυτό η συμπίεση των επικεφαλίδων, ειδικά για το VoIP για το οποίο χρησιμοποιείται, γίνεται πολύ αποδοτική. Από την άλλη μιας και η στατική πληροφορία αποστέλλεται μια φορά και η σωστή αποσυμπίεση εξαρτάται από αυτή, απαιτείται μήνυμα επιβεβαίωσης (acknowledgement) για σωστή παραλαβή τους. Το PDCP στρώμα χρησιμοποιεί δυο ειδών πακέτα, τα PDCP Data PDUs τα οποία περιέχουν δεδομένα είτε από το Control Plane είτε από το User Plane και τα PDCP Control PDUs τα οποία χρησιμοποιούνται για το feedback του ROHC.

### 3.2.2 Ασφάλεια

Το PDCP πρωτόκολλο είναι υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση και έλεγχο ακεραιότητας όπως αναφέρθηκαν στο εδάφιο 3.1.3. Η κρυπτογράφηση γίνεται για τα control plane και user plane πακέτα ενώ ο έλεγχος ακεραιότητας μόνο για τα control plane πακέτα. Για την υλοποίηση των παραπάνω το PDCP χρησιμοποιεί ένα PDCP Data PDU γνωστό ως 'μετρητής' ('COUNT') το οποίο χρησιμοποιείται τόσο από τη συσκευή χρήστη όσο και από το eNB για να απαριθμήσει τα PDCP πακέτα που έχουν σταλεί, και αυξάνει κατά ένα για κάθε ένα από αυτά. Εκτός από το COUNT, με κάθε PDCP πακέτο

αποστέλλεται και ένας Αριθμός Ακολουθίας (Sequence Number, SN) το οποίο αποτελεί τα λιγότερο σημαντικά bits του COUNT. Αν κάποιο πακέτο χαθεί, η σωστή τιμή του COUNT για το επόμενο πακέτο μπορεί να εξαχθεί από την COUNT τιμή του πακέτου και το SN ως η επόμενη τιμή του COUNT που ικανοποιεί το SN. Το ακριβές μήκος του SN είναι θέμα παραμετροποίησης. Με την εξαίρεση των επαναποστολών, η χρήση του ίδιου COUNT δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί παραπάνω από μια φορά ανά ζεύγος κλειδιών ασφαλείας. Το eNB είναι υπεύθυνο για την σωστή χρήση του COUNT ανά bearer, ζεύγος κλειδιών και αλγόριθμο.

Ο έλεγχος ακεραιότητας υλοποιείται προσθέτοντας ένα πεδίο γνωστό ως Κώδικας Αυθεντικοποίησης Μηνύματος για Ακεραιότητα (Message Authentication Code for Integrity, MAC-I) σε κάθε RRC μήνυμα. Ο κώδικας αυτός υπολογίζεται από το μήνυμα, το ID του bearer, το ζεύγος κλειδιών ασφάλειας το COUNT και την κατεύθυνση του μηνύματος (uplink/downlink). Αν ένα μήνυμα αποτύχει στον έλεγχο ακεραιότητας, απορρίπτεται σαν να μην είχε ληφθεί ποτέ.

Η κρυπτογράφηση υλοποιείται εκτελώντας μια XOR λειτουργία ανάμεσα στο μήνυμα και ένα stream που παράγεται από τα κλειδιά ασφαλείας, το ID του bearer, το COUNT και την κατεύθυνση του μηνύματος, ανάλογα με τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης.

### 3.2.3 Handover

Το handover λαμβάνει χώρα όταν ένας χρήστης μεταβεί από την κάλυψη μιας κυψέλης σε μια άλλη. Ανάλογα με το QoS του κάθε radio bearer εκτελείται lossless ή seamless handover.

Seamless handover εκτελείται για bearers που μεταφέρουν δεδομένα ελέγχου ή δεδομένα χρήστη που μεταφέρονται μέσω RLC Unacknowledged Mode (περιγράφεται στη συνέχεια). Αυτού του τύπου οι υπηρεσίες είναι ανεκτικές στις απώλειες αλλά όχι στην καθυστέρηση. Ως εκ τούτου το seamless handover έχει σχεδιαστεί να ελαχιστοποιεί την πολυπλοκότητα και την καθυστέρηση αλλά μπορεί να χάνει SDU πακέτα. Κατά το handover αυτό, όλες οι PDCP οντότητες μαζί με την πληροφορία συμπύεσης επικεφαλίδων αρχικοποιούνται και το COUNT παίρνει μηδενική τιμή, για τον λόγο ότι δεν χρειάζονται εφ' όσον κατά το handover θα δημιουργηθούν νέα κλειδιά ασφαλείας.

Κατά την διάρκεια του handover, τα PDCP SDUs του χρήστη που έχουν σταλεί στο eNB (UL) αλλά δεν έχουν επιβεβαιωθεί, χάνονται. Το ίδιο ισχύει και τα πακέτα που το eNB έχει στείλει στον χρήστη (DL). Τα PDCP SDUs του χρήστη που δεν έχουν σταλεί ακόμη, θα σταλούν στο νέο eNB μετά το handover. Τέλος, τα PDCP SDUs στο eNB, τα οποία δεν έχουν σταλεί ακόμα στον χρήστη, προωθούνται στο νέο eNB μέσω X2 διεπαφής.

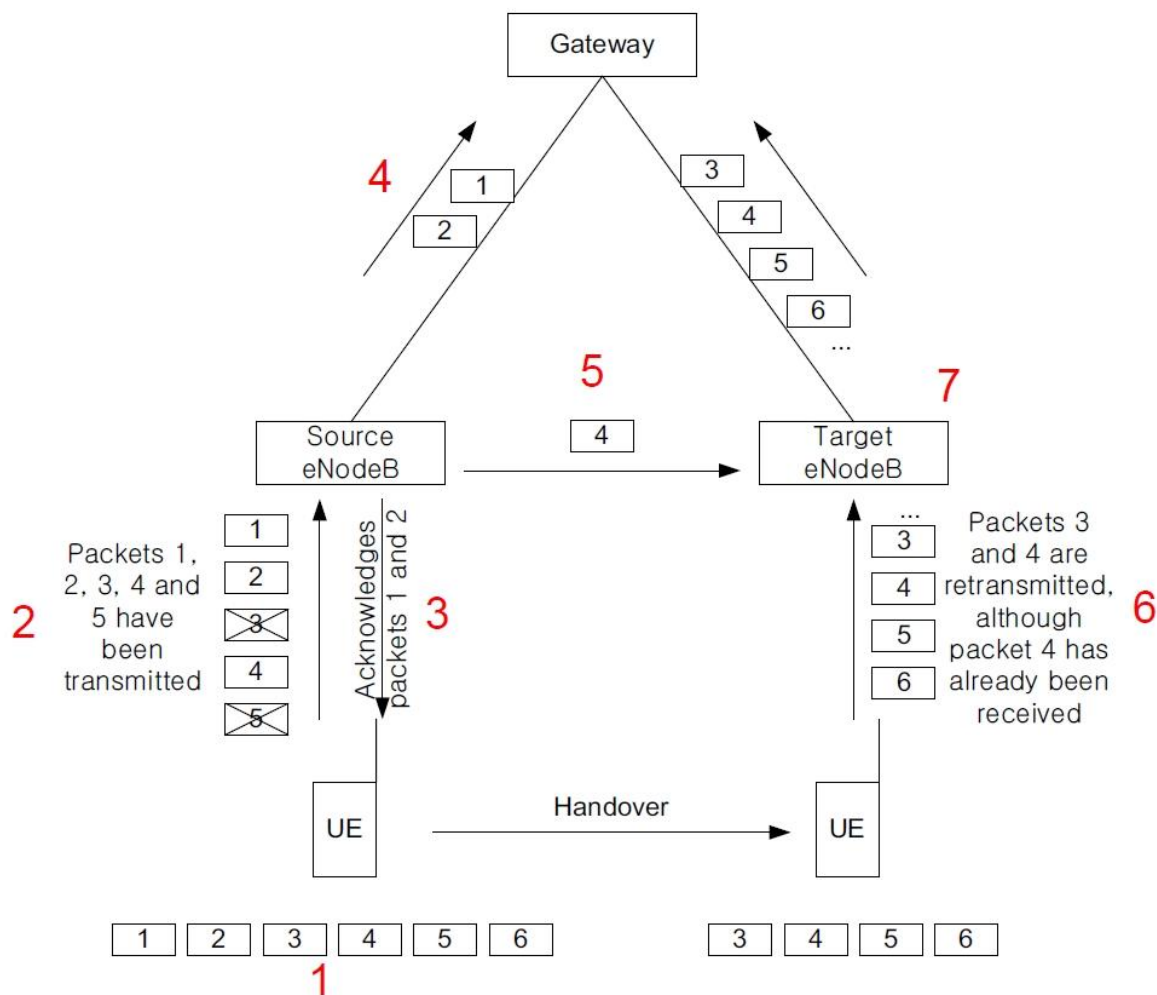
Μέσω του SN που προστίθεται στα PDCP Data PDUs είναι δυνατό να εξασφαλιστεί παράδοση πακέτων με τη σωστή σειρά, ακόμη και μετάδοση χωρίς απώλειες αν γίνει επαναποστολή των χαμένων πακέτων. Το lossless handover χρησιμοποιείται για υπηρεσίες ανεκτικές σε καθυστερήσεις όπως κατέβασμα αρχείων. Αυτού του τύπου το handover χρησιμοποιείται για bearers που αντιστοιχίζονται με RLC Acknowledged Mode, AM (περιγράφεται στη συνέχεια). Κατά το lossless handover η συμπύεση επικεφαλίδων αρχικοποιείται αλλά το COUNT και τα SNs διατηρούνται.

Όταν δεν εκτελείται handover, το RLC επίπεδο είναι υπεύθυνο για την σωστή σειρά παράδοσης των ληφθέντων πακέτων. Αν κάποια πακέτα ληφθούν εκτός σειράς, για παράδειγμα λόγω επαναποστολής από το RLC επίπεδο ή λόγω του HARQ (περιγράφεται στο εδάφιο του MAC πρωτοκόλλου) στο MAC επίπεδο, στο RLC τα τοποθετεί στη σωστή σειρά μέσω του RCL Sequence Number και τα παραδίδει στο παραπάνω επίπεδο. Όταν εκτελείται handover όμως, το RLC επίπεδο παραδίδει στο



PDCP όσα πακέτα έχει λάβει ώστε να αποσυμπιεστούν πριν γίνει αρχικοποίηση επικεφαλίδων. Σε αυτή τη φάση τα πακέτα ίσως να μην έχουν φτάσει με τη σωστή σειρά οπότε τη ταξινόμησή τους γίνεται από το PDCP επίπεδο. Τα πακέτα που έχουν ληφθεί εκτός σειράς, αποθηκεύονται στο buffer ταξινόμησης (reordering buffer) ενώ αυτά που έχουν σταλεί αλλά δεν έχουν επιβεβαιωθεί, στο ενδιάμεση μνήμη επαναποστολής (retransmission buffer).

Στις παρακάτω εικόνες δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας lossless handover στο uplink και downlink.



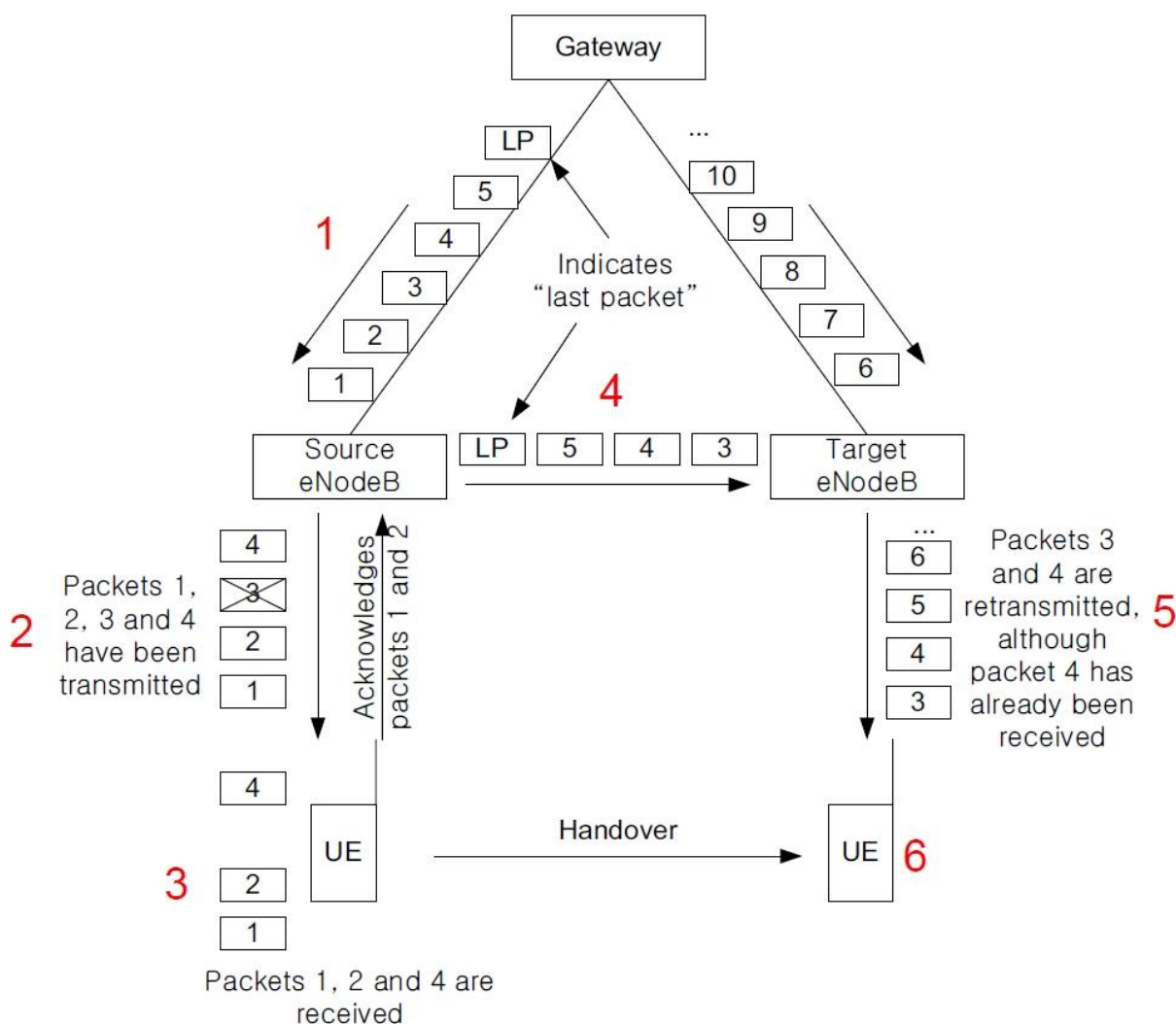
Εικόνα 17: Lossless handover στο Uplink. [2]

Τα βήματα του σεναρίου για lossless handover στην Εικόνα 17, έχουν ως εξής:

1. Το UE στέλνει τα PDCP PDUs 1 έως 5 και αμέσως μετά ξεκινάει διαδικασία handover.
2. Τα PDUs 3 και 5 δεν λαμβάνονται από το eNB.
3. Το eNB ενημερώνει το UE για την σωστή λήψη των πακέτων 1 και 2
4. Τα πακέτα 1 και 2 έχουν ληφθεί με τη σωστή σειρά οπότε μετά την αποσυμπίεσή τους αποστέλλονται στο gateway.
5. Το πακέτο 4 έχει ληφθεί εκτός σειράς και προωθείται στο νέο eNB.
6. Τα πακέτα 3 έως 5 επανεκπέμπονται παρόλο που το πακέτο 4 έχει ήδη ληφθεί από το eNB.

7. Το νέο eNB μπορεί να τοποθετήσει στη σειρά τα πακέτα που έλαβε από το παλιό eNB και τις επαναποστολές του UE, μέσω των PDCP SNs που έχουν διατηρηθεί.

Για την εξασφάλιση μη απώλειας πακέτων στην παραπάνω διαδικασία, το UE διατηρεί στο buffer επαναποστολής τα πακέτα για τα οποία δεν έχει λάβει επιβεβαίωση, ώστε μετά την μετακίνηση στο νέο eNB να μπορεί να τα στείλει ξανά. Για την εξασφάλιση της παράδοσης πακέτων με τη σωστή σειρά, το eNB προωθεί στο νέο eNB όσα πακέτα έχει λάβει σωστά εκτός σειράς ώστε το τελικό eNB να μπορεί να τα τοποθετήσει στη σωστή τους σειρά μόλις λάβει και τα υπόλοιπα πακέτα του χρήστη. Οπότε η μη απώλεια πακέτων υλοποιείται στο βήμα 6 ενώ τη παράδοση με τη σωστή σειρά στα βήματα 4 και 7.



**Εικόνα 18: Lossless handover στο Downlink. [2]**

Για το downlink, ισχύουν τα παρακάτω:

1. Τα πακέτα 1 έως 6 στέλνονται από το gateway στο eNB με μια ένδειξη για το τελευταίο πακέτο.
2. Το eNB προωθεί τα πακέτα στο UE αλλά το πακέτο 3 δεν το λαμβάνει.
3. Το UE λαμβάνει τα πακέτα 1,2 και 4 αλλά επιβεβαιώνει μόνο το 1 και 2 και αμέσως ξεκινάει διαδικασία handover.

4. Το eNB προωθεί στο νέο eNB τα πακέτα που ο χρήστη δεν έχει επιβεβαιώσει ώστε να μπορεί να σταλούν ξανά σε αυτόν από το νέο eNB. Επίσης, το νέο eNB αρχίζει να λαμβάνει τα επόμενα πακέτα από το gateway.
5. Τα πακέτα 3,4 και 5 στέλνονται ξανά στον χρήστη παρόλο που το πακέτο 4 έχει ήδη ληφθεί.
6. Το UE μπορεί να τοποθετήσει τα πακέτα που έχει κρατήσει το reordering buffer στη σωστή σειρά και να τα παραδώσει στο παραπάνω επίπεδο.

Στην παραπάνω διαδικασία, η μη απώλεια πακέτων εξασφαλίζεται με το αρχικό eNB να προωθεί στο τελικό eNB τα μη συμπιεσμένα PDCP SDUs τα οποία δεν έχουν επιβεβαιωθεί από τον χρήστη ώστε να γίνει επαναποστολή τους (βήμα 4). Η παράδοση με τη σωστή σειρά εκτελείται στο βήμα 6 από το UE.

### 3.3 Πρωτόκολλο Ελέγχου Ράδιο-ζεύξης (Radio Link Control, RLC)

Επικοινωνεί με το PDCP (υψηλότερο επίπεδο) μέσω Σημεία Πρόσβασης Υπηρεσίας (Service Access Points, SAPs) και με το MAC επίπεδο (χαμηλότερο επίπεδο) μέσω λογικών καναλιών. Στην αποστολή προσφέρει κατάτμηση (segmentation) ή/και συνένωση των PDCP PDUs σε πακέτα μεγέθους που υποδεικνύει το MAC επίπεδο. Στην λήψη ακολουθεί την αντίστροφη διαδικασία, επανασυναρμολογεί τα ληφθέντα RLC PDUs και ανακατασκευάζει τα PDCP PDUs. Επιπλέον, ταξινομεί τα RLC PDUs στη σωστή τους σειρά, αν αυτά έχουν ληφθεί εκτός σειράς εξαιτίας της HARQ λειτουργίας του επιπέδου MAC (περιγράφεται παρακάτω).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, υπάρχει μια RLC οντότητα ανά bearer η οποία εκτελεί τις RLC λειτουργίες. Κάθε μια από αυτές τις οντότητες μπορεί να ρυθμιστεί να λειτουργήσει έναν από τους τρεις δυνατούς τρόπους: Διαφανής Εκπομπή (Transparent Mode, TM), Εκπομπή Χωρίς Επιβεβαίωση (Unacknowledged Mode, UM) και Εκπομπή Με Επιβεβαίωση (Acknowledged Mode, AM). Η εκπομπή με επιβεβαίωση παρέχει επιπλέον υπηρεσία, την επαναποστολή πακέτων. Η επιλογή ανάμεσα στο UM και AM γίνεται από το eNB κατά την δημιουργία της RRC σύνδεσης, ανάλογα με το QoS τους εκάστοτε EPS bearer.

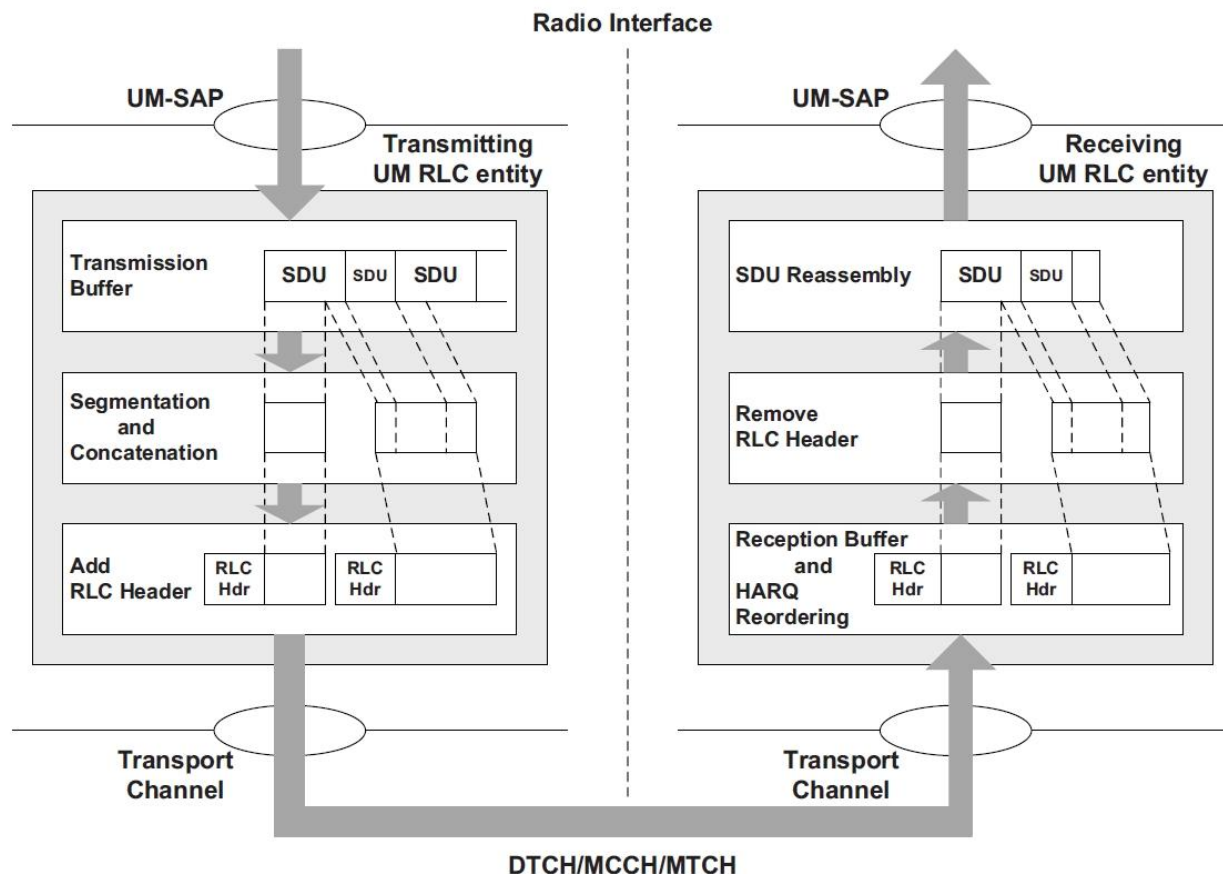
#### 3.3.1 Transparent Mode (TM)

Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας τα PDCP PDUs απλά 'περνάνε μέσα' από το στρώμα αυτό χωρίς να εκτελείται κάποια λειτουργία πάνω τους ή να προστίθεται κάποιο overhead. Το ίδιο ισχύει και στη λήψη. Επομένως σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας κάθε RLC SDU αντιστοιχεί σε ένα RLC PDU και το αντίστροφο.

Η χρήση της RLC TM λειτουργίας δεν παρέχει κανέναν μηχανισμό αξιόπιστης παράδοσης επομένως δεν χρησιμοποιείται για αποστολή δεδομένων χρήστη. Επομένως έχει περιορισμένη χρήση, κυρίως για RRC μηνύματα τα οποία δεν χρειάζονται επιβεβαίωση όπως paging μηνύματα, πληροφορία συστήματος και μηνύματα ελέγχου μέσω του SRB0. Τέλος, κάθε οντότητα που ρυθμίζεται να λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο αποτελεί ένα μονόδρομο κανάλι επικοινωνίας, δηλαδή είτε στέλνει RLC πακέτα είτε λαμβάνει αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα.

### 3.3.2 Unacknowledged Mode (UM)

Και αυτός ο τρόπος λειτουργίας παρέχει ένα μονόδρομο κανάλι επικοινωνίας και χρησιμοποιείται κυρίως για υπηρεσίες για τις οποίες η καθυστέρηση δεν είναι αποδεκτή αλλά αποδέχονται απώλεια πακέτων, όπως το VoIP. Στην Εικόνα 19 δίνεται μια αναπαράσταση των βασικών λειτουργιών του UM τρόπου λειτουργίας.



Εικόνα 19: Βασικές λειτουργίες UM. [2]

**Κατάτμηση και Συνένωση:** Εκτελεί κατάτμηση ή/και συνένωση των RLC SDUs που λαμβάνει από το παραπάνω επίπεδο για να δημιουργήσει RLC PDUs τα οποία παραδίδει στο κάτω επίπεδο. Το μέγεθος των RLC PDUs εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού μετάδοσης και τους διαθέσιμους πόρους εκπομπής. Υποδεικνύεται από το MAC επίπεδο και μπορεί να αλλάζει από αποστολή σε αποστολή. Το RLC PDU κατασκευάζεται από κομμάτια ή και ολόκληρα RLC SDUs, με την σειρά που αυτά φτάνουν και είναι πάντα byte aligned χωρίς padding. Μετά την κατασκευή των RLC PDUs η RLC οντότητα προσθέτει το RLC Header στο οποίο περιλαμβάνεται πληροφορία για την σειρά των επιμέρους κομματιών που το αποτελούν ώστε να μπορεί να γίνει επανασυναρμολόγηση κατά την λήψη.

**Ταξινόμηση, εντοπισμός αντιγράφων και επανασυναρμολόγηση:** Η πρώτη ενέργεια μιας RLC UM οντότητας όταν λαμβάνει ένα RLC PDU είναι να το τοποθετεί σε ένα buffer αναδιάταξης αν το πακέτο αυτό έχει ληφθεί εκτός σειράς. Η λήψη πακέτων εκτός σειράς είναι αναπόφευκτη λόγω της HARQ λειτουργίας του MAC επιπέδου. Τα πακέτα αυτά παραμένουν στο buffer μέχρι να φτάσουν όλα τα προηγούμενα πακέτα για να μπορούν να διαταχθούν σωστά. Κατά την διάρκεια της αναδιάταξης τα ληφθέντα πακέτα ελέγχονται μέσω των SNs τους για αντίγραφα και απορρίπτονται αν χρειάζεται. Για να αποφευχθεί η μεγάλη διάρκεια αναμονής για αναδιάταξη, από τη στιγμή που εντοπιστεί πακέτο εκτός σειράς, ξεκινάει ένας timer αναδιάταξης. Η RLC οντότητα

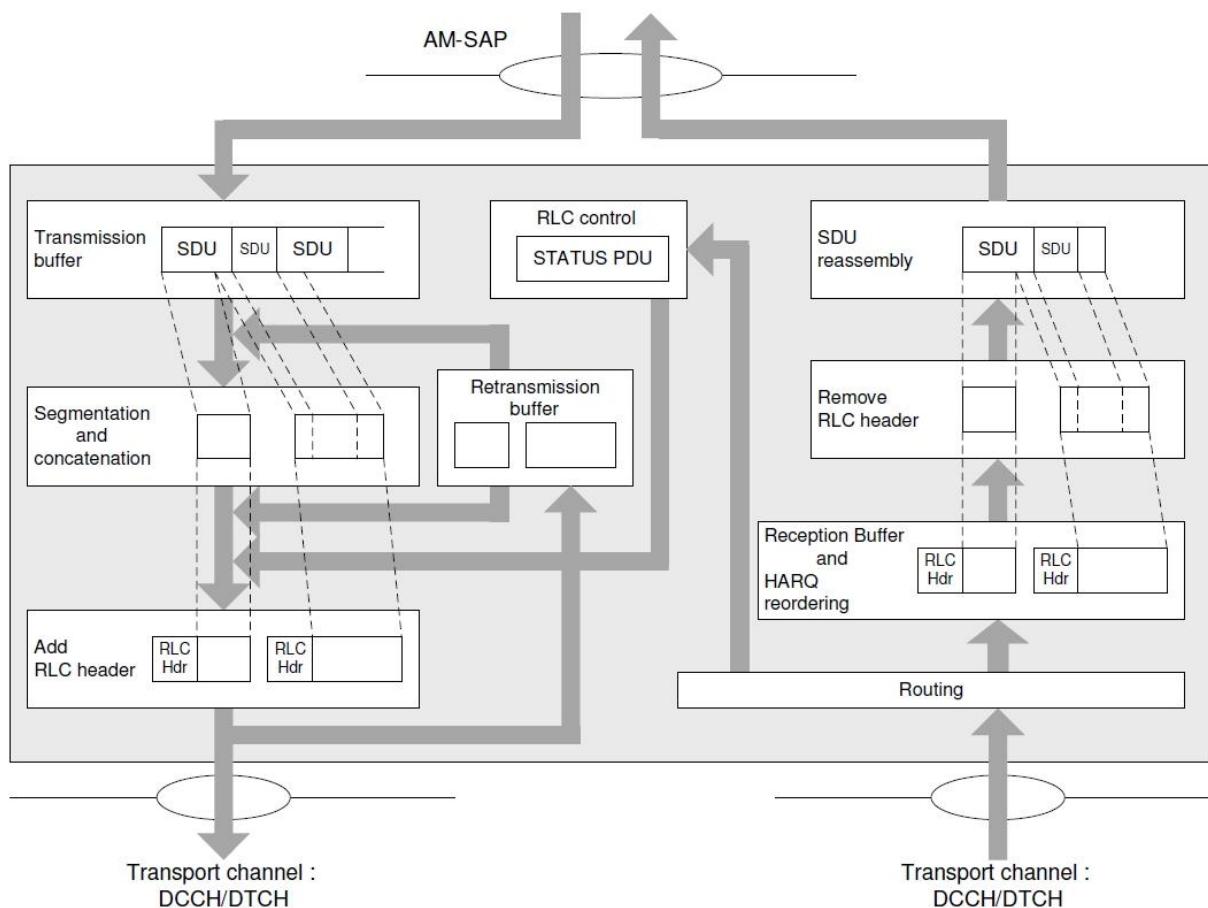
περιμένει τα χαμένα πακέτα για όση ώρα διαρκεί ο timer και αν τα πακέτα αυτά δεν έχουν φτάσει μέχρι τότε τα χαρακτηρίζει ως χαμένα πακέτα και ξεκινάει να επανασυναρμολογεί το επόμενο RLC SDU από τα πακέτα που περιέχει στο buffer.

Η επανασυναρμολόγηση λειτουργεί σε επίπεδο SDU, μόνο τα SDUs τα οποία μπορούν να συναρμολογηθούν πλήρως από τα διαθέσιμα PDUs παραδίδονται στο παραπάνω επίπεδο. Τα υπόλοιπα απορρίπτονται.

### 3.3.3 Acknowledged Mode (AM)

Σε αντίθεση με τους προηγούμενους τρόπους λειτουργίας, το RLC AM παρέχει αμφίδρομο κανάλι επικοινωνίας. Χρησιμοποιείται από υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου για τις οποίες οι καθυστερήσεις είναι ανεκτές αλλά όχι σε χαμένα πακέτα. Τέτοιες υπηρεσίες είναι το κατέβασμα αρχείων ή το web browsing. Η σημαντικότερη λειτουργία στο RLC AM είναι η επαναποστολή πακέτων. Στο control plane, τα RRC μηνύματα χρησιμοποιούν RLC AM για την αξιοπιστία που παρέχουν οι επιβεβαιώσεις και η επαναποστολή.

Στην Εικόνα 20 δίνεται μια αναπαράσταση των λειτουργιών του RLC AM.



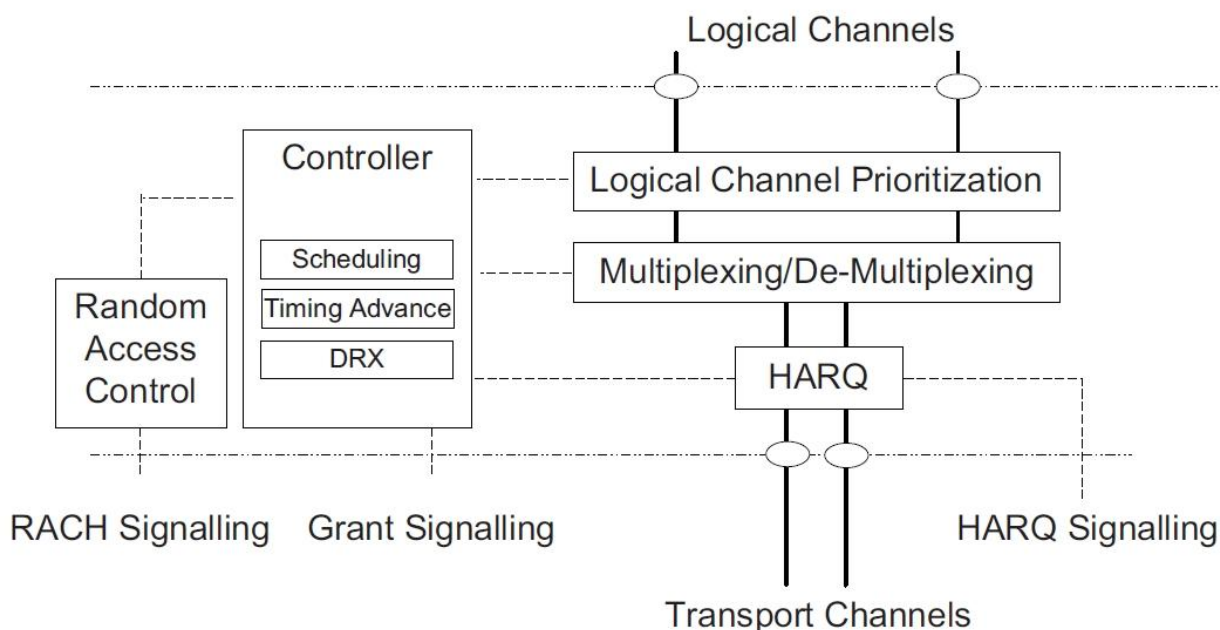
Εικόνα 20: Βασικές λειτουργίες για το RLC AM. [2]

Οι λειτουργίες αποστολής και λήψης είναι ίδιες με αυτές στο RLC UM. Η μόνη διαφορά, όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα είναι τα επιπλέον μπλοκ για την λειτουργία της επαναποστολής. Η ληφθείσα πλευρά στέλνει αναφορές (status reports) για τα πακέτα που έλαβε ή δεν έλαβε (ACK/NACK) οπότε η πλευρά αποστολής θα πρέπει να στείλει ξανά τα χαμένα πακέτα. Όλα τα απεσταλμένα πακέτα διατηρούνται σε buffer επαναποστολής και αν κάποιο δεν ληφθεί σωστά, στέλνεται ξανά. Αν κατά την διάρκεια

της δεύτερης αποστολή το μέγεθος του RLC SDU έχει αλλάξει από το MAC, η RLC οντότητα προχωράει σε επανακατάτμηση του πακέτου.

### 3.4 Πρωτόκολλο Ελέγχου Μέσου Πρόσβασης (Medium Access Control, MAC)

Επικοινωνεί με το RLC επίπεδο μέσω λογικών καναλιών και με το φυσικό επίπεδο από κάτω μέσω καναλιών μεταφοράς. Επομένως το MAC επίπεδο εκτελεί πολύπλεξη μεταξύ λογικών καναλιών για να παράγει MAC PDUs ή αλλιώς μπλοκ μεταφοράς (transport blocks) από MAC SDUs κατά την μετάδοση και ενώ στην λήψη κάνει αποπολύπλεξη των MAC PDUs που δέχεται από τα κανάλια μεταφοράς για την ανακατασκευή των MAC SDUs, τα οποία και προωθεί στα λογικά κανάλια. Στην Εικόνα 21 δίνεται μια αναπαράσταση της παραπάνω λειτουργίας καθώς και των υπολοίπων λειτουργιών του MAC επιπέδου.



**Εικόνα 21: Αρχιτεκτονική και βασικές λειτουργίες MAC επιπέδου. [2]**

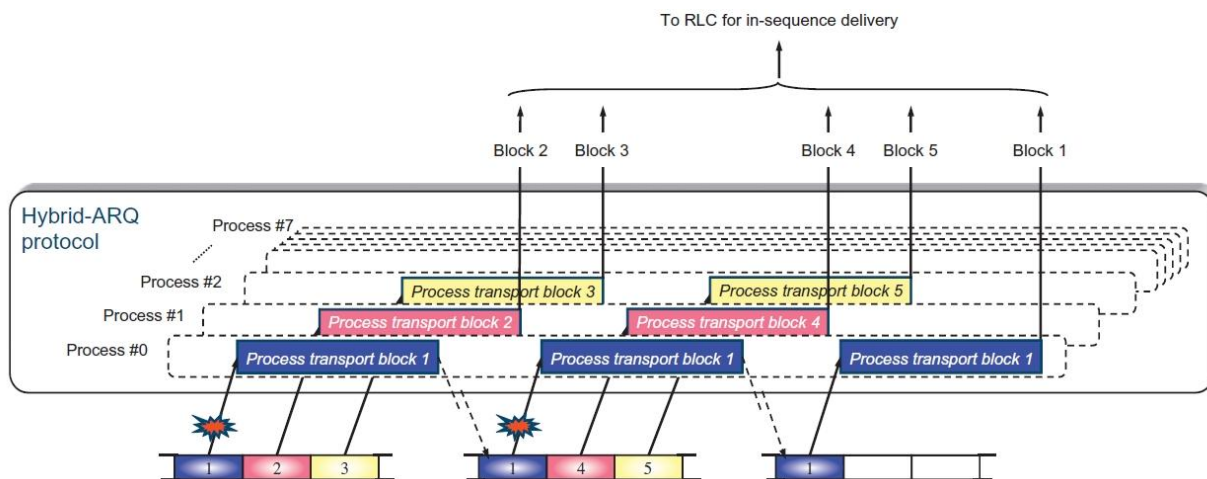
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20, το MAC επίπεδο αποτελείται από τρεις οντότητες που υλοποιούν τις λειτουργίες τους, τις επαναποστολές πακέτων (HARQ), την πολύπλεξη / αποπολύπλεξη και τον ελεγκτή (controller).

Τα μπλοκ μεταφοράς υπόκεινται σε λάθη κατά την μετάδοση, για παράδειγμα λόγω μεταβολών στην ποιότητα του σήματος. Κάποια από τα λάθη αυτά, όπως οι αλλαγές στο κανάλι, μπορούν να διορθωθούν μέσω του πλεονασμού που παρέχει το του cyclic prefix, ενώ άλλα δεν μπορούν, όπως τα λάθη λόγω θορύβου ή παρεμβολών. Τα λάθη τα οποία δεν μπορούν να διορθωθούν μέσω του πλεονασμού, διορθώνονται με αυτόματη επαναποστολή των λανθασμένων πακέτων (Automatic Repeat Request, ARQ). Σε αυτό το σχήμα, ο παραλήπτης ελέγχει το πακέτο που έλαβε μέσω κάποιου κώδικα ελέγχου λαθών όπως το CRC, και αν το πακέτο είναι σωστό, στέλνει στον αποστολέα θετική επιβεβαίωση (ACK) ενώ αν εντοπιστούν λάθη, απορρίπτει το πακέτο και στέλνει αρνητική επιβεβαίωση (NACK) και ο αποστολέας ξεκινάει επαναποστολή. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνικών αποτελεί το Hybrid ARQ. Η κάθε HARQ οντότητα διατηρεί τα λανθασμένα πακέτα μέχρι την λήψη των επαναποστολών τους και εκτελεί έλεγχο λαθών στον συνδυασμό των πακέτων αυτών (soft combining).

Συγκεκριμένα, η οντότητα αποστολής/επαναποστολής (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ) εκτελεί την αποστολή και επαναποστολή των μπλοκ μεταφοράς και



επεξεργάζεται την HARQ σηματοδότηση. Κατά την μετάδοση, η HARQ οντότητα εκτελεί την μετάδοση των μπλοκ μεταφοράς και αναμένει ACK/NACK από τον παραλήπτη. Αν η επιβεβαίωση δεν φτάσει ή είναι NACK, προχωράει σε επαναποστολή του μπλοκ. Στην λήψη εκτελεί τον συνδυασμό των παραληφθέντων μπλοκ για την ανακατασκευή των PDUs και εκπέμπει την ανάλογη HARQ σηματοδότηση στον αποστολέα. Ανά πάσα στιγμή υπάρχουν μέχρι οχτώ HARQ διεργασίες σε εξέλιξη, από τις οποίες μόνο μία μπορεί να δεσμεύει πόρους για μεταφορά δεδομένων ενώ οι υπόλοιπες κάνουν αποκωδικοποίηση των ληφθέντων πακέτων (Stop-And-Wait operation, SAW). Επιπλέον, η κάθε HARQ διαδικασία διαθέτει τον δικό της buffer.

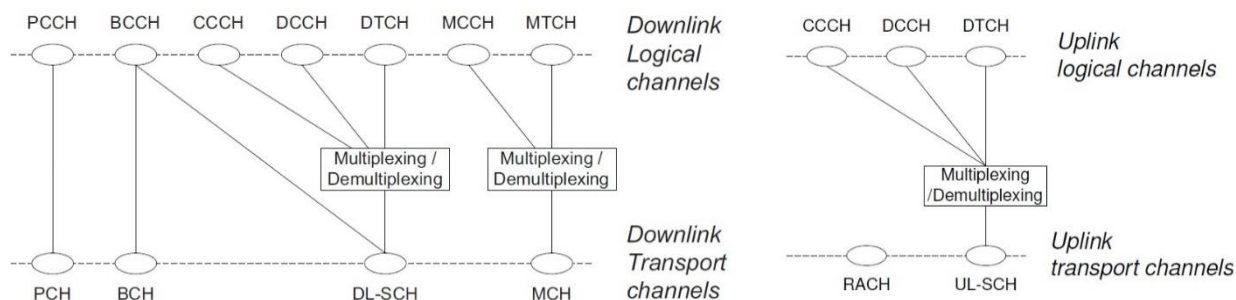


Εικόνα 22: HARQ λειτουργία MAC επιπέδου. [1]

Το HARQ σχήμα (scheme) που χρησιμοποιείται από την HARQ οντότητα μπορεί να είναι σύγχρονο ή ασύγχρονο με προσαρμοζόμενη (adaptive) ή μη-προσαρμοζόμενη (non-adaptive) μετάδοση. Στο σύγχρονο HARQ, η επαναποστολή για κάθε HARQ διεργασία γίνεται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και ο παραλήπτης μπορεί να εξάγει από τον χρόνο αποστολής και επαναποστολής την HARQ διεργασία χωρίς να απαιτείται αποστολή του HARQ ID. Στο ασύγχρονο HARQ, η επαναποστολή μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή οπότε απαιτείται η αποστολή του HARQ ID του αποστολέα για να μπορεί ο παραλήπτης να συσχετίσει την αποστολή του πρώτου μπλοκ με την επαναποστολή. Στην προσαρμοζόμενη μετάδοση οι παράμετροι μετάδοσης, όπως διαμόρφωση, κωδικοποίηση και δέσμευση συχνοτήτων, μπορούν να αλλάζουν δυναμικά ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης στο κανάλι. Στην μη-προσαρμοζόμενη οι παράμετροι δεν αλλάζουν ή αλλάζουν σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες.

Στην μετάδοση, η οντότητα αυτή δέχεται MAC SDUs από τα λογικά κανάλια και παράγει MAC PDUs όταν υπάρχουν επαρκείς πόροι για μετάδοση. Στην λήψη ακολουθεί την αντίστροφη πορεία, ανακατασκευάζει τα MAC SDUs από τα MAC PDUs που λαμβάνει από τα κανάλια μεταφοράς, τα οποία προωθεί στις κατάλληλες RLC οντότητες. Η διαδικασία πολυπλεξίας περιλαμβάνει και την αξιολόγηση των διαθέσιμων μπλοκ προς μετάδοση αναφορικά με την προτεραιότητά τους.

Τα λογικά κανάλια χωρίζονται σε κανάλια σηματοδότησης (control channels) τα οποία μεταφέρουν σήματα ελέγχου (RRC) και κανάλια μεταφοράς (transport channels) τα οποία μεταφέρουν δεδομένα χρήστη. Στην Εικόνα 23 δίνεται μια αναπαράσταση όλων των λογικών καναλιών, για το downlink και uplink.



**Εικόνα 23: Λογικά κανάλια και κανάλια μεταφοράς για το DL (αριστερά) και UL (δεξιά). [2]**

Τέλος, ο ελεγκτής εκτελεί ένα σύνολο λειτουργιών με την βασικότερη στα πλαίσια αυτής της εργασίας, να αποτελεί το scheduling. Οι λειτουργίες του ελεγκτή περιγράφονται παρακάτω.

### 3.4.1 Scheduler

Σκοπός του scheduler σε κάθε eNB είναι να μοιράσει τους διαθέσιμους πόρους μετάδοσης στην ράδιο ζεύξη, στα bearers του κάθε UE στην κυψέλη ανάλογα με τις QoS απαιτήσεις του καθενός. Η ανάθεση των πόρων και ο καθορισμός του μεγέθους για το μπλοκ μεταφοράς καθορίζεται τόσο από τους διαθέσιμους πόρους όσο και από το μέγεθος αποστολής. Στο eNB το μέγεθος αποστολής καθορίζεται από τα πακέτα στο buffer αποστολής ενώ τα UEs θα πρέπει να ενημερώσουν το εκάστοτε eNB με το πλήθος των πακέτων που διατίθενται να μεταδώσουν, μέσω Αναφορών Κατάστασης Ενδιάμεσης Μνήμης Αποστολής (Buffer Status Reports, BSRs).

Ο συνηθισμένος τρόπος scheduling είναι δυναμικά. Στο δυναμικό scheduling ο συντονισμός για το ποια UEs θα λάβουν ποιες συχνότητες για το downlink και uplink γίνεται μέσω μηνυμάτων στο PDCCH κανάλι, για κάθε υποπλαίσιο (subframe). Αυτός ο τρόπος scheduling είναι αποδοτικός για υπηρεσίες στις οποίες η μετάδοση είναι σποραδική και με δυναμικό ρυθμό. Αντίθετα, στο στατικό scheduling οι πόροι ανατίθενται στα UEs για χρονική διάρκεια μεγαλύτερη του ενός υποπλαισίου και δεσμεύονται ημι-στατικά. Είναι αποδοτικός για υπηρεσίες όπως το VoIP στις οποίες τα πακέτα είναι μικρά, περιοδικά και με ημι-στατικό μέγεθος. Η ρύθμιση ή αλλαγή του τρόπου scheduling γίνει μέσω RRC μηνυμάτων στο PDCCH κανάλι. Η οργάνωση των φερουσών στα μπλοκ μεταφοράς και το scheduling θα αναλυθούν λεπτομερέστερα σε μετέπειτα κεφάλαια.

### 3.4.2 Scheduling και UEs

Η βασική αρχή του scheduling είναι να γίνει διάθεση πόρων για αποστολή από και προς τα UEs μόνο όταν υπάρχουν πακέτα προς αποστολή. Μιας και ο διαμοιρασμός των πόρων στους UEs λαμβάνει χώρα στα eNBs, για το downlink ο scheduler έχει εικόνα των πακέτων προς αποστολή μέσω των buffers αποστολής. Για το uplink ωστόσο δεν έχει τέτοια εικόνα καθώς τα πακέτα προς αποστολή βρίσκονται στα UEs. Τα BSRs που στέλνονται από τα UEs προς τα eNBs αποσκοπούν στην ενημέρωση των eNBs με το πλήθος των πακέτων στο uplink για την διευκόλυνση του scheduling.

Τα BSR χωρίζονται σε δύο τύπους, τις μακριές αναφορές κατάστασης ενδιάμεσης μνήμης (long BSRs) και κοντές αναφορές κατάστασης ενδιάμεσης μνήμης (short BSRs). Ποιο από τα δυο θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το πλήθος των πακέτων προς μετάδοση στα λογικά κανάλια και αν έχει ενεργοποιηθεί κάποιο event. Η πρώτη



ομάδα αναφέρει το μέγεθος αποστολής για μέχρι τέσσερις ομάδες λογικών καναλιών ενώ η δεύτερη για μια ομάδα λογικών καναλιών. Τα events που μπορούν να ενεργοποιήσουν την αποστολή BSRs είναι η άφιξη πακέτου σε λογικό κανάλι με μεγαλύτερη προτεραιότητα από αυτά που είχαν πακέτα μέχρι τότε, το πέρασ κάποιας χρονικής διάρκειας από την τελευταία αποστολή BSR και η αλλαγή κυψέλης.

Ενώ για το downlink η πολυπλεξία και ο καθορισμός προτεραιοτήτων για τα λογικά κανάλια είναι θέμα υλοποίησης στα eNBs, για το UE η διαδικασία είναι τυποποιημένη ώστε να εξασφαλίζεται η ικανοποίηση των QoS αναγκών για συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών. Με βάση τους πόρους που έχει λάβει από το eNB, ένα UE θα πρέπει να κατασκευάσει το MAC PDU καθορίζοντας τα κανάλια από τα οποία θα πάρει πακέτα και το πλήθος των πακέτων. Σε κάθε κανάλι ανατίθεται μια προτεραιότητα. Για να αποφευχθεί το starvation των καναλιών με χαμηλότερη προτεραιότητα, για το κάθε κανάλι ορίζεται επίσης και ένα μέγιστο πλήθος πακέτων που μπορεί να επιλεγεί πριν επιλεγούν τα πακέτα του επόμενου καναλιού. Το όριο αυτό λέγεται Προτεραιότητα Bit Rate (Prioritized Bit Rate, PBR).

Για την δημιουργία του MAC PDU λαμβάνονται υπόψη και η προτεραιότητα και το PBR. Από το κανάλι με την μεγαλύτερη προτεραιότητα και επιλέγονται πακέτα σύμφωνα με το PBR του και μετά η επιλογή γίνεται από το κανάλι με την δεύτερη μεγαλύτερη προτεραιότητα κ.ο.κ. Αν αφού έχουν εξυπηρετηθεί όλα τα κανάλια, υπάρχει ακόμη χώρος στο MAC PDU, τότε από κάθε κανάλι που έχει ακόμη πακέτα για αποστολή επιλέγονται πακέτα σύμφωνα με φθίνουσα σειρά προτεραιοτήτων όπως και στο πρώτο βήμα. Τα MAC Elements πακέτα έχουν προτεραιότητα ακόμη κι' όταν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή καθώς καθορίζουν την σωστή λειτουργία του MAC επιπέδου.

### **3.4.3 Διαδικασία Τυχαίας Προσπέλασης (Random Access Procedure) και ευθυγράμμιση αποστολών χρήστη**

Αν ένα UE δεν έχει αρκετούς πόρους για αποστολή ή η αποστολή του δεν είναι σωστά ευθυγραμμισμένη σε σχέση με τον χρόνο, χρησιμοποιεί μια διαδικασία που λέγεται Random Access Procedure. Η ευθυγράμμιση για τις αποστολές των χρηστών είναι σημαντική για να μην επικαλύπτονται οι αποστολές. Η ρύθμιση των χρόνων μετάδοσης για τους χρήστες γίνεται με αποστολή μηνυμάτων Ελέγχου MAC (MAC Control Elements) τα οποία ενημερώνουν τους χρόνους αποστολής. Για να μειωθεί η κατανάλωση μπαταρίας, όταν δεν υπάρχουν πακέτα προς αποστολή για ένα χρονικά διάστημα, οπότε το UE είναι ανενεργό, επιτρέπεται να χάνει τον συγχρονισμό ακόμη και σε RRC\_CONNECTED κατάσταση. Ο συγχρονισμός ενημερώνεται ξανά σε αυτή την περίπτωση μέσω της Random Access Procedure.

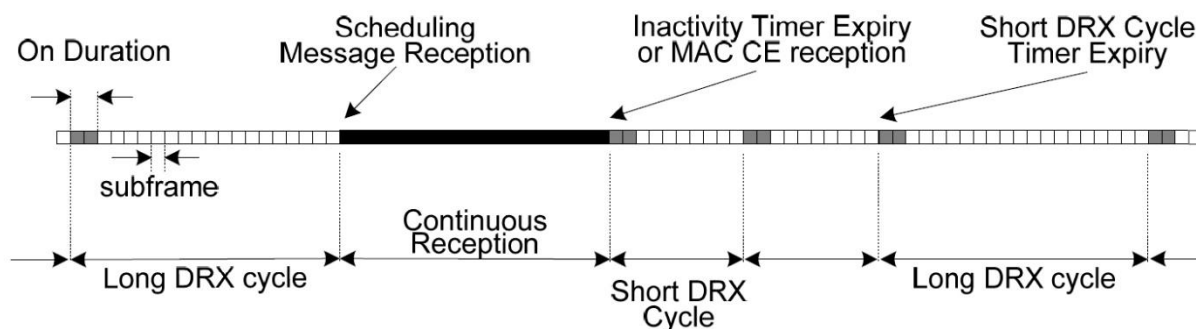
### **3.4.4 Διακοπτόμενη Λήψη (Discontinuous Reception, DRX)**

Η διακοπτόμενη λήψη μπορεί να ενεργοποιηθεί για μια συσκευή χρήστη σε κατάσταση RRC\_CONNECTED. Κατά την περίοδο αυτή η συσκευή δεν κάνει λήψη πακέτων για εξοικονόμηση μπαταρίας. Ο κύκλος λειτουργίας κατά αυτόν τον τρόπο (DRX cycle) αποτελείται από δυο μέρη, την κανονική λήψη ('On Duration') κατά την οποία η συσκευή παρακολουθεί το PDCCH κανάλι και την αδρανή περίοδο ('DRX period') κατά την οποία η συσκευή δεν παρακολουθεί για πακέτα.

Η παραμετροποίηση της αδρανούς περιόδου αποτελεί μια ανταλλαγή ανάμεσα στην εξοικονόμηση μπαταρίας και καθυστέρησης. Για παράδειγμα μια αδρανής περίοδος

μεγάλης διάρκειας θα μπορούσε να εξυπηρετεί καθώς ο χρήστης διαβάζει τα περιεχόμενα μιας σελίδας κατά το web browsing ενώ μια σύντομη περίοδος παρέχει γρηγορότερη απόκριση, όταν για παράδειγμα ο χρήστης ζητήσει μια νέα σελίδα. Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω αντικρουόμενες απαιτήσεις, μπορούν να ρυθμιστούν δυο αδρανής περιόδους για κάθε συσκευή χρήστη, μια σύντομη (short cycle) και μια μεγαλύτερη (long cycle), με την μετάβαση από την σύντομη στην μεγαλύτερη να γίνεται είτε με την πάροδο κάποιου χρόνου είτε με συγκεκριμένη εντολή από το eNB.

Η σύντομη περίοδος λειτουργεί ως περίοδος επιβεβαίωσης πριν την μετάβαση στην μεγαλύτερη περίοδο. Μια συσκευή χρήστη κάνει συνεχώς μεταβάσεις από την σύντομη περίοδο στην μεγαλύτερη περίοδο. Κατά την διάρκεια καθεμίας από αυτές εκτελείται ο 'On Duration' κύκλος. Αν κατά τον κύκλο αυτό δεν ληφθεί μήνυμα για μετάδοση προς τον χρήστη, η συσκευή μεταβαίνει στην αδρανή περίοδο και δεν ελέγχει για πακέτα. Στην συνέχεια μεταβαίνει στην μεγάλη περίοδο η οποία λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, αλλά με μεγαλύτερη αδρανή περίοδο. Αν κατά τον 'On Duration' κύκλο, η συσκευή λάβει από το PDCCH κανάλι μήνυμα για επικείμενη μετάδοση, ξεκινάει έναν χρονομετρητή (Inactivity Timer) και παρακολουθεί κάθε πλαίσιο για μετάδοση προς αυτό. Κάθε φορά που λαμβάνεται ένα πακέτο ο μετρητής ξεκινάει από την αρχή οπότε η συσκευή είναι στην ουσία σε συνεχή λήψη. Όταν αυτός λήξει, η συσκευή μεταβαίνει στον κύκλο σύντομης περιόδου. Η παραπάνω λειτουργία απεικονίζεται στην Εικόνα 24.



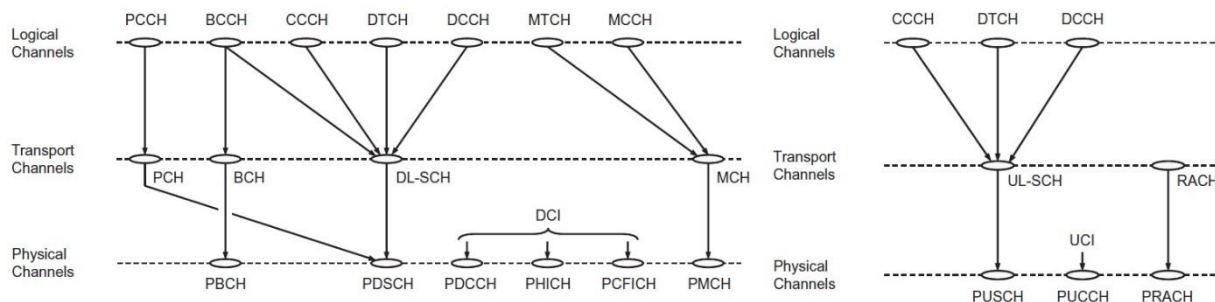
Εικόνα 24: Διακοπτόμενη λήψη (DRX). [2]

Επιπλέον, ορίζεται από το δίκτυο και ένας μετρητής round trip για τις HARQ μεταδόσεις ώστε η συσκευή να μπορεί να μεταβαίνει σε αδρανή κατάσταση κατά τον χρόνο αυτόν. Όταν η αποκωδικοποίηση ενός μπλοκ αποτυγχάνει, μπορεί να θεωρήσει ότι η επόμενη αποστολή θα ξεκινήσει μετά το πέρας του round trip χρόνου. Αν η συσκευή δεν έχει άλλον λόγο να παρακολουθεί το PDCCH κανάλι, μπορεί να μην το κάνει κατά τη διάρκεια του round trip.

### 3.5 Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο παραλαμβάνει μπλοκ μεταφοράς από το MAC επίπεδο και εκτελεί ένα σύνολο λειτουργιών σε αυτά προτού τα μεταδώσει στην ραδιο-διεπαφή, πιθανώς χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες. Στόχος είναι η μετατροπή των μεταδιδόμενων δεδομένων σε ένα αξιόπιστο σήμα μετάδοσης ανάμεσα στο eNB και την συσκευή χρήστη. Το κάθε μπλοκ αρχικά προστατεύεται από λάθη μετάδοσης, με τη χρήση της τεχνικής Κυκλικού Ελέγχου Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC) και στη συνέχεια εφαρμόζεται κωδικοποίηση καναλιού και ένα σύνολο από άλλες λειτουργίες. Το σύνολο των λειτουργιών που εκτελούνται στο φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει τον εντοπισμό λαθών, κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση, διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση, HARQ λειτουργία, την τοπογράφηση (mapping) των σημάτων στους αντίστοιχους πόρους στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας καθώς και το mapping των καναλιών

μεταφοράς στα φυσικά κανάλια. Όπως είδαμε και στην περιγραφή του MAC επιπέδου, το φυσικό επίπεδο παρέχει υπηρεσίες στο MAC επίπεδο με την μορφή καναλιών μεταφοράς. Η τοπογράφηση των καναλιών, από το MAC επίπεδο μέχρι το φυσικό επίπεδο παρουσιάζεται στην Εικόνα 25.

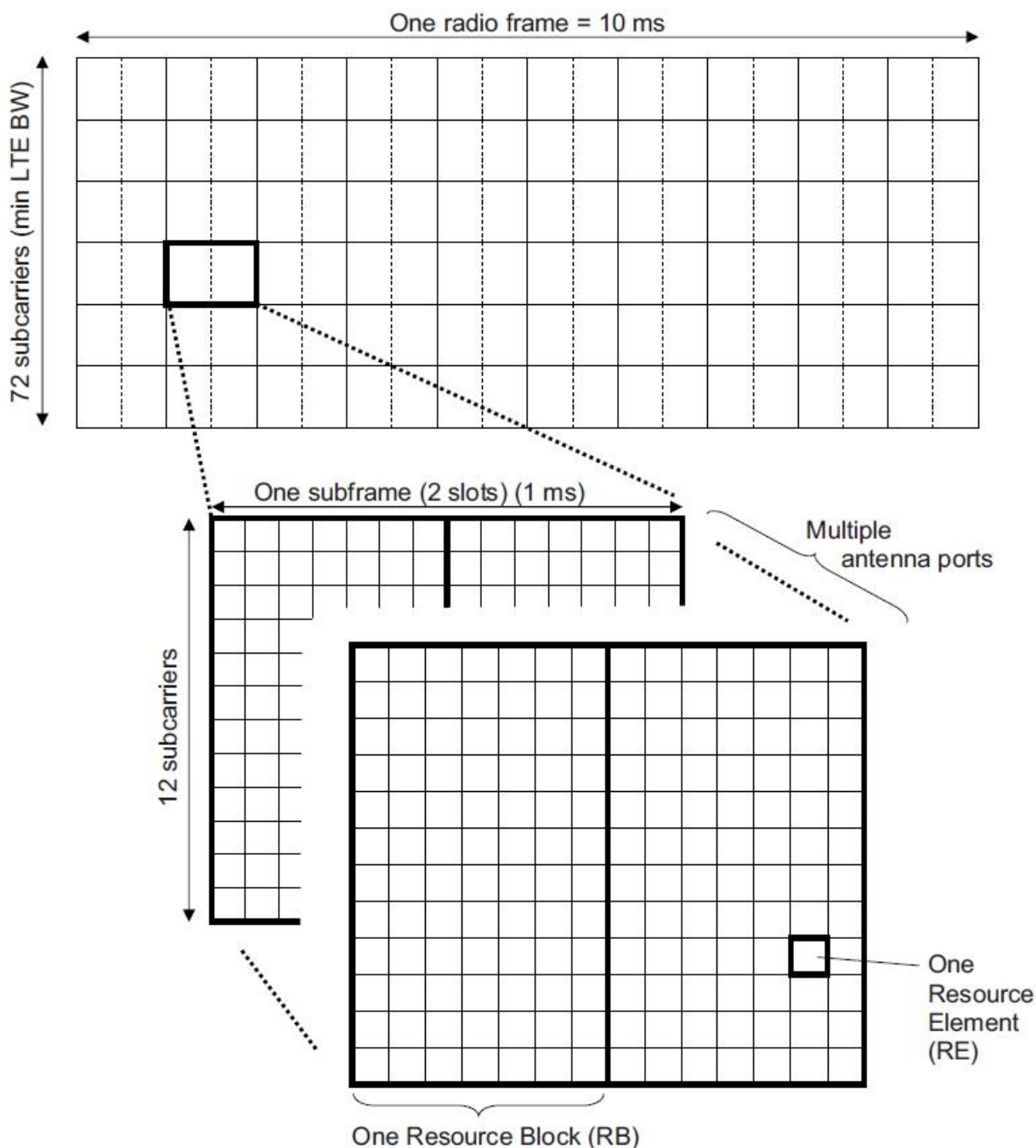


**Εικόνα 25: Τοπογράφηση καναλιών για το Downlink (αριστερά) και Uplink (δεξιά). [1]**

Ένα φυσικό κανάλι αντιστοιχεί στο σύνολο των πόρων που δεσμεύονται για την μετάδοση των δεδομένων ενός καναλιού μεταφοράς. Το σύνολο των πόρων αντιστοιχεί στην δέσμευση συχνοτήτων στο πεδίο του χρόνου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, κάποια φυσικά κανάλια δεν αντιστοιχίζονται με κανένα κανάλι μεταφοράς. Τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται για την μετάδοση πληροφορίας ελέγχου στο downlink (downlink control information, DCI), η οποία παρέχει στις συσκευές χρήστη πληροφορία για την λήψη και αποκωδικοποίηση των downlink μεταδόσεων, και πληροφορίας ελέγχου στο uplink (uplink control information, UCI) η οποία παρέχει στον scheduler και το HARQ πληροφορία για την κατάσταση της συσκευής χρήστη.

### 3.5.1 Δομή Πόρων Μετάδοσης (Transmission Resource Structure)

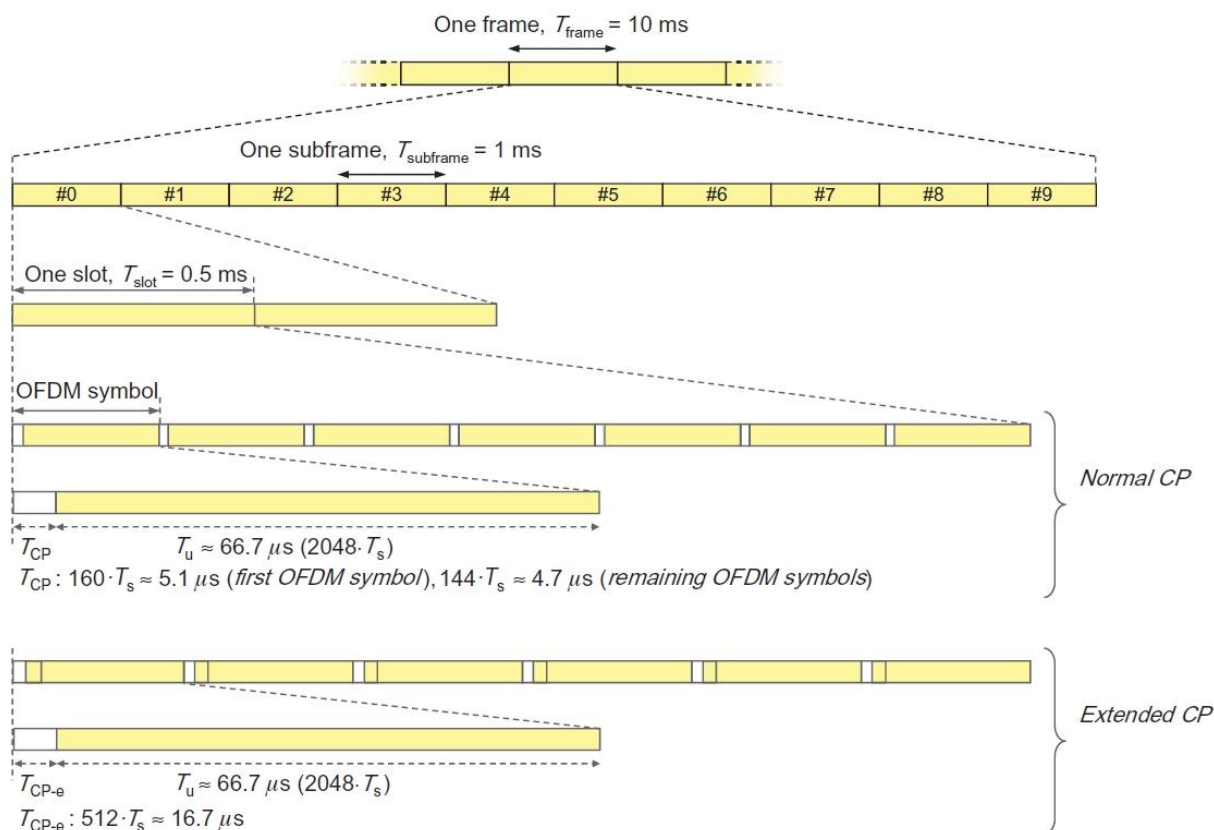
Τα δεδομένα προς μετάδοση που λαμβάνει το φυσικό επίπεδο από τα υψηλότερα επίπεδα περιλαμβάνουν user-plane και control-plane δεδομένα καθώς και δεδομένα για την λειτουργία του φυσικού επιπέδου όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η πολυπλεξία αυτής της ποικιλίας δεδομένων είναι δυνατή χάρη στο OFDMA σχήμα μετάδοσης, το οποίο επιτρέπει η downlink σηματοδότηση να μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα κομμάτια στη διάσταση του χρόνου και των συχνοτήτων.



Εικόνα 26: Δομή πόρων μετάδοσης στο Downlink. [2]

Οι πόροι μετάδοσης ορίζονται στη διάσταση του χώρου, του χρόνου και της συχνότητας. Η διάσταση του χώρου χρησιμοποιεί 'στρώματα' ('layers') και ισχύει όταν χρησιμοποιείται μετάδοση και λήψη με χρήση πολλαπλών κεραιών. Στην διάσταση του χρόνου και των συχνοτήτων, οι πόροι χωρίζονται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 26. Η μεγαλύτερη μονάδα χρόνου ορίζεται ως ένα ράδιο-πλαίσιο (radio frame) με διάρκεια 10ms. Το πλαίσιο αποτελείται από 10 υπό-πλαίσια (subframes) διάρκειας 1ms και το καθένα από αυτά σε δύο υποδοχές (slots) διάρκειας 0.5ms. Κάθε υποδοχή περιέχει 7 σύμβολα OFDM στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος ή 6 στην περίπτωση του εκτεταμένου κυκλικού προθέματος. Στο πεδίο της συχνότητας, κάθε μπλοκ πόρων (Resource Block, RB) είναι ένα σύνολο 12 υπό-φορέων (subframes) συνολικού μεγέθους 180kHz. Η μικρότερη μονάδα πόρου στο RB είναι το στοιχείο πόρος (Resource Element, RE) η οποία αποτελείται από ένα subcarrier για την διάρκεια

ενός OFDM συμβόλου. Ένα RB αποτελείται από 84 στοιχεία πόρου στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος και από 72 στην περίπτωση εκτεταμένου.

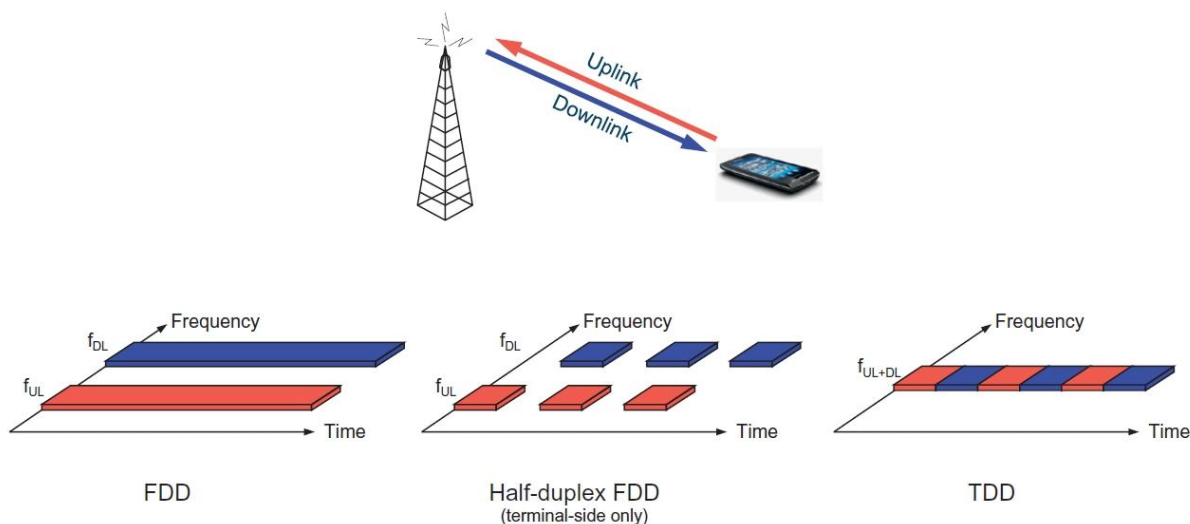


Εικόνα 27: Resource Elements σε ένα Resource Block σε σχέση με το κυκλικό πρόθεμα. [1]

Κάποια στοιχεία πόρου σε συγκεκριμένα RBs δεσμεύονται για ειδικές λειτουργίες (reference signals, synchronization signals, control signaling, critical broadcast system information). Τα υπόλοιπα στοιχεία πόρου είναι ελεύθερα για μετάδοση δεδομένων χρήστη και δεσμεύονται σε επίπεδο subframe (2 RBs).

### 3.5.2 Paired and Unpaired Spectrum

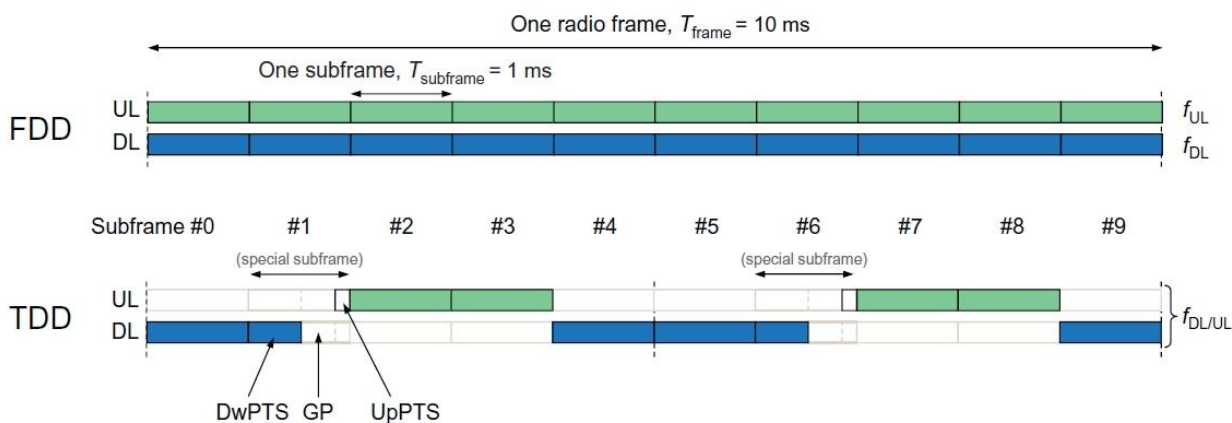
Το LTE έχει σχεδιαστεί ώστε να προσφέρει ευελιξία και απόδοση όσον αφορά τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Η συνεχής ανάγκη των κινητών τεχνολογιών για μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ο διαφορετικός τρόπος κατάτμησης και ανάθεσής του σε διαφορετικές τεχνολογίες ανάλογα με την περιοχή, επιβάλλουν την χρήση διαφορετικών κομματιών του φάσματος και σε διαφορετικά μεγέθη το οποίο καθιστά την ευέλικτη χρήση του διαθέσιμου φάσματος έναν σημαντικό παράγοντα στην σχεδίαση του προτύπου. Μέρος της αποδοτική χρήσης του φάσματος αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί να λειτουργεί είτε σε κατά ζεύγος φάσμα (paired spectrum) είτε σε άζευκτο φάσμα (unpaired). Στην πρώτη περίπτωση το downlink και uplink χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες σε διαφορετικά μέρη του φάσματος, αρκετά διαχωρισμένες μεταξύ τους για να μην προκαλούν παρεμβολές, ενώ στην δεύτερη περίπτωση το ίδιο μέρος του φάσματος χρησιμοποιείται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές είτε για το downlink είτε για το uplink.



**Εικόνα 28: Διαχείριση φάσματος στο LTE. [1]**

Στην περίπτωση του paired spectrum, το LTE υποστηρίζει Αμφίδρομη επικοινωνία με Διαίρεση Συχνότητες (Frequency Division Duplex, FDD) και ημί-αμφίδρομη επικοινωνία με Διαίρεση Συχνότητας (Half-Duplex FDD, HD-FDD) ενώ στην περίπτωση του unpaired spectrum, υποστηρίζει μόνο Αμφίδρομη επικοινωνία με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Duplex, TDD). Στη ημί-αμφίδρομη επικοινωνία, το downlink και uplink στην συσκευή χρήστη, διαχωρίζονται στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου. Το eNB λειτουργεί σε FDD και εξυπηρετεί πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, ενώ ο κάθε χρήστης εκπέμπει και λαμβάνει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το αν θα χρησιμοποιηθεί full duplex ή half-duplex επικοινωνία ανάμεσα στο eNB και τις συσκευές χρήστη, εξαρτάται από τις δυνατότητες της κάθε συσκευής. Το eNB μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα και τους δυο τύπους.

Στην περίπτωση του TDD, χρησιμοποιείται μία συχνότητα για downlink και uplink, με διαχωρισμό στο πεδίο του χρόνου.



**Εικόνα 29: Δομή υπό-πλαισίων για FDD και TDD. [1]**

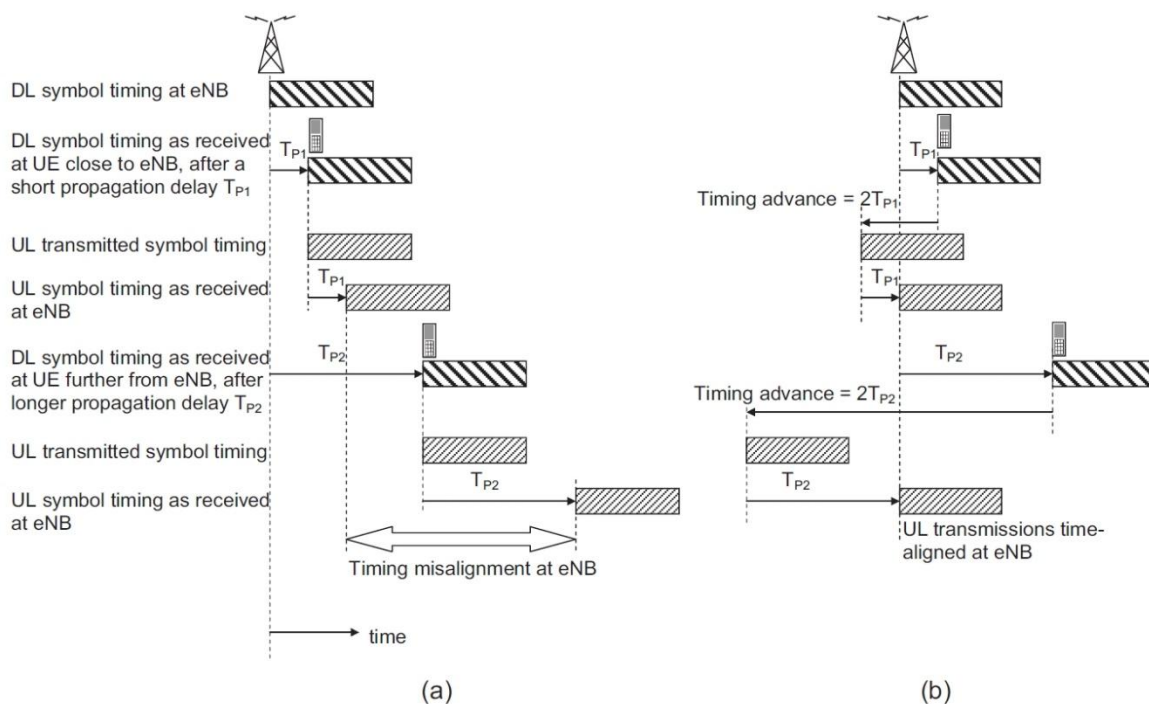
Στην περίπτωση του TDD, χρησιμοποιείται μία συχνότητα για downlink και uplink, με διαχωρισμό στο πεδίο του χρόνου. Το eNB και UE θα πρέπει κάνουν μετάβαση από downlink σε uplink και το αντίστροφο στις αλλαγές των subframes. Ένα subframe μπορεί να έχει δεσμευτεί για downlink ή uplink ανάλογα με τον φόρτο του δικτύου, μέσω των πολλαπλών διαφορετικών ρυθμίσεων που προσφέρει το LTE για ανισομερή δέσμευση πόρων για downlink/uplink. Για αυτές τις μεταβάσεις, δεσμεύεται κάποιο



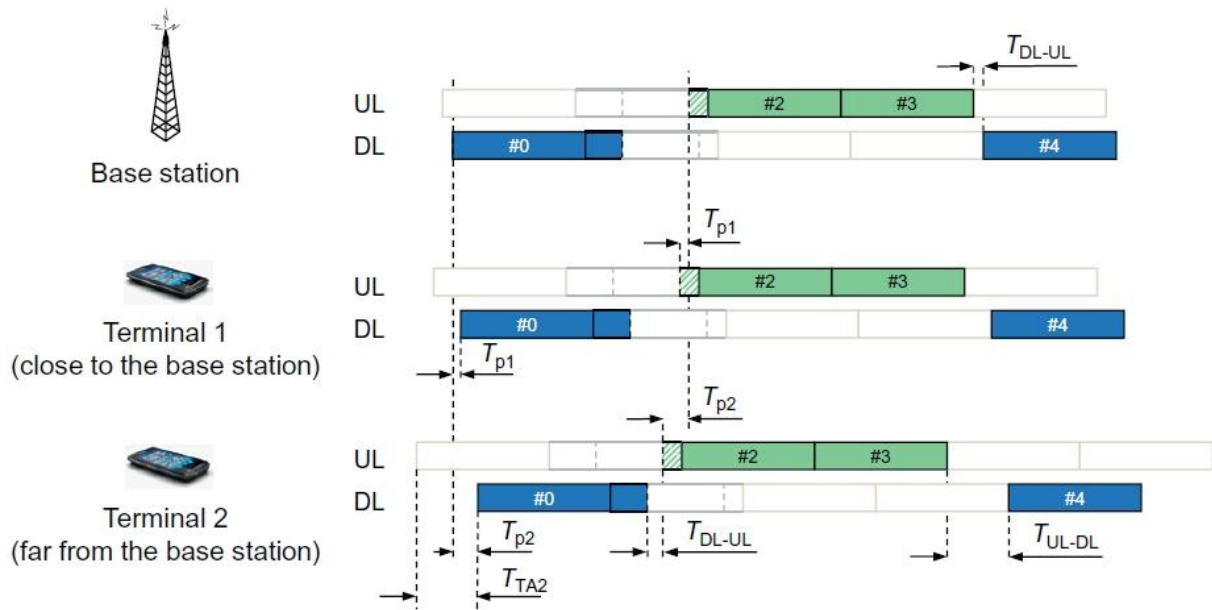
μέρος των κατάλληλων subframes ανάλογα με το configuration κατανομής των subframes. Έτσι η μετάβαση από downlink στο uplink γίνεται στο DwPTS, η αντίθετη μετάβαση στο UpPTS ενώ υπάρχει και ένα κενό μέρος του subframe (guard period, GP). Το DwPTS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για downlink μετάδοση, το UpPTS χρησιμοποιείται για random access procedure ή είναι κενό και το guard period είναι πάντα κενό για την σωστή μετάβαση από downlink σε uplink και το αντίθετο.

Η διάρκεια του guard period είναι σημαντικός παράγοντας στην λειτουργία του δικτύου. Πρώτον, θα πρέπει η διάρκεια αυτή να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να γίνει μέσα σε αυτήν η μετάβαση από downlink σε uplink και το αντίστροφο. Η μετάβαση γίνεται σχετικά γρήγορα, 20microseconds. Επιπλέον θα πρέπει να προστατεύει από τις παρεμβολές των γειτονικών κυψελών. Θα πρέπει η μετάδοση ενός γειτονικού eNB να έχει φθίσει αρκετά προτού ένα άλλο eNB ξεκινήσει να λαμβάνει. Σε αυτή την περίπτωση η διάρκεια του guard period εξαρτάται από τις συνθήκες μετάδοσης.

Ένας σημαντικός παράγοντας λειτουργία του LTE δικτύου είναι το ότι έχει σχεδιαστεί να είναι ορθογώνιο στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, για διαφορετικά UEs. Το χαρακτηριστικό αυτό διατηρείται με τον συγχρονισμό της λήψης στο eNB για διαφορετικούς χρήστες. Αυτό υλοποιείται ρυθμίζοντας τα UEs να εκπέμπουν λίγο νωρίτερα από το προβλεπόμενο (timing advance), ανάλογα με την καθυστέρηση που υφίστανται λόγω των συνθηκών μετάδοσης. Αυτό αποτρέπει την εμφάνιση παρεμβολών από χρήστες σε γειτονικές συχνότητες και μεταξύ διαδοχικών subframes.



Εικόνα 30: Καθυστέρηση μετάδοσης (a) και timing advance (b). [2]



**Εικόνα 31: Διάρκεια guard period για διασφάλιση ευθυγράμμισης στο uplink. [1]**

Η διάρκεια του guard period θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην επιτρέπει η λήψη ενός downlink subframe να συμπίπτει με την μετάδοση ενός uplink subframe.



## 4 Χρονοπρογραμματισμός (Scheduling)

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των κινητών επικοινωνιών είναι οι ταχείς, τυχαίες και σημαντικές στιγμιαίες μεταβολές στην ποιότητα του καναλιού. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται σε εξασθένηση του σήματος, shadow fading, path loss ή παρεμβολές από γειτονικούς κόμβους. Παρά τα προβλήματα που ίσως προκαλούν, είναι δυνατόν οι αλλαγές αυτές να εκμεταλλευτούν άμεσα προς όφελος του συστήματος από το χρονοπρογραμματισμό με βάση την ποιότητα καναλιού (channel-dependent scheduling) και εμμέσως μέσω της προσαρμογής στο κανάλι (link adaptation).

Ο scheduler αντιμετωπίζει το πρόβλημα του διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων στους διαθέσιμους χρήστες ενώ η προσαρμογή στο κανάλι ορίζει τις παραμέτρους της μετάδοσης ώστε να μπορούν να αντιμετωπιστούν τυχών μεταβολές κατά την επικοινωνία. Τόσο ο scheduler όσο και το link adaptation βασίζονται σε εκ των προτέρων γνώση για την στιγμιαία ποιότητα του καναλιού. Λόγω της τυχασίας φύσης των στιγμιαίων μεταβολών, δεν είναι δυνατόν να υπάρξει τέλεια προσαρμογή με αποτέλεσμα να υπάρχουν λάθη κατά την μετάδοση. Το HARQ όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.4 έρχεται να συμπληρώσει το link adaptation και το channel-dependent scheduling.

### 4.1 Προσαρμογή καναλιού

Η προσαρμογή καναλιού μπορεί να υλοποιηθεί με δυο τρόπους, με δυναμική προσαρμογή της ισχύς εκπομπής (dynamic transmit-power control) ή ρυθμίζοντας την διαμόρφωση ή/και την κωδικοποίηση καναλιού.

Η δυναμική προσαρμογή της ισχύος προσαρμόζει την ισχύ εκπομπής για να αντισταθμίσει τις στιγμιαίες μεταβολές του καναλιού. Στόχος είναι η διατήρηση σταθερού SINR στον παραλήπτη ώστε η πιθανότητα λάθους στην μετάδοση να παραμείνει χαμηλή. Στην πράξη, με τον μηχανισμό αυτόν η εκπεμπόμενη ισχύς μειώνεται όταν οι συνθήκες είναι καλές και αυξάνεται όταν δεν είναι. Το αποτέλεσμα είναι ένας σταθερός ρυθμός μετάδοσης ανεξαρτήτως των συνθηκών στο κανάλι, το οποίο είναι επιθυμητό στα circuit-based συστήματα στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί (WCDMA, CDMA2000). Στα packet-based συστήματα δεν υπάρχει ανάγκη για σταθερό ρυθμό μετάδοσης, ακόμη και για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου είναι ανεκτή μια μικρή διακύμανση του ρυθμού μετάδοσης, αρκεί να η μέση τιμή του να παραμένει σταθερή. Σε αυτή την περίπτωση η εκπεμπόμενη ισχύς παραμένει σταθερή και ίση με την μέγιστη δυνατή τιμή και ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται σύμφωνα με τις συνθήκες του καναλιού.

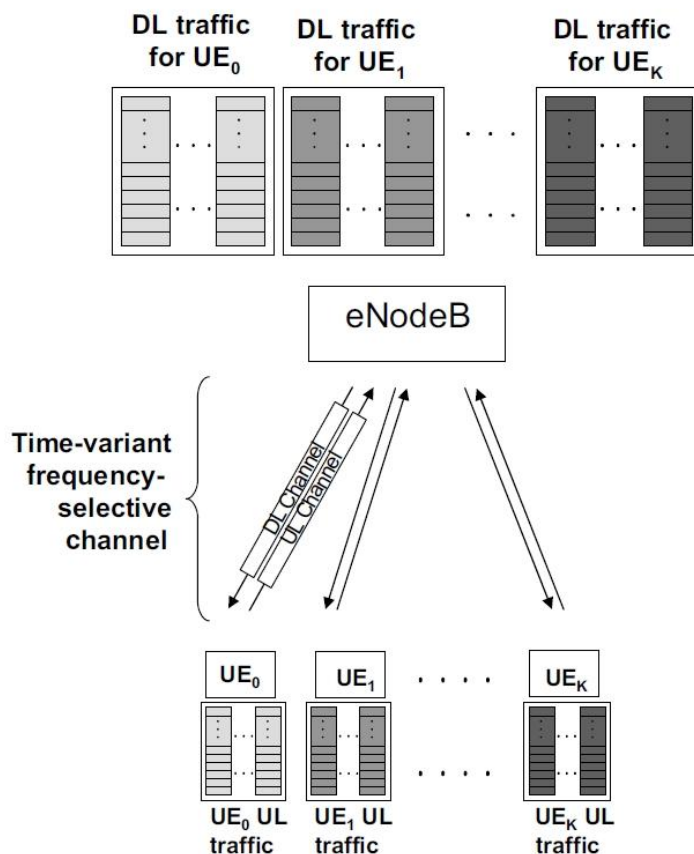
Στην πράξη, η προσαρμογή στις συνθήκες του καναλιού υλοποιείται με την χρήση της κατάλληλης διαμόρφωσης και κωδικοποίησης καναλιού ανάλογα με τις συνθήκες. Όταν ποιότητα του καναλιού είναι καλή, το SINR στον παραλήπτη παραμένει σταθερό και ο μόνος περιορισμός στον ρυθμό μετάδοσης είναι το διαθέσιμο bandwidth. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαμόρφωση υψηλότερου επιπέδου, για παράδειγμα 16QAM ή 64QAM και κωδικοποίηση υψηλότερης τάξης. Όταν η ποιότητα του καναλιού είναι κακή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί QPSK και κωδικοποίηση χαμηλότερης τάξης.

### 4.2 Χρονοπρογραμματισμός

Ο χρονοπρογραμματισμός είναι η διεργασία κατά την οποία ανατίθενται πόροι μετάδοσης στους χρήστες και είναι συνδεδεμένος με την διαδικασία προσαρμογής στο

κανάλι. Οι βασικές αρχές που το διέπουν, και το ποιοι πόροι θα είναι διαθέσιμοι σε ποιους χρήστες εξαρτάται από την κατεύθυνση της επικοινωνίας (downlink/uplink) καθώς και από το αν οι μεταδόσεις των χρηστών είναι ορθογώνιες ή όχι. Απώτερος σκοπός είναι η εξυπηρέτηση των QoS απαιτήσεων όσο το δυνατόν περισσότερων εφαρμογών για τους αντίστοιχους χρήστες τους, μεγιστοποιώντας παράλληλα κάποια μονάδα μέτρησης.

Ένα τυπικό σενάριο μετάδοσης, για μια κυψέλη, παρουσιάζεται στην Εικόνα 32. Στο σενάριο αυτό υπάρχουν  $K$  συσκευές χρήστη, οι οποίες επικοινωνούν με ένα eNB μέσω ενός συγκεκριμένου εύρους ζώνης  $B$ . Για κάθε συσκευή χρήστη υπάρχουν πολλαπλές ουρές μετάδοσης (traffic queues), οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά uplink κανάλια με διαφορετικές απαιτήσεις σε καθυστέρηση και ρυθμούς μετάδοσης, ανάλογα με τις αντίστοιχες εφαρμογές του χρήστη. Στο eNB, επίσης υπάρχουν πολλαπλές ουρές μετάδοσης προς διαφορετικούς χρήστες, με διαφορετικές QoS απαιτήσεις. Η μετάδοση γίνεται μέσω των OFDM φερουσών (κανάλια), των οποίων η ποιότητα μπορεί να μεταβάλλεται στιγμιαία. Το συνολικό εύρος ζώνης χωρίζεται σε  $M$  RBs στο πεδίο της συχνότητας. Η μετάδοση γίνεται σε επίπεδο subframe το οποίο αποτελείται από δυο RBs με διάρκεια 1ms (TTI).

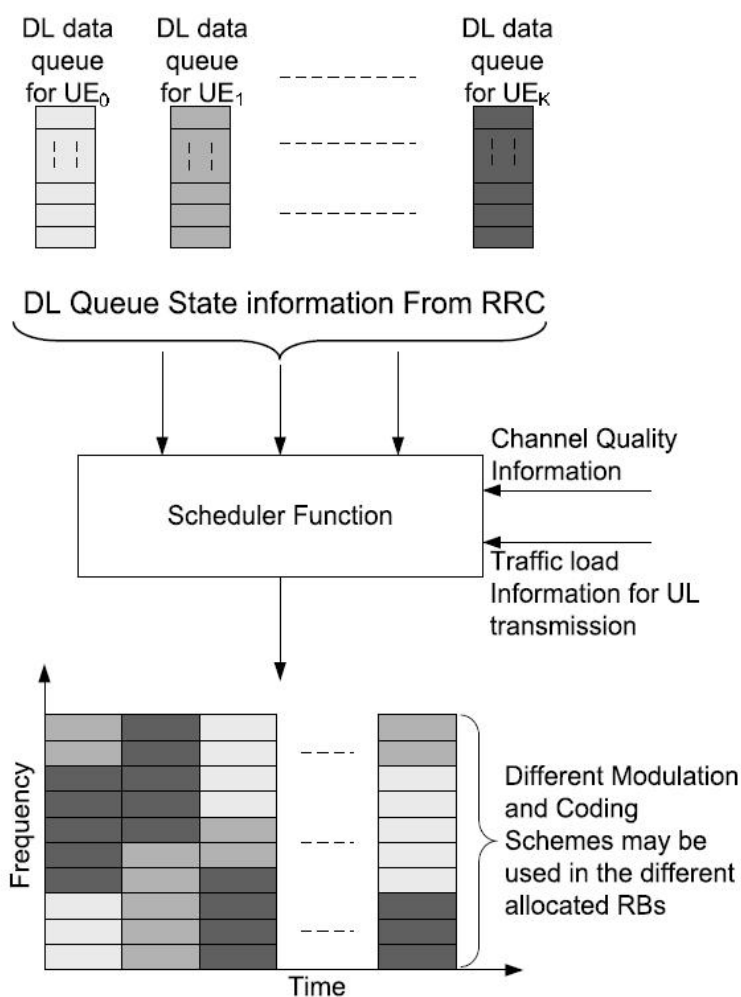


Εικόνα 32: Τυπικό σενάριο μετάδοσης για πολλαπλούς χρήστες με μια κυψέλη. [2]

Στόχος της διαδικασίας χρονοπρογραμματισμού είναι η δέσμευση των RBs και καθορισμός της ισχύς εκπομπής για κάθε subframe, με σκοπό την βελτιστοποίηση κάποιας συνάρτησης ή μονάδα μέτρησης της απόδοσης, όπως το μέγιστο/ελάχιστο/μέσο throughput, μέγιστη/ελάχιστη/μέση καθυστέρηση, φασματική απόδοση κ.ά. Στο downlink, η δέσμευση των πόρων περιορίζεται μόνο από την συνολική ισχύ εκπομπής του eNB ενώ στο uplink από τις παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες. Τέλος, ένας πρακτικός περιορισμός τον οποίο θα πρέπει να ικανοποιεί ο

αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού είναι η ορθογώνια μετάδοση μεταξύ χρηστών, το οποίο σημαίνει ότι το κάθε RB ανατίθεται σε έναν μόνο χρήστη.

Η γενική δομή ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 33. Ένας τέτοιος αλγόριθμος αναθέτει πόρους, από ένα κοινό σύνολο φυσικών πόρων, στους διαθέσιμους χρήστες, εξασφαλίζοντας ότι λαμβάνουν αρκετούς πόρους για να ικανοποιήσουν τις αντίστοιχες QoS απαιτήσεις τους. Η υλοποίηση των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού δεν είναι τυποποιημένη, επιτρέποντας στους κατασκευαστές να υλοποιούν τους δικούς τους αλγορίθμους. Επιπλέον, για να μειωθεί η πολυπλοκότητα σχεδίασής τους, λειτουργούν σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, με βάση την διαθέσιμη πληροφορία για την κατάσταση του δικτύου, δημιουργούν το σύνολο των χρηστών στους οποίους μπορούν να ανατεθούν πόροι για μετάδοση και στην δεύτερη φάση κάνουν την ανάθεση αυτή. [4] [8]



Εικόνα 33: Δομή ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού. [2]

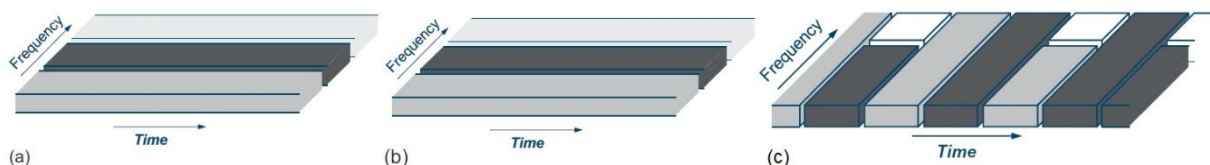
Η ανάθεση των πόρων γίνεται με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία για την ποιότητα του κάθε καναλιού καθώς και φόρτο του δικτύου (ένταση και προτεραιότητες). Η πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού αποστέλλεται στο eNB ως feedback των χρηστών μέσω μηνυμάτων Ένδειξης Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Indicator, CQI) στο downlink, ενώ στο uplink εξάγεται από το eNB μέσω των Σημάτων Αναφοράς (Sounding Reference Signals, SRS) ή από άλλες εκπομπές των χρηστών. Η περίοδος αποστολής των παραπάνω σημάτων αποτελεί ρύθμιση του eNB, επιτρέποντας ένα trade-off, από τη μία ανάμεσα στην επαρκή και ενημερωμένη πληροφορία για την κατάσταση των καναλιών και εισαγωγή επιπλέον κόστους (overhead) στις μεταδόσεις,

από την άλλη. Η τακτική ενημέρωση της ποιότητας του καναλιού είναι σημαντική καθώς λόγω της φύσης των στιγμιαίων μεταβολών των καναλιών, η ποιότητά τους μπορεί να μειωθεί σημαντικά καθιστώντας τον χρονοπρογραμματισμό μη-αποδοτικό, αν αυτός έχει βασιστεί σε προηγούμενη πληροφορία. [1] [9] [2] Ο downlink φόρτος του δικτύου είναι διαθέσιμος, ενώ για το uplink παρέχεται από τους χρήστες μέσω των Buffer Status Reports (BSRs) όπως έχει ήδη αναφερθεί.

#### 4.2.1 Χρονοπρογραμματισμός στο downlink

Στο downlink η μετάδοση διαφορετικών τερματικών είναι ορθογώνια, αποκλείοντας την δια-συμβολική παρεμβολή στην ίδια κυψέλη. Η ορθογώνια μετάδοση μπορεί να επιτευχθεί με πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM), στο πεδίο της συχνότητας (Frequency Division Multiplexing, FDM) ή στο πεδίο της κωδικοποίησης (Code Division Multiplexing, CDM). Στην περίπτωση χρήσης πολλαπλών κεραιών, το πεδίο του χώρου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον διαχωρισμό των μεταδόσεων (Spatial Division Multiplexing, SDM).

Στην πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου, τα τερματικά μιας κυψέλης μπορούν να μεταδώσουν σε διαφορετικές, μη επικαλυπτόμενες χρονικές στιγμές, χρησιμοποιώντας όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Το παραπάνω επιτρέπει μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης, αλλά για τις περισσότερες packet-based υπηρεσίες η κίνηση είναι σποραδική και πολλές φορές κάποια τερματικά δεν έχουν πακέτα προς μετάδοση. Επιπλέον, οι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν περιορίζονται κυρίως από την διαθέσιμη ισχύ εκπομπής παρά από το διαθέσιμο bandwidth, ειδικά για το uplink. Για τους παραπάνω λόγους, η χρήση του παραπάνω σχήματος είναι μη αποδοτική για την αξιοποίηση του εύρους ζώνης και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την πολυπλεξία στο πεδίο της συχνότητας. Στο σχήμα αυτό, διαφορετικά τερματικά στην ίδια κυψέλη, μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές συχνότητες.



Εικόνα 34: TDMA (a), FDMA (b), συνδυασμός TDMA και FDMA (c). [1]

Σε γενικές γραμμές, οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού μπορούν να ανήκουν σε μια από δυο κατηγορίες, ευκαιριακοί (opportunistic) ή δίκαιοι (fair). Οι αλγόριθμοι στην πρώτη κατηγορία έχουν ως στόχο την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος ενώ αυτοί στην δεύτερη κατηγορία έχουν ως στόχο την ικανοποίηση των QoS απαιτήσεων όσο το δυνατόν περισσότερων χρηστών.

Ο αλγόριθμος μέγιστης ρυθμαπόδοσης (maximum rate, MR) είναι ένας opportunistic αλγόριθμος, στον οποίο η ανάθεση πόρων στα τερματικά γίνεται με βάση την ποιότητα του καναλιού. Όπως όλοι οι αλγόριθμοι στην ίδια κατηγορία, βασίζεται στην έννοια της ποικιλομορφίας των συνδέσεων χρηστών (multiuser diversity). Η στιγμιαία ποιότητα καναλιού διαφέρει σε μεγάλο βαθμό για διαφορετικούς χρήστες, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, υπάρχει όμως πάντα κάποιο κανάλι του οποίου η ποιότητα προσεγγίζει την άριστη, συνεπώς και για το κανάλι αυτό ο ρυθμός μετάδοσης θα είναι υψηλός. Επομένως ένας χρήστης που εκπέμπει στο κανάλι αυτό θα βιώνει καλύτερη

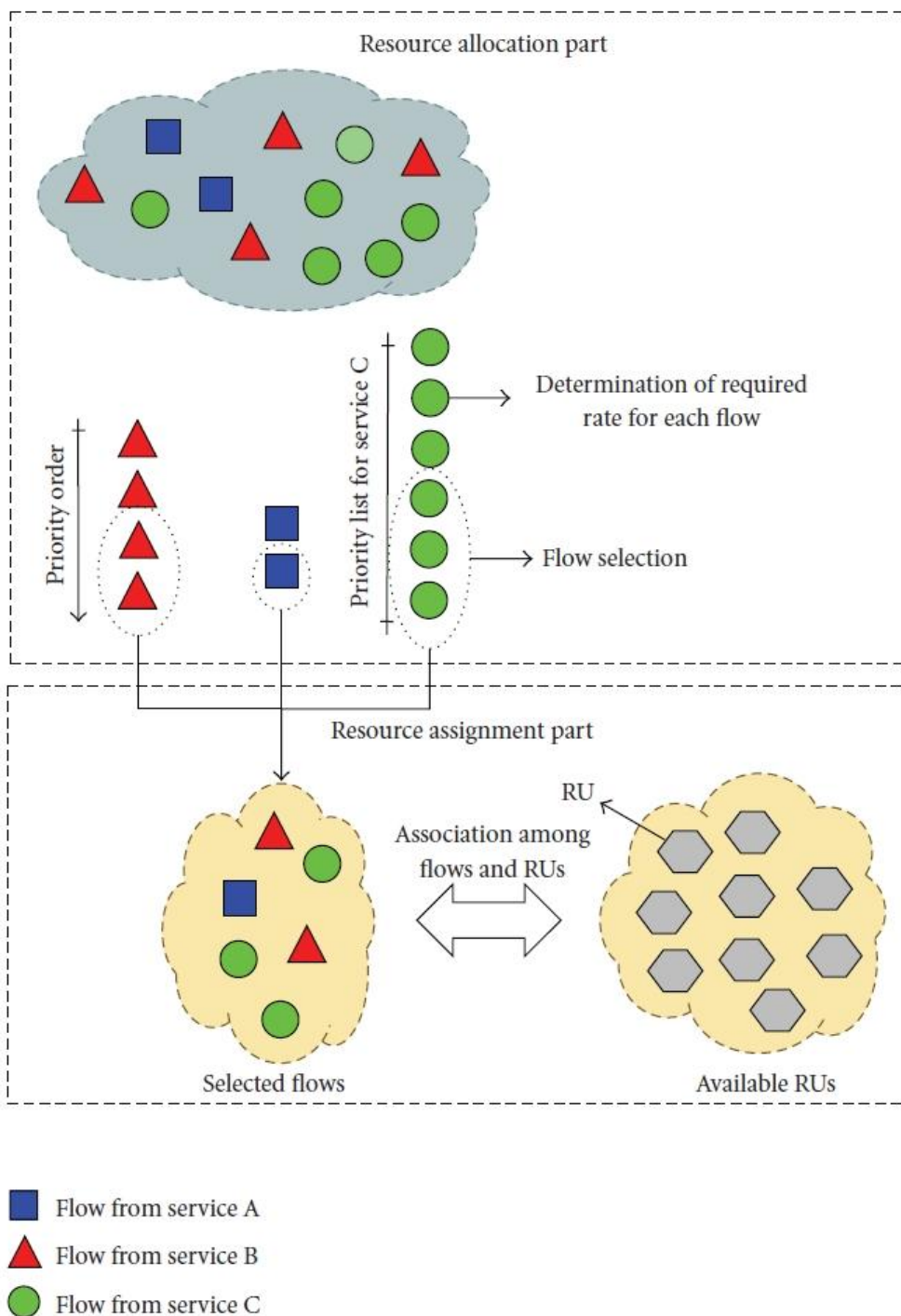
υπηρεσία σε σχέση με ένα άλλο κανάλι χειρότερης ποιότητας. Στον αλγόριθμο αυτόν, η ανάθεση ενός subframe γίνεται στον χρήστη με τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης εκείνη τη στιγμή.

Ενώ με τον παραπάνω αλγόριθμο μεγιστοποιείται η χωρητικότητα του συστήματος, εντούτοις δεν είναι δίκαιος ως την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσιών. Τα δεδομένα των χρηστών δεν μπορούν πάντα να περιμένουν για ευνοϊκές συνθήκες μετάδοσης και επίσης είναι σημαντικό το δίκτυο να παρέχει αξιόπιστη κάλυψη και σε τερματικά που βρίσκονται στην άκρη μιας κυψέλης, δεν μετακινούνται και βιώνουν μονίμως κακή ποιότητα καναλιού. Ο αναλογικά-δίκαιος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού (proportional fair, PF) είναι ένας αλγόριθμος που συνδυάζει την αξιοποίηση των μεταβολών στην ποιότητα των καναλιών με την απαιτούμενη δίκαια χρήση των πόρων ως προς την ποιότητα υπηρεσιών. Στον αλγόριθμο αυτόν, ένα subframe ανατίθεται στον χρήστη με την βέλτιστη στιγμιαία ποιότητα καναλιού σε σχέση με την μέση ποιότητα του καναλιού για τον χρήστη αυτόν.

Οι συγγραφείς στο [8] προτείνουν ένα scheduling σχήμα στο οποίο μεγιστοποιείται η χωρητικότητα σε ένα multicarrier σύστημα με multiservice υπηρεσίες, σύμφωνα με τον ορισμό της χωρητικότητας που παρέχουν. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time, RT) και μη-πραγματικού χρόνου (non-real time, NRT). Οι πρώτες έχουν αυστηρές απαιτήσεις για τις καθυστερήσεις και το jittering ενώ για τις δεύτερες η ακεραιότητα των μεταδόσεων έχει μεγαλύτερη σημασία από τις καθυστερήσεις.

Ο ορισμός της χωρητικότητας που χρησιμοποιείται βασίζεται στο σύνολο των ροών (flows) στο σύστημα και τον βαθμό ικανοποίησης των χρηστών. Στο σύστημα της μελέτης υπάρχει ένα σύνολο από υπηρεσίες (services), πραγματικού χρόνου ή μη, το καθένα από τα οποία αποτελείται από πολλαπλές ροές (flows). Ο συνολικός φόρτος στο σύστημα τότε υπολογίζεται ως το άθροισμα όλων των flows για όλες τις υπηρεσίες στο σύνολο των υπηρεσιών. Δεδομένων ενός αλγόριθμου scheduling, του συνολικού φόρτου του συστήματος και του φόρτου για κάθε μια υπηρεσία στο σύνολο υπηρεσιών, ο βαθμός ικανοποίησης των χρηστών για μια υπηρεσία, ορίζεται ως το υποσύνολο των flows για τα οποία η μετάδοση τελειώνει ικανοποιώντας ένα ελάχιστο όριο ικανοποίησης (threshold). Επομένως η ικανοποίηση των χρηστών εξαρτάται άμεσα από το μίγμα των υπηρεσιών καθώς διαφορετικές υπηρεσίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Η χωρητικότητα μιας υπηρεσίας ορίζεται ως ο συνολικός φόρτος που προσθέτει στο σύστημα όταν η πλειοψηφία των flows της τελειώνουν τις μεταδόσεις τους επιτυγχάνοντας QoS μεγαλύτερο από το παραπάνω threshold. Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος ορίζεται ως ο μέγιστος φόρτος στο σύστημα όταν όλες οι υπηρεσίες σε αυτό ικανοποιούν το ελάχιστο όριο ικανοποίησης χρηστών. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι υπηρεσίες θα πρέπει να ικανοποιούν, στο ελάχιστο το όριο αυτό. Αν κάποια υπηρεσία ξεπερνάει το όριο και μια άλλη είναι ελάχιστα κάτω από αυτό, η πρώτη θα πρέπει να ελευθερώσει αρκετούς πόρους χωρίς να πέσει κάτω από το threshold ώστε η δεύτερη να μπορεί να το επιτύχει. Αυτό έχει νόημα από την πλευρά του διαχειριστή του συστήματος καθώς εξασφαλίζει αρκετούς πόρους για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο σύνολο υπηρεσιών χωρίς κάποια από αυτές να μονοπωλεί την χρήση των πόρων. Η μετάδοση υποθέτει σταθερή ισχύ μετάδοσης η οποία ισομοιράζεται ανάλογα με το πλήθος των μεταδιδόμενων RBs ενώ το πλήθος των χρηστών που μεταδίδουν σε καθένα από αυτά θεωρείται σταθερό. Τέλος, το σύνολο υπηρεσιών αποτελείται από υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου. Για τις πρώτες, η ποιότητα υπηρεσίας σχετίζεται με τον ρυθμό απώλειας πλαισίων (Frame Error Rate, FER) και απαιτούν ότι ο συσσωρευμένος ρυθμός απωλειών να μην είναι μεγαλύτερος από ένα ελάχιστο όριο. Για τις υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου, απαιτείται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης, ορισμένος ως το σύνολο των bits που έχουν μεταδοθεί σωστά διά

το συνολικό τους πλήθος που έχει μεταδοθεί, να είναι μεγαλύτερος από ένα ελάχιστο όριο.



Εικόνα 35: Βήματα δέσμησης και ανάθεσης πόρων στον CRA.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ονομάζεται Capacity-Driven Resource Allocation (CRA) και ακολουθεί την τυπική διαδικασία σχεδίασης αλγορίθμων σε βήματα. Στο πρώτο βήμα αποφασίζεται για ποιες υπηρεσίες θα γίνει δέσμηση πόρων (resource allocation) για κάθε TTI και στο δεύτερο βήμα γίνεται η ανάθεση των πόρων στις υπηρεσίες που επιλέχθηκαν στο πρώτο βήμα (resource assignment). Συγκεκριμένα:

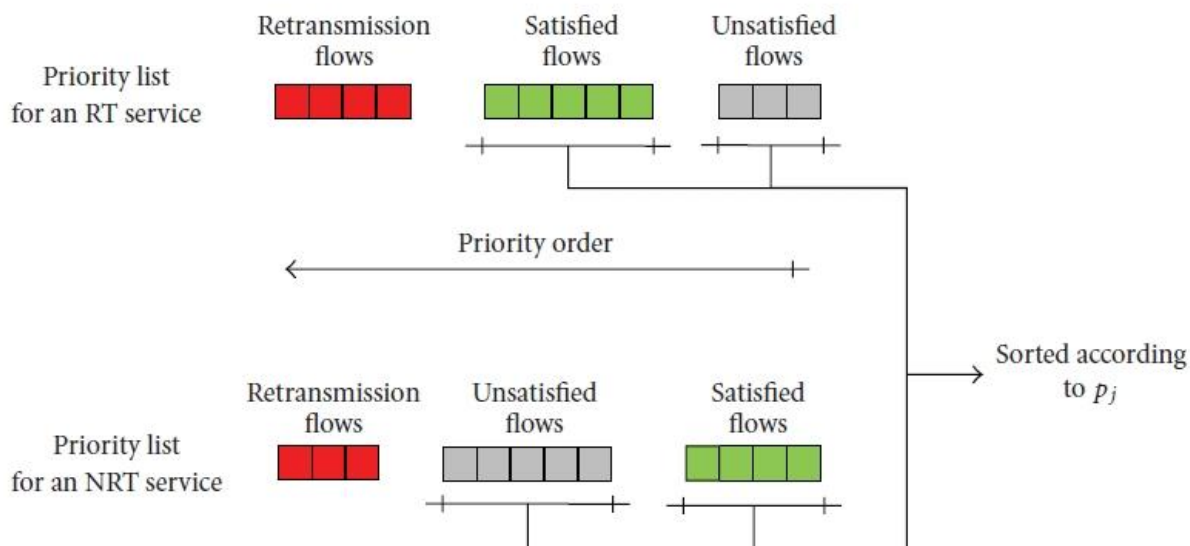
- **Resource Allocation:** Για τις υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου υπολογίζει τον απαραίτητο ρυθμό μετάδοσης ως 'απόσταση' από τον ελάχιστο δυνατό, το οποίο

δηλώνει πόσο επιπλέον ρυθμό μετάδοσης χρειάζεται για να πετύχει το ελάχιστο όριο ή πόσο παραπάνω από αυτό βρίσκεται. Για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, υπολογίζεται ως ο απαραίτητος ρυθμός μετάδοσης για την αποστολή των bits του πιο καθυστερημένου πακέτου. Τα πακέτα στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου χωρίζονται σε μικρότερα πακέτα για μικρότερες καθυστερήσεις. Η αποστολή του πιο καθυστερημένου πακέτου εξυπηρετεί την διατήρηση της ικανοποίησης του χρήστη καθώς σε τέτοιες υπηρεσίες και οι μικρές καθυστερήσεις γίνονται αντιληπτές και επηρεάζουν την ποιότητα της υπηρεσίας.

Με βάση τους υπολογισμούς για τους απαραίτητους ρυθμούς μετάδοσης γίνεται και η ταξινόμηση των flows σε σειρές προτεραιότητας. Προτεραιότητα έχουν αυτά που μπορούν να εξυπηρετηθούν πιο εύκολα. Οι αναμεταδόσεις έχουν την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Για τις υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου, εξυπηρετούνται πρώτα τα flows τα οποία είναι μη-ικανοποιημένα. Για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου η προτεραιότητα είναι αντίστροφη. Εκτός από την παραπάνω ταξινόμηση, τα flows σε μια σειρά ταξινομούνται και με βάση το επίπεδο ικανοποίησης. Για τις μη ικανοποιημένες υπηρεσίες μη-πραγματικού, προηγούνται αυτές για τις οποίες οι συνθήκες είναι καλές ώστε να ικανοποιήσουν το ελάχιστο όριο. Για τις ικανοποιημένες, προηγούνται αυτές που είναι πιο κοντά στο να γίνουν μη-ικανοποιημένες. Για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ορίζεται η 'απόσταση' για την επίτευξη του ελάχιστου ορίου, ως το πλήθος των συνεχόμενων πακέτων που ένα ικανοποιημένο flow μπορεί να χάσει και να παραμείνει ικανοποιημένο ή ως το πλήθος των συνεχόμενων πακέτων που χρειάζεται ένα μη ικανοποιημένο flow για να ικανοποιήσει το όριο. Επομένως για τις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου προηγούνται τα flows που έχουν πακέτα κοντά στο deadline με την μικρότερη δυνατή 'απόσταση'. Ο κανόνας αυτός ισχύει για τα ικανοποιημένα και μη flows. Τέλος, η επιλογή των flows ανά υπηρεσία, στα οποία θα ανατεθούν πόροι, γίνεται αναλογικά με το συνολικό πλήθος των flows ανά υπηρεσία και έτσι ώστε να μη ξεπερνούν το πλήθος των συνδεδεμένων τερματικών ανά ΤΤΙ. Στόχος είναι ο καλύτερος διαμοιρασμός των πόρων.

- **Resource Assignment:** Η ανάθεση των πόρων γίνεται με δίκαιο και opportunistic τρόπο, στα flows που επιλέχθηκαν στο πρώτο βήμα. Η ανάθεση εκτελείται σε βήματα. Στο πρώτο βήμα όλα τα flows παίρνουν από ένα RB με αυτό που έχει τις καλύτερες συνθήκες να λαμβάνει πρώτο και τα υπόλοιπα με φθίνουσα σειρά. Στο επόμενο βήμα τα flows ανταγωνίζονται στην επίτευξη του ρυθμού μετάδοσης που υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα. Όσα το επιτυγχάνουν αφαιρούνται από το σύνολο. Αν περισσέψουν RBs αυτά μοιράζονται δίκαια σε όλα τα flows.





Εικόνα 36: Λίστες προτεραιοτήτων στον CRA.

Οι μετρήσεις για την απόδοση του προτεινόμενου σχήματος έγιναν προσομοιώνοντας ένα LTE σύστημα με υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (VoIP) και μη-πραγματικού (web), σύμφωνα με τα πρότυπα του 3GPP στα οποία περιλαμβάνεται ICI, path loss κτλ. Οι αλγόριθμοι με τους οποίους συγκρίθηκε είναι οι Delay Schedule (DS) και Maximum Rate (MR), οι οποίοι ευνοούν τα πακέτα των υπηρεσιών με την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Ο CRA αλγόριθμος είναι channel-aware, που σημαίνει ότι βασίζεται στις αναφορές των τερματικών για την κατάσταση του δικτύου (CQI). Η αύξηση του χρόνου αναφοράς από τα 10ms στα 25ms έχει επίδραση μόνο στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου, και για το σενάριο των Web υπηρεσιών και για τις VoIP υπηρεσίες, και έδειξε μικρή πτώση της απόδοσης (2%) κυρίως λόγω του link adaptation που σχετίζεται με την ενημέρωση της ποιότητας του καναλιού.

Για την μέτρηση του επιπέδου ικανοποίησης χρηστών χρησιμοποιήθηκαν τρία σενάρια ως προς το συνολικό πλήθος των flows για κάθε υπηρεσία: 25% VoIP – 75% Web, 50% VoIP – 50% Web και 75 VoIP – 25% Web. Σε γενικές γραμμές παρατηρήθηκε ότι το επίπεδο ικανοποίησης ανεβαίνει καθώς ανεβαίνει το πλήθος των VoIP flows στο σύστημα και αυτό γιατί οι VoIP υπηρεσίες απαιτούν μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης. Η χωρητικότητα ήταν περιορισμένη για τον CRA αλλά το επίπεδο ικανοποίησης ήταν καλύτερο από αυτό των άλλων δυο αλγορίθμων, κυρίως λόγω του ότι στον CRA όλα τα flows έχουν την δυνατότητα να βελτιώσουν το επίπεδο ικανοποίησης.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε πραγματικά δίκτυα σχεδόν ποτέ δεν φτάνουν στα άκρα όπως αυτοί που περιγράφονται παραπάνω αλλά χρησιμοποιούν στοιχεία από όλες τις παραπάνω παρατηρήσεις. Επιπλέον, είναι ευκαιριακοί και στο επίπεδο του χρόνου και στο επίπεδο συχνότητας (frequency and time opportunistic)

#### 4.2.2 Χρονοπρογραμματισμός στο uplink

Σε γενικές γραμμές, για τον χρονοπρογραμματισμό στο uplink ισχύουν οι ίδιες αρχές με αυτόν στο downlink, με κάποιες σημαντικές διαφορές. Στο uplink, η συνολική ισχύς εκπομπής είναι κατανομημένη ανάμεσα στα τερματικά χρηστών ενώ στο downlink είναι συγκεντρωμένη στο eNB. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς εκπομπής για κάθε χρήστη, είναι σημαντικά λιγότερη για το uplink σε σύγκριση με το downlink, και αυτό επηρεάζει την διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού. Ενώ στο downlink είναι δυνατόν να εφαρμοστεί αποκλειστικά το TDMA σήμα εκπομπής, στο uplink το πεδίο της συχνότητας, του χρόνου και η κωδικοποίηση θα πρέπει να μοιράζεται ανάμεσα στα τερματικά καθώς ένα



μοναδικό τερματικό δεν έχει επαρκής πόρους για αποδοτική χρήση της γραμμής. Ομοίως με το downlink, ο χρονοπρογραμματισμός με βάση την ποιότητα του καναλιού είναι εξίσου χρήσιμος και στο uplink, αλλά τα χαρακτηριστικά της ραδιο-διεπαφής όπως η ορθογώνια μετάδοση, και η προσαρμογή στην ποιότητα του καναλιού έχουν σημαντική επίδραση στον χρονοπρογραμματισμό.

Σε περιπτώσεις μη ορθογώνιας μετάδοσης, όπως στο CDMA, η διαχείριση της εκπεμπόμενης ισχύς είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση ικανοποιητικού SNR καθώς και την διαχείριση των παρεμβολών στους γειτονικούς κόμβους. Έτσι, ένα τερματικό δεν μπορεί να εκπέμπει σε πλήρη ισχύ, αν αυτό προκαλεί παρεμβολές στα γειτονικά τερματικά. Με αυτόν τον τρόπο ο ρυθμός μετάδοσης είναι σταθερός ανεξαρτήτως των συνθηκών μετάδοσης ενώ η εκπεμπόμενη ισχύς αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες. Ο χρονοπρογραμματισμός με βάση την ποιότητα του καναλιού, σε αυτή την περίπτωση δεν εξασφαλίζει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης αλλά χαμηλότερη επίπεδα παρεμβολών.

Στην περίπτωση της ορθογώνιας μετάδοσης, δεν υπάρχει ανάγκη για έλεγχο της εκπεμπόμενης ισχύς, αν και πρακτικά αυτό εφαρμόζεται λόγω περιορισμών υλοποίησης, καθώς για τις μεταδόσεις στην ίδια κυψέλη, το κάθε τερματικό μπορεί να εκπέμπει με πλήρη ισχύ σε ένα κομμάτι του εύρους ζώνης το οποίο είναι ορθογώνιο με τα υπόλοιπα τα οποία ανατίθενται σε άλλα τερματικά.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού είναι η τοποθεσία του τερματικού, καθώς ένα τερματικό στην άκρη της κυψέλης χρειάζεται περισσότερη ισχύ εκπομπή αντί για bandwidth σε αντίθεση με αυτά που βρίσκονται κοντά στο eNB, και οι στιγμιαίες μεταβολές στην ποιότητα των καναλιών, καθώς η γνώση για τις μεταβολές αυτές επιτρέπει την ανάθεσή τους στα κατάλληλα τερματικά σύμφωνα με την αρχή του multiuser diversity.

Ανεξαρτήτως του τρόπου μετάδοσης, οι αλγόριθμοι του downlink ισχύουν και για το uplink. Ο αλγόριθμος μέγιστης ρυθμαπόδοσης αναθέτει πόρους στο τερματικό με τις καλύτερες συνθήκες, ενώ για ποιο δίκαιο διαμοιρασμό των πόρων μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες στρατηγικές του proportional-fair αλγόριθμοι. Για μη ορθογώνια μετάδοση μπορεί να εφαρμοστεί και ο άπληστος αλγόριθμος (greedy filling) κατά τον οποίον το τερματικό με τις καλύτερες συνθήκες λαμβάνει πόρους ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης. Αν οι παρεμβολές είναι ανεκτές, συνεχίζει με το τερματικό με τις δεύτερες καλύτερες συνθήκες κ.ο.κ. αυτός ο αλγόριθμος αξιοποιεί στο έπακρο την ραδιο-διεπαφή αλλά με το κόστος των πιθανώς μεγάλων διαφορών στην ποιότητα υπηρεσίας ανάμεσα στους χρήστες. Όλοι οι παραπάνω αλγόριθμοι βασίζονται στην ύπαρξη πληροφορίας για την κατάσταση του καναλιού. Αν δεν υπάρχει τέτοια πληροφορία μπορεί να εφαρμοστεί κάποιος round-robin αλγόριθμος.

### 4.2.3 Χρονοπρογραμματισμός για VoIP υπηρεσία

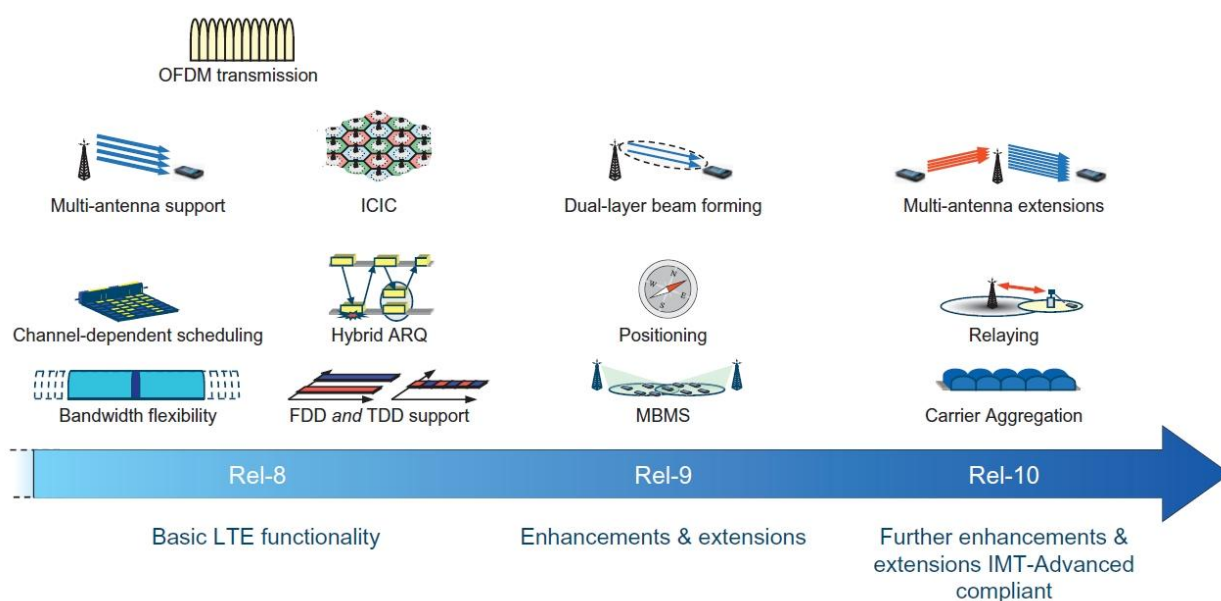
Η VoIP υπηρεσία είναι ένα σημαντικό κομμάτι του LTE. Ο χρονοπρογραμματισμός για VoIP παρουσιάζει κάποιες διαφορές όσον αφορά την φύση και την συχνότητα της μετάδοσης στο δίκτυο.

Οι VoIP χρήστες είναι ενεργοί μόνο για το μισό της συνεδρίας και η κίνησή τους αποτελεί την συχνή και περιοδική λήψη μικρών πακέτων. Επιπλέον, η VoIP υπηρεσία θέτει αυστηρούς περιορισμούς όσον αφορά τις καθυστερήσεις και την απώλεια πακέτων. Η κάλυψη των παραπάνω αναγκών μπορεί να γίνει με δυναμικό χρονοπρογραμματισμό (dynamic scheduling), περιοδικό χρονοπρογραμματισμό (persistent scheduling) ή ημί-περιοδικό χρονοπρογραμματισμό (semi-persistent scheduling).

Στον dynamic scheduling γίνεται πλήρη αξιοποίηση των καναλιών μέσω του multiuser diversity στο πεδίο της συχνότητας και του χρόνου αλλά απαιτεί μεγάλο κόστος για την μετάδοση της πληροφορίας κατάστασης του δικτύου, το οποίο με τη σειρά του μειώνει την συνολική απόδοση τους συστήματος. Στο persistent scheduling, γίνεται μια εκ των προτέρων ανάθεση συγκεκριμένων RBs με συγκεκριμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση στην αρχή μιας ειδικής χρονικής περιόδου. Η ανάθεση αυτή αλλάζει όταν προκύψει κάποια αλλαγή στην ποιότητα του καναλιού ή στην λήξη της περιόδου αυτής. Ενώ με τον τρόπο αυτόν μειώνεται το κόστος για την μετάδοση πληροφορίας δικτύου είναι δυνατόν να καταλήξει σε μη αποδοτική χρήση των πόρων αφού δεν μπορεί να προσαρμοστεί στις συνθήκες του καναλιού στο επίπεδο του χρόνου με αποτέλεσμα την πιθανή ανάθεση παραπάνω πόρων από όσο πραγματικά χρειάζονται. Τέλος, το semi-persistent scheduling αποτελεί μια ενδιάμεση προσέγγιση στην ανάθεση των πόρων, ανάμεσα στην πλήρως δυναμική και το μη-ευέλικτη στατική. Στο σχήμα αυτό η αρχική σύνδεση είναι στατική για να αποφύγει το μειώσει το κόστος ενώ οι αναμεταδώσεις είναι δυναμικές. [4]

## 5 LTE – Advanced

Η πρώτη κυκλοφορία του LTE προτύπου (Release 8) έγινε το 2008 και η πρώτη εμπορική χρήση του ακολούθησε το 2009. Το Release 8 ακολούθησαν και άλλες κυκλοφορίες με επιπλέον δυνατότητες σε διαφορετικούς τομείς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 37. Η τελευταία από αυτές τις κυκλοφορίες είναι το Release 10, γνωστό και ως LTE-Advanced. Το Release 10 ολοκληρώθηκε το 2010 και επεκτείνει τις δυνατότητες του LTE μέσω ενός συνόλου λειτουργιών που περιλαμβάνουν εκτεταμένη χρήση πολλαπλών κεραιών (MIMO), χρήση μικρότερων κυψελών (picocells, femtocells, Home eNBs) δημιουργώντας ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous Networks, HetNets), συνάθροιση φερουσών (carrier aggregation, CA) από διαφορετικές μπάντες του φάσματος, χρήση κόμβων αναμετάδοσης (Relay Nodes), Συντονισμένη Πολύ-σημειακή μετάδοση (CoMP) και βελτιώσεις στην διαχείριση των παρεμβολών για την περίπτωση των HetNets.



Εικόνα 37: Εξέλιξη LTE προτύπου. [1]

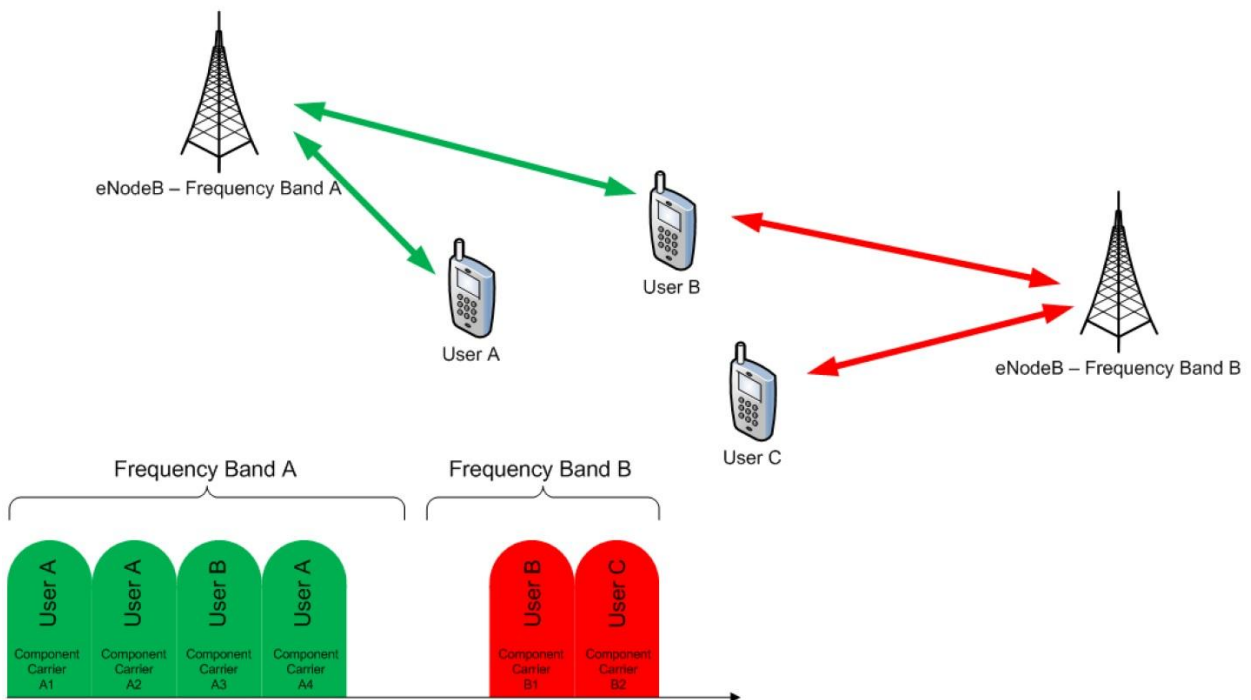
Πίνακας 3: Στόχοι για το LTE Release 10. [2]

Parameter	Downlink	Uplink
Maximum Bandwidth	Up to 100 MHz	
Peak data rate (Mbps)	1000	500
Peak Spectral Efficiency (bps/Hz)	30	15
Average Spectral Efficiency (bps/Hz/Cell)	2.6	2
Cell-edge user spectral efficiency (bps/Hz)	0.009	0.007
VoIP capacity (user/cell/MHz)	Exceeding LTE Release 8	
User plane latency (ms)	10	
Control plane latency (ms)	50 (Idle to Active) 10 (Dormant to Active)	

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι κυριότεροι στόχοι που έχουν τεθεί για το LTE-Advanced. Ένας σημαντικός περιορισμός είναι το γεγονός ότι πρέπει να είναι συμβατό με τις προηγούμενες κυκλοφορίες του προτύπου, που σημαίνει ότι ένα τερματικό συμβατό με την Release 8 έκδοση του προτύπου, θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε ένα Release 10 δίκτυο, χωρίς φυσικά να μπορεί να λάβει τις επιπλέον λειτουργίες του, και το αντίστροφο, ένα Release 10 τερματικό να μπορεί να λειτουργεί σε ένα Release 8 δίκτυο. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότερες από τις παραπάνω τεχνολογίες που θα μας απασχολήσουν για την διαχείριση των παρεμβολών.

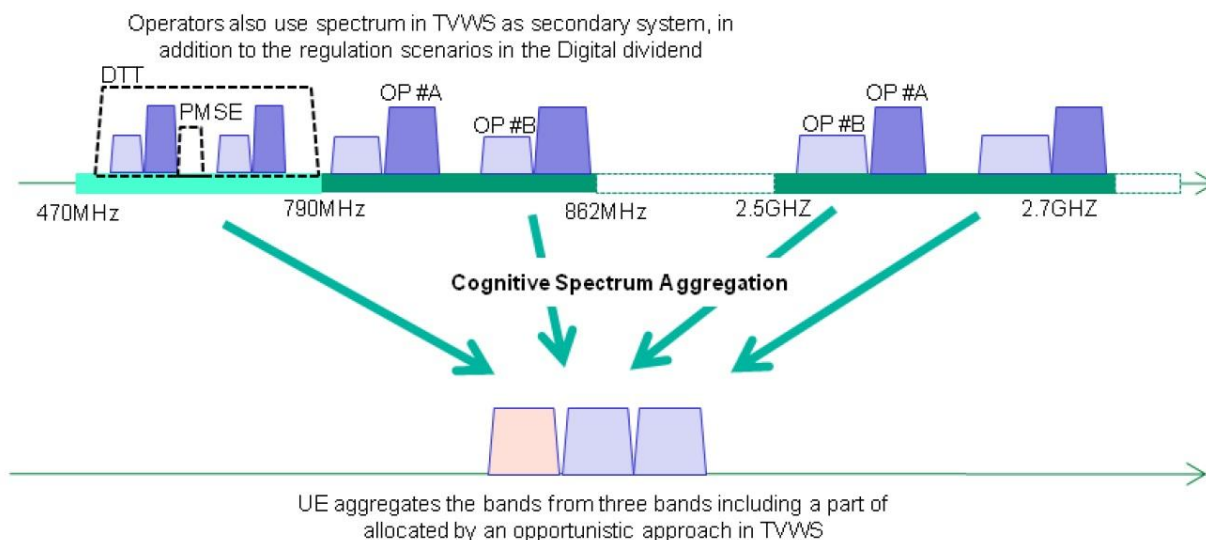
### 5.1 Συνάθροιση Φερουσών (Carrier Aggregation)

Ένας από τους στόχους του LTE-Advanced είναι η επίτευξη ρυθμών μετάδοσης ύψους 1Gbps στον downlink και 500Mbps στο uplink. Για να είναι αυτό δυνατό απαιτείται εύρος ζώνης μέχρι 100MHz, το οποίο όμως δεν είναι διαθέσιμο ως συνεχές φάσμα λόγω διαφορετικών πολιτικών διαχείρισης του φάσματος από διαφορετικές τεχνολογίες. Για να μπορεί να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, το LTE-Advanced κάνει χρήση της τεχνικής συνάθροισης φερουσών. Κάθε φέρουσα είναι τύπου Release8/9 με εύρος ζώνης μέχρι 20MHz και αναφέρεται ως συστατική φέρουσα (component carrier, CC). Η κάθε φέρουσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για FDD και για TDD λειτουργία. Για το FDD, το σύνολο των συστατικών φερουσών στο downlink και uplink μπορεί να είναι διαφορετικό, αλλά του uplink δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το uplink. Επομένως για την επίτευξη του εύρους ζώνης των 100MHz, το LTE-Advanced μπορεί να χρησιμοποιήσει μέχρι πέντε τέτοιες φέρουσες. [10]



**Εικόνα 38: Χρήση συνάθροισης φερουσών μέσω FDD στο LTE-Advanced. Ο χρήστης B μπορεί να χρησιμοποιήσει όλες τις φέρουσες ενώ οι χρήστες A και μόνο μια από αυτές. [11]**

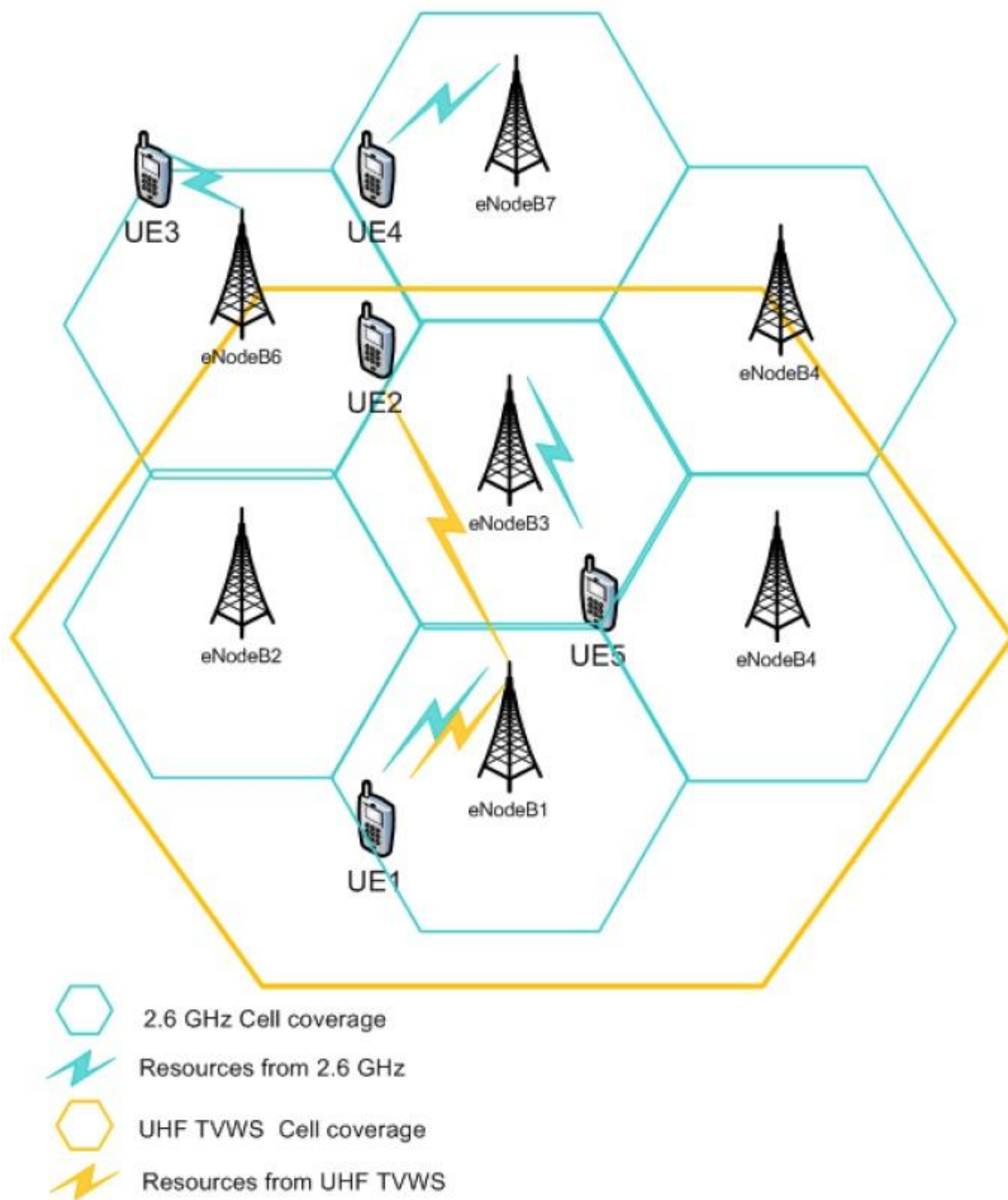
Για την συνάθροιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν φέρουσες διαφορετικού εύρους ζώνης, στην ίδια ή διαφορετική ζώνη συχνοτήτων, συνεχόμενες ή μη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Με τον τρόπο αυτό το LTE-Advanced κάνει καλύτερη αξιοποίηση της κατάτμησης φάσματος, οι πάροχοι μπορούν να παρέχουν καλύτερες υπηρεσίες και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης ακόμη κι' αν το εύρος ζώνης είναι κατετμημένο, αρκεί να υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες φέρουσες.



**Εικόνα 39: Σενάρια συνάθροισης φερουσών στο LTE-Advanced. [11]**

Κάθε φέρουσα είναι συμβατή με τερματικά τύπου Release 8/9 οπότε τα κανάλια και η σηματοδότηση του Release 8, όπως τα PSS, SSS και SI για κάθε φέρουσα, εκπέμπονται στην αντίστοιχη φέρουσα. Το εύρος κάλυψης της καθεμίας μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την συχνότητα ή την πολιτική εκπεμπόμενης ισχύς που ίσως εφαρμόζεται, για παράδειγμα σε ένα HetNet. Σε υψηλότερο επίπεδο, η κάθε φέρουσα φαίνεται στο σύστημα ως ξεχωριστή κυψέλη και το δικό της ID (Cell ID). Ένα τερματικό ρυθμισμένο για χρήση συνενωμένων φερουσών συνδέεται σε μια Πρωταρχική Κυψέλη (Primary Serving Cell, PCell) μέσω των γνωστών διαδικασιών του Release 8 και μέχρι τέσσερις Δευτερεύοντες Κυψέλες (Secondary Serving Cell, SCell) μετά την εγκαθίδρυση σύνδεσης με την πρωταρχική κυψέλη. Οι φέρουσες για το PCell ονομάζονται DL και UL Πρωταρχικές συστατικές φέρουσες (DL/UL Primary Component Carrier, PCC) ενώ ενός SCell, Δευτερεύουσες Συστατικές Φέρουσες (DL/UL Secondary Component Carrier, SCC).

Το PCell είναι η κυψέλη στην οποία δημιουργείται η αρχική σύνδεση και οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί περιλαμβάνουν το security, RRC και NAS σηματοδότηση και System Information για τις χρησιμοποιούμενες κυψέλες. Το κάθε τερματικό έχει το δικό του PCell, το οποίο δεν μπορεί να απενεργοποιηθεί ούτε να αλλάξει, με εξαίρεση το handover. Η παρακολούθηση της πληροφορίας συστήματος γίνεται όπως και στο Release 8. Τα SCells μπορούν να ρυθμιστούν μετά την αρχική σύνδεση για την παροχή επιπλέον πόρων και μόνο και μπορούν να απενεργοποιηθούν αν δεν υπάρχει ανάγκη για αυτά. Το πλήθος των SCells εξαρτάται από τις δυνατότητες του τερματικού.



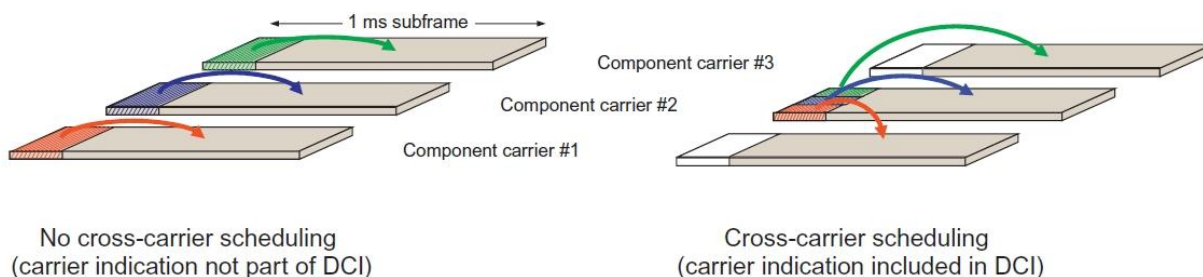
**Εικόνα 40: Χρήστη συστατικών φερουσών και κάλυψη καθεμίας. [11]**

Στο φυσικό επίπεδο, η κάθε φέρουσα έχει τα δικά της μπλοκ μεταφοράς για ένα δεδομένο serving cell, ακόμη και στην περίπτωση του χρονοπρογραμματισμού σε πολλαπλές φέρουσες (cross-carrier scheduling). Επιπλέον οι λειτουργίες HARQ, διαμόρφωση, κωδικοποίηση και δέσμευση πόρων μαζί με την αντίστοιχη σηματοδότηση, εκτελούνται ανεξάρτητα σε κάθε φέρουσα. Η κάθε φέρουσα περιέχει την PCFICH, PDCCH και PHICH σηματοδότηση στην αρχή του κάθε subframe, όπως και στο Release 8. Το PDCCH κομμάτι περιέχει την ανάθεση των πόρων για το downlink και τα uplink grants για την εκάστοτε φέρουσα.

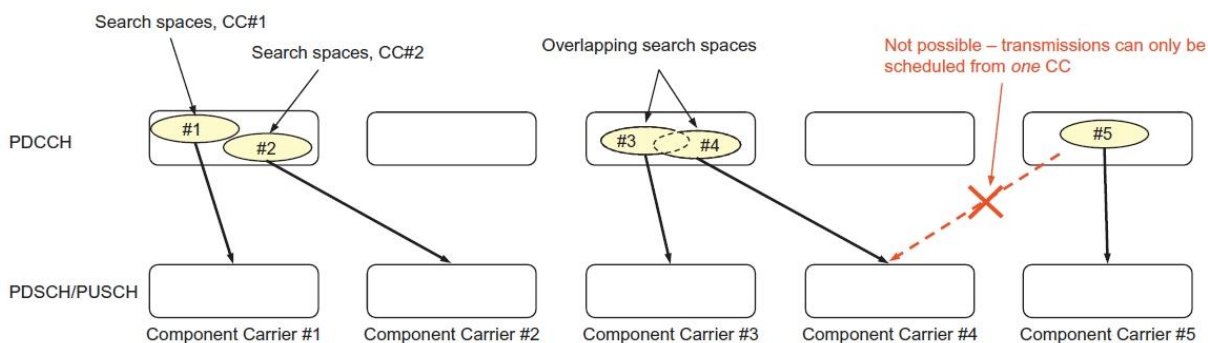


Για σημαντική λειτουργία του carrier aggregation είναι η δυνατότητα χρονοπρογραμματισμού μεταδόσεων σε πολλαπλές φέρουσες (cross carrier scheduling). Η λειτουργία αυτή επιτρέπει σε μια PDCCH σηματοδοσία να προγραμματίσει μετάδοση σε μια άλλη φέρουσα, μέσω ενός επιπλέον πεδίου τριών bits, το Πεδίο Ένδειξης Φέρουσας (Carrier Indicator Field, CIF), στην αρχή κάθε PDCCH μηνύματος. Τα υπόλοιπα πεδία και περιεχόμενα είναι ίδια με το Release 8. Η χρήση της λειτουργίας αυτή γίνεται ημι στατικά, μέσω RRC σηματοδοσίας, ανά φέρουσα και τερματικό χρήστη. Η αντιστοίχιση από το PDCCH στο PDSCH γίνεται επίσης ημιστατικά, μέσω RRC σηματοδοσίας.

Για μετάδοση σε ένα component carrier, ένα τερματικό περιμένει να λάβει την αντίστοιχη σηματοδοσία σε ένα μόνο component carrier, είτε χρησιμοποιεί cross-carrier scheduling είτε όχι. Για την φέρουσα στην οποία γίνεται η παρακολούθηση του PDCCH, το τερματικό περιμένει να λάβει PDCCH μήνυμα για scheduling τουλάχιστον για την ίδια φέρουσα αν δεν βρεθεί τιμή για το CIF πεδίο. Αν λάβει PDCCH μηνύματα στα οποία το CIF πεδίο έχει λάβει τιμή, τότε γνωρίζει ότι έχει γίνει scheduling στις φέρουσες που υποδεικνύονται από τις αντίστοιχες CIF τιμές. Σε αυτή την περίπτωση το τερματικό θα πρέπει να παρακολουθήσει μόνο τις αντίστοιχες PUSCH και PDSCH μεταδόσεις για τις φέρουσες αυτές.



Εικόνα 41: cross carrier scheduling. [1]



Εικόνα 42: Αντιστοίχιση PDCCH και PUSCH/PDSCH κατά το cross-carrier scheduling. [1]

## 5.2 Μίκρο-Κυψέλες (Relay Nodes, Femtocells, Picocells) και ετερογενή δίκτυα

Ένα συνεχής στόχος του LTE προτύπου είναι η βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας, ειδικά για τους χρήστες στα άκρα των κυψελών, με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Ο ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ανάμεσά τους και το path loss ανάμεσα στο τερματικό και το eNB. Μπορούν να

χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές για την βελτίωση της υπηρεσίας, για παράδειγμα η χρήση beamforming, περισσότερο bandwidth ή απλά ένα πιο πυκνό δίκτυο το οποίο σημαίνει και μικρότερη απόσταση από το eNB στο τερματικό άρα και μικρότερη πιθανότητα για path loss. Θεωρητικά ένα δίκτυο μπορεί να επεκταθεί με επιπλέον base stations αλλά αυτό απαιτεί σχεδιασμό και εγκατάσταση επιπλέον αποκλειστικών backhaul συνδέσεων. Η κίνηση στο δίκτυο δεν είναι ομοιογενής, οπότε η λύση αυτή είναι ακριβή και μη αποδοτική. Επιπλέον του κόστους, για χρήστες που μετακινούνται διαρκώς η παραπάνω λύση επιφέρει συχνές μεταπομπές.

Μια οικονομικότερη εναλλακτική, ήδη εφαρμόσιμη από το Release 8, για την επέκταση του δικτύου, είναι η χρήση base stations με μικρότερη ισχύ μετάδοσης (microcells) σε σύγκριση με τα συμβατικά eNBs (macrocells), καθώς απαιτούν σαφώς μικρότερο χρόνο εγκατάστασης και μπορούν να μοιραστούν το υπάρχων backhaul δίκτυο με τα υπάρχοντα base stations.. Ένα τέτοιο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από macrocells και microcells, αποτελεί ένα ανομοιογενές δίκτυο και θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 5.3 Οι μικρό-κυψέλες χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές τους. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας θα μας απασχολήσουν τα Relay Nodes και femtocells/picocells.

### 5.2.1 Femtocells/Picocells

Αποτελούν και τα δύο συσκευές περιορισμένων δυνατοτήτων που χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της κάλυψης ενός δικτύου σε σχέση με ένα ομοιογενές δίκτυο. Οι βασικές τους διαφορές συνοψίζονται ως εξής:

- Ένα picocell ελέγχεται από έναν pico eNB κόμβο και μπορεί να ελέγχει παραπάνω από μία μικρο-κυψέλες. Ένα femtocell ελέγχεται από έναν Οικιακός σταθμός βάσης (Home eNB, HeNB) κόμβο και μπορεί να ελέγχει μόνο μια μικρο-κυψέλη.
- Τα picocells εγκαθίστανται από τον διαχειριστή του δικτύου με τρόπο παρόμοιο με την εγκατάσταση των macrocells (eNBs). Τα femtocells από την άλλη εγκαθίστανται από τους χρήστες χωρίς κανέναν σχεδιασμό. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να είναι αυτό-διαχειριζόμενα ως προς την προσαρμογή τους στις συνθήκες του δικτύου για την εξασφάλιση της επιθυμητής κάλυψης και αποφυγή παρεμβολών.
- Τα femtocells παρέχουν πρόσβαση Κλειστού Τύπου (Closed Subscriber Group, CSG) μόνο για συγκεκριμένους χρήστες ενώ τα picocells παρέχουν ανοιχτού τύπου πρόσβαση (Open Subscriber Group, OSG) σε όλους τους χρήστες.
- Τα femtocells εκπέμπουν σε χαμηλότερη ισχύ καθώς είναι σχεδιασμένα να καλύπτουν τις ανάγκες ενός σπιτιού ή κατοικίας (4-6 χρήστες). Τα picocells εκπέμπουν σε υψηλότερη ισχύ και είναι σχεδιασμένα να καλύπτουν τις ανάγκες μεγαλύτερων χώρων όπως γραφεία, εμπορικά κέντρα ή απλά να επεκτείνουν το εύρος κάλυψης μιας κυψέλης.
- Τα picocells έχουν την ίδια αρχιτεκτονική με τα macrocells ενώ τα femtocells όχι απαραίτητως. Επιπλέον, για την σύνδεση των femtocells με τα macrocells χρησιμοποιείται η οικιακή broadband σύνδεση του χρήστη (DSL, cable).

Οι microcell συσκευές μπορούν να λειτουργούν στην ίδια φέρουσα με τα macrocells ή σε διαφορετική. Στην περίπτωση της ίδιας φέρουσας θα πρέπει να δοθεί προσοχή στις παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν ανάμεσα στα microcells και macrocells. Η περίπτωση αυτή θα καλυφθεί στο κεφάλαιο 6.3.2.



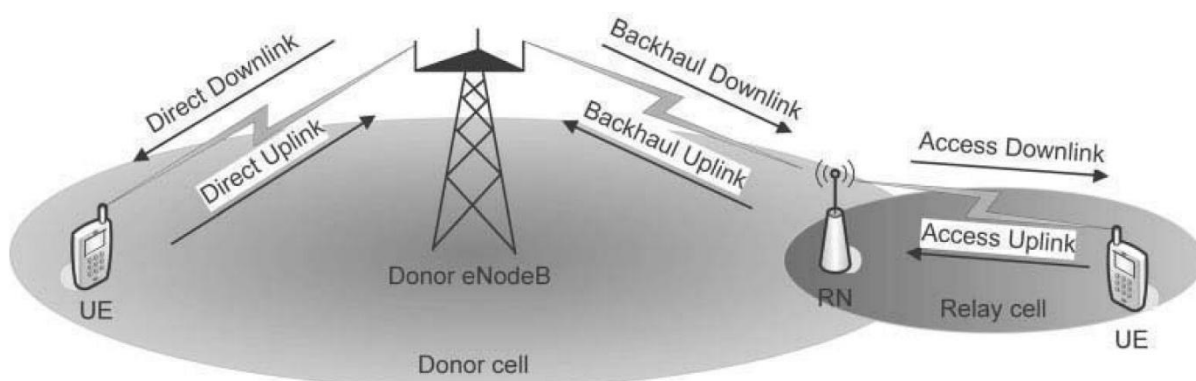
Από πλευράς αρχιτεκτονικής, αυτή παραμένει ίδια με αυτή του LTE, με την εξαίρεση της προαιρετικής προσθήκης του κόμβου HeNB Gateway (HeNB GTW) για την διαχείριση των HeNBs. Η χωρητικότητα ενός HeNB GTW φτάνει μέχρι δεκάδες χιλιάδες HeNBs. Επίσης ένα HeNB GTW μπορεί να υλοποιεί User Plane διαχείριση ή/και Control Plane. Στο Control Plane, το HeNB GTW συγκεντρώνει τις συνδέσεις όλων των συνδεδεμένων HeNBs και διατηρεί μία σύνδεση με το MME. Ομοίως, στο User Plane συγκεντρώνει τις συνδέσεις των HeNBs και παρέχει μια σύνδεση με το S-GW. Αυτό αφαιρεί από το S-GW τον φόρτο του να διατηρεί χιλιάδες συνδέσεις για όλα τα HeNBs. Η σύνδεση των HeNBs με το MME μέσω του HeNB GTW είναι διαφανής, τα HeNBs θεωρούν ότι είναι συνδεδεμένα με το MME και το MME ότι είναι συνδεδεμένο με κάποιο eNB.

### 5.2.2 Αναμεταδότες (Relay Nodes)

Οι αναμεταδότες (Relay Nodes, RNs) είναι microcells, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη περιοχών με κακή κάλυψη ή βελτίωση της απόδοσης. Υπάρχουν διαφορετικών τύπων RNs και κάποιοι από αυτούς χρησιμοποιούνται ήδη σε LTE Release 8 δίκτυα. Οι βασικές κατηγορίες των RNs είναι οι Ενίσχυσε-και-προώθησε (amplify-and-forward) και Αποκωδικοποίησε-και-προώθησε (decode-and-forward). Βρίσκονται συνεχώς υπό τον έλεγχο του radio access network, το οποίο επιτρέπει την παρακολούθηση και την από μακριά διαχείρισή τους, ομοίως με τα συμβατικά eNBs.

Οι RNs τύπου amplify-and-forward λειτουργούν ως απλοί αναμεταδότες και απλά ενισχύουν και αναμεταδίδουν το λαμβανόμενο αναλογικό σήμα. Χρησιμοποιούνται για την κάλυψη κενών στο δίκτυο (περιοχές με κακή κάλυψη) ήδη από το Release 8. Το γεγονός ότι ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα σημαίνει ότι ενισχύουν και τον λαμβανόμενο θόρυβο ή παρεμβολές και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε περιοχές με καλό SNR.

Οι decode-and-forward RNs από την άλλη, πριν αναμεταδώσουν το λαμβανόμενο σήμα, το αποκωδικοποιούν και το κωδικοποιούν ξανά σύμφωνα με τις συνθήκες του καναλιού στο οποίο γίνεται η αναμετάδοση. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί εν δυνάμει να χρησιμοποιηθεί διαφορετική κωδικοποίηση και διαμόρφωση. Επιπλέον, με τον παραπάνω τρόπο δεν αναπαράγουν τον θόρυβο και τις παρεμβολές, γεγονός το οποίο καθιστά δυνατό το να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε περιοχές με χαμηλό SNR. Το μειονέκτημά τους είναι το ότι η παραπάνω διαδικασία επιφέρει καθυστέρηση στην μετάδοση, μεγαλύτερη από την διάρκεια του LTE subframe (1ms).



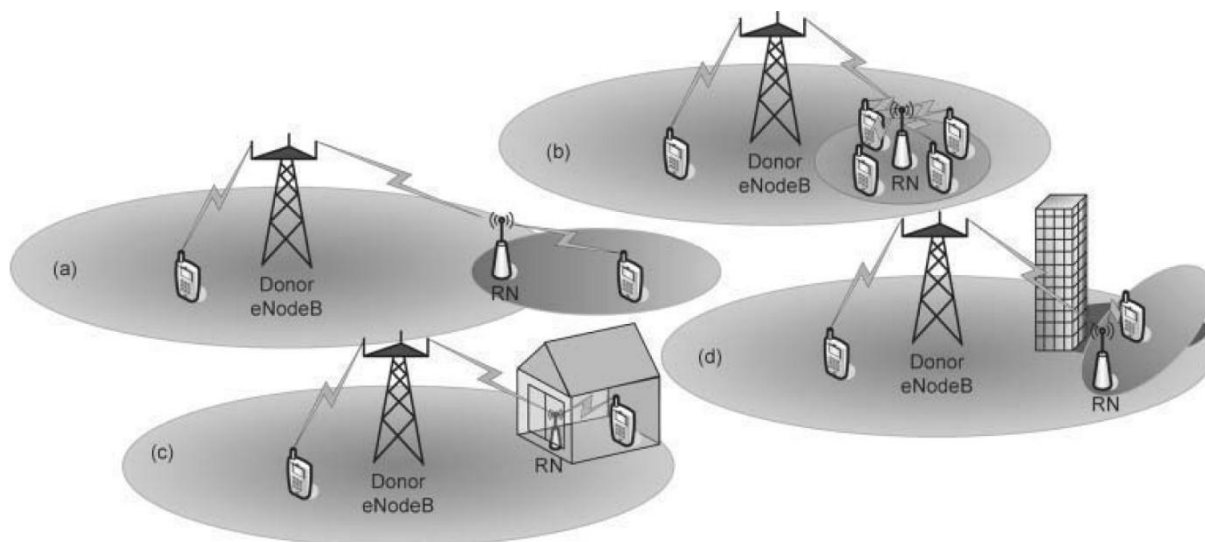
Εικόνα 43: Χρήση Relay Node στην άκρη μιας κυψέλης. [2]

Ένα Relay Node είναι συνδεδεμένο ασύρματα με ένα eNB δότη (donor eNB) από το οποίο λαμβάνει την σηματοδότησή του. Η σύνδεση αυτή ανάμεσα στο donor eNB και το Relay Node ονομάζεται σύνδεση με το δίκτυο κορμού (backhaul link). Το RN, όπως και

το donor eNB έχει μπορεί να εξυπηρετεί τερματικά που βρίσκονται στην αντίστοιχη περιοχή κάλυψης. Η σύνδεση ανάμεσα στο Relay Node και τα τερματικά ονομάζεται ζεύξη πρόσβασης (access link) ενώ αυτή ανάμεσα στο donor eNB και τα δικά του τερματικά, άμεση σύνδεση (direct link). Η access link και backhaul link συνδέσεις μπορούν να μοιράζονται την ίδια συχνότητα (inband) ή διαφορετική συχνότητα (outband). Στην περίπτωση της inband σύνδεσης, το RN μπορεί να είναι half-duplex ή full-duplex. Ένα half-duplex RN δεν μπορεί να λαμβάνει στο backhaul link την ίδια ώρα που στέλνει δεδομένα στο access link και το αντίστροφο, ενώ ένα full-duplex μπορεί. Τα outband RNs είναι πάντα full-duplex.

Ανάλογα με τον τύπο τους οι κόμβοι Relay Node μπορούν να αποτελούν απλούς αναμεταδότες, στην οποία περίπτωση δεν υλοποιούν την στοίβα πρωτοκόλλων του eNB πάνω από το PHYSICAL, μέχρι και την υλοποίηση του RRC πρωτοκόλλου, δηλαδή πλήρη λειτουργία ενός eNB περιορισμένης ισχύς το οποίο περιλαμβάνει την διαχείριση της ράδιο-σύνδεσης και τον χρονοπρογραμματισμό. Επιπλέον, το πλήθος των τερματικών που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα eNB εξαρτάται από τις επεξεργαστικές του δυνατότητες.

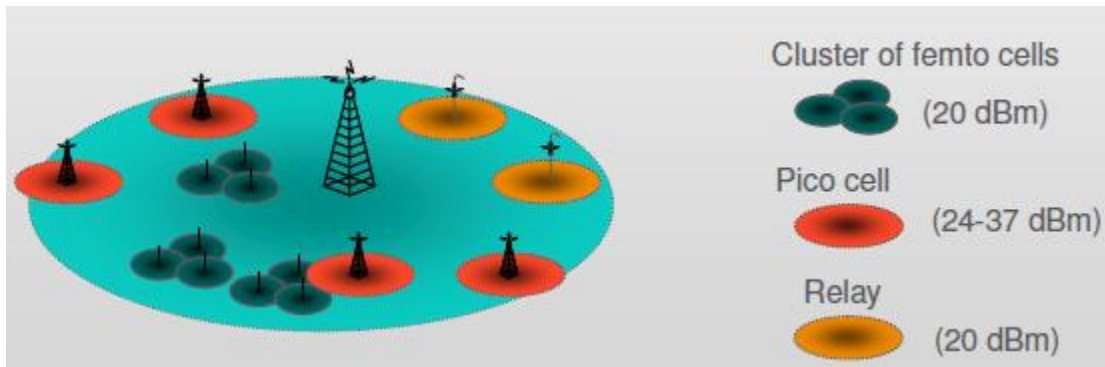
Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα σενάρια για την επέκταση του δικτύου, ανάμεσά τους ως οικιακές συσκευές ενίσχυσης σήματος, βελτίωση υπάρχοντος σήματος και επέκτασή της. Τα πιο συχνά σενάρια χρήσης παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 44: Σενάρια χρήσης των Relay Nodes. [2]

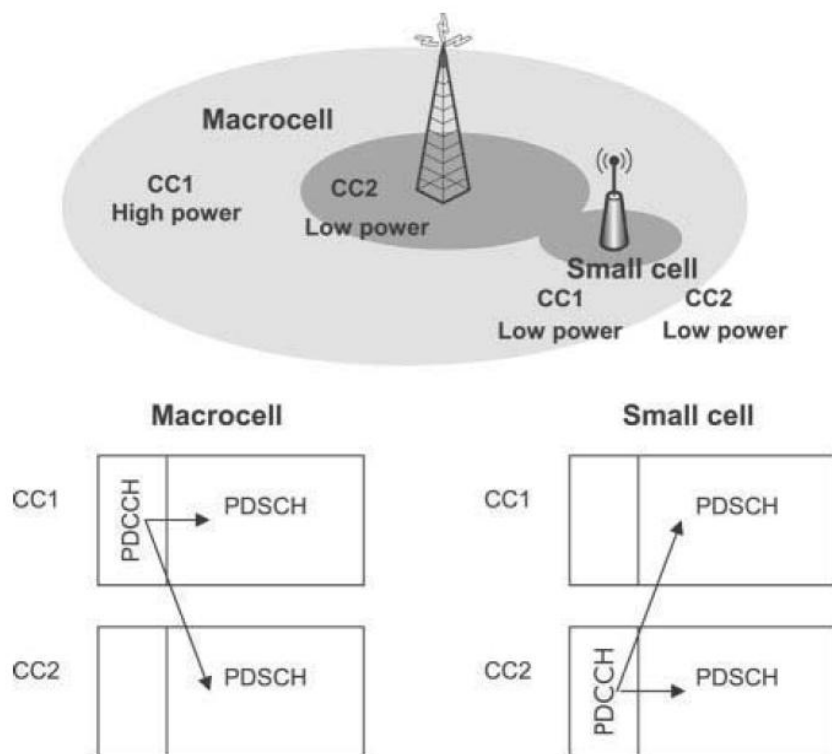
### 5.2.3 Ετερογενή δίκτυα (HetNets)

Ένα ανομοιογενές δίκτυο αποτελείται από κόμβους με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε ισχύ μετάδοσης, οι οποίοι λειτουργούν μερικώς ή πλήρως σε ένα κοινό σύνολο φερουσών. Σε ένα τέτοια δίκτυο, οι κόμβοι με περιορισμένη ισχύ μπορούν να είναι κάποιο από τα microcells που περιγράφηκαν παραπάνω και είναι συνήθως διάσπαρτοι σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές του εύρους κάλυψης ενός macrocell. Παρ' ότι τέτοια δίκτυα υπάρχουν ήδη από το Release 8, το Release 10 βελτιώνει την ικανότητα διαχείρισης των παρεμβολών.



Εικόνα 45: Ανομοιογενές δίκτυο αποτελούμενα από femtocells, picocells και Relay Nodes. [5]

Όπως πρόκειται να αναλυθεί και σε μετέπειτα κεφάλαιο, σε ένα τέτοιο δίκτυο παρατηρούνται παρεμβολές κυρίως λόγω των διαφορετικών δυνατοτήτων αναφορικά με την ισχύ μετάδοσης. Το Carrier Aggregation, όπως αναλύθηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον διαχωρισμό των καναλιών στα οποία οι κόμβοι του δικτύου παρακολουθούν τα downlink assignments και uplink grants όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Αυτό εξασφαλίζει την ακύρωση των παρεμβολών στο κανάλι της σηματοδότησης ενώ για τα δεδομένα χρησιμοποιούνται τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών όπως αναλύονται στο Κεφάλαιο 6.



Εικόνα 46: Παρεμβολές στην σηματοδότηση σε ένα HetNet. [2]

## 6 Παρεμβολές και αλγόριθμοι αντιμετώπισης

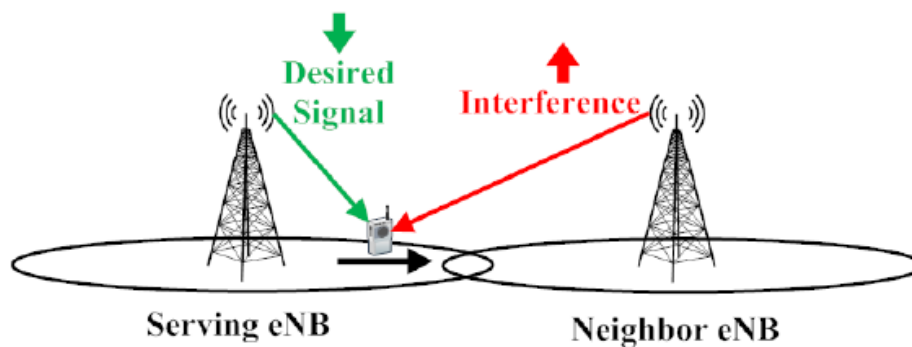
Το LTE υπόσχεται αξιόπιστες υπηρεσίες σε όλους τους χρήστες, ακόμη και σε αυτούς που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών, και υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που καλείται να λύσει το LTE πρότυπο, για να μπορεί να παρέχει την παραπάνω αξιοπιστία, είναι η βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Ο τρόπος ανάθεσης των ούτως ή άλλως περιορισμένων πόρων μετάδοσης, σε διαφορετικές τεχνολογίες και οι όλο ένα και αυξανόμενες απαιτήσεις για ταχύτητα και αξιοπιστία στα κινητά δίκτυα, οδηγούν στην ανάγκη για επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων από διαφορετικές κυψέλες (reuse 1). Ο χρήστες στα άκρα των κυψελών είναι αυτοί που πλήττονται περισσότερο από την τεχνική αυτή, καθώς όταν δεν υπάρχει συντονισμός στη χρήση των συχνοτήτων ή/και της ισχύος εκπομπής, οι χρήστες αυτοί δέχονται ισχυρές παρεμβολές από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Το αποτέλεσμα είναι η μειωμένη απόδοση του συστήματος, πέραν της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας στα άκρα των κυψελών. Στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί πληθώρα τεχνικών για την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Από αυτές, η πιο υποσχόμενη είναι η τεχνική του συντονισμού ανάμεσα στις γειτονικές κυψέλες όσον αφορά την χρησιμοποιούμενη συχνότητα ή/και την ισχύ εκπομπής τους. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια περιγραφή του προβλήματος των Διακυψελικών Παρεμβολών (Inter-cell Interference, ICI), το πως αυτές προκαλούνται και των αλγορίθμων αντιμετώπισής τους, καταλήγοντας στην τεχνική του Συντονισμού Διακυψελικών Παρεμβολών (Inter-Cell Interference Coordination, ICIC).

### 6.1 Παρεμβολές στο LTE και LTE-Advanced

#### 6.1.1 Παρεμβολές στο LTE

Υπό ιδανικές συνθήκες, ο μόνος παράγοντας περιορισμού της απόδοσης της ράδιο ζεύξης είναι ο θόρυβος στο κανάλι. Σε πραγματικά συστήματα όμως, ο κύριος παράγοντας είναι οι παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες. Είναι δυνατόν να υπάρχουν ωστόσο και παρεμβολές που προέρχονται από την ίδια κυψέλη, όπως για παράδειγμα παρεμβολές από γειτονικές συχνότητες. Ανεξαρτήτως μορφής ή προέλευσης, το αποτέλεσμα των παρεμβολών είναι παρόμοιο με αυτό του θορύβου. Συγκεκριμένα, ο μέγιστος ρυθμός μεταφοράς για το διαθέσιμο εύρος ζώνης περιορίζεται σύμφωνα με τον ορισμό του SINR. Σε αυτή την περίπτωση, μεγαλύτερος ρυθμός μεταφοράς μπορεί να επιτευχθεί μόνο με δυσανάλογα μεγαλύτερη τιμή για το SINR.

Η ποιότητα της επικοινωνίας αντικατοπτρίζεται από την τιμή του SINR, όπου  $SINR = \frac{S}{I+R}$ , με  $S$  το ωφέλιμο σήμα,  $I$  οι παρεμβολές και  $R$  ο θόρυβος στο κανάλι. Η χρήση της ίδιας συχνότητας σε όλες τις κυψέλες σε συνδυασμό με την αρχή του multiuser diversity, είναι πιθανό να καταλήγει σε μεγάλες αποκλείσει για το SINR ανάμεσα σε διαφορετικούς χρήστες, με αυτούς στα όρια των κυψελών να έχουν χαμηλότερα SINR και να υφίστανται τις χαμηλότερες ταχύτητες. Οι λόγοι για τα χαμηλά SINR στις άκρες των κυψελών είναι αφενός η εξασθένιση του σήματος από την κυψέλη υπηρεσίας και αφετέρου οι παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες. [1] [12] [13]

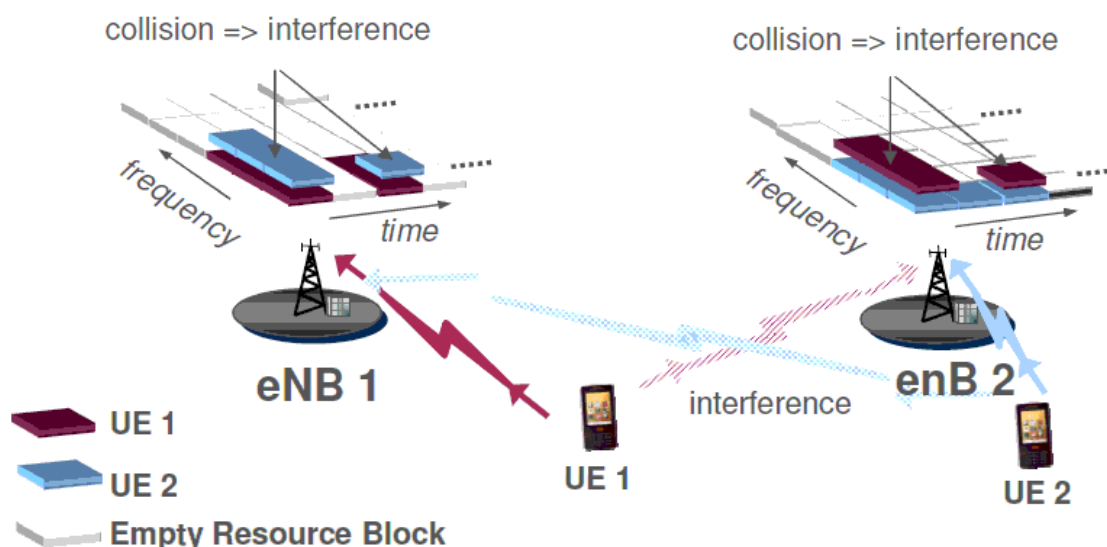


**Εικόνα 47: Παρεμβολές από το γειτονικό σταθμό βάσης, καθώς το τερματικό πλησιάζει στο άκρο της κυψέλης. [12]**

Στην περίπτωση του downlink, οι παρεμβολές παρατηρούνται στα τερματικά των χρηστών, βλ. Εικόνα 49, ενώ στο uplink οι παρεμβολές παρατηρούνται στους σταθμούς βάσης. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, η βελτίωση της ποιότητας επικοινωνίας προϋποθέτει βελτίωση του SINR, το οποίο μπορεί να προκύψει είτε ενισχύοντας το εκπνεμένο σήμα είτε μειώνοντας τις παρεμβολές. Ισχυρότερο σήμα όμως σημαίνει ισχυρότερες παρεμβολές στις γειτονικές κυψέλες αφήνοντας μόνο την μείωση των παρεμβολών ως βιώσιμη λύση.

Η αντιμετώπιση των παρεμβολών εξαρτάται από την προέλευσή τους. Σε ένα πραγματικό σύστημα οι πηγές των παρεμβολών μπορούν να ποικίλουν, από παρεμβολές ανάμεσα σε διαφορετικά συστήματα μέχρι παρεμβολές από την ίδια συχνότητα στο ίδιο σύστημα. Οι παρεμβολές από διαφορετικά συστήματα είναι από τη φύση τους σταθερές και δεν θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της εργασίας. Οι παρεμβολές στο ίδιο σύστημα χωρίζονται σε αυτές που προκαλούνται από διαφορετικές, γειτονικές συχνότητες (adjacent channel interference) και αυτές που προκαλούνται από την ίδια συχνότητα (co-channel interference). Παρ' ότι το OFDM αποκλείει τις παρεμβολές ανάμεσα σε γειτονικές συχνότητες, αυτό εξακολουθεί να είναι πιθανό λόγω των πρακτικών περιορισμών της υπάρχουσας τεχνολογίας. Οι πομποί εκπέμπουν και εκτός του προβλεπόμενου εύρους ζώνης του εκάστοτε subcarrier, ενώ τα μη-ιδανικά φίλτρα στους δέκτες επιτρέπουν την λήψη αυτών των σημάτων. Όσο πιο κοντά βρίσκονται οι γειτονικές συχνότητες, για παράδειγμα λόγω μικρής ζώνης φύλαξης (guard-period), τόσο ισχυρότερες είναι οι παρεμβολές. Η αντιμετώπισή τους μπορεί να γίνει μέσω καλύτερων, άρα και ακριβότερων φίλτρων ή με μεγαλύτερα guard periods, το οποίο επίσης δεν είναι η βέλτιστη λύση λόγω σπατάλης πόρων. Η αντιμετώπιση των παρεμβολών αυτών, επίσης δεν θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Η πιο σημαντική μορφή παρεμβολών είναι η παρεμβολές ανάμεσα σε γειτονικές κυψέλες, όταν αυτές χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Όταν την ίδια χρονική στιγμή και για την ίδια συχνότητα, ένας κόμβος λαμβάνει δεδομένα από διαφορετικούς αποστολείς, τότε λέμε ότι έχουμε σύγκρουση (conflict). Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται το σενάριο του conflict για το uplink.



Εικόνα 48: Σενάριο σύγκρουσης στο uplink. [5]

Η σύγκρουση προκαλείται όταν ο scheduler για κάθε σταθμό βάσης, λειτουργεί ανεξαρτήτως με τους schedulers των γειτονικών σταθμών, δεδομένου ότι έχουμε αρκετούς συνδεδεμένους χρήστες και όγκο δεδομένων στο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση το SINR είναι χαμηλότερο λόγω των παρεμβολών, με αποτέλεσμα την μεταφορά λιγότερων bits σε κάθε RB, αφού η προσαρμογή στο κανάλι θα πρέπει να επιλέξει διαμόρφωση χαμηλότερης τάξης ή κωδικοποίηση χαμηλότερου ρυθμού και ίσως προκύψουν περισσότερες HARQ εκπομπές. Για να καλυφθούν οι ίδιες απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης με αυτές των χρηστών στο κέντρο, χρειάζονται περισσότερα RBs και υψηλότερη ισχύ μετάδοσης, τα οποία οδηγούν σε μειωμένη απόδοση του συστήματος. Η σύγκρουση δεν οδηγεί απαραίτητα σε απώλεια πληροφορίας.

Αν και οι τρόποι αντιμετώπισης των παρεμβολών θα αναλυθούν στη συνέχεια, σε γενικές γραμμές οι συγκρούσεις μπορούν να αποφευχθούν μέσω της αυτόνομης ή συντονισμένης διαχείρισης των ραδιο-πόρων, μοιράζοντας τις διαθέσιμες συχνότητες ανά  $n$  κυψέλες (reuse  $n$ ) και ρυθμίζοντας την ισχύ εκπομπής. Στην περίπτωση της αποφυγής συγκρούσεων με περιορισμό του εύρους ζώνης, έχουμε και περιορισμό της απόδοσης αφού μερικές συχνότητες δεν θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάποιους χρήστες και πιθανώς η εκπομπή να γίνεται με μειωμένη ένταση. Εναλλακτικά, η αποφυγή συγκρούσεων μπορεί να αποφευχθεί με καθυστέρηση μετάδοσης, αναβάλλοντας την μετάδοση των χρηστών που προκαλούν τις παρεμβολές ή των χρηστών που δέχονται παρεμβολές. Για την μετρίαση των παρεμβολών από την άλλη, χρειάζονται ακριβοί και πολύπλοκοι δέκτες ή κάποιο σχήμα συντονισμού για το οποίο το κόστος είναι ο ακριβός εξοπλισμός και οι απαιτήσεις για backhaul σύνδεση. [5]

### 6.1.2 Παρεμβολές στο LTE-Advanced

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις σε χωρητικότητα δικτύου και ταχύτητες ανά χρήστη αντιμετωπίζονται από τα LTE-Advanced συστήματα με πυκνότερα δίκτυα. Πιο πυκνά δίκτυα εξασφαλίζουν μικρότερες αποστάσεις ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και τα τερματικά και αυτό με τη σειρά του εξασφαλίζει καλύτερες συνθήκες στο κανάλι. Τα LTE-Advanced δίκτυα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορούν να κάνουν χρήση picocells, femtocells ή Relay Nodes για να καλύψουν, επεκτείνουν ή να βελτιώσουν την παρεχόμενη υπηρεσία σε όσα μέρη του δικτύου απαιτείται, δημιουργώντας ένα ετερογενές δίκτυο. Αν και η χρήση macrocells και picocells στο ίδιο δίκτυο

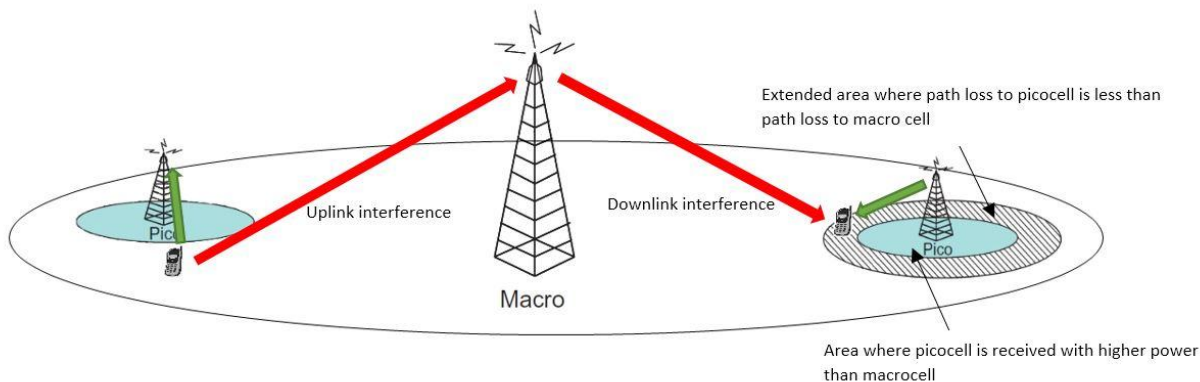
χρησιμοποιούνταν ήδη από τα GSM δίκτυα, αυτά έκαναν χρήση στατικής ανάθεσης διαφορετικών συχνοτήτων ανάμεσα στους δύο τύπους κόμβων για να αποφύγουν τις παρεμβολές. Σε ένα ευρυζωνικό δίκτυο υψηλών ταχυτήτων όπως το LTE, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες ταχύτητες μετάδοσης και πιθανώς σε μη αποδοτική αξιοποίηση των πόρων όταν ο διακινούμενος φόρτος δεδομένων σε κάποιον κόμβο είναι χαμηλός. Το ιδανικό θα ήταν και τα δύο στρώματα να μπορούν να χρησιμοποιούν το ίδιο εύρος ζώνης. Η χρήση όμως της ίδια συχνότητας και η σημαντική διαφορά στην ισχύ εκπομπής ανάμεσα στα δύο στρώματα, δημιουργεί σοβαρές παρεμβολές ανάμεσα στα δύο στρώματα (inter-layer interference), οι οποίες μάλιστα μπορούν να είναι και πιο σοβαρές σε σύγκριση με τις παρεμβολές ανάμεσα σε γειτονικές κυψέλες.

Τα χαρακτηριστικά των παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα συνδέονται άμεσα με τον τρόπο επιλογής της κυψέλης εξυπηρέτησης. Ο συμβατικός τρόπος επιλογής χρησιμοποιεί ως κριτήριο τις μετρήσεις του τερματικού για την ποιότητα στο κανάλι και πιο ειδικά την ισχύ λήψης των σημάτων για το downlink. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται και από την ισχύ μετάδοσης. Το αποτέλεσμα είναι ένα κόμβος που βρίσκεται κοντά σε ένα picocell να επιλέξει το μακρινότερο macrocell αφού αυτό έχει μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης, παρά το γεγονός ότι το path-loss με το picocell μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερο. Η παραπάνω χρήση των πόρων είναι μη-βέλτιστη όχι μόνο από την οπτική του uplink και της χωρητικότητας αλλά και του downlink, καθώς ένα ισχυρό σήμα στο downlink προκαλεί παρεμβολές σε γειτονικούς κόμβους, αποτρέποντας στην ουσία την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας.

Οι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται ελάχιστα πιο έξω από την κάλυψη ενός picocell, είναι αυτοί που είναι πιο επιρρεπείς στο να επιλέξουν το macrocell αντί του picocell. Μια εναλλακτική στην παραπάνω στρατηγική είναι το να ληφθεί υπόψη και το path-loss εφαρμόζοντας ένα offset ανάλογα με τις μετρήσεις του λαμβανόμενου σήματος ανά κυψέλη. Αν οι παραπάνω κόμβοι λάμβαναν υπόψη το path-loss προς το picocell και επέλεγαν αυτό, θα είχαν καλύτερο SINR άρα και ταχύτητες μετάδοσης, και θα χρησιμοποιούσαν λιγότερη ισχύ για το uplink οπότε και θα περιορίζαν τις παρεμβολές στους γειτονικούς κόμβους με αποτέλεσμα την βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Η τεχνική η οποία επηρεάζει την τιμή του offset που θα χρησιμοποιηθεί για να κάνει ένα τερματικό να επιλέξει το picocell ονομάζεται επέκταση κάλυψης (range expansion). Στην τεχνική αυτή, ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί ένα τερματικό επηρεάζει την handover διαδικασία παρουσιάζοντας το picocell ως ισχυρότερη κυψέλη απ' όση πραγματικά είναι, ώστε το τερματικό να περάσει στην κάλυψη του picocell.

Και στην περίπτωση του range expansion όμως υπάρχει μια περιοχή κάλυψης όπως φαίνεται στην Εικόνα 49, στην οποία παρά το ότι έχει επιλεγθεί το picocell, το λαμβανόμενο σήμα από το macrocell εξακολουθεί να είναι ισχυρό, με αποτέλεσμα τα τερματικά του picocell να δέχονται ισχυρές παρεμβολές από το macrocell.





**Εικόνα 49: Παρεμβολές στο downlink και uplink ενός HetNet.**

Στο [14] γίνεται μια μελέτη στο αποτέλεσμα που έχει το range expansion σε συνδυασμό με ICIC σε ένα HetNet με picocells, αναφορικά με την συνολική χωρητικότητα και το fairness στο δίκτυο. Η συνολική χωρητικότητα και το fairness υπολογίζονται μελετώντας το πλήθος των τερματικών που μεταβαίνουν στην κάλυψη των picocells συναρτήσει του offset (range expansion bias, REB) και γνωρίζοντας τα SINRs των τερματικών στα macrocells και picocells.

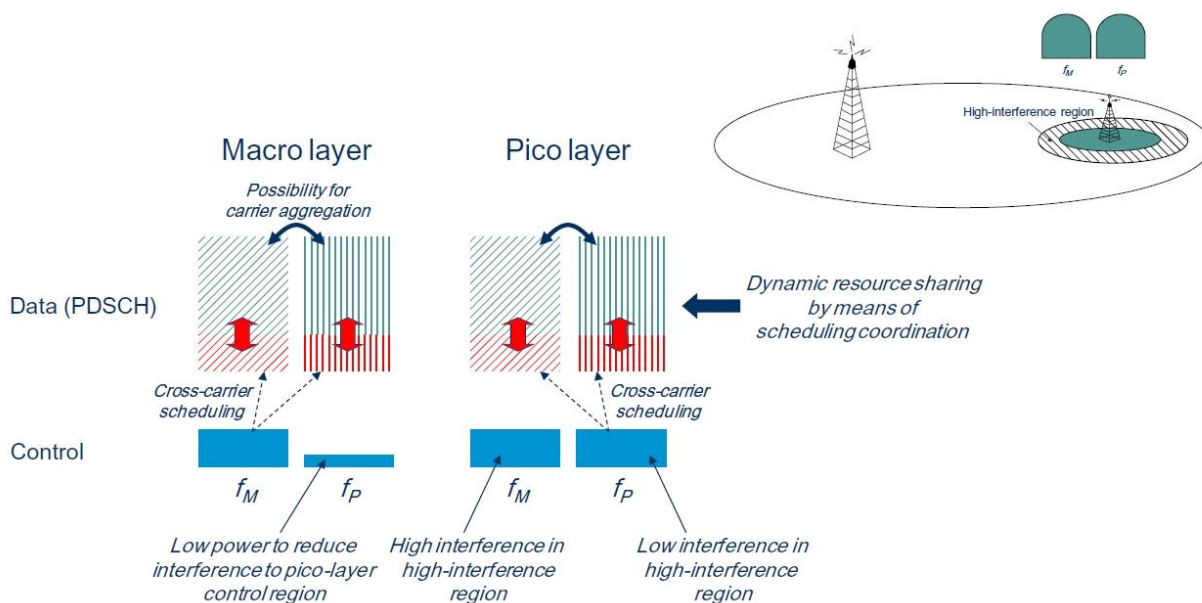
Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την τεχνική Almost Blank Subframes (περιγράφεται παρακάτω) ως ICIC μηχανισμό, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η χρήση των picocells βελτιώνει την χωρητικότητα του δικτύου και χωρίς την χρήση του range expansion, με το 60 – 65% των χρηστών να συνδέονται σε αυτά ενώ το ποσοστό ανεβαίνει στο 90% με την χρήση του range expansion. Η πολύ υψηλή τιμή του REB ωστόσο μπορεί να μειώσει την απόδοση του συστήματος καθώς τα picocells υπερφορτώνονται και η χωρητικότητα στα άκρα της κυψέλης να μειώνεται. Σε αυτή την περίπτωση το SINR βελτιώνεται για τους χρήστες του macrocell ενώ μειώνεται για αυτούς στα picocells αφού περισσότεροι χρήστες συνδέονται στα picocells με αποτέλεσμα περισσότερο εύρος ζώνης να είναι διαθέσιμο για τους χρήστες του macrocell. Συμπεράνοντας, υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του REB για την οποία, είτε με ICIC είτε χωρίς, η χωρητικότητα βελτιώνεται και πέρα από αυτήν αρχίζει να πέφτει.

Υποθέτοντας ότι η μετάδοση των macrocells και των picocells είναι ευθυγραμμισμένη, τότε η μετάδοση των πληροφοριών συστήματος (PDCCH) από το macrocell θα δέχεται παρεμβολές από τις αντίστοιχες μεταδόσεις των picocells. Το ίδιο ισχύει και για την μετάδοση δεδομένων (PDSCH) αλλά σε αυτή την περίπτωση μπορεί να εφαρμοστεί κάποιος αλγόριθμος ICIC για την αντιμετώπισή τους όπως τα Almost Blank Subframes που περιγράφονται παρακάτω. Η μετάδοση σηματοδοσίας ελέγχου, PDCCH, PCFICH και PHICH, είναι διαφορετική καθώς δεν μπορεί να προγραμματιστεί δυναμικά όπως τα δεδομένα χρήστη.

Ένα τρόπος αντιμετώπισης τέτοιων παρεμβολών είναι το carrier aggregation με τη χρήση cross-carrier scheduling. Η βασική αρχή που διέπει την τεχνική αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 50. Το macrocell και το picocell μοιράζονται δυο φορείς, έστω  $f_M$  και  $f_p$ . Για την μετάδοση δεδομένων και οι δυο φορείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από τους δυο κόμβους χρησιμοποιώντας κάποια από τις γνωστές τεχνικές ICIC για την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Η χρήση των φορέων μπορεί να ρυθμιστεί δυναμικά. Για την μετάδοση L1/L2 σηματοδοσίας από την άλλη, χρησιμοποιείται ημι-στατική ανάθεση φορέων. Το macrocell θα πρέπει να αποφύγει την μετάδοση πληροφορίας ελέγχου στον φορέα που χρησιμοποιεί το picocell για την ίδια πληροφορία, έστω το  $f_p$ , ενώ μπορεί να μεταδώσει σε αυτό με χαμηλή ισχύ προς τους χρήστες που δεν βρίσκονται στην περιοχή υψηλών παρεμβολών, για παράδειγμα



αυτούς που βρίσκονται κοντά στο macrocell. Με αυτόν τον τρόπο το picocell μπορεί να χρησιμοποιήσει το  $f_p$  για μετάδοση πληροφορίας ελέγχου στην περιοχή κάλυψής του, συμπεριλαμβανομένης της περιοχής υψηλών παρεμβολών, χωρίς να δέχεται παρεμβολές από το macrocell. Ομοίως το picocell μπορεί να χρησιμοποιήσει το  $f_M$  για σηματοδότηση ελέγχου προς τους χρήστες που δεν βρίσκονται στην περιοχή υψηλών παρεμβολών. Επιπλέον, ακόμη κι' αν ένας κόμβος χρησιμοποιήσει μόνο έναν από τους φορείς για σηματοδότηση ελέγχου, για παράδειγμα το picocell τον φορέα  $f_p$ , η μετάδοση δεδομένων μπορεί να προγραμματιστεί στον άλλον φορέα ( $f_M$ ) μέσω cross-carrier scheduling. Το μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι χρειάζονται τερματικά με υποστήριξη για carrier-aggregation για πλήρως ευέλικτη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Διαφορετικά, για τερματικά χωρίς αυτή την δυνατότητα η μετάδοση πληροφορίας ελέγχου και δεδομένων περιορίζεται και για τα δυο στην ίδιο φορέα.



**Εικόνα 50: Αντιμετώπιση παρεμβολών σε HetNet μέσω Carrier Aggregation με χρήση cross-carrier scheduling. [1]**

Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο για τις παρεμβολές σε ένα ετερογενές δίκτυο είναι ο τύπος πρόσβασης των χρηστών στους κόμβους. Αν ένα τερματικό βρίσκεται κοντά σε έναν κόμβο κλειστού τύπου (femtocell) στο οποίο δεν του επιτρέπεται η πρόσβαση, θα εξυπηρετείται από το macrocell, αφού δεν μπορεί να συνδεθεί στο femtocells, αλλά θα δέχεται παρεμβολές στο downlink από το femtocells και θα προκαλεί σε αυτά παρεμβολές στο uplink. Το παραπάνω σενάριο είναι το χειρίστο σενάριο παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα καθώς για κόμβους ανοιχτής πρόσβασης (picocells) τα τερματικά μπορούν να χειραγωγηθούν από τον σταθμό βάσης που τα εξυπηρετεί ώστε να μεταβούν στην κάλυψη των picocells ακυρώνοντας τις παρεμβολές (range expansion). Η αντιμετώπιση σε αυτή την περίπτωση είναι παρόμοια με παραπάνω με τη διαφορά ότι αφορά και τους δυο τύπους κόμβων, το macrocell δεν θα πρέπει να προκαλεί παρεμβολές στους χρήστες των femtocells και τα femtocells στους χρήστες του macrocell. Ένας επιπλέον περιοριστικός παράγοντας είναι η επικοινωνία ανάμεσα στα macrocells και femtocells. Για της διασύνδεσή τους χρησιμοποιείται η broadband σύνδεση του κατόχου τους, η οποία δεν μπορεί να παρέχει τις εγγυήσεις της X2 διεπαφής που συνδέει τα macrocells. Για τον λόγο αυτό οι μορφές αντιμετώπισης που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι στατικές ή να βασίζονται στις μετρήσεις των Home eNBs. [1] [2]

Για την καταγραφή των μορφών με τις οποίες εμφανίζονται οι παρεμβολές σε ένα ετερογενές δίκτυο στο οποίο χρησιμοποιούνται femtocells, ακολουθούμε την ακόλουθη σύμβαση. Τα macrocells (macro eNBs) θα αναφέρονται ως MeNBs και τα microcells (Home eNBs), θα αναφέρονται ως HeNBs. Κατ' αντιστοιχία, οι χρήστες των MeNBs και HeNBs θα αναφέρονται ως MUEs (macro UEs) και HUEs (HeNB UEs) αντίστοιχα. Οι μορφές υπό τις οποίες παρουσιάζονται παρεμβολές όσον αφορά τα femtocells είναι οι εξής:

- **HeNB προς MeNB (femto-to-macro) και MeNB προς HeNB (macro-to-femto) στο downlink**  
Στην macro-to-femto περίπτωση οι HUEs επηρεάζονται περισσότερο ειδικά όταν βρίσκονται κοντά στο MeNB, αφού η ισχύς μετάδοσής του είναι κατά πολύ ισχυρότερη του HeNB. Στην περίπτωση του femto-to-macro, οι MUEs που βρίσκονται κοντά στην περιοχή κάλυψης του HeNB επηρεάζονται περισσότερο, ειδικά όταν το HeNB βρίσκεται στα άκρα της κυψέλης. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει μια 'νεκρή ζώνη' ('dead zone') στα όρια κάλυψης του HeNB.
- **HeNB προς MeNB (femto-to-macro) και MeNB προς HeNB (macro-to-femto) στο uplink**  
Στην macro-to-femto περίπτωση, οι HUEs δέχονται παρεμβολές στο uplink από τους κοντινούς MUEs. Οι παρεμβολές είναι χειρότερες όταν το HeNB βρίσκεται στα άκρα της κυψέλης αφού τότε οι MUEs εκπέμπουν με μεγαλύτερη ισχύ για το uplink ή όταν βρίσκονται σε εσωτερικό χώρο. Στην femto-to-macro περίπτωση η uplink μετάδοση των MUEs δέχεται παρεμβολές από τις uplink μεταδόσεις των HUEs. Οι παρεμβολές είναι στην χειρότερη μορφή όταν η πυκνότητα των femtocells είναι μεγάλη ή όταν αυτά βρίσκονται σε εξωτερικούς χώρους οπότε και εκπέμπουν με μεγαλύτερη ισχύ.
- **HeNB προς HeNB στο downlink/uplink (femto-to-femto)**  
Σε αυτές τις περιπτώσεις η μετάδοση ενός HUE στο uplink/downlink δέχεται παρεμβολές από ένα άλλο HUE ενός διαφορετικού και κοντινού HeNB για την ίδια μετάδοση. Οι παρεμβολές είναι χειρότερες καθώς αυξάνει η πυκνότητα των femtocells.

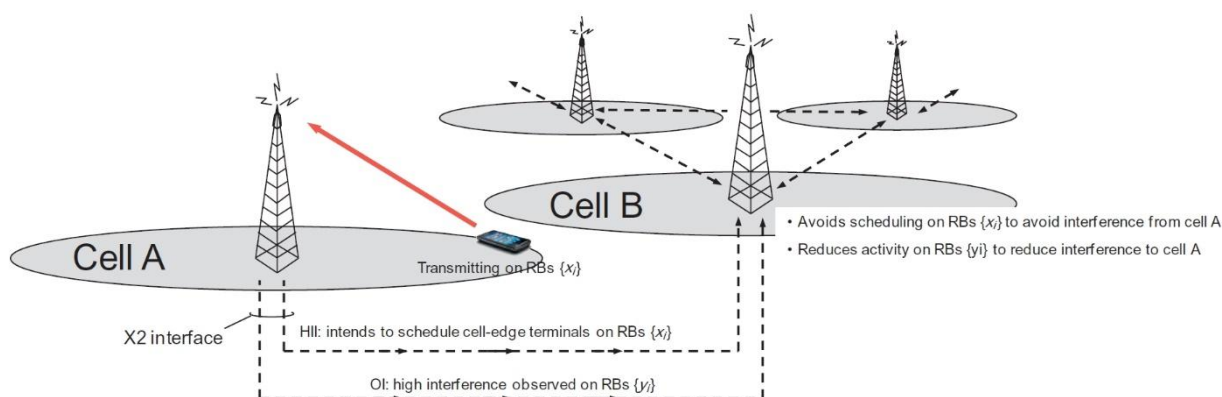
Στο LTE-Advanced προτείνονται τεχνικές αντιμετώπισης των παρεμβολών που συμπληρώνουν τις τεχνικές των LTE Release 8 δικτύων. Οι τεχνικές αντιμετώπισης, για το Release 8 και Release 10, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

## 6.2 Υποστήριξη για αντιμετώπιση παρεμβολών στο LTE/LTE-Advanced

Η ύπαρξη ενός κεντρικού κόμβου στο σύστημα θα εξυπηρετούσε τον συντονισμό των σταθμών βάσης αναφορικά με το scheduling. Μιας και στο LTE δεν υπάρχει τέτοιος κόμβος, το scheduling του εκάστοτε σταθμού βάσης λαμβάνει χώρα τοπικά και ανεξάρτητα από τους γειτονικούς σταθμούς. Για την υποστήριξη του συντονισμού των σταθμών βάσης σε αυτή την περίπτωση η λύση είναι η ύπαρξη κατάλληλης σηματοδότησης στην X2 διεπαφή. Μέσω αυτής της ανταλλαγής πληροφορίας, οι σταθμοί βάσης μπορούν να λάβουν υπόψη τις παρεμβολές από τους γειτονικούς σταθμούς και να εφαρμόσουν περιορισμούς ως προς τις συχνότητες και την ισχύ εκπομπής των χρηστών.

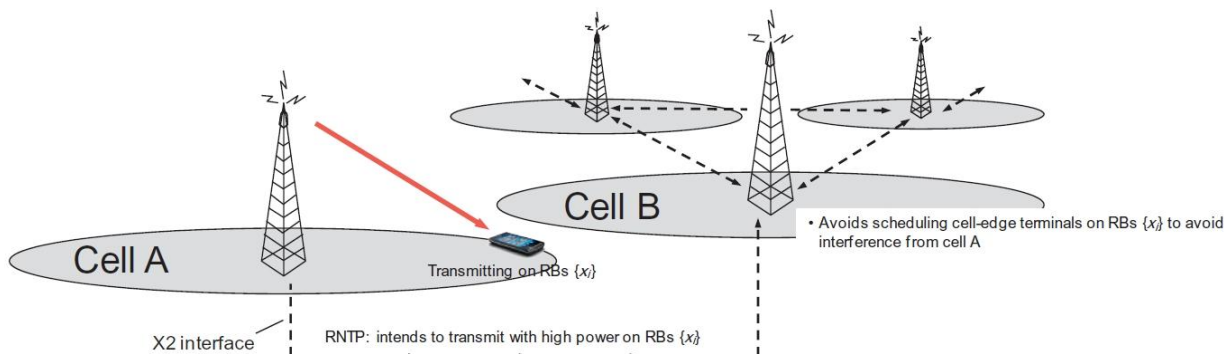
Για το uplink η X2 διεπαφή προσφέρει τα μηνύματα Ένδειξη Παρεμβολών (High Interference Indicator, HII) και Ένδειξη Υπερφόρτωσης (Overload Indicator, OI).

Η ένδειξη παρεμβολών (HII) μπορεί να θεωρηθεί ένα εργαλείο πρόληψης παρεμβολών, μέσω του οποίου οι σταθμοί βάσης προσπαθούν να αποφύγουν πολύ χαμηλές τιμές του SINR. Τα HII μηνύματα περιέχουν πληροφορία για τα RBs τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιήσουν οι cell-edge χρήστες του σταθμού βάσης που στέλνει το μήνυμα. Στα RBs αυτά πιθανώς να προκύψουν παρεμβολές στους χρήστες των γειτονικών σταθμών, γι' αυτό κατά την λήψη των μηνυμάτων αυτών από τους γειτονικούς σταθμούς, αποφεύγεται η ανάθεση των RBs αυτών στους δικούς τους χρήστες. Τα μηνύματα υπερφόρτωσης από την άλλη μπορούν να θεωρηθούν εργαλείο απόκρισης. Μεταφέρουν πληροφορία για το επίπεδο παρεμβολών (χαμηλό/μέσο/υψηλό) του uplink για κάθε RB με την μορφή bitmap πίνακα. Κατά την λήψης τέτοιων μηνυμάτων, οι γειτονικοί σταθμοί μπορούν να τροποποιήσουν το scheduling ώστε να μειώνει τις παρεμβολές στο uplink του σταθμού από τον οποίο έλαβε το OI μήνυμα.



Εικόνα 51: uplink σηματοδότηση μέσω X2 διεπαφής, για την αντιμετώπιση παρεμβολών. [1]

Στο downlink, η X2 διεπαφή προσφέρει την σηματοδότηση (Relative Narrowband Transmit Power, RNTP). Τα RNTP μηνύματα περιέχουν πληροφορία για την ισχύ μετάδοσης για κάθε RB με την μορφή bitmap. Συγκεκριμένα, το κάθε bit αντιστοιχεί σε ένα RB στο πεδίο της συχνότητας και ο πίνακας δηλώνει τα RBs στα οποία ο σταθμός βάσης προτίθεται να χρησιμοποιήσει ισχύ μετάδοσης υψηλότερη από ένα καθορισμένο όριο. Το όριο αυτό και η περίοδος για την οποία ισχύει αυτή η ένδειξη είναι παραμετροποιήσιμα. Οι γειτονικοί σταθμοί που λαμβάνουν ένα RNTP μήνυμα μπορούν να ρυθμίσουν την ισχύ μετάδοσης των δικών τους χρηστών ώστε να αποφεύγουν τις παρεμβολές στα RBs αυτά ή να αποφύγουν εντελώς την χρήση αυτών των RBs. [1] [2]



Εικόνα 52: downlink σηματοδότηση μέσω X2 διεπαφής, για την αντιμετώπιση παρεμβολών. [1]

### 6.3 Αλγόριθμοι αντιμετώπισης παρεμβολών

Η πιο σοβαρή μορφή παρεμβολών στο LTE, όπως έχει αναφερθεί είναι το Inter-Cell Interference (ICI). Κρίνοντας από το πλήθος των προτεινόμενων τεχνικών στη βιβλιογραφία, η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος αποδεικνύεται δύσκολη. Η απλή λύση στις παρεμβολές που παρατηρούνται από την χρήση του reuse 1, θα ήταν η διαίρεση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε παραπάνω από ένα μέρη και η στατική ανάθεσή τους σε κυψέλες. Η διαίρεση του εύρους ζώνης εξισορροπείται από τα οφέλη λόγω της μείωσης των παρεμβολών. Ωστόσο με μια τέτοια ανάθεση δεν είναι δυνατή η αποδοτική αξιοποίηση των πόρων για λόγους που αναλύονται στο κεφάλαιο 6.3.1.1. Το LTE πρότυπο προτείνει τη χρήση δυναμικής αντιμετώπισης των παρεμβολών, υπό τον όρο ICIC, κατά την οποία στους χρήστες που βρίσκονται στις άκρες των κυψελών ανατίθενται, με δυναμικό τρόπο, συμπληρωματικά κομμάτια του εύρους ζώνης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι κατηγορίες που συνθέτουν το ICIC και στο επόμενο εδάφιο οι βασικές τεχνικές που θα μας απασχολήσουν.

Σε γενικές γραμμές το ICIC αποτελείται από τις τεχνικές μετρίασης των παρεμβολών (interference mitigation) και τις τεχνικές αποφυγής τους (interference avoidance). Στις τεχνικές μετρίασης των παρεμβολών χρησιμοποιούνται τεχνικές για την μείωση των επιπτώσεων των παρεμβολών κατά την αποστολή ή μετά την λήψη τους σήματος. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών είναι η τεχνική τυχαιότητας παρεμβολών (interference randomization), η τεχνική ακύρωσης (Interference cancellation) και ο προσαρμοστικός σχηματισμός δέσμης (adaptive beamforming). Στην τεχνική interference randomization μπορεί να εφαρμοστεί διαφορετική κρυπτογράφηση ανά κυψέλη (cell-specific scrambling), παρεμβολή κυψελών (cell-specific interleaving) ή συχνή αλλαγή συχνότητας (frequency hopping) για την μείωση των παρεμβολών. Στην τεχνική interference cancellation, κατά την λήψη του επιθυμητού σήματος γίνεται εντοπισμός και αφαίρεση των παρεμβολών μέσω επεξεργασίας σήματος ή αν υπάρχουν πολλαπλές κεραιές, γίνεται επιλογή του σήματος με την καλύτερη ποιότητα. Στην τεχνική adaptive beamforming οι κεραιές πολλαπλών σταθμών μπορούν να συντονιστούν και να μεταδώσουν την ίδια πληροφορία προς το ίδιο τερματικό, μετατρέποντας στην ουσία τις παρεμβολές σε ωφέλιμο σήμα. Οι κεραιές μπορούν να αλλάζουν τον τρόπο μετάδοσης δυναμικά ανάλογα με τα επίπεδα παρεμβολών. Η τεχνική αυτή απαιτεί όλοι οι σταθμοί να διαθέτουν την μεταδιδόμενη πληροφορία και πλήρη γνώση της κατάστασης των καναλιών (channel state information) οπότε πρακτικά η χρήση του είναι δύσκολη [15]. Από τις τεχνικές αυτές η τεχνική randomization δεν πληροί τις EUTRA απαιτήσεις για την ρυθμαπόδοση των χρηστών στις άκρες των κυψελών καθώς δεν παρέχει καμία βελτίωση για αυτούς τους χρήστες. Η ακύρωση των παρεμβολών από την άλλη είναι ξεχωριστή ανά τερματικό (UE-specific) και μπορεί να παρέχει κάποια βελτίωση στο SINR αλλά από την άλλη μόνο μερικές μορφές παρεμβολών μπορούν να ακυρωθούν, περιορίζοντας την βελτίωση. Τέλος, κάποιο τερματικό μπορεί να υφίσταται ένα σύνολο από πολλές και μικρές σε ένταση παρεμβολές η ακύρωση των οποίων μπορεί να προβεί απαγορευτική χωρίς να αυξάνει την πολυπλοκότητα των τερματικών. [12] [13]

Οι interference avoidance τεχνικές, οι οποίες θα μας απασχολήσουν, έχουν ως στόχο τον έλεγχο της ανάθεσης των πόρων, συχνότητα/χρόνος και ισχύς εκπομπής, στους χρήστες με στόχο την βελτίωση του SINR για τους χρήστες στα άκρα των κυψελών και να διατηρεί τις παρεμβολές σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Η βελτίωση του SINR έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ρυθμαπόδοσης για δεδομένη περιοχή κάλυψης ή την επέκταση της περιοχής κάλυψης για δεδομένη ρυθμαπόδοση. Στην βιβλιογραφία έχει προταθεί μια πληθώρα τεχνικών στην κατηγορία αυτή, οι οποίες τεχνικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν επιπλέον χρησιμοποιώντας κάποιους ορθογώνιες διαστάσεις όπως

στατικές (static)/δυναμικές (dynamic) και κεντροποιημένες (centralized)/κατανεμημένες (distributed).

Συγκεκριμένα, για τον τελευταίο διαχωρισμό, οι τεχνικές χωρίζονται στις κεντροποιημένες, ημί-κατανεμημένες (semi-distributed) και πλήρως κατανεμημένες. Οι πλήρως κατανεμημένες τεχνικές με τη σειρά τους στις τεχνικές με συντονισμό (coordinated) και τις αυτόνομες (autonomous). Για όσες από αυτές απαιτείται επικοινωνία μεταξύ των σταθμών βάσης, αυτή παρέχεται μέσω της X2 διεπαφής. Η συχνότητα και το μέγεθος της πληροφορίας που ανταλλάσσουν θεωρείται trade off ανάμεσα στο overhead που επιφέρουν και την απόδοσή τους. Τέλος, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το αν ρυθμίζουν την ισχύ εκπομπής ή όχι.

Σχετικά με τους αλγόριθμους αποφυγής, από ανάλυση ([12] [13] [4] [16]) προκύπτει ότι οι αλγόριθμοι αυτοί ωφελούν περισσότερο τους χρήστες στα άκρα των κυψελών παρά αυτούς στο κέντρο. Συγκεκριμένα, για τους χρήστες στο κέντρο της κυψέλης οι παρεμβολές δεν είναι τόσο ισχυρές όσο για αυτούς στα άκρα οπότε η ελαχιστοποίησή τους έχει ελάχιστη επίδραση στην βελτίωση του SINR. Η βελτίωση της φασματικής απόδοσης είναι λογαριθμική σε σχέση με το SINR ενώ για τους χρήστες στα άκρα γραμμική.

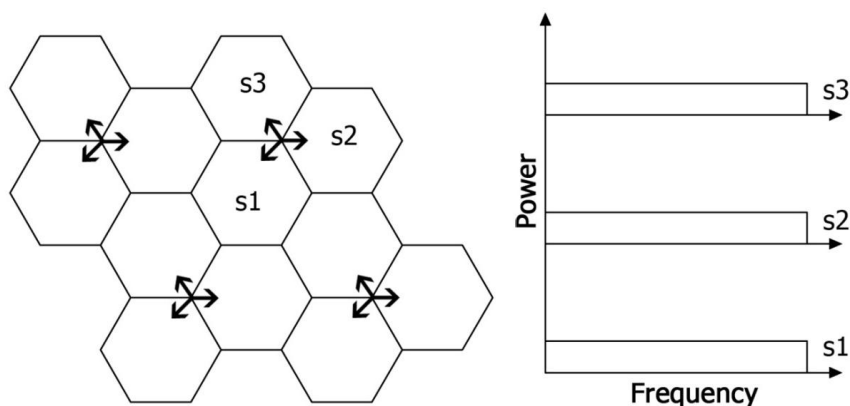
### 6.3.1 Συντονισμός Διακυβελικών Παρεμβολών

Ενώ η χρήση στατικής ανάθεσης πόρων αποτελεί μια εύκολη λύση για την αντιμετώπιση των παρεμβολών, δεν αποτελεί βέλτιστη λύση όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Ο συντονισμός των διακυβελικών παρεμβολών επιχειρεί να λύσει με δυναμικό τρόπο τα προβλήματα της στατικής ανάθεσης πόρων, με το να προσαρμόζεται στο διακινούμενο όγκο δεδομένων στο δίκτυο και τις συνθήκες μετάδοσης.

#### 6.3.1.1 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητων

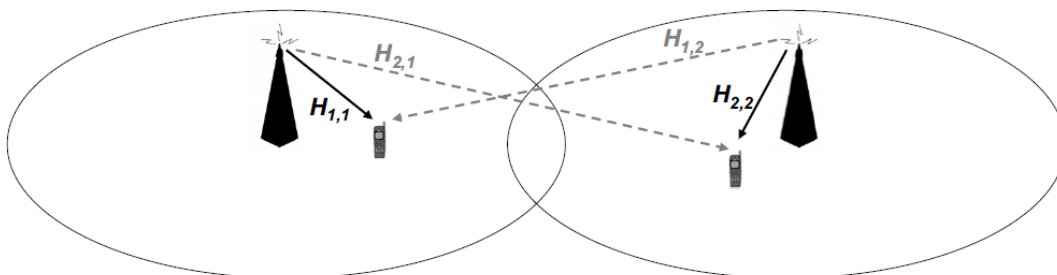
Όπως ήδη αναφέρθηκε η κατάτμηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε τμήματα και ανάθεσή τους στις κυψέλες του δικτύου, μπορεί να λύσει το πρόβλημα των παρεμβολών. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια περιγραφή των τεχνικών αυτών καθώς και τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καθεμιάς. Για την συνέχεια της εργασίας ακολουθούμε την σύμβαση ότι ένας σταθμός βάσης μπορεί να ελέγχει παραπάνω από έναν τομέα (sector), κατά σύμβαση τρεις, εκτός κι' αν αναφέρεται διαφορετικά. Οι τομείς θα αναπαρίστανται από εξάγωνα και ανά τρεις συνθέτουν μια κυψέλη, με τον σταθμό βάσης να βρίσκεται στην κοινή τους κορυφή.

Το LTE είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί στην περίπτωση της καθολικής διάθεσης του εύρους ζώνης σε όλες τις κυψέλες, με τις κυψέλες να μπορούν να μεταδίδουν χρησιμοποιώντας πλήρη ισχύ. Το σχήμα αυτό ονομάζεται reuse 1 και στην Εικόνα 53 δίνεται μια παρουσίαση της διάθεσης του εύρους ζώνης και της ισχύος εκπομπής.



Εικόνα 53: ανάθεση εύρους ζώνης στο reuse 1 σχήμα. [12]

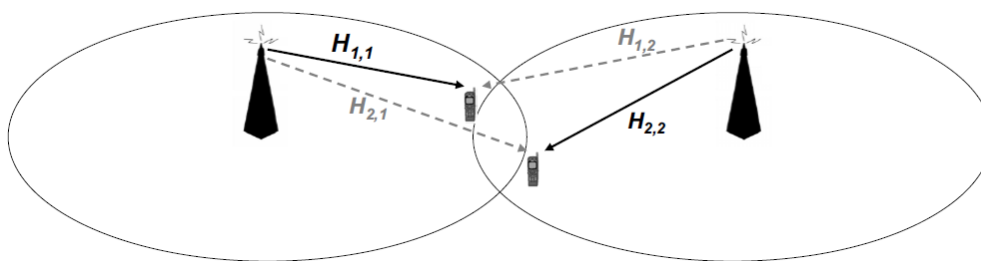
Η χρήση του reuse 1 έχει το πλεονέκτημα της πλήρους αξιοποίησης του διαθέσιμου εύρους Ζώνης, χωρίς κανένα περιορισμό για τις συχνότητες ή την ισχύ εκπομπής, το οποίο επιτρέπει, θεωρητικά, την χρήση του μέγιστου δυνατού ρυθμού μετάδοσης. Στην Εικόνα 54 παρουσιάζεται το παραπάνω σενάριο. Και τα δυο τερματικά βρίσκονται στο κέντρο της εκάστοτε κυψέλης. Το σήμα από την κυψέλη στην οποία εξυπηρετούνται είναι ισχυρό και οι παρεμβολές από την γειτονική κυψέλη αμελητέες. Σε αυτό το σενάριο, η μέγιστη ρυθμαπόδοση του συστήματος επιτυγχάνεται όταν τα τερματικά εκπέμπουν σε πλήρη ισχύ.



Εικόνα 54: reuse 1 σχήμα μετάδοσης, χωρίς παρεμβολές. [2]

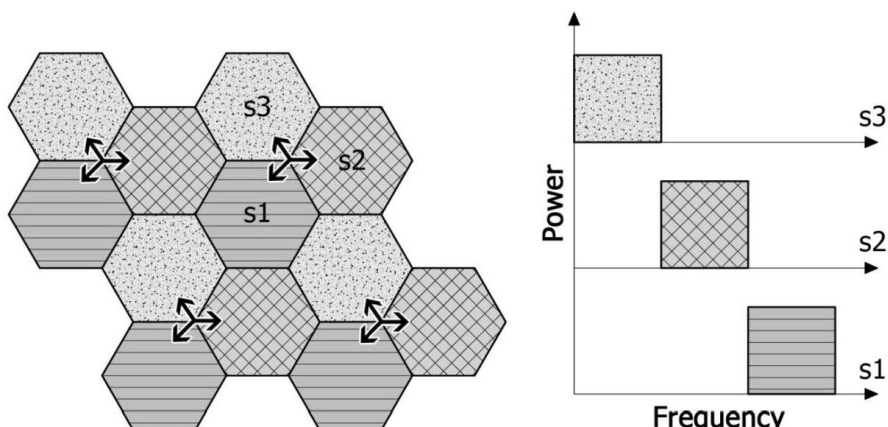
Καθώς οι απαιτήσεις για μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου μεγαλώνουν, το οποίο σημαίνει περισσότεροι χρήστες ανά  $m^2$ , η περίπτωση μετάδοσης χωρίς παρεμβολές με τη χρήση του reuse 1 σχήματος φαίνεται αδύνατη. Στην Εικόνα 55 παρουσιάζεται το σενάριο της πρώτης περίπτωσης με παρεμβολές. Σε αυτή την περίπτωση τα τερματικά βρίσκονται στα όρια των αντίστοιχων κυψελών. Το σήμα που λαμβάνουν από την εκάστοτε κυψέλη υπηρεσίας σε αυτή την περίπτωση είναι συγκρίσιμο με την αντίστοιχες παρεμβολές που δέχονται από την γειτονική κυψέλη. Σε αυτό το σενάριο, το οποίο αποτελεί την χειρόστη περίπτωση παρεμβολών, τα τερματικά δεν μπορούν να εκπέμπουν σε πλήρη ισχύ καθώς αυτό σημαίνει ενίσχυση των παρεμβολών. Η μέγιστη ρυθμαπόδοση του συστήματος, υπό αυτές τις συνθήκες, επιτυγχάνεται όταν μόνο ένα από τα τερματικά εκπέμπει σε πλήρη ισχύ. [2]





Εικόνα 55: reuse 1 σχήμα μετάδοσης με παρεμβολές. [2]

Μια λύση θα ήταν η διαίρεση του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε τρεις ορθογώνιες υποζώνες (sub-bands) και ανάθεσή τους στις κυψέλες με τέτοιον τρόπο ώστε ανά δυο γειτονικές κυψέλες, να μην έχουμε τομή στις αντίστοιχες ζώνες. Η κάθε κυψέλη μπορεί να εκπέμπει σε πλήρη ισχύ, στο sub-band που τις έχει ανατεθεί, και να επιτύχει υψηλό SINR, καθώς η ορθογωνιότητα εξασφαλίζει την εξάλειψη των παρεμβολών. Το κόστος από την άλλη είναι ο περιορισμός του διαθέσιμου εύρους ζώνης στο 1/3 του συνολικού. Επιπλέον, η ανάθεση αυτή είναι στατική και καταλήγει σε σπατάλη πόρων ή starvation, αφού ο φόρτος δικτύου δεν είναι ποτέ ομοιόμορφος. Έτσι, για κάποιες κυψέλες το εύρος ζώνης δεν αξιοποιείται ενώ για κάποιες άλλες δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση επιπλέον χρηστών οπότε η υπηρεσία δεν επιτρέπεται για τους χρήστες αυτούς. Στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται η ανάθεση στο reuse 3 σχήμα.



Εικόνα 56: Ανάθεση εύρους ζώνης στο reuse 3 σχήμα. [12]

Εναλλακτικά, το διαθέσιμο εύρος ζώνης θα μπορούσε να διαιρεθεί σε παραπάνω από τρεις υποζώνες. Το σχήμα τότε ονομάζεται reuse  $n$ , με το  $n$  να ορίζεται ως ο Συντελεστής Επαναχρησιμοποίησης (reuse factor) και δηλώνει το πλήθος των υποζωνών στα οποία χωρίζεται το συνολικό εύρος ζώνης. Για το reuse 1 δηλώνει ένα τμήμα και για το reuse 3, τρία ίσα, ορθογώνια τμήματα.

Η απόδοση των σχημάτων επαναχρησιμοποίησης διαφέρει ανάλογα με το reuse factor. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα [12] [13] [4] το SINR και η χωρητικότητα είναι χαμηλά για τα σχήματα reuse 1 και reuse 2, εξαιτίας των παρεμβολών, παρά το μεγάλο εύρος ζώνης. Για το reuse 3 η χωρητικότητα βελτιώνεται ως αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης των παρεμβολών, το ίδιο και για το SINR, παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιεί το ένα τρίτο του εύρους ζώνης. Ενώ για το reuse 3, η βελτίωση της απόδοσης εξισορροπεί την απώλεια διαθέσιμου εύρους ζώνης, το ίδιο δεν ισχύει για τα σχήματα με μεγαλύτερο reuse factor. Για την ακρίβεια, το SINR βελτιώνεται αλλά δυσανάλογα με την απώλεια εύρους ζώνης ενώ η χωρητικότητα παραμένει μεγαλύτερη από αυτή των reuse 1 και reuse 2, αλλά μειώνεται καθώς μεγαλώνει ο reuse factor.

Τα σχήματα επαναχρησιμοποίησης είναι εύκολα στην υλοποίηση και δεν απαιτούν επικοινωνία μεταξύ των σταθμών βάσης. Από την άλλη, η ανάθεση των πόρων είναι στατική, συνεπώς τα σχήματα αυτά δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις δυναμικές συνθήκες μετάδοσης στο δίκτυο, καθώς σπάνια ο φόρτος δικτύου είναι ομοιόμορφος σε όλες τις κυψέλες. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί δυναμικά σχήματα τα οποία αναλύονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Στα σχήματα αυτά παρέχεται επικοινωνία ανάμεσα στους σταθμούς βάσης, ρύθμιση των εντάσεων μετάδοσης και προσαρμογή στις δυναμικές συνθήκες του δικτύου. [12] [13] [17] [4] [16]

### 6.3.1.2 Τμηματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων

Στο προηγούμενο εδάφιο είδαμε ότι η χρήση του ίδιο reuse factor σε όλη την κυψέλη δεν είναι αποδοτική. Το reuse 3 μπορεί να κάνει σπατάλη πόρων σε κυψέλες χωρίς δεδομένα για μετάδοση ενώ στο reuse 1 η ρυθμαπόδοση εξαρτάται από την τοποθεσία του τερματικού στη κυψέλη. Η παραπάνω παρατήρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλα σχήματα, για καλύτερη διαχείριση των πόρων. Μια κατηγορία τέτοιων σχημάτων είναι τα σχήματα Τμηματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνοτήτων (Fractional Frequency Reuse, FFR). Στα σχήματα αυτά, οι χρήστες διαχωρίζονται σε αυτούς που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης και σε αυτούς που βρίσκονται στα άκρα της. Οι χρήστες στο κέντρο της κυψέλης δεν δέχονται παρεμβολές και χρειάζονται λιγότερη ισχύ για την επικοινωνία με το σταθμό βάσης ενώ για την μετάδοση στα άκρα εφαρμόζονται περιορισμοί στη μετάδοση. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης χωρίζεται σε δυο υποζώνες, μια μεγάλη (major) και μια μικρή (minor). Οι χρήστες στο κέντρο χρησιμοποιούν την μεγάλη υποζώνη ενώ οι χρήστες στα άκρα μπορούν να μεταδώσουν σε κάποιες από τις διαθέσιμες συχνότητες της μικρής υποζώνης, με τις γειτονικές κυψέλες να μην μπορούν να εκπέμπουν σε αυτές ή να εκπέμπουν με μικρότερη ισχύ για να αποφευχθούν οι παρεμβολές μεταξύ τους. Ανάλογα με το εύρος ζώνης που θα διατεθεί στην κάθε κατηγορία χρηστών και τους περιορισμούς στην ισχύ μετάδοσης, ο reuse factor στα σχήματα αυτά κυμαίνεται ανάμεσα στο 1 και 3.

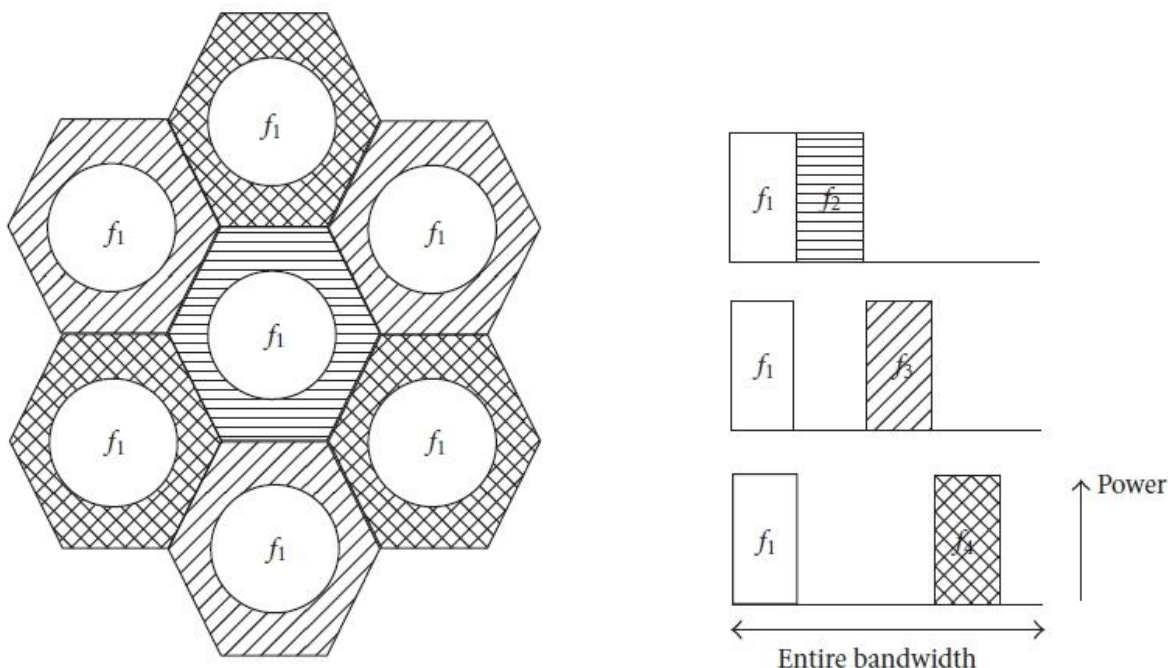
Τα βασικότερα σχήματα στην κατηγορία αυτή, τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια, είναι το σχήμα Μερικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνοτήτων (Partial Frequency Reuse, PFR) και Προσαρμοστική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων (Soft Frequency Reuse, SFR). Από τα υπόλοιπα σχήματα στην κατηγορία θα γίνει μια αναφορά στο σχήμα Προσαρμοστική Τμηματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων (Soft Fractional Frequency Reuse, SFFR), Σταδιακή Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων (Incremental Frequency Reuse, IFR) και Βελτιωμένη Τμηματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων (Enhanced Fractional Frequency Reuse, EFR).

Στο PFR, το εύρος ζώνης διαιρείται σε μια μεγάλη υποζώνη και μια μικρή. Οι χρήστες στο κέντρο της κυψέλης χρησιμοποιούν την μεγάλη υποζώνη με reuse 1 ενώ οι χρήστες στα άκρα της μοιράζονται την μικρή χρησιμοποιώντας reuse 3. Συγκεκριμένα το εύρος ζώνης για την μετάδοση στα άκρα διαιρείται σε τρία επιμέρους ορθογώνια τμήματα και ο κάθε sector λαμβάνει ένα από αυτά ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές στους sectors της γειτονικής κυψέλης. Η ανάθεση παρουσιάζεται στην Εικόνα 57. Σε σχέση με τα σχήματα reuse 1 και reuse 3, το σχήμα αυτό έχει τις μικρότερες παρεμβολές. [12] [16]

Το μέγεθος και ο τρόπος ανάθεσης μπορεί να αλλάξει δυναμικά σε παραλλαγές του σχήματος. Σε μια παραλλαγή το μέγεθος του εύρους ζώνης για την μετάδοση στα άκρα μπορεί να υπολογιστεί δυναμικά ανάλογα με τον φόρτο δικτύου στο κέντρο και τα άκρα ενώ σε μια άλλη παραλλαγή, με τα ίδια κριτήρια, το εύρος ζώνης ενός sector του οποίου ο φόρτος δικτύου είναι χαμηλός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα γειτονικό του sector



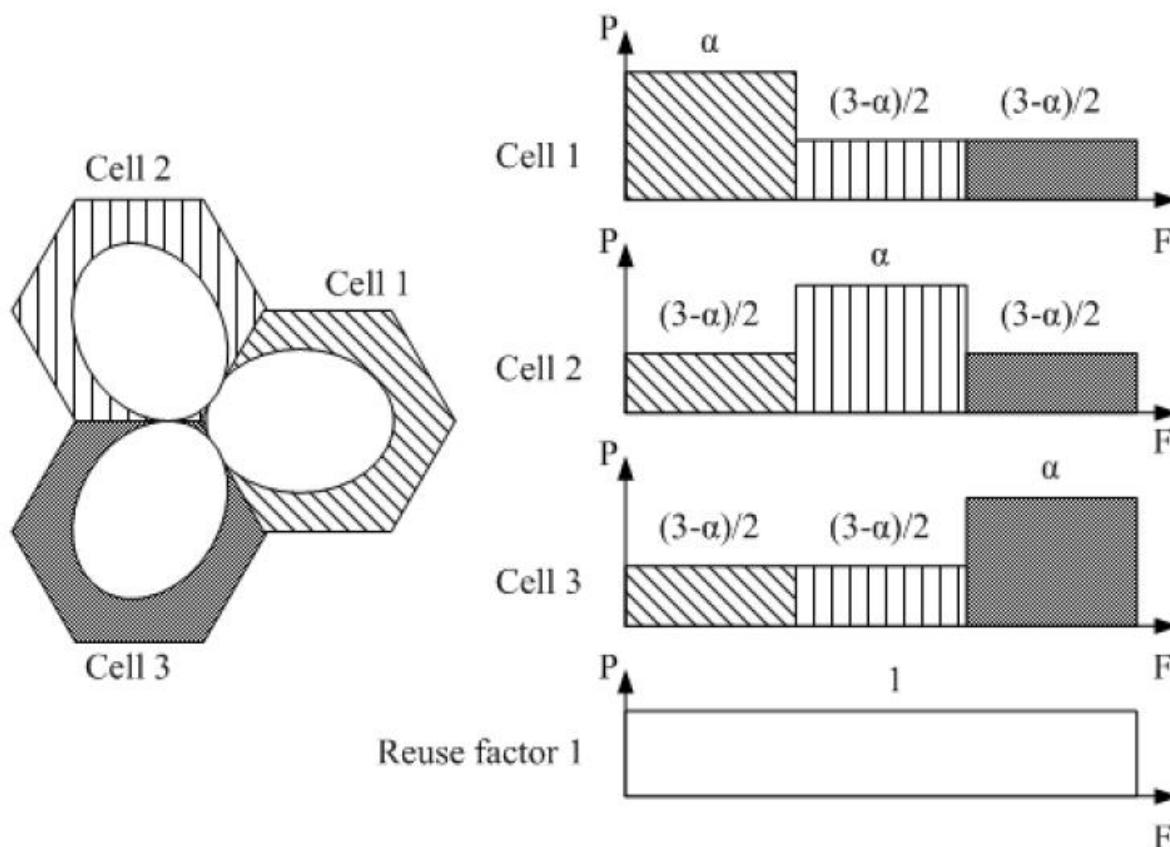
στο οποίο ο φόρτος δικτύου είναι υψηλότερος από όσο μπορεί να καλύψει με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του. [4]



Εικόνα 57: Ανάθεση πόρων στο PFR. [4]

Στο SFR ό κάθε sector μπορεί να μεταδώσει σε ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης, αλλά σε κάποια υποζώνη εκπέμπει με μικρότερη ισχύ. Αποτελεί μια εξισορρόπηση ανάμεσα στην σπατάλη πόρων του PFR και τα σχήματα reuse n, μειώνει τις παρεμβολές σε σχέση με το reuse 1 και παρέχει περισσότερη ευελιξία στην αξιοποίηση των πόρων σε σχέση με το PFR. Το εύρος ζώνης διαιρείται σε δυο υποζώνες, μια για τους χρήστες στα άκρα και μια για αυτούς στο κέντρο. Η υποζώνη για τους χρήστες στα άκρα αποτελεί το 1/3 του συνολικού εύρους ζώνης και αναφέρεται ως major sub-band. Η αντίστοιχη υποζώνη για τους χρήστες στο κέντρο αποτελεί τα υπόλοιπα 2/3 του εύρους ζώνης και αναφέρεται ως minor sub-band. Η ανάθεση της υποζώνης στα άκρα γίνεται όπως και στο reuse 3. Οι χρήστες στο κέντρο της κυψέλης μπορούν να χρησιμοποιήσουν και το major sub-band, αν αυτή δεν αξιοποιείται από τους χρήστες στα άκρα, επιτρέποντας στην ουσία reuse 1 χρήση του εύρους ζώνης σε όλη την κυψέλη. Το minor sub-band από την άλλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από τους χρήστες στο κέντρο.

Η μετάδοση στα άκρα γίνεται με ενισχυμένη ισχύ σε σχέση με αυτή στο κέντρο, υπό την προϋπόθεση της σταθερής συνολική ισχύος. Η διαφορά της ισχύος μετάδοσης ανάμεσα στο major και minor sub-band είναι παραμετροποιήσιμη από τον διαχειριστή του δικτύου, με ημί-στατικό τρόπο, ανάλογα με το επιθυμητό πραγματικό (effective) συντελεστή επαναχρησιμοποίησης και τις συνθήκες του δικτύου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ανάθεση των πόρων στο SFR. [12] [16] [4] [13]



Εικόνα 58: Ανάθεση πόρων στο SFR με συνολική ισχύ μετάδοσης ίση με 3. [16]

Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σύμφωνα με τα [12] [4] [16] [13] αναφέρουν ότι καθώς η αναλογία της ισχύος μετάδοσης παραμένει στο ένα, η ταχύτητα μετάδοσης στα άκρα είναι ίση με το ένα τρίτο αυτής στο reuse 1. Καθώς η αναλογία μειώνεται, το ίδιο κάνει το throughput στο κέντρο. Στα άκρα το throughput αυξάνει, λόγω των μειωμένων παρεμβολών και της αυξημένης ισχύος. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι το SFR βελτιώνει το SINR για τους χρήστες στα άκρα αλλά μειώνει αυτό των χρηστών στο κέντρο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του κοινού φάσματος μεταξύ των χρηστών στο κέντρο και αυτών στα άκρα των γειτονικών κυψελών. Παρ' όλα αυτά, η μείωση του SINR για τους χρήστες στο κέντρο είναι λογαριθμική ενώ η βελτίωση στα άκρα γραμμική.

Τα αποτελέσματα μελέτης για την χρήση του PFR στο κέντρο αντί του reuse 1 [12] δείχνουν ότι το κόστος του SFR είναι η μειωμένη απόδοση στο κέντρο και γι' αυτό είναι προτιμότερο η χρήση του για την βελτίωση της απόδοσης τοπικά μόνο και όχι για ολόκληρο το δίκτυο και ότι η απόδοση είναι μεγαλύτερη όταν το major sub-band καταλαμβάνει τα 2/3 του διαθέσιμου εύρους ζώνης αντί του προτεινόμενου 1/3.

### 6.3.1.2.1 Συγκριτική μελέτη σχημάτων PFR και SFR

Η σύγκριση των παραπάνω σχημάτων αναλύεται στο [16]. Η μελέτη, μέσω προσομοιώσεων σε επίπεδο συστήματος για ένα LTE δίκτυο με χρήση FDD και OFDMA για μετάδοση, χρησιμοποιεί μετρικές όπως η ρυθμαπόδοση στα άκρα των κυψελών, η μέση ρυθμαπόδοση του συστήματος και η χωρητικότητα του δικτύου σε σύγκριση με το reuse 1 σχήμα. Η μετάδοση χρησιμοποιεί μια κεραία μετάδοσης στον

σταθμό βάσης και μία λήψης στα τερματικά. Επιπλέον για τις αναμεταδόσεις χρησιμοποιείται HARQ.

Για την διεξαγωγή της μελέτης έχουν γίνει κάποιες παραδοχές. Το δίκτυο αποτελείται από κυψέλες των 3 sectors (3sector cells) και η μετάδοση γίνεται σε RBs όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.5.1. Οι κυψέλες εκπέμπουν πάντα με την μέγιστη δυνατή ισχύ μετάδοσης και η ανάθεση της ισχύος για τα RBs είναι στατική. Το συνολικό εύρος ζώνης είναι 10MHz bandwidth, το οποίο αντιστοιχεί σε συνολικά 24 RBs. Για την μέτρηση της χωρητικότητας υποθέτουμε πολλαπλούς χρήστες ανά κυψέλη (36) τοποθετημένους με ομοιόμορφο τρόπο. Ο καθένας από αυτούς έχει απεριόριστο αριθμό πακέτων προς μετάδοση. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται multiuser diversity. Ο κάθε χρήστης έχει τις ίδιες πιθανότητες ανάθεσης ενός RB του ίδιου subcarrier.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις η χωρητικότητα του κάθε subcarrier προκύπτει από το άθροισμα των χωρητικότητων των RBs και η συνολική χωρητικότητα του δικτύου από το άθροισμα των αντίστοιχων χωρητικότητων των cell-edge και cell-center bands. Οι χρήστες μοιράζονται σε αυτούς στο κέντρο και αυτούς στα άκρα με τους τελευταίους να αποτελούνται από ένα ποσοστό των χρηστών με το χειρότερο SINR. Με βάση το ποσοστό αυτό γίνεται και η ανάθεση του αντίστοιχου εύρους ζώνης στα άκρα και το κέντρο ούτως ώστε ο φόρτος μετάδοσης σε κάθε σημείο του δικτύου να είναι ομοιόμορφος. Μιας και το δίκτυο θεωρείται πλήρως φορτωμένο, η κάθε ομάδα χρηστών περιορίζεται στο δικό της εύρος ζώνης οπότε είναι σημαντικό ο φόρτος να μοιράζεται ομοιόμορφα γιατί περιορίζει τον όγκο δεδομένων της κάθε ομάδας ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης και παρέχει ίδιες καθυστερήσεις για τις δυο ομάδες.

Για την προσομοίωση σε επίπεδο συστήματος γίνονται επίσης κάποιες παραδοχές. Η στοίβα πρωτοκόλλων είναι μια απλοποιημένη εκδοχή της υπάρχουσας. Για απλότητα στην προσομοίωση, η μετάδοση γίνεται σε επίπεδο RB το οποίο περιέχει ακριβώς ένα MAC PDU και ένα RLC PDU. Ο χρονοπρογραμματισμός περιλαμβάνει μετάδοση νέων πακέτων και αναμεταδόσεις και ο scheduler είναι ένας 'channel aware' round-robin αλγόριθμος. Ο κάθε χρήστης έχει ακριβώς ένα CBR flow το οποίο προσομοιώνει ένα video stream. Τέλος, η μετάδοση δίνει προτεραιότητα πρώτα στις αναμεταδόσεις και μετά τα νέα πακέτα. Επίσης, οι μεταδόσεις των χρηστών στα άκρα, νέα πακέτα ή αναμεταδόσεις, έχουν προτεραιότητα σε σχέση με αυτές των χρηστών στο κέντρο.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης οι χρήστες πρέπει να κινούνται ώστε το SINR τους να αλλάζει. Η μετακίνησή τους γίνεται έτσι ώστε να προτιμάται η μετακίνηση στα άκρα αλλά όταν προκληθεί συμφόρηση, αυτοί με το καλύτερο SINR μετακινούνται πίσω στο κέντρο. Εξετάζεται μια κεντρική κυψέλη, την οποία περικυκλώνει ένα επίπεδο γειτονικών κυψελών, οι οποίες με τη σειρά τους δεν έχουν γειτονικές κυψέλες (1 ring site). Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι το residual Packet Error Rate (PER), το οποίο αποτελεί το πλήθος των πακέτων που δεν καταφέρουν να μεταδοθούν μετά από 3 αποτυχημένες προσπάθειες του HARQ, η μέση καθυστέρηση, η οποία ορίζεται από την στιγμή της δημιουργίας ενός πακέτου μέχρι την στιγμή που έχει γίνει schedule το τελευταίο του bit και η ρυθμαπόδοση.

Αναφορικά με την χωρητικότητα για το PFR, τα αποτελέσματα της σύγκρισης δείχνουν ότι αφενός η ανάθεση ισχύος στα cell-edge/cell-center bands, με ανάμοιο τρόπο έχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτή που δίνει ίδια ισχύ. Αφετέρου όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης στα άκρα, τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης, άρα μικρότερη χωρητικότητα. Σε γενικές γραμμές όμως οι παρατηρήσεις είναι οι παρακάτω. Το reuse 1 έχει την μεγαλύτερη χωρητικότητα. Το SFR πλησιάζει την χωρητικότητα του reuse 1 όσο η διαφορά ισχύος στα άκρα και το κέντρο μειώνεται. Το PFR έχει παρόμοια χωρητικότητα με το reuse 3 και χειρότερη από αυτήν του SFR.

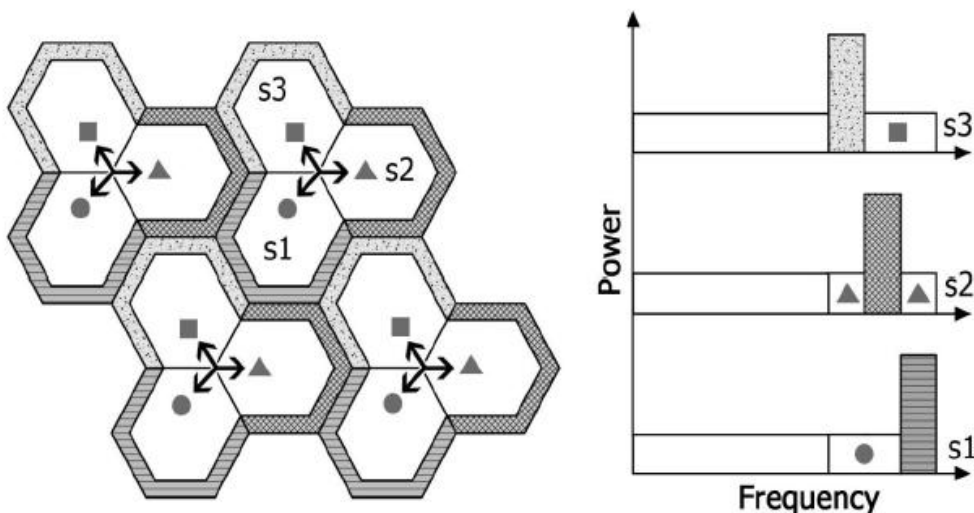
Για τις μετρήσεις του SFR χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές 2, 1.8 και 5/3 για τον παράγοντα ενίσχυσης ( $\alpha$ ) της ισχύος μετάδοσης, σε τρία σενάρια φόρτου: υψηλό (36 users, 180kbps/user), μέσο έως υψηλό (30 users, 180 kbps/user) και μέσο (36 users, 120kbps/user). Τα αποτελέσματα έδειξαν μικρή διαφορά για τις τιμές του  $\alpha$  με το  $\alpha=1.8$  να έχει λίγο καλύτερη επίδοση.

Για τα συνολικά αποτελέσματα της σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν τα σχήματα reuse1, reuse3, PFR με  $\alpha=1.8$  και τρεις εκδοχές του SFR με διάφορα μεγέθη για την ισχύ μετάδοσης και διάφορα μεγέθη του εύρους ζώνης για τα άκρα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το reuse1 έχει το χειρότερο PER με τα υπόλοιπα σχήματα να έχουν σημαντικά μικρότερη τιμή. Το reuse3 έχει την χαμηλότερη τιμή, το SFR έχει ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή PER σε σχέση με το PFR και αυτό γιατί το SFR υπό υψηλό φόρτο δέχεται περισσότερες παρεμβολές σε σχέση με το PFR.

Όσον αφορά την καθυστέρηση, το SFR και reuse1 έχουν την καλύτερη επίδοση. Τα υπόλοιπα σχήματα έχουν καθυστερήσεις που οφείλονται στο γεγονός ότι το δίκτυο έχει φτάσει στα όρια της χωρητικότητάς του.

Για την απόδοση στα άκρα χρησιμοποιήθηκε το 5<sup>th</sup> percentile και 85<sup>th</sup> percentile και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα reuse3, SFR και PFR έχουν καλύτερη απόδοση στα άκρα σε σχέση με το reuse 1 στο 5<sup>th</sup> percentile, αλλά στο 85<sup>th</sup> percentile το reuse1 εξακολουθεί να έχει καλύτερη απόδοση με το SFR να ακολουθεί.

Τελικώς, η μελέτη φτάνει στα εξής συμπεράσματα: το reuse1 μεγιστοποιεί την χωρητικότητα αλλά μειώνει την απόδοση. Με την ανάθεση μεγαλύτερου εύρους ζώνης στα άκρα απ' ότι στο κέντρο, το SFR έχει μικρότερη χωρητικότητα από το reuse1 αλλά μειώνει το PER και αυξάνει την απόδοση στα άκρα. Τέλος τόσο το reuse3 όσο και το PFR, έχουν καλύτερη ποιότητα μετάδοσης με μικρότερο PER αλλά και μικρότερη χωρητικότητα σε σχέση με το SFR.

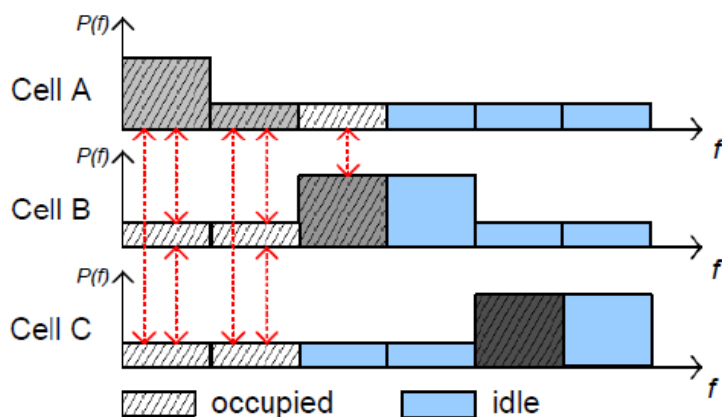


Εικόνα 59: Ανάθεση πόρων στο SFRR σχήμα. [12]

Οι παρατηρήσεις που έχουν προκύψει από τις έρευνες [12] είναι ότι αφενός το επίπεδο της ισχύος μετάδοσης στο κέντρο δεν επηρεάζει την συνολική ρυθμαπόδοση και αφετέρου ότι η ισχύς μετάδοσης στα άκρα έχει άμεση επίδραση στην ρυθμαπόδοση της περιοχής εκείνης. Συγκεκριμένα, η ρυθμαπόδοση στα άκρα είναι ανάλογη της ισχύος μετάδοσης και αντιστρόφως ανάλογη της ρυθμαπόδοσης στο κέντρο.

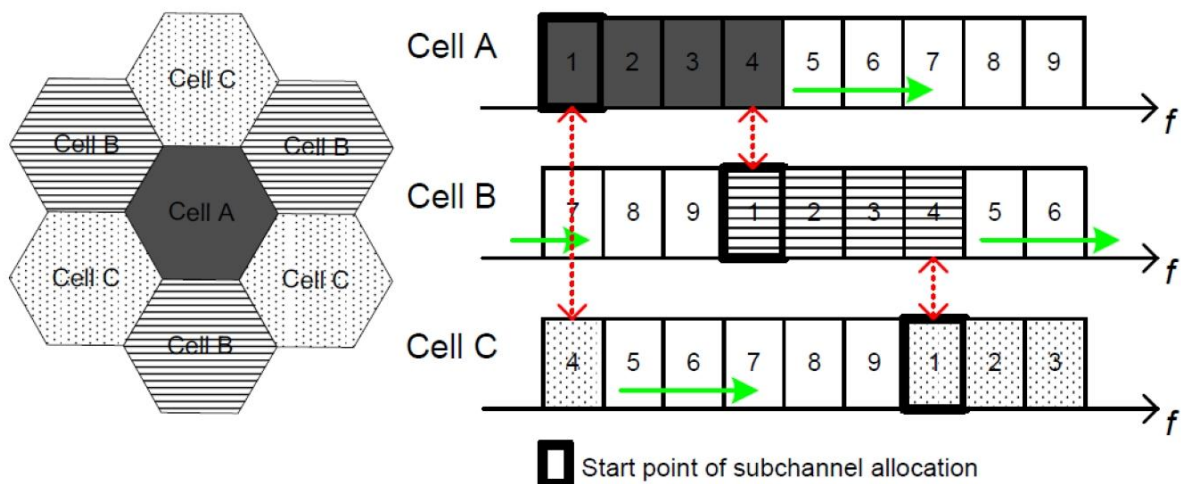
Ενώ τα σχήματα PFR και SFR βελτιώνουν της ρυθμαπόδοση στα άκρα από την άλλη έχουν ως αποτέλεσμα την μειωμένη συνολική ρυθμαπόδοση της κυψέλης σε σύγκριση με το reuse 1. Το PFR δεν αξιοποιεί ολόκληρο το εύρος ζώνης. Το SFR ενώ το αξιοποιεί, αυτό συμβαίνει με μικρότερη ισχύ. Το Soft Fractional Frequency Reuse (SFFR) σχήμα, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 59, αξιοποιεί το εύρος ζώνης που δεν αξιοποιείται από το PFR σχήμα. Το μέρος τους εύρους ζώνης που ανατίθεται στα άκρα των γειτονικών κυψελών (τα κομμάτια που περιέχουν κύκλο, τρίγωνο και τετράγωνο σχήμα στην παραπάνω Εικόνα) μπορούν να ανατεθούν στους χρήστες στο κέντρο αλλά με μικρότερη ισχύ.

Εκτός από τα την μειωμένη ρυθμαπόδοση στο κέντρο, το SFR έχει και άλλα μειονεκτήματα. Στο σχήμα αυτό οι χρήστες στα άκρα μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο το 1/3 του διαθέσιμου εύρους. Σε πραγματικές συνθήκες όμως οι χρήστες στα άκρα είναι περισσότεροι από αυτούς στο κέντρο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μειωμένη φασματική απόδοση στο SFR. Επιπλέον, ακόμη και στο σχήμα αυτό μπορεί να εμφανιστούν παρεμβολές ενώ υπάρχουν φορείς που δεν χρησιμοποιούνται. Ο λόγος είναι αφενός η διαφορά στην ισχύ μετάδοσης σε συνδυασμό με την ύπαρξη κοινών συχνοτήτων και το γεγονός ότι η ανάθεση των sub channels ξεκινάει πάντα από το πρώτο και αυξάνει. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στην Εικόνα 60. Τέλος, όταν ο φόρτος δικτύου ξεπερνάει το 50% το SFR παρουσιάζει χαμηλότερη ρυθμαπόδοση σε σχέση με το reuse 1 και αυτό γιατί μόνο το 1/3 των συχνοτήτων μπορούν να μεταδώσουν με μεγάλη ισχύ ενώ τα υπόλοιπα 2/3 επιφέρουν απώλεια ρυθμαπόδοσης λόγω της μειωμένης ισχύος.



Εικόνα 60: Παρεμβολές και μειωμένη φασματική απόδοση στο SFR. [12]

Το Incremental Frequency Reuse (IFR) επιχειρεί να διορθώσει όλα τα παραπάνω προβλήματα όταν ο φόρτος δικτύου είναι χαμηλός, διατηρώντας την χωρητικότητα του δικτύου. Θεωρεί 3-sector κυψέλες στις οποίες οι sectors χωρίζονται σε τρεις ομάδες όπως φαίνεται στην Εικόνα 61. Η διαφορά τους έγκειται στο σημείο του εύρους ζώνης από το οποίο θα ξεκινήσουν να χρησιμοποιούν sub channels. Οι sectors τύπου A λαμβάνουν συχνότητες από την αρχή τους εύρους ζώνης, οι τύπου B από το 1/3 και μετά και οι τύπου C από τα 2/3 και μετά.

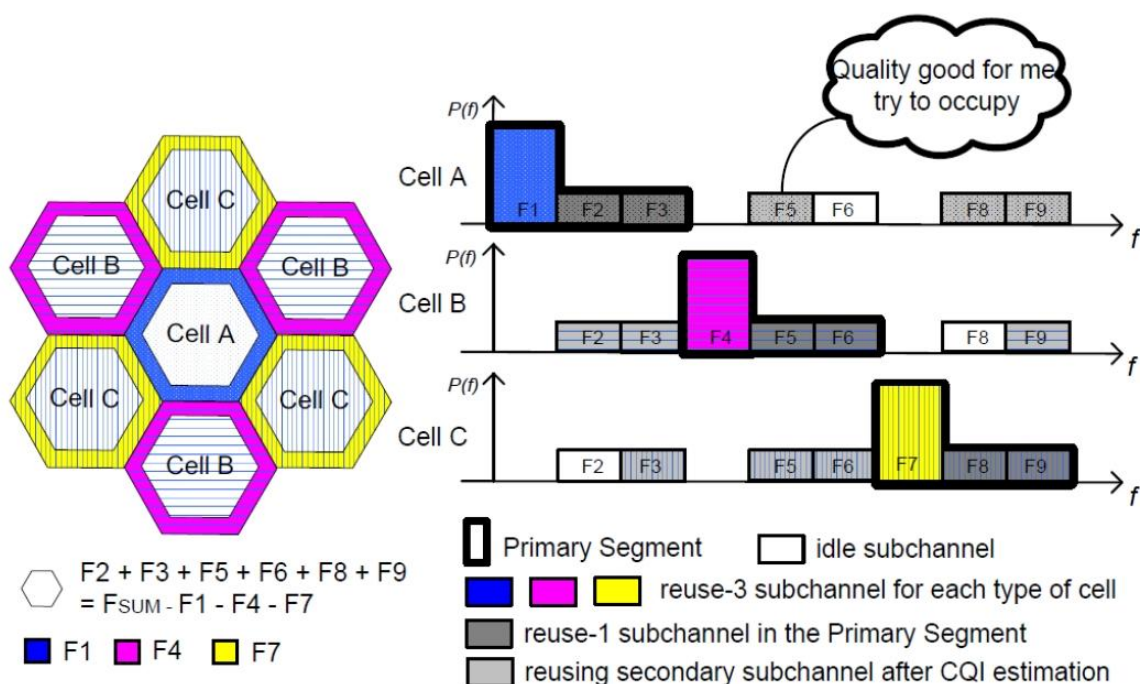


**Εικόνα 61: Ανάθεση πόρων στο IFR. [12]**

Στο σχήμα αυτό οι παρεμβολές μπορούν να εξαλειφθούν εντελώς όταν ο φόρτος δικτύου δεν ξεπερνάει το 30% καθώς σε αυτές τις συνθήκες αποτελεί στην ουσία το reuse 3 σχήμα. Καθώς ο φόρτος δικτύου αυξάνει, η ανάθεση των subchannels πλησιάζει το reuse 1. Η ρυθμαπόδοση τους σχήματος φόρτο πάνω από 30% είναι χειρότερη από αυτή του SFR. Για την ακρίβεια οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι και το IFR και το SFR αποδίδουν χειρότερα για μέσο και υψηλό φόρτο δικτύου από πλευράς ρυθμαπόδοσης και χωρητικότητας, σε σύγκριση με το reuse 1. [12]

Το Enhanced Fractional Frequency Reuse (EFFF) επιχειρεί να βελτιώσει ακόμη περισσότερο τους περιορισμούς των IFR και SFR σχημάτων. Παρομοίως με το IFR βασίζεται σε 3-sector κυψέλες τις οποίες κατηγοριοποιεί στις ίδιες κατηγορίες. Σε κάθε sector ανατίθεται ένα τμήμα του εύρους ζώνης το οποίο ονομάζεται Πρωτεύων Τμήμα (Primary Segment). Το υπόλοιπο εύρος ζώνης ονομάζεται Δευτερεύων Τμήμα (Secondary Segment). Μέρος του δευτερεύοντος τμήματος για το ένα sector αποτελεί το πρωτεύων τμήμα ενός άλλου. Οι χρήστες σε ένα sector μπορούν να χρησιμοποιούν ελεύθερα τα sub channels του πρωτεύοντος τμήματος αλλά για την χρήση των sub channels του δευτερεύοντος θα πρέπει να πληρούνται οι προϋποθέσεις αποφυγής παρεμβολών. Το πρωτεύων τμήμα χωρίζεται επιπλέον στο reuse 1 και reuse 3 κομμάτι. Τα sub channels του reuse 1 χρησιμοποιούνται από τους χρήστες στο κέντρο ενώ το reuse 3 κομμάτι από τους χρήστες στα άκρα του sector όπως φαίνεται στην Εικόνα 62.





Εικόνα 62: Ανάθεση πόρων στο E-FFR. [12]

Η χρήση του δευτερεύοντος τμήματος είναι συμπληρωματική και εφόσον δεν προκαλεί παρεμβολές στις γειτονικές κυψέλες. Η κάθε κυψέλη παρακολουθεί όλα τα sub channels στο δευτερεύον τμήμα και προτού αποφασίσει την χρήση κάποιου, λαμβάνει υπόψη το SINR με βάση τις εκτιμήσεις για την ποιότητα του καναλιού και επιλέγει αυτό με τις καλύτερες συνθήκες. Αν κανένα δεν ικανοποιεί τις συνθήκες ή όλα τα sub channels έχουν ανατεθεί, δεν χρησιμοποιεί κανένα. Με αυτόν τον τρόπο δεν κάνει σπατάλη πόρων, αφού για διαφορετικά sub channels μπορεί να ισχύουν διαφορετικές συνθήκες για διαφορετικές κυψέλες, και δεν προκαλεί παρεμβολές. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από προσομοιώσεις στις οποίες η σύγκριση της χωρητικότητας του δικτύου ανάμεσα στα reuse 1, reuse 3, IFR και E-FFR έδειξαν ότι το τελευταίο έχει καλύτερη απόδοση. [12]

### 6.3.2 Αντιμετώπιση Παρεμβολών στα HetNets

Τα HetNets, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 5.2.3, συνίστανται από ένα σύνολο σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή, οι οποίοι έχουν διαφορετικές δυνατότητες και περιορισμούς. Στα δίκτυα αυτά, τα οφέλη που παρέχει η χρήση των microcells έρχεται σε σύγκρουση με τα προβλήματα που μπορεί να προκαλούν. Ως επί το πλείστον τα microcells είναι συσκευές που εγκαθίστανται από τον χρήστη (femtocells) χωρίς μελέτη και σχεδιασμό με αποτέλεσμα να προκαλούν παρεμβολές στους γειτονικούς σταθμούς. Για τον λόγο αυτό, στο LTE-Advanced έχουν χρησιμοποιηθεί επιπλέον τεχνικές αντιμετώπισης των παρεμβολών που αντιμετωπίζουν τα νέα αυτά σενάρια που δεν υπήρχαν στα προηγούμενα Releases του προτύπου. Τα σχήματα αυτά αναφέρονται ως enhanced ICIC (eICIC).

Οι τεχνικές στο eICIC χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, στις τεχνικές που βασίζονται στο πεδίο του χρόνου (time-domain techniques), σε αυτές που βασίζονται στο πεδίο της συχνότητας (frequency-domain techniques) και σε αυτές που κάνουν διαχείριση της ισχύος μετάδοσης (power control). Οι τεχνικές στην πρώτη κατηγορία αποφεύγουν εντελώς ή ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές μέσω του συντονισμού των μεταδόσεων στο πεδίο του χρόνου, είτε σε επίπεδο subframe είτε σε επίπεδο OFDM συμβόλων. Οι τεχνικές στο πεδίο της συχνότητας βασίζονται στον διαχωρισμό των σημάτων ελέγχου

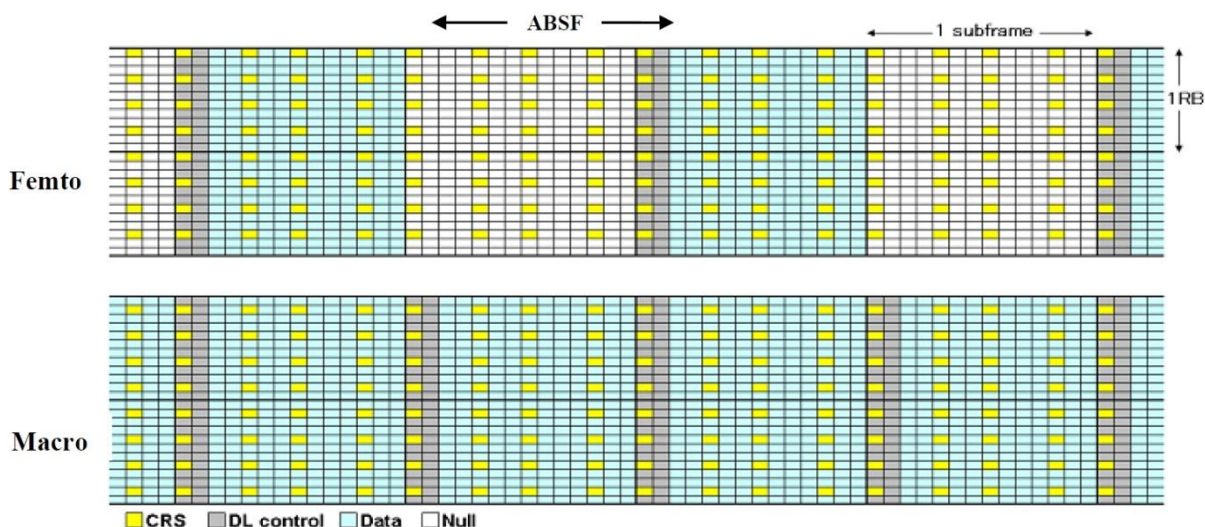
και δεδομένων ενώ οι τεχνικές που διαχειρίζονται την ισχύ μετάδοσης, οι οποίες είναι και οι βασικές τεχνικές αντιμετώπισης παρεμβολών, ρυθμίζουν την ισχύ μετάδοσης των microcells ώστε να ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές στους χρήστες του macrocell, χωρίς να θυσιάζουν την συνολική ρυθμαπόδοση.

### 6.3.2.1 Time-domain τεχνικές

Στις τεχνικές αυτές, οι παρεμβολές αντιμετωπίζονται με τον συντονισμό στην χρήση των πόρων στο πεδίο του χρόνου. Χωρίζονται στις τεχνικές που συντονίζουν subframes και σε αυτές που συντονίζουν OFDM σύμβολα.

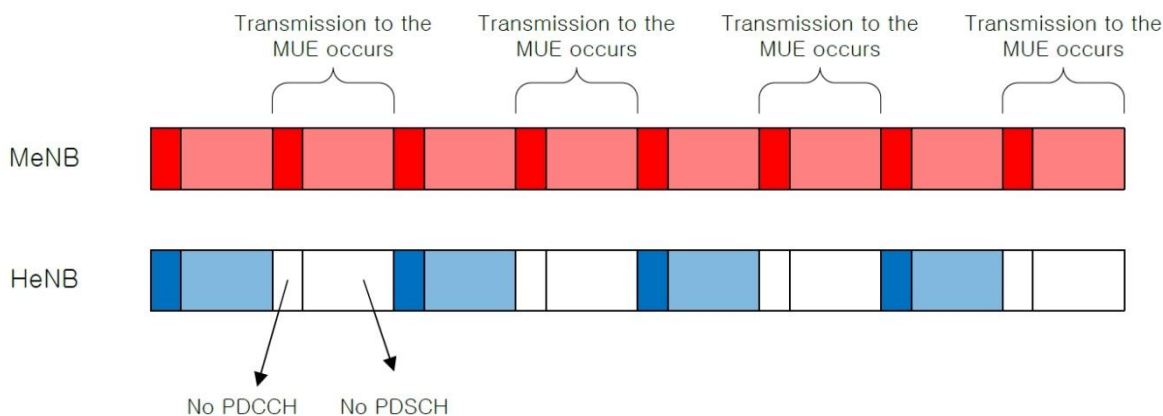
Όπως έχει αναφερθεί ήδη, το βασικό πρόβλημα με τις παρεμβολές στα HetNets προκύπτει από την ευθυγράμμιση των subframes του MeNB και των HeNBs κατά την μετάδοση. Οι τεχνικές συντονισμού των subframes συντονίζουν τις μεταδόσεις ώστε να μειωθούν τα conflicts. Οι τεχνικές αυτές είναι η Σχεδόν Άδεια Υποπλαίσια (Almost Blank Subframes, ABS) και η Ελαφρώς Φορτωμένα Υποπλαίσια (Lightly-Loaded subframes).

Ένα ABS δεν φέρει δεδομένα χρήστη (PDSCH), ούτε δεδομένα ελέγχου (PDCCH), με την εξαίρεση των σημάτων αναφοράς (reference signals, RSs) και είναι πλήρως συμβατό με τα προηγούμενα Releases του προτύπου. Η δομή και ο τρόπος χρήσης τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 63 και Εικόνα 64 αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν διάφορα έτοιμα πρότυπα για την χρήση των ABSs για TDD και FDD διαχείριση φάσματος.



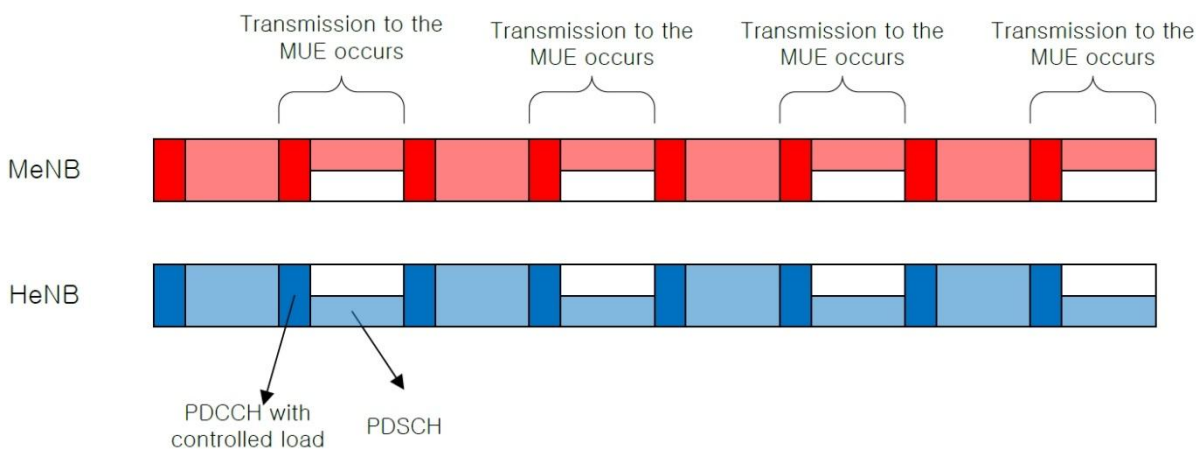
Εικόνα 63: Δομή ενός Almost Blank Subframe σε σχέση με ένα κανονικό. [12]





**Εικόνα 64: Χρήση των ABS από το HeNB. [12]**

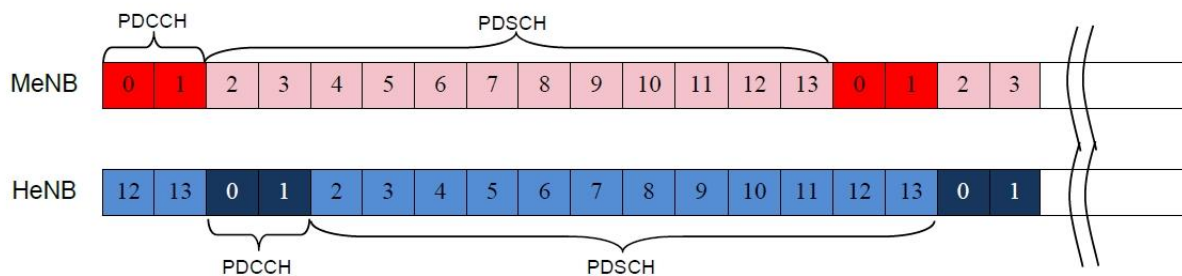
Τα μειονεκτήματα των ABSs είναι ότι παρεμβολές θα συνεχίσουν να υπάρχουν εξαιτίας της ευθυγράμμισης των σημάτων αναφοράς στα ABSs των HeNBs και το ότι η χρήση τους μειώνει την ρυθμαπόδοση στα HeNBs. Η τεχνική Ελαφρώς Φορτωμένα Υποπλαίσια επιχειρεί να αντιμετωπίσει τα παραπάνω προβλήματα. Είναι σχεδόν ίδια με τα ABSs, με τη διαφορά ότι τα PDCCH και PDSCH δεδομένα ελέγχονται από το HeNB για να μειωθούν οι παρεμβολές στα σήματα ελέγχου ανάμεσα σε αυτά και τα macrocells. Επιπλέον, η μετάδοση σε αυτό το σχήμα επιτρέπεται για όλα τα υποπλαίσια. Τα δεδομένα ελέγχου προστατεύονται μέσω του HeNB και τα δεδομένα χρήστη προγραμματίζονται για μετάδοση σε αμοιβαίως αποκλειόμενα RBs όπως φαίνεται στην Εικόνα 65.



**Εικόνα 65: μετάδοση με την χρήση Lightly-loaded subframes. [12]**

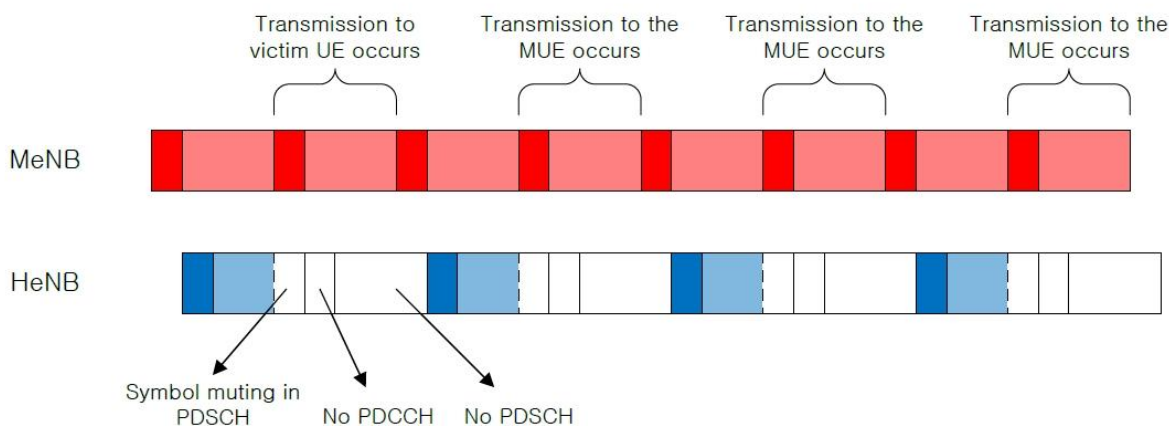
Το πρόβλημα με τις παραπάνω τεχνικές είναι οι παρεμβολές ανάμεσα στα reference signals και τα δεδομένα ελέγχου, στα ABSs, και τα δεδομένα χρήστη στα κανονικά subframes. Οι παρεμβολές εξαιτίας των reference signals μπορούν να αντιμετωπιστούν αν χρησιμοποιηθούν MBSFN subframes αντί των κανονικών, αλλά αυτό ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Οι τεχνικές διαχείρισης OFDM συμβόλων μετατοπίζουν το τέλος ενός HeNB subframe κατά ένα ή περισσότερα σύμβολα όπως φαίνεται στην Εικόνα 66. Με αυτόν τον τρόπο τα σύμβολα ελέγχου του macrocell δεν συγκρούονται με τα PDCCH σύμβολα ή τα reference signals, του HeNB. Από την άλλη όμως συγκρούονται με τα PDSCH σύμβολα οπότε το HeNB θα πρέπει να προβεί σε διορθωτικές ενέργειες.



**Εικόνα 66: Μετατόπιση OFDM συμβόλων σε ένα HeNB subframe. [12]**

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος είναι η σίγαση (mute) των OFDM συμβόλων που συγκρούονται με τα δεδομένα ελέγχους του macrocell. Για την αποφυγή παρεμβολών στο PDSCH, το επόμενο subframe στο HeNB ρυθμίζεται να είναι ABS, όπως φαίνεται στην Εικόνα 67. Το κόστος της μεθόδου είναι η μειωμένη ρυθμαπόδοση στους χρήστες του HeNB, ειδικά αν αυτοί χρησιμοποιούν Release 8 τεματικά. Τα Release 10 τεματικά μπορούν να ενημερωθούν για τα muted σύμβολα. Επιπλέον, αντί για σίγαση συμβόλων μπορεί να γίνει και σίγαση ολόκληρου του subframe οπότε αν ο χρήστης του macrocell είναι προγραμματισμένος για μετάδοση σε  $N - 1$  σύμβολα, αυτό σημαίνει ότι θα γίνει σίγαση σε  $N$  subframes, με το αντίστοιχο κόστος σε μειωμένη ρυθμαπόδοση.



**Εικόνα 67: Μετάδοση με σίγαση OFDM συμβόλων και ABS subframe. [12]**

### 6.3.2.2 Power-control τεχνικές

Στις τεχνικές αυτές, τα femtocells ρυθμίζουν την ισχύ μετάδοσης των HUEs ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές προς τους MUEs, με το κόστος της μειωμένης απόδοσης των πρώτων. Χωρίζονται σε αυτές στις οποίες η απαραίτητα πληροφορία μεταβιβάζεται μέσω της backhaul σηματοδοσίας και σε αυτές στις οποίες οι απαραίτητη πληροφορία προκύπτει από τις μετρήσεις των ίδιων των HeNBs.

Η μείωση της ισχύος μετάδοσης η οποία μεταφέρεται μέσω της backhaul σηματοδοσίας ενδείκνυται για τα MeNBs και για τις παρεμβολές στα σήματα αναφοράς και την σηματοδοσία ελέγχου. Η χρήση της X2 διεπαφής που τα συνδέεται εγγυάται σταθερές καθυστερήσεις. Αντίθετα, για τις παρεμβολές ανάμεσα στα MeNBs και HeNBs, οι τεχνικές αυτές εξαρτώνται από την ποιότητα και ταχύτητα της backhaul σύνδεσης του πελάτη (DSL) και ως εκ τούτου δεν μπορεί να εγγυηθεί την παροχή του απαραίτητου QoS.

Οι τεχνικές στην δεύτερη κατηγορία στοχεύουν στο να ρυθμίσουν την ισχύ μετάδοσης των HeNBs ώστε η κάλυψή τους να περιορίζεται στην γεωγραφική περιοχή της οικίας ή του γραφείου του ιδιοκτήτη τους, με βάση τις μετρήσεις από τα ίδια τα HeNBs.

Οι όροι που θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή των τεχνικών σε αυτή την κατηγορία είναι οι εξής:

$P_{max}, P_{min}$ : Η μέγιστη και ελάχιστη δυνατή ισχύς μετάδοσης για τα HeNBs

$P_m$ : Η ισχύς του σήματος από τα MeNBs που λαμβάνεται στα HeNBs.

$P_{tx}$ : ισχύς μετάδοσης ενός HeNB.

Οι κυριότερες μέθοδοι σε αυτή την κατηγορία είναι οι εξής:

- **Παρεμβολές ισχυρότερου MeNB στο HeNB**

Η ισχύς μετάδοσης του HeNB προσαρμόζεται σύμφωνα με την μέτρηση του ισχυρότερου ληφθέντος σήματος από ένα ομοκαναλικό (cochannel) MeNB. Η ισχύς μετάδοσης προσαρμόζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$P_{tx} = \max(\min(aP_m + b, P_{max}), P_{min}) \text{ dB}_m \text{ με τα } a, b \text{ να αποτελούν παραμέτρους ρύθμισης.}$$

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι στην μέθοδο αυτή τα HeNBs μεταδίδουν στην χειρότερη περίπτωση με ισχύ ίση με αυτήν του σήματος που δέχονται από το ισχυρότερο ομοκαναλικό MeNB. Η μέθοδος είναι εύκολη στην υλοποίηση, δεν απαιτεί επικοινωνία ανάμεσα στα MeNBs και τα HeNBs και συμβάλλει στην προτυποποίηση των HeNBs.

- **Path loss ανάμεσα στα MeNB και HeNB**

Η ισχύς μετάδοσης με βάση την μέτρηση του path loss ανάμεσα στο HeNB και τους MUEs υπολογίζεται με βάση του παρακάτω τύπους:

$$P_{tx} = \text{median}(P_m + P_{offset}, P_{max}, P_{min}) \text{ dB}_m$$

$$P_{offset} = \text{median}(P_{ipl}, P_{offset-max}, P_{offset-min}) \text{ dB}_m$$

Από τους παραπάνω τύπους προκύπτει ότι στην μέθοδο αυτή λαμβάνεται υπόψη το ενδοκτηριακό path loss και το penetration loss ανάμεσα στο πλησιέστερο MUE και το HeNB.

- **SINR στους HUEs**

Σε αυτή την μέθοδο, η τιμή του SINR για τους HUEs περιορίζεται σε μια τιμή τέτοια ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές στους γειτονικούς MUEs και το HeNB περιορίζει την ισχύ του ώστε να επιτύχει την τιμή αυτή του SINR.

Η μετάδοση τότε περιγράφεται από τους παρακάτω τύπους:

$$P_{HeNB} = \max(P_{min}, \min(PL_{est} + P_{HUE_{rcv}}), P_{max})$$

$$P_{HUE_{rcv}} = 10 \log_{10} \left( 10^{\frac{I}{10}} + 10^{N_{bgrnd\_noise}/10} \right) + x \text{ dB}_m$$

με

$I = \text{παρεμβολές στους HUEs}, N_{bgrnd\_noise} = \text{θόρυβος}, x = \text{επιθυμητό SINR και } PL_{est} = \text{εκτίμηση pathloss ανάμεσα στο HUE και το femtocell}$

Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι ο περιορισμός της ισχύος μετάδοσης του HeNB, στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ώστε οι περιορισμοί στους γειτονικούς MUEs να

είναι στο ελάχιστο και το SINR των HUEs σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Από τις παραπάνω συναρτήσεις βλέπουμε ότι η πρώτη υπολογίζει την ισχύ μετάδοσης σύμφωνα με το επιθυμητό SINR και η δεύτερη λαμβάνει υπόψη τον θόρυβο και τις παρεμβολές για την επίτευξη του SINR.

- **SINR στους MUEs**

Στην μέθοδο αυτή η ισχύς του HeNB περιορίζεται για να εγγυηθεί ένα συγκεκριμένο SINR στους MUEs. Σκοπός είναι η προστασία της λήψης των σημάτων ελέγχου για το MUE. Η ισχύς σε αυτή την μέθοδο περιορίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

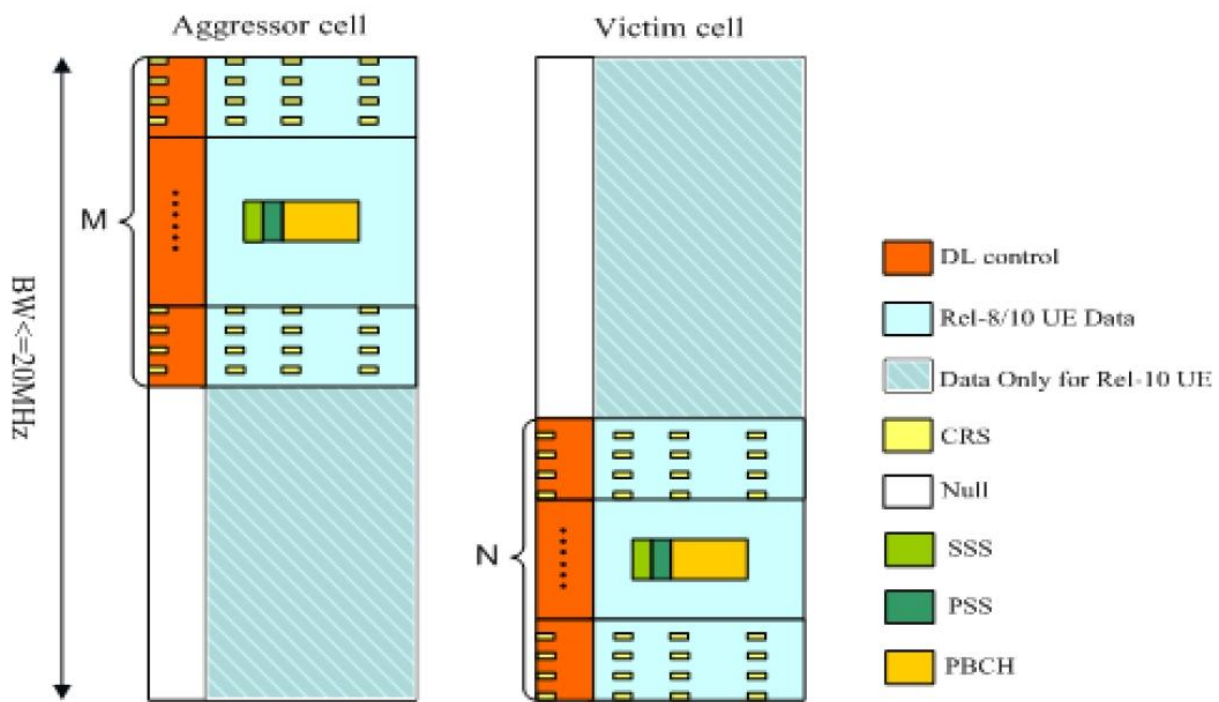
$P_{tx} = \max(\min(aP_{SINR} + b, P_{max}), P_{min})$  με  $P_{SINR}$  την μέτρηση του SINR από το MUE λαμβάνονται υπόψη τις μόνο τις παρεμβολές από το πιο κοντινό femtocell.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι η ισχύς μετάδοσης του HeNB εξασφαλίζει την επίτευξη του SINR για το κοντινότερο MUE που δέχεται παρεμβολές από το femtocells.

### 6.3.2.3 Frequency-domain τεχνικές

Στις τεχνικές αυτές, τα σήματα ελέγχου και αναφοράς για τα MeNBs και τα HeNBs, μεταδίδονται σε διαφορετικές ζώνες, για ορθογωνιότητα στην μετάδοση. Η ανάθεση των ορθογώνιων ζωνών μπορεί να γίνει στατικά ή δυναμικά. Οι MUEs που υπόκεινται σε παρεμβολές μπορεί να εντοπίζονται από τους αντίστοιχους MeNBs τους μέσω των μετρήσεων που αναφέρουν περιοδικά σε αυτούς και οι MeNBs να ενημερώνουν τους HeNBs που προκαλούν τις παρεμβολές αυτές ή μπορούν να εντοπίζονται από τους HeNBs. Σε αυτό το σενάριο, το HeNB που προκαλεί τις παρεμβολές αναφέρεται ως επιτιθέμενη κυψέλη (aggressor cell) και το MeNB, υπο την κάλυψη του οποίου βρίσκονται οι χρήστες που δέχονται τις παρεμβολές, αναφέρεται ως το κυψέλη θύμα (victim cell).

Για τους Release 8 UEs η μετάδοση λαμβάνει χώρα αποκλειστικά στην ζώνη που τους έχει ανατεθεί ενώ για τους Release 10 UEs η μετάδοση μπορεί να γίνει μέσω του Carrier Aggregation με cross-carrier scheduling όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 6.1.2, τα σήματα ελέγχου μεταδίδονται σε διαφορετική ζώνη από αυτά των δεδομένων.



Εικόνα 68: Μετάδοση σε διαφορετικές ζώνες. [12]

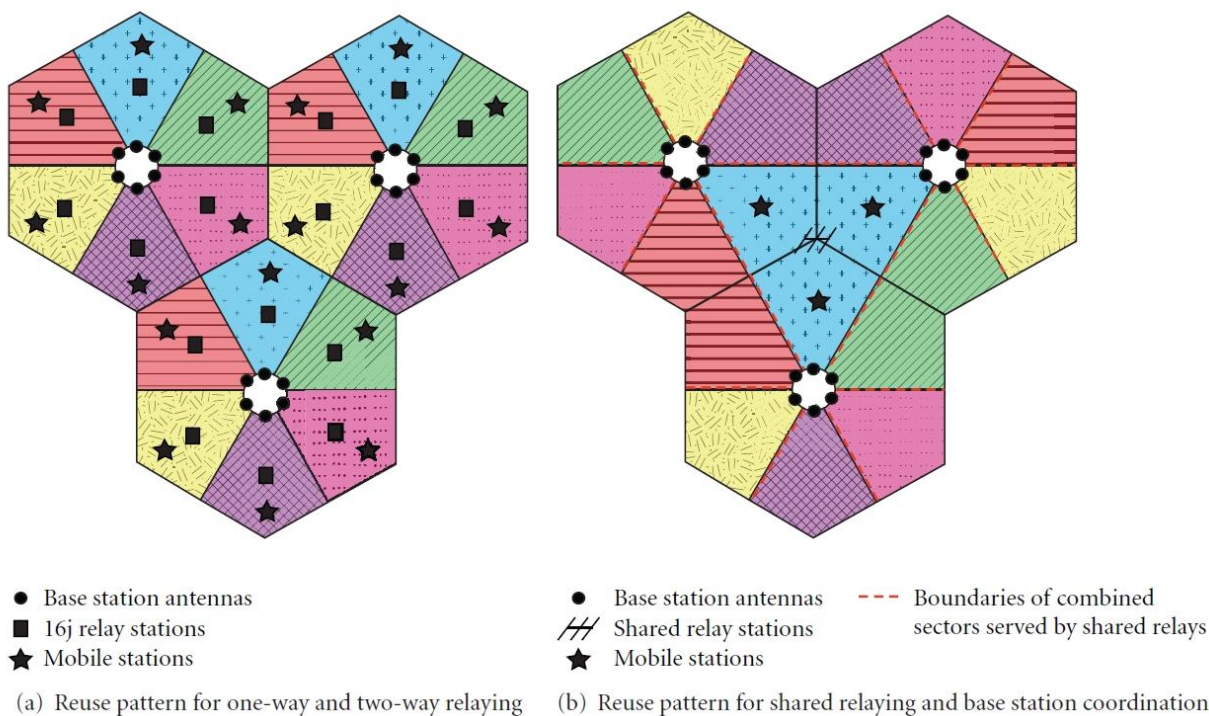
## 7 Μελέτη και εξέλιξη των τεχνικών ICIC

Η επίλυση του προβλήματος των παρεμβολών είναι καίριο για την επιτυχία και διάδοση του LTE προτύπου γι' αυτό και η έρευνα στο θέμα αυτό είναι πλούσια. Κάποιο κομμάτι της έρευνας αναλύει το πρόβλημα σε επίπεδο συστήματος ενώ το υπόλοιπο προτείνει νέους αλγορίθμους ή παραλλαγές των ήδη υπαρχών σε επίπεδο κόμβου. Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια συνολική εικόνα της μέχρι τώρα ερευνητικής δραστηριότητας που περιλαμβάνει μελέτες και προτάσεις για την αντιμετώπιση των παρεμβολών σε LTE και LTE-Advanced συστήματα. Στο επόμενο κεφάλαιο δίνεται μια σύνοψη των τεχνικών που θα αναλυθούν κεφάλαιο αυτό.

### 7.1 Μελέτες και προτάσεις σε επίπεδο συστήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η χρήση των Relay Nodes μπορεί να βελτιώσει την ρυθμαπόδοση και την χωρητικότητα ενός συστήματος με μικρό κόστος, αλλά από την άλλη επιφέρουν και πρόσθετες παρεμβολές. Στο [18] οι συγγραφείς κάνουν μια μελέτη σχετικά με την χρήση half-duplex relays και το όφελός τους σε σύγκριση με την τεχνική του συντονισμού των σταθμών βάσης (base station coordination). Τα RelayNodes που μελετώνται χρησιμοποιούν τις στρατηγικές one-way, two-ways και shared relaying και η σύγκρισή τους γίνεται αναφορικά με την απόδοση του καθενός σε σχέση με αυτή του συντονισμού των σταθμών βάσης. Στόχος είναι η αξιοποίηση των RNs με πολλαπλές κεραίες για την ακύρωση των παρεμβολών στο χωρικό πεδίο.

Η μελέτη γίνεται μέσω προσομοίωσης σε επίπεδο συστήματος. Οι χρήστες είναι σταθεροί σε διάφορα σημεία στην κυψέλη. Το δίκτυο αποτελείται από τουλάχιστον 3 κυψέλες, η κάθε μια αποτελούμενη από 6 sectors, ενώ για την προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί ένα επιπλέον στρώμα από κυψέλες. Ο σταθμός βάσης σε κάθε κυψέλη βρίσκεται στο κέντρο και χρησιμοποιεί έξι κεραίες, μια για κάθε sector. Για την μετάδοση στους sectors χρησιμοποιείται reuse6, οπότε η μετάδοση σε κάθε sector είναι ορθογώνια σε σχέση με τα γειτονικά sectors της ίδια κυψέλης και σε κάθε sector εξυπηρετείται μόνο ένας χρήστης, οπότε το scheduling δεν μας απασχολεί. Η σύγκριση γίνεται στο άθροισμα των ρυθμαποδόσεων των χρηστών ανά sector σε σχέση με αυτό των BS coordination, reuse1 και reuse6.

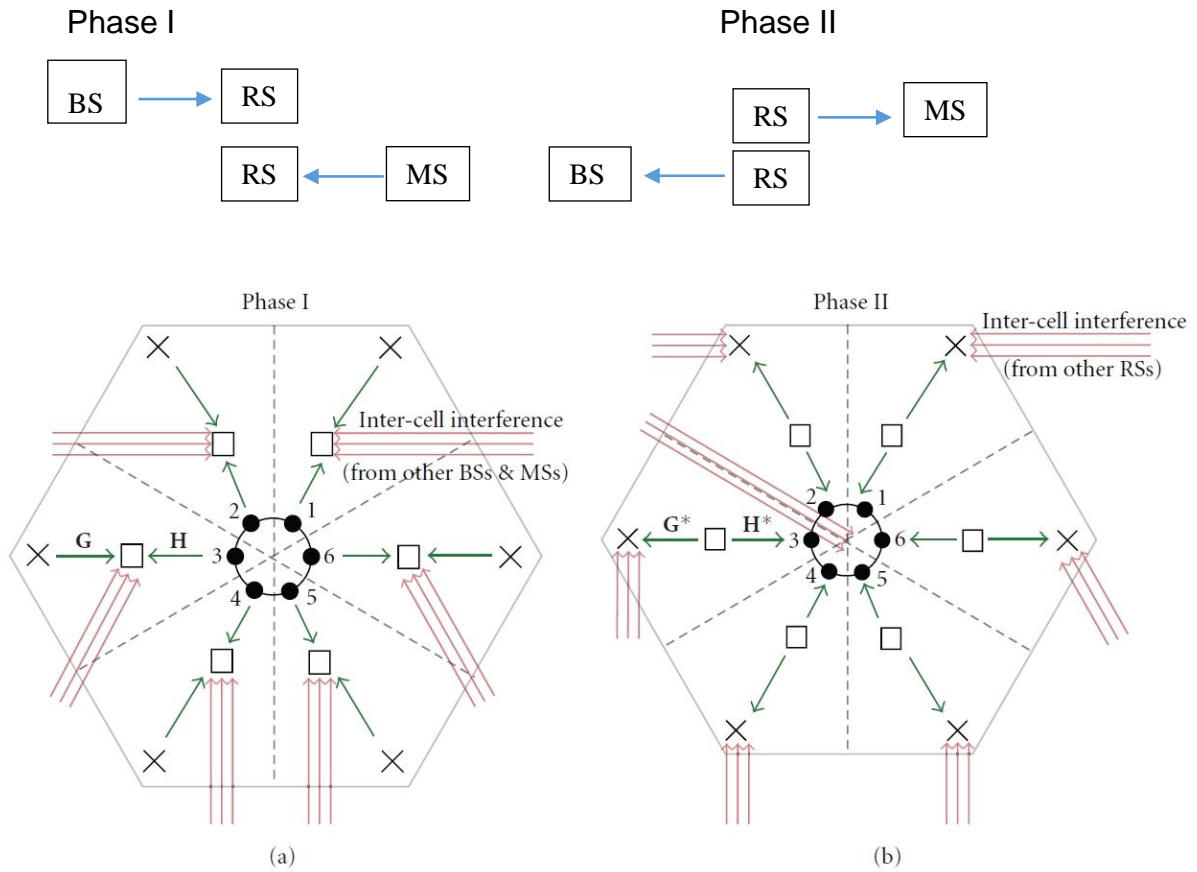


**Εικόνα 69: Εικόνα δικτύου στο one-way & two-way relaying (a) και shared-relaying (b).**

Στο **one-way relaying**, οι RNs διαθέτουν μόνο μια κεραία ανά sector. Εκτελεί decode-and-forward λειτουργία με την μετάδοση να υλοποιείται σε δυο ορθογώνιες φάσεις. Στην πρώτη, το BS μεταδίδει και το RN λαμβάνει και στην δεύτερη το RN μεταδίδει και το τερματικό λαμβάνει. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε επιπλέον κόστος στην χωρητικότητα εξαιτίας των δυο φάσεων για την μετάδοση της ίδιας πληροφορίας. Επιπλέον οι φάσεις αυτές είναι συγχρονισμένες και εκτελούνται ταυτόχρονα σε όλες τις κυψέλες. Η μοντελοποίηση για την χωρητικότητα και την ρυθμαπόδοση καταλήγει ότι η βέλτιστη τακτική είναι η ανάθεση ίδιας χρονικής διάρκειας για τις δύο φάσεις.

Το **two-way relaying** επιχειρεί να μειώσει την καθυστέρηση των half-duplex RNs με το να λειτουργεί σε δυο φάσεις. Στην πρώτη φάση, οι κόμβοι που παράγουν πληροφορία (BS και τερματικά) στέλνουν την πληροφορία στον RN. Οι BSs στην φάση αυτή μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλες τις κεραίες για την αποκωδικοποίηση των ληφθέντων σημάτων. Στην δεύτερη φάση, και μετά την επεξεργασία τους σήματος, το RN προωθεί τα σήματα αναλόγως. Κατά την φάση αυτή, οι κόμβοι μπορούν να ακυρώσουν τις παρεμβολές οι προκάλεσαν οι ίδιοι στην πρώτη φάση. Η παρακάτω εικόνες δίνουν την αναπαράσταση της μετάδοσης στις δύο φάσεις. Οι RNs που χρησιμοποιούνται είναι τύπου amplify-and-forward.





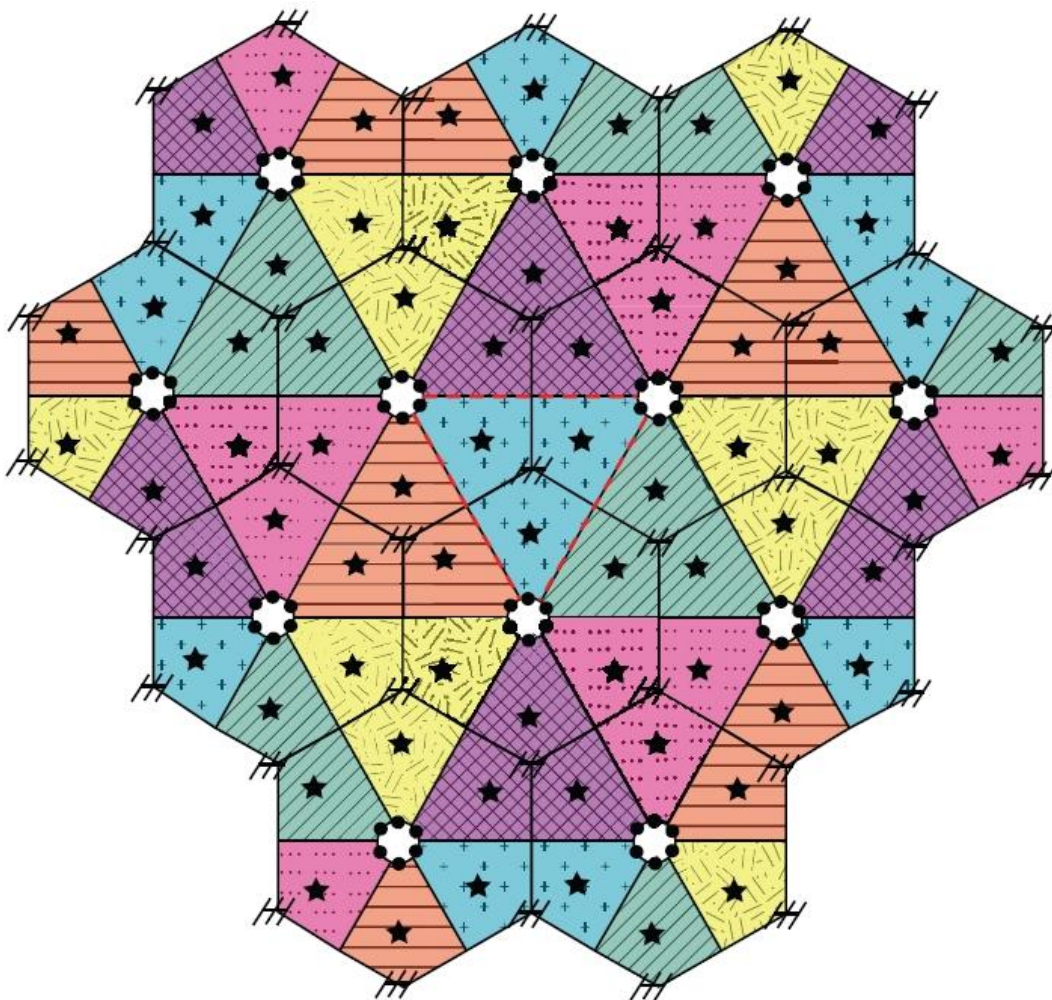
Εικόνα 70: Μετάδοση στο two-way relaying κατά την πρώτη φάση (α) και δεύτερη φάση (β)



Στο **shared relaying**, RNs με πολλαπλές κεραιές τοποθετούνται στις τομές των κυψελών και μοιράζονται από τους αντίστοιχους BSs για την εξυπηρέτηση των χρηστών στους κοινούς sectors. Όλοι οι sectors στους οποίους μεταδίδει ένας shared RN χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, ακόμη και στο reuse6. Η χρήση πολλαπλών κεραιών επιτρέπει την ακύρωση των παρεμβολών στα δύο hops. Στην ουσία ένας shared RN λειτουργεί ως πολλοί συντονισμένοι RNs ακυρώνοντας την ανάγκη για συντονισμό των BSs. Για την μετάδοση στο shared relaying ισχύουν τα ίδια με αυτά στο one-way relaying. Κατά την μετάδοση στην δεύτερη φάση, ο RN αφού αποκωδικοποιήσει το σήμα που έλαβε το επανακωδικοποιεί για το δεύτερο hop. Επίσης, από την μοντελοποίηση προκύπτει ότι η χρονική περίοδος για τα δυο hops βελτιστοποιείται ώστε να εξυπηρετεί την μεγιστοποίηση της αθροιστικής ρυθμαπόδοσης των χρηστών στους κοινούς sectors.

Και στο **Base station coordination** χρησιμοποιείται η ίδια συχνότητα στους κοινούς sectors, όπως και στο shared relaying. Ο συντονισμός των καταμεμημένων BSs σε αυτή τη στρατηγική τους επιτρέπει να μεταδίδουν ως ένας μεγάλος πομποδέκτης, μέσω μιας ενσύρματης διασύνδεσης η οποία παρέχει μετάδοση χωρίς καθυστερήσεις και απώλειες. Αν όλοι οι BSs μπορούν να συντονίσουν τις μεταδόσεις τους, δεν θα υπήρχαν παρεμβολές. Ο συντονισμός όλων των BSs όμως δεν είναι πρακτικός για λόγους πολυπλοκότητας και κόστους οπότε η έρευνα προσανατολίζεται προς τον τοπικό συντονισμό. Σε αυτή την στρατηγική δεν κάνουμε χρήση των RNs.

Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο της παρακάτω εικόνας, και ειδικά η μετάδοση στους τρεις κεντρικούς sectors.



- Base station antennas
- // Shared relay stations
- ★ Mobile stations

Εικόνα 71: Εικόνα του δικτύου για το μοντέλο της μελέτης.

Η μονάδα μέτρησης είναι η αθροιστική ρυθμαπώδοση στους κεντρικούς τρεις sectors, η οποία υπολογίζεται ανάλογα με την εκάστοτε στρατηγική που εφαρμόζεται. Αναφορικά με την ρυθμαπώδοση στο downlink, το BS coordination παρουσίασε την καλύτερη απόδοση (119% βελτίωση σε σχέση με το reuse1) με το shared-relaying να ακολουθεί (60% βελτίωση). Η διαφορά τους έγκειται στο επιπλέον κόστος εξαιτίας των δύο φάσεων μετάδοσης στο shared-relaying. Το one-way παρουσιάζει μικρή βελτίωση σε σχέση με το reuse1 (15%) ενώ το two-way είχε την χειρότερη απόδοση, χειρότερη του reuse1. Στο uplink τα αποτελέσματα είναι παρόμοια, με την διαφορά ότι το κόστος του half-duplex είναι μικρότερο.

Οι συγγραφείς φτάνουν στο αποτέλεσμα ότι αφενός η χρήση των RNs ως σταθμοί ακύρωσης των παρεμβολών δίνει τα ίδια σχεδόν αποτελέσματα με το BSs coordination και αφετέρου ότι το two-way relaying μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση της απόδοσης μόνο όταν τα RNs βρίσκονται πολύ κοντά στα τερματικά. Σε όλες τις μετρήσεις το BS coordination παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση το reuse1 έχει καλύτερη απόδοση από το reuse6.

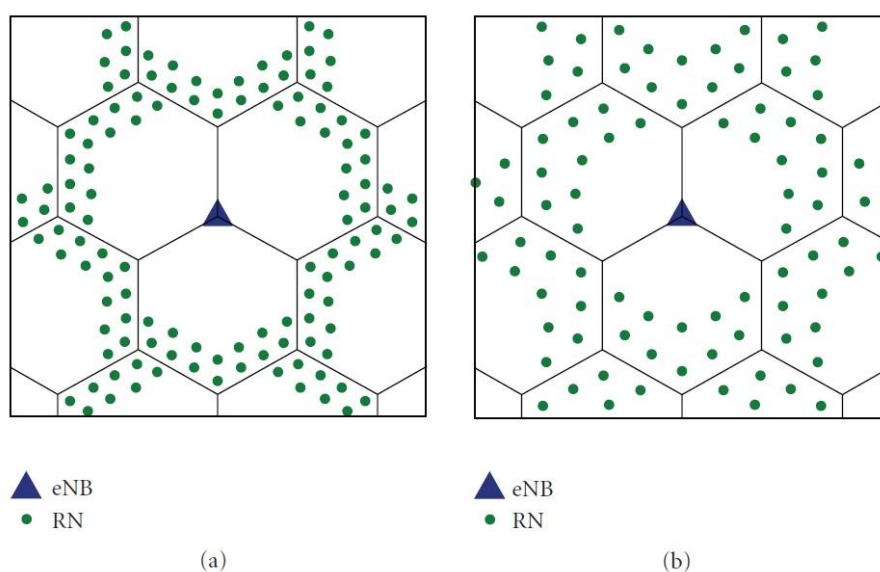
Σε μια άλλη μελέτη στο [19], μέσω προσομοίωσης, μελετάται το κέρδος σε επέκταση της περιοχής κάλυψης και το κέρδος σε χωρητικότητα δικτύου από την χρήση των Type1 και Type1b Relay Nodes, για διάφορα σενάρια μετάδοσης σε σχέση με το κόστος που επιφέρουν. Τα Type1 και Type1b RNs είναι inband RNs, χρησιμοποιούν δικά τους Cell IDs (CIDs), μπορούν να κάνουν διαχείριση των ραδιο πόρων, scheduling και HARQ αναμετάδοση. Η διαφορά τους είναι ότι το Type1b παρέχει πλήρη απομόνωση των κεραιών στο access και direct link. Οι μετρικές που χρησιμοποιούν οι συγγραφείς για την μέτρηση της επέκτασης της περιοχής κάλυψης είναι η αναλογία ανταλλαγής μηνυμάτων ανάμεσα στους BSs και τα RNs υπό την προϋπόθεση ότι οι απαιτήσεις σε κάλυψη είναι σταθερές, δηλώνοντας έτσι ότι μεγαλύτερη αναλογία αντιστοιχεί σε κέρδος στην κάλυψη. Για την χωρητικότητα η μονάδα μέτρησης είναι η μέση ρυθμαπώδοση κυψέλης.

Σε ένα 2-hop σύστημα όπως αυτό που μελετάται, η ρυθμαπώδοση που αντιλαμβάνεται το τερματικό περιορίζεται από την ελάχιστη ρυθμαπώδοση στο access link (RN-UE) και αυτήν στο direct link (eNB-RN). Στα inband RNs το ίδιο κανάλι χρησιμοποιείται για την μετάδοση στο access link και direct link με διαχωρισμό στο πεδίο του χρόνου. Οι χρήστες του RN βιώνουν καλές συνθήκες επικοινωνίας μιας και βρίσκονται κοντά σε αυτό. Αν η ρυθμοί μεταφοράς των χρηστών δεν περιοριστεί, τα πακέτα τους θα ανταγωνίζονται για μετάδοση στο relay link με αποτέλεσμα το relay link να αποτελεί bottleneck. Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη τακτική είναι η ανάθεση ίδιων ρυθμών μετάδοσης στα δύο links. Για τα Type1b RNs η παραπάνω περίπτωση δεν ισχύει λόγω της πλήρους απομόνωσης των κεραιών στο access και direct link. Για τα RNs αυτά η λήψη και μετάδοση μπορεί να συμβεί παράλληλα οπότε η ρυθμαπώδοση περιορίζεται από την ρυθμαπώδοση στο access link. Για την μέτρηση της χωρητικότητας ισχύει η παραδοχή για σταθερή χωρητικότητα. Η χρήση όμως των RNs στα άκρα των κυψελών αυξάνει την χωρητικότητα. Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί με ένα ισοδύναμο σύστημα με χωρητικότητα αυτή της παραδοχής αλλά με αυξημένη απόσταση ανάμεσα στους BSs (Inter-Site Distance, ISD). Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι για την κάλυψη της ίδιας περιοχής χρειάζονται λιγότεροι BSs. Μιας και ο αριθμός των BSs δεν μπορεί να αλλάξει, το κέρδος σε χωρητικότητα μεταφράζεται σε αύξηση του ISD ανάλογα με την πυκνότητα των RNs στα άκρα των κυψελών.

Καθώς η απόδοση ενός συστήματος διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης είναι σημαντικό η μελέτη να γίνει με βάση το σύνολο των διαφορετικών αυτών συνθηκών. Τρία σενάρια εξετάζονται στην μελέτη αυτή. Στο πρώτο σενάριο, τόσο οι RNs όσο και οι UEs βιώνουν πάντα μετάδοση μη οπτικής επαφής (non-line of sight, NLOS). Το σενάριο αυτό είναι πιθανό σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όταν το τερματικό

βρίσκεται στο επίπεδο του δρόμου και οι RNs σε υψηλά σημεία. Το σενάριο αυτό ωστόσο είναι απαισιόδοξο καθώς η περιοχή κάλυψης των RNs είναι μικρή και οι χρήστες που συνδέονται σε αυτό έχουν καλές πιθανότητες για οπτική επαφή. Το δεύτερο σενάριο υποθέτει μικρή πρόσβαση με οπτική και μη επαφή (LOS/NLOS). Το τρίτο σενάριο υιοθετεί ένα πιθανοτικό μοντέλο στο οποίο η μετάδοση ενός UE μπορεί να χαρακτηρίζεται LOS ή NLOS. Αυτό το σενάριο καλύπτει την περίπτωση που το τερματικό έχει οπτική επαφή με το BS ή το RN αλλά και την περίπτωση που σε κάποια μέρη έχει οπτική επαφή ενώ σε άλλα όχι.

Το δίκτυο της προσομοίωσης αποτελείται από 19 κυψέλες των 3sectors και αγνοεί τις παρεμβολές καθώς υποθέτει την χρήση των RNs σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη. Οι RNs τοποθετούνται στο δίκτυο με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν όλα τα κενά στην κάλυψη και να ελαχιστοποιούν τις παρεμβολές στις γειτονικές κυψέλες. Η ακριβής τους τοποθέτηση να εξαρτάται από τις συνθήκες μετάδοσης. Στην Εικόνα 72 παρουσιάζεται ο βέλτιστος τρόπος τοποθέτησης των RNs, αναφορικά με την βελτίωση της κάλυψης, για το σενάριο 1 στο αριστερό μέρος και τα σενάρια 2 και 3 στο δεξιό.



**Εικόνα 72: Βέλτιστη διάταξη των RelayNodes σε επίπεδα (tiers) ανά σενάριο μετάδοσης.**

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι ανάλογα με τα σενάρια μετάδοση χρησιμοποιούνται και διαφορετικό πλήθος RNs ανά επίπεδο (tier) κάλυψης. Το ένα επίπεδο καλύπτει τα κενά κάλυψης στα άκρα ενώ ένα δεύτερο το επεκτείνει επιπλέον χωρίς να αφήνει κενά σε σχέση με το πρώτο. Το πλήθος των επιπέδων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιορίζεται από τις παρεμβολές ανάμεσα στο eNB και το πιο κοντινό σε αυτό επίπεδο από RNs, αν τα επίπεδα αυξάνονται από τα άκρα προς το κέντρο. Το πλήθος των RNs ανά επίπεδο είναι ενδεικτικό της περιοχής κάλυψης ανά RN για το εκάστοτε σενάριο μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας τις ευρέως χρησιμοποιημένες τιμές ISD 500m και 1732m για αστική περιοχή και αγροτική αντίστοιχα, οι συγγραφείς καταλήγουν μετά από δοκιμές ότι ένα επίπεδο από RNs βελτιώνει την κάλυψη κατά 20% για κάθε μια από τις παραπάνω ISD τιμές στο πρώτο σενάριο. Στα σενάρια 2 και 3 η κάλυψη βελτιώνεται κατά 40% λόγω της LOS μετάδοσης, για το σενάριο 2 και ακόμη περισσότερο για το σενάριο 3.

Για την βελτίωση της κάλυψης σε αστικά περιβάλλοντα (ISD 500m), οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι δύο τύποι RNs (Type1 και Type1b) έχουν μικρές διαφορές και ότι η βελτίωση που προσφέρουν διαφέρει πολύ ανά σενάριο μετάδοσης. Συγκεκριμένα, για το σενάριο 3 χρειάζονται λιγότεροι RNs σε σχέση με το σενάριο 2. Για το σενάριο 1, η χρήση 7 Type1 RNs ανά eNB βελτιώνει την κάλυψη κατά 42m ενώ 7 Type1b RNs κατά

54m. Για το σενάριο 2, 4 Type1 RNs βελτιώνουν κατά 92m την κάλυψη, 7 Type1 RNs κατά 154m ενώ 4 Type1b RNs κατά 107m. Τέλος, για το σενάριο 3, 3 Type1 RNs την βελτιώνουν κατά 106m ενώ 3 Type1b RNs κατά 140m.

Για τις μετρήσεις σε αγροτικές περιοχές, η απόδοση των Type1 και Type1b RNs ήταν και πάλι ίδια σχετικά με την βελτίωση της κάλυψης. Και εδώ η απόδοση διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το σενάριο μετάδοσης. Για το σενάριο 1, 7 Type1/Type1b RNs επεκτείνουν την κάλυψη κατά 201μ. Για το σενάριο 2, 5 RNs κατά 414m ενώ για το σενάριο 3, 4 RNs κατά 396m.

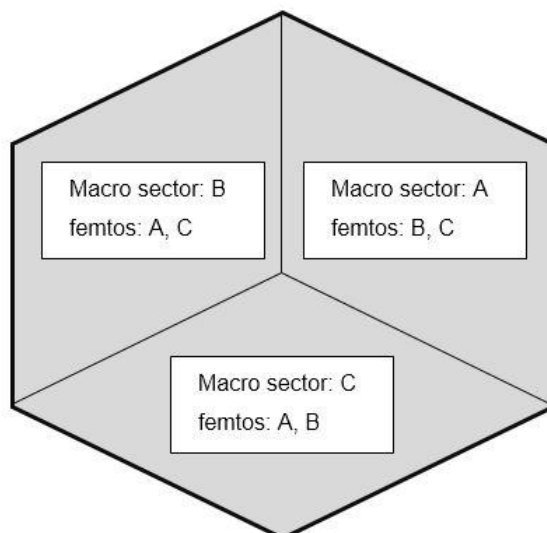
Για την βελτίωση της ρυθμαπόδοσης, σε αστικά περιβάλλοντα οι Type1b RNs έχουν καλύτερα αποτελέσματα από τους Type1, για 7 ή 14 RNs, και αυτό επειδή η απόδοση των Type1 RNs περιορίζεται από την διαίρεση της ρυθμαπόδοσης στο direct και access link. Ειδικά σε υψηλότερες ρυθμαποδόσεις, το direct link περιορίζει την συνολική ρυθμαπόδοση σε σχέση με αυτή που προσφέρει το access link. Το συμπέρασμα είναι ότι οι χρήστες που συνδέονται σε Type1 RNs μπορούν να βιώσουν καλύτερη ρυθμαπόδοση σε σύγκριση με αυτή ενός δικτύου αποτελούμενο μόνο από eNBs. Ωστόσο, μόνο οι Type1b RNs μπορούν να αυξήσουν το πλήθος αυτών των χρηστών αφού για υψηλές ρυθμαποδόσεις δεν έχουν το bottleneck των Type1 RNs. Για τα υπόλοιπα σενάρια ισχύουν λίγο πολύ τα ίδια με τις μετρήσεις για την χωρητικότητα. Η LOS μετάδοση στο σενάριο 2 βελτιώνει την μέση ρυθμαπόδοση ενώ για το σενάριο 3 η βελτίωση σε σχέση με το σενάριο 2 είναι μικρή.

Η απόδοση σε αγροτικές περιοχές είναι ίδια με αυτή σε αστικές. Οι Type1b RNs έχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους Type1 σε υψηλές ρυθμαποδόσεις, με το κέρδος από τους Type1b RNs να είναι σχετικά μικρό. Η διαφορά στην βελτίωση της ρυθμαπόδοσης και σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται από τα σενάρια μετάδοσης, με τα σενάρια 2 και 3 να έχουν καλύτερη βελτίωση σε σχέση με το σενάριο 1 λόγω της LOS μετάδοσης.

## 7.2 Νέες προτάσεις για αλγορίθμους ICIC

Η μελέτη στο [17] επικεντρώνεται στην ακύρωση των femto-to-femto παρεμβολών σε ένα HetNet, στο οποίο υλοποιείται το χείριστο δυνατό σενάριο παρεμβολών ανάμεσα σε ομοκαναλικά femtocells και macrocells. Η τεχνική που προτείνουν είναι δυναμική, καταναμημένη και απαιτεί ελάχιστη επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους.

Στο δίκτυο της μελέτης η κάθε κυψέλη αποτελείται από 3 sectors και η ανάθεση των πόρων γίνεται ως εξής. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης (20MHz), το οποίο αντιστοιχεί σε 100 RBs, χωρίζεται σε τρία μέρη. Σε κάθε sector ανατίθεται ένα από αυτά τα τρία μέρη για τους χρήστες που συνδέονται στο macrocell, ενώ τα femtocells στο sector μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα υπόλοιπα δυο μέρη τους εύρους ζώνης. Με τον παραπάνω τρόπο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, υπάρχουν μέρη του εύρους ζώνης τα οποία είναι κοινά για τα femtocells γειτονικών sectors. Για την ακύρωση των παρεμβολών ανάμεσα στα femtocells οι συγγραφείς προτείνουν την χρήση της τεχνικής εντοπισμού των IDs των femtocells σε μια περιοχή (Femtocell Identification, FID).



**Εικόνα 73: Προτεινόμενη κατανομή εύρους ζώνης ανάμεσα στα macrocells/femtocells**

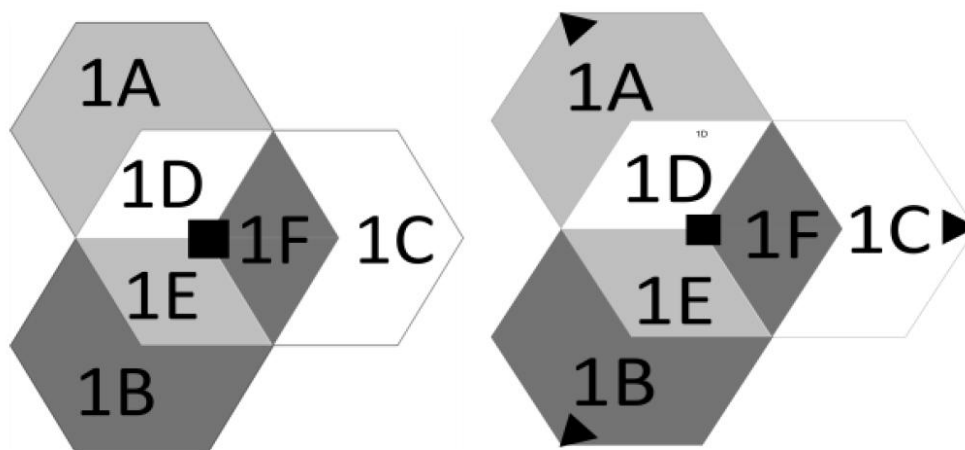
Το κάθε femtocell διαθέτει ένα μοναδικό FID, το οποίο είναι γνωστό στα γειτονικά του femtocells. Τα femtocells στα οποία έχουν ανατεθεί RBs, μεταδίδουν στο κανάλι το FID τους, στις συχνότητες που αντιστοιχούν στα RBs που τους έχουν ανατεθεί και null σύμβολα στις υπόλοιπες συχνότητες. Τα υπόλοιπα femtocells, πριν την ανάθεση RBs, ακροάζονται το κανάλι για τις μεταδόσεις των γειτονικών femtocells και από τα ληφθέντα FIDs εξάγουν την ανάθεση των RBs για κάθε ένα από τα γειτονικά femtocells. Οπότε για την ανάθεσή τους, τα femtocells μπορούν να διαλέξουν από τα ελεύθερα RBs. Ο συνδυασμός FID και ανάθεση είναι μοναδικός για κάθε femtocell. Το FID αποτελείται από μια ακολουθία από  $[+1, -1]$  η οποία παράγεται μέσω τυχαίων πρώτων αριθμών, Hadamard κωδικοποίηση ή δομημένη κωδικοποίηση. Ο εντοπισμός ενός FID από τα ληφθέντα femtocells γίνεται μέσω συσχετισμού του ληφθέντος FID με τα αποθηκευμένα FID patterns, οπότε η πολυπλοκότητα τους σχήματος αυξάνει με το πλήθος των femtocells.

Από τα 100 διαθέσιμα RBs, τα 64 είναι διαθέσιμα για την μετάδοση των femtocells. Για τις μετρήσεις της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν FIDs μήκους 2 RBs, 4 RBs και 8 RBs σε συνδυασμό με τους τρόπους κατασκευής των FIDs όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Η σύγκριση των τρόπων αυτών ως προς την πιθανότητα εντοπισμού των FIDs έδειξε ότι η δομημένη κωδικοποίηση έχει καλύτερη απόδοση καθώς αυξάνει το πλήθος των femtocells σε σχέση με τους υπόλοιπους. Ένα νέο femtocell με τον τρόπο αυτόν μπορεί να εντοπίσει τα FIDs και τις αναθέσεις των γειτονικών του femtocells ακόμη και σε χαμηλά SINR, με την πιθανότητα λάθος εντοπισμού να αυξάνει με το πλήθος των femtocell. Ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τις υπόλοιπες μετρήσεις. Το μήκος των FIDs έχει επίδραση στην πιθανότητα εντοπισμού τους. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερα μήκη για το FID μειώνουν την πιθανότητα λάθος εντοπισμού αλλά από την άλλη μειώνουν και το πλήθος των διαθέσιμων RBs για μετάδοση. Τέλος, οι μετρήσεις σε κανάλι διαλείψεων με μήκος FID 4 RBs έδειξαν ότι για τον σωστό εντοπισμό χρειάζεται καλή καναλική απολαβή η οποία θα μπορούσε να βελτιωθεί με την χρήση πολλαπλών κεραιών.

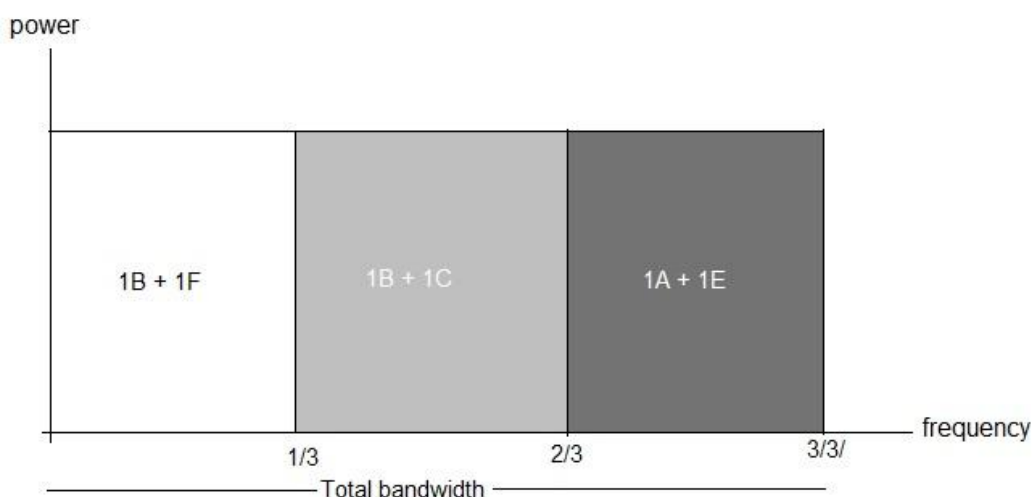
Στο [13] οι συγγραφείς προτείνουν ένα αυτόνομο και δυναμικό ICIC σχήμα σε HetNet αποτελούμενο από macrocells και RelayNodes. Το σχήμα αυτό είναι αυτό-διαχειριζόμενο από την άποψη της δυναμικής και αυτόνομης προσαρμογής στις συνθήκες μετάδοσης προσαρμόζοντας ανάλογα την ανάθεση των πόρων. Στόχος είναι η βελτίωση της φασματικής απόδοσης και του SINR στα άκρα. Τα χαρακτηριστικά του



προτεινόμενου σχήματος είναι ότι κάνει ένα trade off ανάμεσα στη φασματική απόδοση του συστήματος και αυτή στα άκρα και το ότι αντιμετωπίζει τις παρεμβολές χρησιμοποιώντας την έννοια του συνόλου των παρεμβληθέντων γειτόνων (interfering neighbor set). Συγκεκριμένα η ανάθεση των πόρων ανάμεσα στα eNBs και τα RNs γίνεται με ευέλικτο τρόπο και έτσι ώστε όλο το εύρος ζώνης να είναι διαθέσιμο σε κάθε κυψέλη λαμβάνοντας υπόψη ένα threshold σχετικό με το επίπεδο των παρεμβολών. Η απόδοση του σχήματος συγκρίνεται με την αντίστοιχη των reuse1, reuse3 και SFR, με κριτήρια το SINR, την φασματική απόδοση των χρηστών στα άκρα και την φασματική απόδοση τους συστήματος. Οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στο eNB δεν επηρεάζονται από παρεμβολές, και βρίσκονται στην αντίστοιχη μη-κρίσιμη περιοχή (non-critical region). Η περιοχή αυτή αποτελείται από τα μέρη 1D, 1E και 1F στην παρακάτω εικόνα. Αντίστοιχα, οι χρήστες στα άκρα βρίσκονται στην κρίσιμη περιοχή (critical region) η οποία αποτελείται από τα μέρη 1A, 1B και 1C και δέχονται παρεμβολές. Η κατηγοριοποίησή τους στις παραπάνω κατηγορίες γίνεται με βάση το SINR, θεωρώντας ένα SINR threshold ως κατώτερη τιμή, το οποίο αποτελεί παράμετρο σχεδιασμού. Τέλος, οι χρήστες είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι σε κάθε sector, σε τυχαίες θέσεις.



Εικόνα 74: Κατανομή εύρους ζώνης στο προτεινόμενο σχήμα στα critical και non-critical regions



Εικόνα 75: Διάρθρωση εύρους ζώνης σε τρία ίσα και ορθογώνια μέρη

Το σύστημα υπό μελέτη αποτελείται από 3sector κυψέλες με ένα RN σε κάθε sector, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, με το eNB να βρίσκεται στο κέντρο και τα RNs στα άκρα της κυψέλης. Η διαχείριση του εύρους ζώνης στα αντίστοιχα regions γίνεται



μέσω ενός τροποποιημένου FFR σχήματος. Στο σχήμα αυτό το εύρος ζώνης διαιρείται σε τρία ίσα και ορθογώνια μέρη. Εφαρμόζεται reuse3 και για τις δυο κατηγορίες χρηστών οπότε σε κάθε sector υπάρχει ένα critical και ένα non-critical region όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες. Με τον τρόπο αυτό η ανάθεση για κάθε sector αποτελείται από δύο σύνολα από RBs τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά, ασύνδετα (disjoint) κομμάτια του εύρους ζώνης. Ωστόσο, παρέχει την ευελιξία της χρήσης των πόρων από οποιονδήποτε και οπουδήποτε αρκεί οι παρεμβολές από την χρήση των αντίστοιχων RBs να διατηρείται σε ένα ελάχιστο βαθμό.

Η αντιμετώπιση των παρεμβολών γίνεται μέσω του συνόλου των sectors που προκαλούν παρεμβολές (interfering neighbor set). Το σύνολο αυτό αναφέρεται στα regions από τα οποία προέρχονται οι παρεμβολές για μια δεδομένη κυψέλη όταν χρησιμοποιούμε RNs στην κυψέλη αυτή. Ορίζεται ως ένας πίνακας γειτνίασης  $N = \{n_{i,j} | n_{i,j} \in \{0,1\}\}$  με  $n_{i,j} = 1$  όταν η περιοχές  $i, j$  δέχονται παρεμβολές και  $n_{i,j} = 0$  όταν δεν δέχονται παρεμβολές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια συχνότητα στις περιοχές αυτές. Το σχήμα βασίζεται σε δυο αρχές, οι χρήστες στο κέντρο και τα άκρα αντιμετωπίζονται διαφορετικά όσον αφορά την αντιμετώπιση των παρεμβολών, μιας και οι δεύτεροι επηρεάζονται περισσότερο, και η χρήση της ίδιας συχνότητας επιτρέπεται μέσω τοπικού συντονισμού των αντίστοιχων κόμβων όταν δεν ξεπερνιέται το threshold.

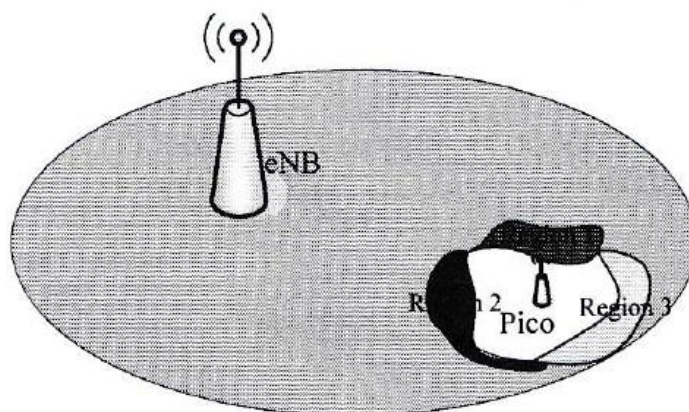
Θεωρώντας το παραπάνω σύστημα, ομοιόμορφα κατανεμημένους χρήστες και δύο δυνατές τιμές για την ισχύ μετάδοσης, την υψηλή για τους χρήστες στα άκρα και χαμηλή για αυτούς στο κέντρο, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα. Συγκεκριμένα, το SINR ήταν καλύτερο για το προτεινόμενο σχήμα σε σχέση με τα reuse1, reuse3 και SFR. Το πλήθος των χρηστών για τους οποίους βελτιώνεται το SINR είναι υψηλότερο για το προτεινόμενο σχήμα όταν χρησιμοποιούνται RNs ενώ όταν δεν χρησιμοποιούνται, έχει την ίδια απόδοση με το SFR. Ομοίως, η φασματική απόδοση είναι καλύτερη για το προτεινόμενο σχήμα ενώ η φασματική απόδοση του συστήματος βελτιώνεται με το SFR κυρίως λόγω της δυναμικής προσαρμογής της ισχύος μετάδοσης. Για το προτεινόμενο σχήμα χωρίς RNs, η φασματική απόδοση συστήματος είναι υψηλότερη σε σχέση με τα reuse1 και reuse3 αλλά χαμηλότερη του SFR εξαιτίας των δυο τιμών για την ισχύ μετάδοσης. Για το προτεινόμενο σχήμα με χρήση RNs η φασματική απόδοση συστήματος είναι καλύτερη από όλα τα άλλα σχήματα. Τέλος, περιορισμοί για το σχήμα αυτό αποτελούν το γεγονός ότι έχει αυξημένο κόστος στην επικοινωνία εξαιτίας της μετάδοσης των interference sets το οποίο επιπλέον προσθέτει πολυπλοκότητα στα RNs και το γεγονός ότι δεν μπορεί να αξιοποιήσει το multiuser diversity.

Η μελέτη στο [20] προσανατολίζεται περισσότερο προς τον εντοπισμό του κόμβου που προκαλεί τις παρεμβολές και την στοχευμένη αντιμετώπισή τους. Συγκεκριμένα υποθέτει κάποιο υπάρχων σχήμα ICIC σε ένα HetNet αποτελούμενο από οποιουδήποτε τύπου microcell (femtocell, RelayNode κτλ.), το οποίο βελτιώνεται με το να γίνει γνωστός ο κόμβος που προκαλεί τις παρεμβολές. Τα άκρα των περιοχών κάλυψης των microcells διαιρούνται σε επιμέρους μικρότερες περιοχές με βάση την εξασθένιση ή γεωμετρία. Όταν το όριο των αποδεκτών παρεμβολών σε μια από τις επιμέρους περιοχές ξεπεραστεί, η κυψέλη υπηρεσίας ενημερώνει όλες τις γειτονικές κυψέλες με τις περιοχές που δέχονται έντονες παρεμβολές και τα RBs που χρησιμοποιούν. Με τον τρόπο αυτό κάθε γειτονική κυψέλη μπορεί να υπολογίσει αν αποτελεί την αιτία των παρεμβολών και να ρυθμίσει αναλόγως την μετάδοσή της. Προϋπόθεση είναι ότι όλες οι κυψέλες έχουν ενημερωθεί για την ύπαρξη των επιμέρους περιοχών.

Το LTE διαθέτει ήδη κατάλληλα μηνύματα για την ενημέρωση του επιπέδου των παρεμβολών, μέσω του RNTP για παράδειγμα. Στην πληροφορία αυτή όμως δεν περιλαμβάνεται η πηγή των παρεμβολών. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με το

προτεινόμενο σχήμα και οι γειτονικές κυψέλες μπορούν να διασταυρώσουν τα χρησιμοποιούμενα RBs με το scheduling τους στην περιοχή που έχει υποδειχθεί ότι δέχεται παρεμβολές. Συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι η ακρίβεια του ICIC σχήματος βελτιώνεται ανάλογα με το πλήθος των επιμέρους περιοχών.

Η προσομοίωση κατά την οποία ελέγχθηκε η βελτίωση της ρυθμαπόδοσης των χρηστών στα άκρα έδειξε βελτίωση της τάξης του 20% και σχεδόν 28% για την μέση ρυθμαπόδοση τους συστήματος, σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα.



**Εικόνα 76: Διαίρεση της περιοχής κάλυψης ενός microcell σε μικρότερες, επιμέρους περιοχές.**

Στο [21] οι συγγραφείς μελετούν ένα δυναμικό και καταναμημένο ICIC σχήμα, παρόμοιο με το SFR, με στόχο την βελτίωση της ρυθμαπόδοσης στα άκρα της κυψέλης. Δυο σημαντικά χαρακτηριστικά του αλγορίθμου είναι ότι αφενός η ανάθεση ενός καναλιού σε ένα χρήστη γίνεται ώστε το κανάλι να ανατίθεται κάθε φορά στον χρήστη με τις καλύτερες συνθήκες μετάδοσης και αφετέρου, η αποφυγή συγκρούσεων λόγω μετάδοσης στο ίδιο κανάλι. Για την εξάλειψη των conflicts, χρησιμοποιείται το σύνολο των σταθμών βάσης με τους οποίους υπάρχουν παρεμβολές εξαιτίας της μετάδοσης στο ίδιο κανάλι (interference set). Στην ουσία το καταναμημένο πρόβλημα της ανάθεσης πόρων και αντιμετώπισης των παρεμβολών μετατρέπεται σε ένα τοπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο ο σταθμός βάσης γνωρίζει τις συνθήκες μετάδοσης των χρηστών του και με βάση αυτές κάνει την ανάθεση των πόρων. Η αντιμετώπιση των παρεμβολών γίνεται με την ανταλλαγή μηνυμάτων σχετικά με το παραπάνω αναφερθέν interference set μέσω μιας διεπαφής όπως η X2.

Το σύστημα της μελέτης αποτελείται από  $L$  κυψέλες με την καθεμία να εξυπηρετεί  $K$  χρήστες. Θεωρεί συγκεκριμένη συνολική ισχύ μετάδοσης και συγκεκριμένο πλήθος καναλιών για κάθε κυψέλη. Επιπλέον, οι χρήστες χωρίζονται με βάση την απόστασή τους από τον σταθμό βάσης σε αυτούς που βρίσκονται στο κέντρο και αυτούς που βρίσκονται στα άκρα. Για την υλοποίηση του παραπάνω χρησιμοποιείται ένα threshold για την απόσταση.

Ο αλγόριθμος εκτελείται σειριακά στις κυψέλες του δικτύου με τελευταία την κυψέλη αναφοράς. Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

**Πίνακας 4: Βήματα αλγορίθμου για την παραλλαγή του SFR σχήματος. [21]**

Βήμα	Περιγραφή
1	<b>Αρχικοποίηση:</b> αρχικοποιούνται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται όπως το σύνολο των διαθέσιμων καναλιών σε κάθε κυψέλη, το πλήθος των χρηστών σε αυτές, το threshold απόστασης και η δημιουργία των συνόλων χρηστών στα

	άκρα και το κέντρο.
2	<b>Ανάθεση πόρων:</b> βρίσκει το κανάλι που χρησιμοποιείται λιγότερο από τους γειτονικούς σταθμούς βάσης και τον χρήστη στα άκρα για τον οποίο η μετάδοση στο κανάλι αυτό είναι η βέλτιστη και του αναθέτει το κανάλι αυτό. Το επιλεγμένο κανάλι και χρήστης αφαιρούνται από τα αντίστοιχα σύνολα και η διαδικασία συνεχίζει μέχρι να έχουν εξυπηρετηθεί όλοι οι χρήστες στα άκρα. Οι χρήστες στο κέντρο, όπως συμπεραίνεται χρησιμοποιούν τα υπόλοιπα κανάλια. Επομένως όλο το εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο σε όλους τους χρήστες.
3	<b>Ισχύς μετάδοσης:</b> όλοι οι χρήστες στα άκρα ανατίθενται την ίδια ισχύ μετάδοσης με βάση την συνολική ισχύ μετάδοσης.

Το σύστημα της προσομοίωσης αποτελείται από τρεις εξάγωνες κυψέλες με το threshold της απόστασης στα 2/3 της απόστασης (500m). Τα σενάρια που εξετάστηκαν ήταν ένα στο οποίο κάθε κυψέλη έχει τον ίδιο αριθμό ομοιόμορφα κατανεμημένων χρηστών και ένα στο οποίο οι γειτονικές κυψέλες έχουν σημαντικά μικρότερο φόρτο δικτύου από την κυψέλη αναφοράς. Τα σχήματα με τα οποία έγινε σύγκριση ήταν τα reuse1, reuse3, SFR και PFR και οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ρυθμαπόδοση και το fairness.

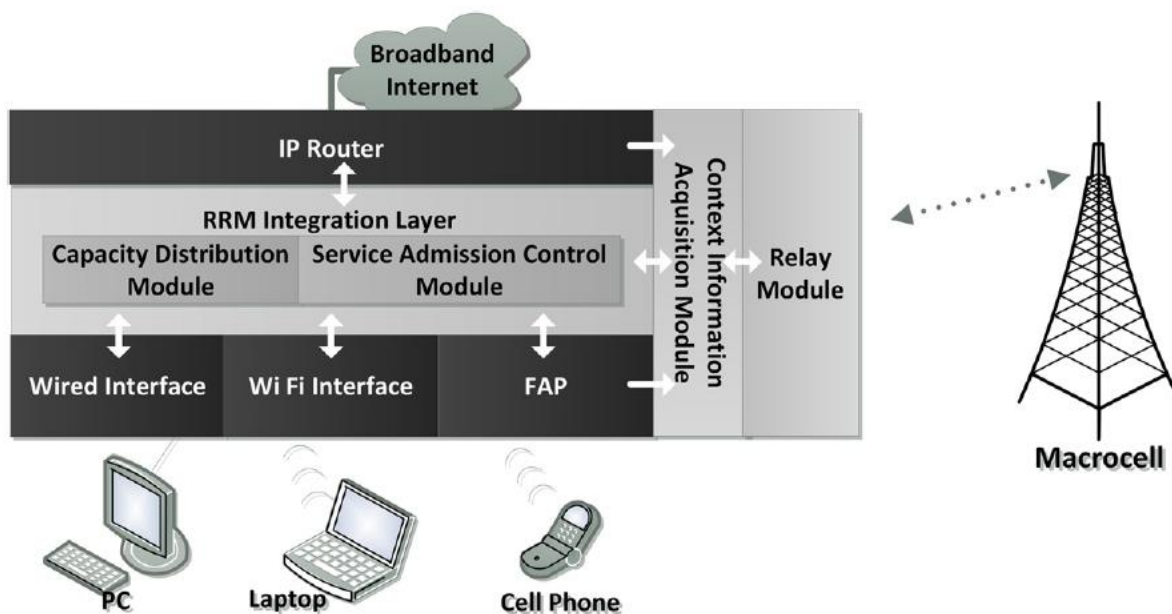
Όσον αφορά την ρυθμαπόδοση ανάλογα με το πλήθος των χρηστών, το προτεινόμενο σχήμα και το SFR έχουν παρόμοια συμπεριφορά, αφού και στα δυο σχήματα όλο το εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο σε όλους τους χρήστες, με το προτεινόμενο σχήμα να έχει καλύτερη απόδοση. Τα reuse3 και PFR από την άλλη έχουν επίσης παρόμοια συμπεριφορά η οποία διαφοροποιείται από τα SFR και το προτεινόμενο σχήμα. Στα σχήματα αυτά, μετά από ένα πλήθος χρηστών η ρυθμαπόδοση σταματάει να αυξάνει και αυτό οφείλεται στο ότι έχει εξαντληθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης στα άκρα. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στο σενάριο του ασύμμετρου φόρτου δικτύου, με την διαφορά της μεγαλύτερης ρυθμαπόδοσης λόγω των μικρότερων παρεμβολών.

Αναφορικά με το fairness, χρησιμοποιώντας το Jain's fairness index, αυτό βελτιώνεται όσο το SINR μεγαλώνει αφού μεγαλύτερο SINR σημαίνει λιγότερες παρεμβολές και πιο δίκαιες μεταδόσεις. Στα reuse1 και SFR η επίδραση των παρεμβολών είναι σημαντική για το fairness, με το SFR να έχει καλύτερη συμπεριφορά από το reuse1 λόγω της αντιμετώπισης των παρεμβολών στα άκρα. Το ίδιο συμβαίνει και με τα reuse3 και PFR αλλά με μικρότερη απόδοση λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης. Το προτεινόμενο σχήμα είχε καλύτερη απόδοση από όλα τα συγκρινόμενα σχήματα.

Στο [22] οι συγγραφείς προτείνουν ένα framework για την αντιμετώπιση των βασικών προβλημάτων που προκύπτουν από την χρήση των femtocells σε ένα HetNet. Αν και τα femtocells είναι μια οικονομική λύση για την βελτίωση του δικτύου εισάγουν και μια σειρά προβλημάτων. Ένα από αυτά είναι η δυσκολία διατήρησης των QoS απαιτήσεων σε ένα IP δίκτυο. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, η έλλειψη ενός κεντρικού κόμβου αποδοχής συνδέσεων (Service Admission Control, SAC) μπορεί να οδηγήσει μεγάλο πλήθος χρηστών να συνδεθούν στα femtocells. Η χωρητικότητά τους μπορεί να ποικίλει στο χρόνο και αυτό έχει αντίκτυπο στο ήδη περιορισμένο εύρος ζώνης στη backhaul σύνδεσή τους με τον σταθμό βάσης. Τα femtocells προορίζονται για οικιακή χρήση οπότε πιθανώς η backhaul σύνδεση να χρησιμοποιείται ήδη και από άλλες τεχνολογίες, ασύρματες ή μη. Τέλος, η ίδια η ποιότητα της backhaul σύνδεσης δεν είναι αξιόπιστη καθώς μπορεί να υποστεί μεταβολές από τον ISP. Για τους παραπάνω λόγους η αξιοπιστία των femtocells στην παροχή των απαραίτητων QoS μπορεί να υποβαθμιστεί σημαντικά. Μια εύκολη και οικονομική λύση είναι η λειτουργία τους σε Closed

Subscriber Group για να περιορίσει τον αριθμό των συνδεδεμένων χρηστών αλλά με αυτό έχει αντίκτυπο στις παρεμβολές με τον σταθμό βάσης. Για την αντιμετώπισή τους απαιτείται η μείωση της ισχύος μετάδοσης των χρηστών που συνδέονται στον σταθμό βάσης. Το προτεινόμενο framework αντιμετωπίζει τις παρεμβολές στο uplink του παραπάνω σεναρίου. Συγκεκριμένα αποτελεί ένα framework ενημερότητας περιεχομένου (context-aware) για την αποδοτική ενσωμάτωση (Context-Aware Femtocell Integration, CA-FEI) των femtocells σε ένα IP δίκτυο. Παρέχει έλεγχο των συνδέσεων στο femtocells και διαχείριση του διαμοιρασμού της backhaul σύνδεσης με προϋπάρχοντα δίκτυα. Η αντιμετώπιση των παρεμβολών στο framework χρησιμοποιεί το femtocell ως RelayNode όταν αυτό είναι δυνατό.

Το προτεινόμενο framework δεν απαιτεί αλλαγές στα υπάρχοντα IP δίκτυα και μπορεί να υλοποιηθεί ως μια ενοποιημένη IP Router/Femtocell Access Point (FAP) συσκευή με ένα πρόσθετο module για την Decode-and-forward λειτουργία όταν θα λειτουργεί ως RelayNode. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται μια αναπαράσταση του CA-FEI framework.

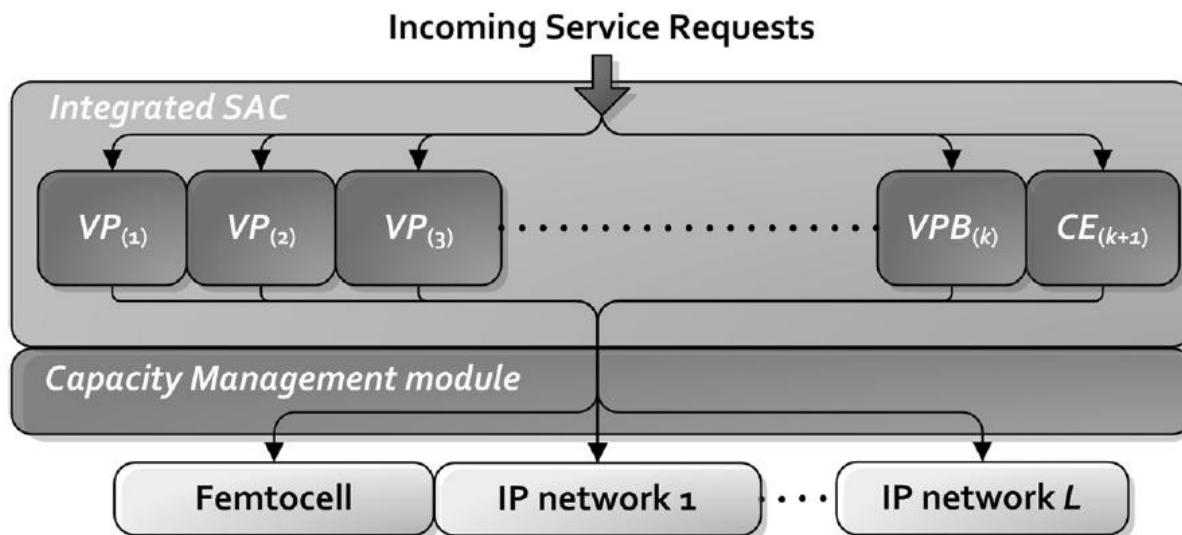


Εικόνα 77: Αρχιτεκτονική προτεινόμενου framework.

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, το framework αποτελείται από τα modules του στρώματος ενσωμάτωσης με την διαχείριση των ράδιο-πόρων (RRM Integration Layer), το module για τον διαμοιρασμό της χωρητικότητας (Capacity Distribution Module) και το module για την αποδοχή συνδέσεων (Service Admission Control Module), την παροχή πληροφορίας για το είδος της μετάδοσης στο δίκτυο (Context Acquisition Information Module) και το module για την αντιμετώπιση των παρεμβολών (Decode-and-Forward Module). Το RRM Integration Layer λειτουργεί υπό την προϋπόθεση χρήστης μιας κοινής, εικονικής διεπαφής δικτύου από όλες τις τεχνολογίες που μοιράζονται την backhaul σύνδεση. Στο στρώμα αυτό γίνεται διαμοιρασμός της υπάρχουσας χωρητικότητας και προσαρμογή των αναθέσεων περιοδικά ανάλογα με τον φόρτο δικτύου. Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι το module για την αποδοχή συνδέσεων αντιμετωπίζει όλες τις συνδέσεις με τον ίδιο τρόπο, ανεξαρτήτως αν προέρχονται από το FAP ή όχι.

**Service Admission Control (SAC) module:** ορίζει κλάσεις που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά μιας κατηγορίας μετάδοσης (πχ το streaming) και χωρίζει την χωρητικότητα της backhaul σύνδεσης σε ισάριθμα μέρη (virtual partitions), συν ένα επιπλέον partition το οποίο χρειάζεται για την περιοδική προσαρμογή των υπολοίπων partitions (capacity exchange partition, CE). Το CE partition λειτουργεί ως κοινό pool

από το οποίο δεσμεύεται πόροι για τα υπόλοιπα partitions. Συγκεκριμένα, μια νέα υπηρεσία μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα αν το QoS της μπορεί να ικανοποιηθεί από την υπάρχουσα χωρητικότητα. Σε αυτή την περίπτωση οι αντίστοιχοι πόροι αφαιρούνται από το CE partition και ανατίθενται στο partition που αντιστοιχεί στην κλάση της υπηρεσίας αυτής. Οι χωρητικότητες των partitions προσαρμόζονται περιοδικά. Αν η χωρητικότητα ενός partition δεν χρησιμοποιείται πλήρως, η διαφορά επιστρέφεται στο CE partition.



Εικόνα 78: Αντιστοίχιση πραγματικών υπηρεσιών σε εικονικές αναθέσεις χωρητικότητας (virtual partitions)

**Capacity Management (CAM) module:** αποτελεί ένα ενδιάμεσο στρώμα ανάμεσα στην πραγματική χωρητικότητα της backhaul σύνδεσης με αυτές των virtual partition. Για κάθε virtual partition αντιστοιχεί την εικονική του χωρητικότητα στην πραγματική. Είναι δυνατόν να έχουν δεσμευτεί πόροι από ένα virtual partition αλλά να μην χρησιμοποιούνται. Σε αυτή την περίπτωση το CAM μπορεί να τους διαθέσει σε μια άλλη υπηρεσία στην οποία μπορούν να αξιοποιηθούν.

**Context Acquisition Information Module, CIAM) module:** Παρέχει πληροφορία για το είδος της μετάδοσης, η οποία είναι απαραίτητη για τον διαμοιρασμό της χωρητικότητας και την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Συλλέγει δεδομένα χαμηλού επιπέδου από το IP Router (φόρτος δικτύου, χωρητικότητα backhaul σύνδεσης) και τα μετατρέπει σε δεδομένα υψηλού επιπέδου (context) τα οποία αποτελούν είσοδο στα αντίστοιχα modules για τον διαμοιρασμό χωρητικότητας και αντιμετώπιση παρεμβολών. Από το module αυτό ενεργοποιείται η αντιμετώπιση των παρεμβολών.

**Decode-and-forward module:** Η κύρια πηγή παρεμβολών στο femtocell αποτελούν οι χρήστες του σταθμού βάσης που βρίσκονται κοντά στο femtocell. Τα femtocells που δεν έχουν συνδεδεμένους χρήστες μπορούν να λειτουργήσουν ως RelayNodes για τους χρήστες του σταθμού βάσης. Με αυτόν τον τρόπο μειώνουν τις παρεμβολές στα γειτονικά femtocells το οποίο βελτιώνει το SINR των χρηστών του. Χρησιμοποιεί μια επιπλέον κεραία για ασύρματη επικοινωνία με τον σταθμό βάσης, ανεξαρτήτως της backhaul σύνδεσης του femtocell. Το κανάλι αυτό χρησιμοποιείται από τους χρήστες του σταθμού βάσης όταν το femtocell λειτουργεί ως RN, για την αποδέσμευση της backhaul σύνδεσης η οποία θα χρησιμοποιείται από τους χρήστες του femtocell. Η αντιμετώπιση των παρεμβολών λαμβάνει χώρα στα δυο hops της επικοινωνίας. Στο πρώτο hop οι χρήστες του σταθμού βάσης θα βρίσκονται κοντά στο femtocell οπότε κατά την μετάβασή τους σε αυτό η επικοινωνία θα απαιτεί μικρή ισχύ μετάδοσης. Στο δεύτερο hop η επικοινωνία με του femtocell με τον σταθμό βάσης χρησιμοποιεί την

επιπλέον κεραία η οποία θα έχει καλές πιθανότητες για LOS μετάδοση αν τοποθετείται στην οροφή των κτηρίων οπότε και θα απαιτεί μικρότερη ισχύ μετάδοσης.

Η ικανότητα του RRM στρώματος να προσαρμόζεται συνεχώς στις πραγματικές συνθήκες της μετάδοσης αξιολογήθηκε σε σύγκριση με το Hybrid Partitioning Scheme (HPS) μέσω προσομοίωσης. Στο σχήμα αυτό η χωρητικότητα διαιρείται σε ένα πλήθος από partitions με ένα κομμάτι της να λειτουργεί ως Common pool για όλα τα partitions. Οι συνθήκες μετάδοσης είναι αυτές που συντελούν το χειρίστο σενάριο μετάδοσης με τις υπηρεσίες να αποτελούνται αποκλειστικά από delay sensitive υπηρεσίες (streaming, VoIP κτλ.). Υπό μεγάλο φόρτο δικτύου το HPS δείχνει ανεπαρκές για την αξιοποίηση της χωρητικότητας. Το CA-FEI από την άλλη κάνει καλύτερη διαχείριση και διατηρεί χαμηλή πιθανότητα φραγής υπηρεσιών εξαιτίας ανεπαρκούς χωρητικότητας.

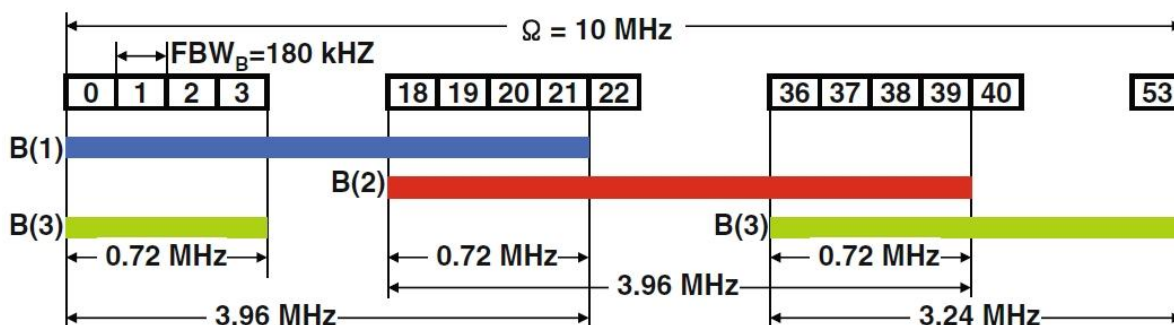
Η απόδοση στην αντιμετώπιση των παρεμβολών αξιολογήθηκε επίσης μέσω προσομοίωσης. Το σενάριο μετάδοσης περιλαμβάνει ένα σταθμό βάσης τοποθετημένο σε αστικό περιβάλλον με ένα μεταβλητό πλήθος από femtocells, τα οποία τοποθετούνται ομοιογενώς στην περιοχή κάλυψης του σταθμού βάσης. Οι χρήστες τοποθετούνται επίσης ομοιογενώς και υποθέτουμε NLOS μετάδοση για τους χρήστες και LOS μετάδοση για την επικοινωνία femtocell-σταθμός βάσης. Τα κριτήρια της αξιολόγησης ήταν το ποσοστό μείωσης της ισχύος μετάδοσης των χρηστών του σταθμού βάσης και οι ρυθμοί μετάδοσης που πέτυχαν. Το σύστημα αναφοράς ήταν ένα δίκτυο με CSG femtocells στα οποία δεν υπάρχει η δυνατότητα συνεργασίας. Οι παρεμβολές μειώνονται, οπότε και οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνονται, όταν για τους χρήστες που συνδέονται στον σταθμό βάσης υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές για μετάδοση, για παράδειγμα μέσω των femtocells. Όταν ο ρυθμός μετάδοσης για έναν τέτοιο χρήστη είναι καλύτερος διαμέσου του femtocell, θα επιλέξει αυτό για την μετάδοση. Στην ακραία περίπτωση της 100% διαθεσιμότητας των femtocells ο ρυθμός μετάδοσης βελτιώνεται κατά 26% ενώ για το πιο ρεαλιστικό σενάριο της 30-50% διαθεσιμότητας βελτιώνεται κατά 10-16%.

Στο [23] προτείνεται ένα ICIC σχήμα στο οποίο η περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης χωρίζεται σε μικρότερες επιμέρους περιοχές και η ανάθεση πόρων γίνεται ανάλογα με την περιοχή και τις παρεμβολές της. Στο σχήμα αυτό ακολουθείται η προσέγγιση των ήδη υπάρχοντων ICIC σχημάτων, περισσότερο εύρος ζώνης στο κέντρο της κυψέλης με χαμηλή ισχύ μετάδοσης και λιγότερο εύρος ζώνης στα άκρα με υψηλότερη ισχύ μετάδοσης.

Στο σχήμα αυτό ορίζεται ένα σύνολο το οποίο περιέχει το εύρος ζώνης για κάθε σταθμό βάσης. Το σύνολο αυτό μεταδίδεται στους γειτονικούς σταθμούς μέσω της X2 διεπαφής ώστε όλοι οι σταθμοί να γνωρίζουν τις αναθέσεις των υπολοίπων. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης ταξινομείται σύμφωνα με την αύξουσα σειρά των RBs σε αυτό και ορίζονται τρία ίσα μέρη του, ομοίως με reuse3 αλλά όχι ορθογώνια. Για καθένα από τα τρία μέρη ορίζονται το RB από το οποίο ξεκινάει το εύρος ζώνης και το RB στο οποίο τελειώνει. Αν το RB στο οποίο τελειώνει το εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από το τελευταίο RB τους συνολικού εύρους ζώνης η ανάθεση συνεχίζει από το τελευταίο μέχρι το RB για το οποίο ισχύει  $End\_RB \bmod (maxRB)$ . Τα μέρη αυτά έχουν κοινά κανάλια ανά δυο αλλά όχι και στα τρία μέρη, δηλαδή δεν έχουμε reuse1. Στην Εικόνα 79 φαίνεται ο τρόπος διαχωρισμού του εύρους ζώνης.



- eNB1 → SB<sub>1</sub>=0, EB<sub>1</sub>=21
- eNB2 → SB<sub>1</sub>=18, EB<sub>1</sub>=39
- eNB3 → SB<sub>1</sub>=36, EB<sub>1</sub>=57 (EB<sub>1</sub>=3)

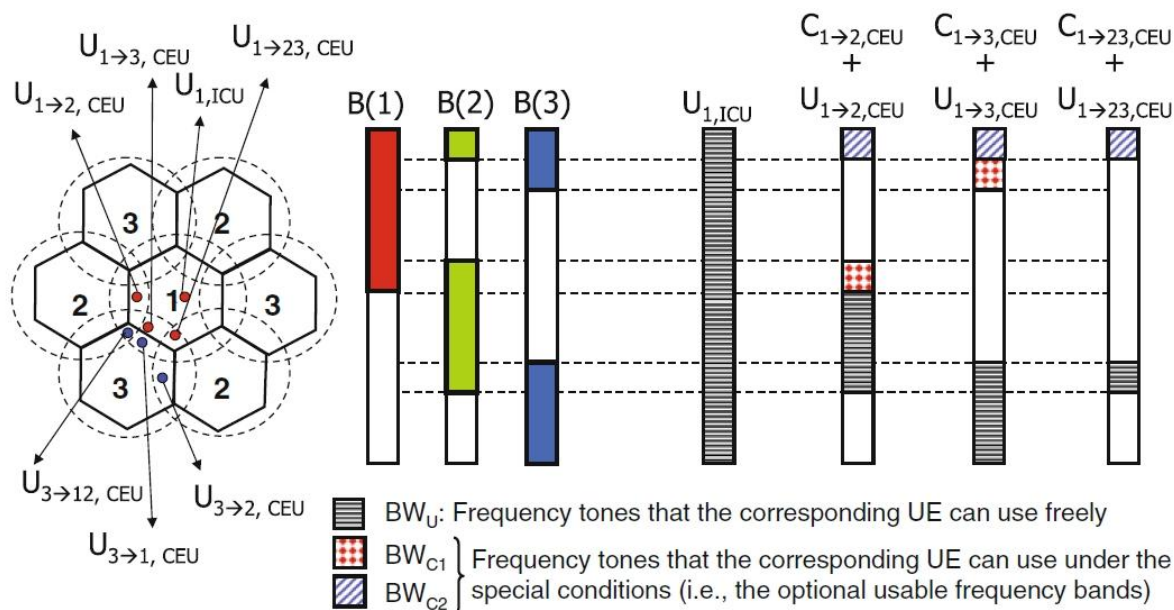


Εικόνα 79: διαχωρισμός εύρους ζώνης με βάση το region

Ο διαχωρισμός των χρηστών σε χρήστες στο κέντρο και στα άκρα γίνεται με βάση την γεωγραφία, από την οποία εξάγεται το πόσο κοντά στο κέντρο είναι ένας χρήστης από το πόσο ισχυρό είναι το σήμα που δέχεται σε σύγκριση με τον θόρυβο. Σε κάθε κυψέλη είναι διαθέσιμο ολόκληρο το εύρος ζώνης, το οποίο χωρίζεται σε δυο μέρη, ένα το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χρήστες στα άκρα ή μπορεί υπό συνθήκες και ένα το οποίο μπορεί. Οι χρήστες στο κέντρο μπορούν να χρησιμοποιήσουν ολόκληρο το εύρος ζώνης.

Οι χρήστες στα άκρα οι οποίοι δέχονται παρεμβολές από μια γειτονική κυψέλη μπορούν να χρησιμοποιήσουν το εύρος ζώνης το οποίο αποτελεί την τομή του μέρους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την κυψέλη στην οποία βρίσκονται και το μέρος του εύρους ζώνης που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χρήστες στα άκρα της γειτονικής κυψέλης από την οποία δέχεται παρεμβολές. Αν δέχεται παρεμβολές από παραπάνω από μια κυψέλες, το εύρος ζώνης ορίζεται από την τομή των τριών αντίστοιχων μερών. Η τομή δυο ή τριών μερών του εύρους ζώνης που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ορίζει ένα ειδικό κομμάτι του εύρους ζώνης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεν από έναν χρήστη στα άκρα αλλά υπό ειδικές συνθήκες. Στο μέρος αυτό ο χρήστης μπορεί να δέχεται παρεμβολές από το πολύ έναν ή δύο χρήστες, και πρέπει να χρησιμοποιήσει κάποιον ICIC μηχανισμό για την αντιμετώπιση των παρεμβολών αν θελήσει να το χρησιμοποιήσει.





Εικόνα 80: Τρόπος χρήσης του εύρους ζώνης ανά περιοχή και τις παρεμβολές.

Για τον προσδιορισμό της περιοχής στην οποία βρίσκεται ένας χρήστης χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός παρακολούθησης βασισμένος σε thresholds και αναφορές από τον χρήστη. Τα threshold που χρησιμοποιεί είναι δυο, ένα για την απόσταση που ορίζει το κέντρο και τα άκρα και ένα το οποίο δηλώνει την κατεύθυνση μετακίνησης του χρήστη από την μια κυψέλη στην άλλη, ενώ οι αναφορές του χρήστη είναι αυτές που χρησιμοποιούνται ήδη. Ανάλογα με τα παραπάνω δεδομένα οι μηχανισμός καθορίζει την περιοχή στην οποία βρίσκεται και κάνει την αντίστοιχη ανάθεση. Η προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης εξαρτάται από την ζώνη και τις παρεμβολές. Ορίζονται οι παρακάτω ζώνες παρεμβολών: Ζώνη χωρίς παρεμβολές (Interference Free Zone, IFZ), Ζώνη Χαμηλών Παρεμβολών (Low-Interference Zone, LIZ) και Ζώνη Παρεμβολών (Interference Zone, IZ) η οποία χωρίζεται στις υποζώνες Ζώνη Ακύρωσης Παρεμβολών (Interference Cancellation Zone, ICZ) και Ζώνη Υψηλών Παρεμβολών (High Interference Zone, HIZ). Η ανάθεση της ισχύος μετάδοσης ακολουθεί το παρακάτω τύπο:  $IFZ \geq ICZ \geq LIZ \geq HIZ$ .

Η αξιολόγηση του προτεινόμενου σχήματος μέσω προσομοίωσης έδειξε ότι βελτιώνει την πιθανότητα φραγής υπηρεσίας στα άκρα της κυψέλης και της μέσης ρυθμαπόδοσης. Η χρήση του είναι πρακτική και παρέχει ευελιξία καθώς χρησιμοποιεί ήδη υπάρχουσες αναφορές και λίγες παραμέτρους συστήματος (thresholds) μέσω των οποίων μπορεί να καθορίσει το tradeoff ανάμεσα στην μέση ρυθμαπόδοση της κυψέλης και αυτής στα άκρα.

Στο [15] μελετάται η χρήση του beamforming στην αντιμετώπιση των παρεμβολών. Στα υπάρχοντα συστήματα η επιλογή του διανύσματος προ κωδικοποίησης (precoding vector) από τον scheduler, για την δημιουργία της δέσμης από τον σταθμό βάσης προς τα τερματικά βασίζεται αποκλειστικά στην ποιότητα της επικοινωνίας ανάμεσά τους και αγνοεί τα precoding vectors των γειτονικών σταθμών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τυχαία conflicts ανάμεσα στις αντίστοιχες δέσμες και αυτό προκαλεί σοβαρές παρεμβολές στους χρήστες στα άκρα των κυψελών. Το προτεινόμενο σχήμα εξετάζει την χρήση του beamforming από έναν σταθμό, για το οποίο το precoding vector υπολογίζεται με βάση την ποιότητα του καναλιού ανάμεσα στον σταθμό βάσης και τις παρεμβολές στο τερματικό. Το σχήμα αυτό απαιτεί ελάχιστη επικοινωνία ανάμεσα στους σταθμούς βάσης και ο καθένας από αυτούς μπορεί να διαλέξει το precoding vector του με καταναμημένο τρόπο, ανάλογα με τα precoding vectors των γειτονικών σταθμών.

Στα υπάρχοντα συστήματα η επιλογή του precoding vector γίνεται με κριτήριο την καναλική απολαβή ανάμεσα στον σταθμό βάσης και το τερματικό. Για το χειρίστο σενάριο παρεμβολών, η καναλική απολαβή είναι συγκρίσιμη με τις παρεμβολές που δέχεται το τερματικό με αποτέλεσμα η ενίσχυση του σήματος μέσω του beamforming να ενισχύει και τις παρεμβολές. Το ίδιο ισχύει και για την ενίσχυση της ισχύος μετάδοσης. Από την ανάλυση του SINR στο σενάριο αυτό προκύπτει ότι το SINR εξαρτάται από το precoding vector, οπότε στα MIMO συστήματα η επιλογή διαφορετικών precoding vectors για διαφορετικούς σταθμούς βάσης μπορεί να εξαλείψει τις παρεμβολές τελείως ή μερικώς υποθέτοντας ότι η επιλογή τους μπορεί να γίνει με κατανομημένο τρόπο και ο κάθε σταθμός να μπορεί να επιλέξει ελεύθερα το βέλτιστο precoding vector από ένα σύνολο από vectors. Μέσω μαθηματικής ανάλυσης προκύπτει ότι υπάρχει ένα σύνολο από precoding vectors στον σταθμό που προκαλεί τις παρεμβολές τα οποία μπορούν να εξαλείψουν εντελώς ή μερικώς τις παρεμβολές στον σταθμό 'θύμα', αρκεί οι κεραιές λήψης του τερματικού να είναι περισσότερες από αυτής της μετάδοσης. Η ολική ή στο ελάχιστο δυνατό εξάλειψη των παρεμβολών μπορεί να είναι πολύ περιοριστική, γι' αυτό εισάγεται ένα threshold το οποίο δηλώνει το ελάχιστο αποδεκτό όριο παρεμβολών και το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να χειρίζεται το tradeoff ανάμεσα στο multiuser diversity και την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Υψηλό threshold σημαίνει λιγότερες επιλογές για τα precoding vectors άρα και μικρότερο user diversity. Αντίθετα, χαμηλότερο threshold σημαίνει περισσότερες παρεμβολές.

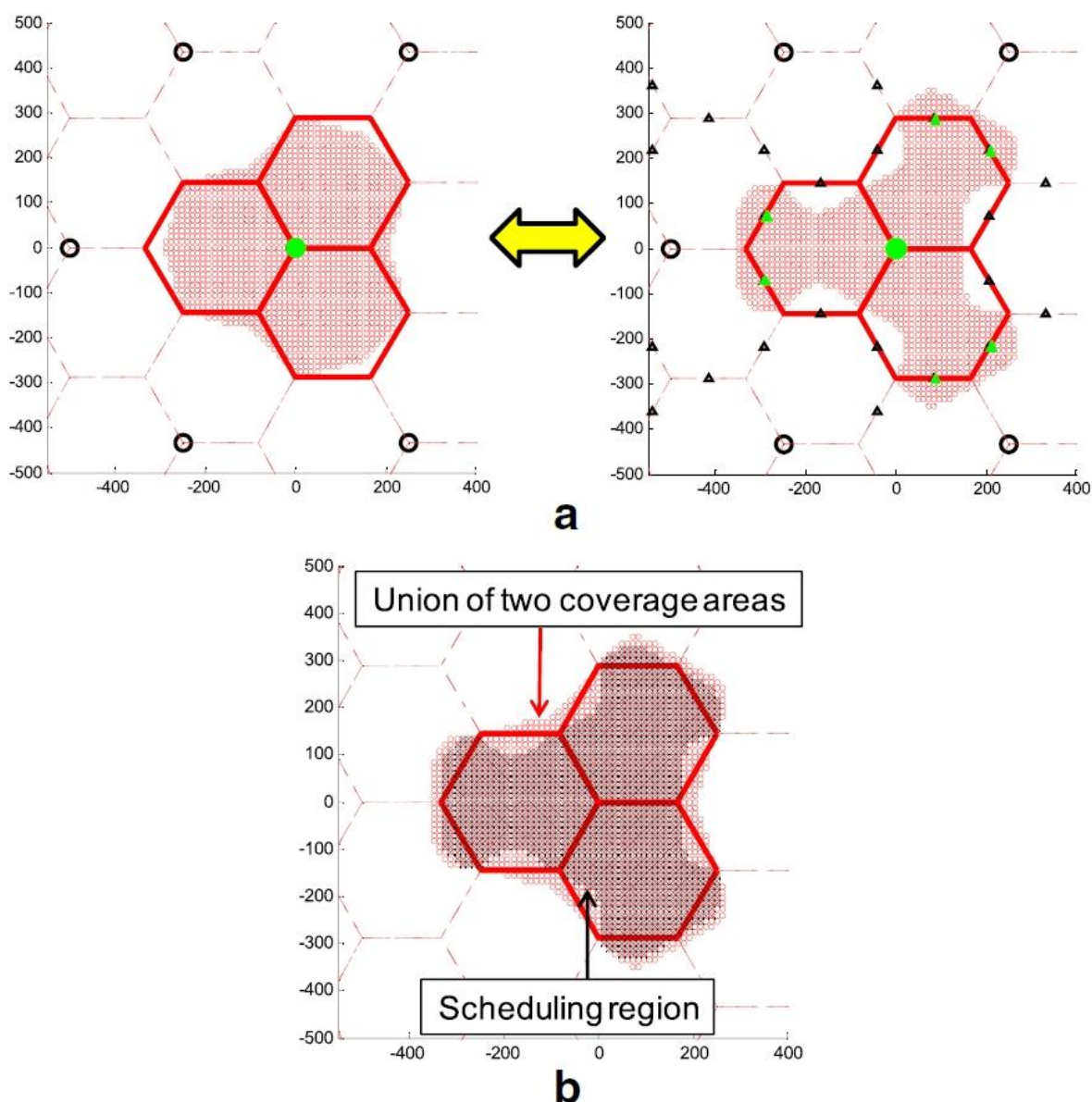
Η δημιουργία του παραπάνω συνόλου γίνεται μέσω των τερματικών τα οποία υπολογίζουν τα precoding vectors σύμφωνα με την μαθηματική ανάλυση και τα αναφέρουν στους σταθμούς από τους οποίους δέχονται παρεμβολές μαζί με το SINR ή την βελτίωση του καναλιού τους. Για την μείωση του overhead, εισάγεται ένα threshold που δηλώνει την απόσταση μέσα στην οποία αναφέρουν τα τερματικά.

Μέσω προσομοιώσεων, το προτεινόμενο σχήμα δείχνει να επιτυγχάνει καλύτερο SINR για τους χρήστες στα άκρα σε σύγκριση με ένα σύστημα στο οποίο δεν υπάρχει συντονισμός στην επιλογή των precoding vectors. Το κέρδος αυτό επιτυγχάνεται με το κόστος της επιπλέον σηματοδότησης για την ενημέρωση του συνόλου των precoding vectors. Όσον αφορά την ρυθμαπόδοση, η επιλογή του precoding vector από ένα σύνολο τιμών υπολογίζοντας το threshold επηρεάζει την ρυθμαπόδοση στον σταθμό 'θύμα'. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν 10% βελτίωση για την μέση ρυθμαπόδοση και μέχρι 30% βελτίωση για τους χρήστες στα άκρα.

Στο [9] εξετάζεται η βελτίωση της CoMP λειτουργίας με την χρήση απομακρυσμένων ραδιοσταθμών βάσης στα άκρα των κυψελών. Στα HetNets, η χρήση των microcells εξυπηρετεί, μεταξύ άλλων την παροχή κάλυψης σε περιοχές που δεν καλύπτονται από τον σταθμό βάσης. Εκτός των femtocells και picocells, μια κατηγορία τέτοιων συσκευών είναι από Απομακρυσμένες Ραδιοσταθμός Βάσης (Remote Radio Heads, RRHs), τα οποία αποτελούν απομακρυσμένες μονάδες ραδιομετάδοσης και συνδέονται με την μονάδα ελέγχου μέσω οπτικών ινών ως backhaul σύνδεση. Το CoMP είναι ένας από τους τρόπους αντιμετώπισης των παρεμβολών στο οποίο πολλαπλές, γεωγραφικά κατανομημένες κεραιές λειτουργούν ως ένας ενιαίος πομπός, για τον οποίο η πληροφορία για το scheduling, η μετάδοση των δεδομένων και η πληροφορία για την κατάσταση του καναλιού μοιράζονται μέσω κάποιας backhaul σύνδεσης, όπως η X2 διεπαφή. Η απόδοσή του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις δυνατότητες της backhaul σύνδεσης. Και στο CoMP όμως εξακολουθούν να υπάρχουν παρεμβολές στα όρια της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης της κοινής μετάδοσης. Το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιεί RRHs για την CoMP μετάδοση και εισάγει την έννοια της εικονικής περιοχής πρόσβασης για την αντιμετώπιση των παρεμβολών στα άκρα.

Το υπο μελέτη σύστημα αποτελείται από 3sector κυψέλες με χρήση RRHs. Τα RRHs και ο σταθμός βάσης για μια κυψέλη μοιράζονται το ίδιο Cell ID και το ίδιο σύνολο από

χρήστες για scheduling. Μέχρι 8 χρήστες μπορούν να γίνουν schedule για CoMP μετάδοση. Η περιοχή κάλυψης για έναν σταθμό βάσης και τους RRHs του ορίζεται ως η περιοχή στην οποία γίνονται schedule για μετάδοση οι χρήστες. Η ανταλλαγή πληροφορίας για την σηματοδότηση και την μετάδοση περιορίζεται στην περιοχή αυτή. Η μετάδοση στο προτεινόμενο σχήμα γίνεται σε φάσεις. Στην πρώτη φάση, για μια διάρκεια  $t$  της συνολικής διάρκειας ενός subframe, μεταδίδουν όλοι οι κόμβοι ενώ για διάρκεια  $1-t$  μεταδίδει μόνο ο σταθμός βάσης. Εξαιτίας του παραπάνω η περιοχή κάλυψης αλλάζει με τον χρόνο. Όταν τα RRHs είναι ανενεργά η περιοχή κάλυψης είναι ίδια με ένα ομογενές σύστημα ενώ όταν εκπέμπουν είναι ίδια με το τυπικό CoMP σενάριο. Η προτεινόμενη εικονική περιοχή κάλυψης αποτελεί την ένωση των δυο παραπάνω περιοχών. Για την δημιουργία της περιοχής κάλυψης, το κάθε τερματικό υπολογίζει το SINR όταν τα RRHs είναι ενεργά και ανενεργά. Με βάση τις τιμές αυτές υπολογίζει τις αντίστοιχες φασματικές αποδόσεις και επιλέγει τον κόμβο στον οποίο έχει την μεγαλύτερη φασματική απόδοση. Το εξυπηρετούμενο σύνολο είναι αυτό με την μεγαλύτερη φασματική απόδοση και οι χρήστες σε αυτό συνθέτουν το scheduling σύνολο χρηστών. Η περιοχή στην οποία βρίσκονται οι χρήστες αυτοί αποτελεί την περιοχή κάλυψης. Σκοπός είναι να μην υπάρχουν χρήστες στα όρια της περιοχής κάλυψης.



Εικόνα 81: Εικονική περιοχή κάλυψης για CoMP μετάδοση μέσω RRHs.

Η μελέτη έδειξε ότι η πιθανότητα φραγής υπηρεσίας μειώθηκε με την χρήση των RRHs το οποίο μεταφράζεται σε βελτίωση του SINR στα άκρα, ανάλογα με το πλήθος των RRHs. Σε σύγκριση με τα eICIC και το τυπικό CoMP σενάριο, το προτεινόμενο σχήμα είχε καλύτερη τιμή SINR και ρυθμαπόδοση για τους χρήστες στα άκρα. Αναφορικά με την διάρκεια μετάδοσης των RRHs, όταν  $t=1$  έχει την ίδια συμπεριφορά με το CoMP αφού τα RRHs εκπέμπουν πάντα ενώ όταν  $t=0$  έχει την ίδια συμπεριφορά με ένα ομογενές δίκτυο. Για την βελτίωση της ρυθμαπόδοσης των χρηστών στα άκρα, από δοκιμές προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή είναι  $t=0.7$  το οποίο βελτιώνει την ρυθμαπόδοση κατά 28%. Τέλος, η τοποθεσία των RRHs εξετάστηκε με τις επιλογές την τοποθέτησής τους στο κέντρο της κυψέλης σε τυχαίες θέσεις, σε κύκλο μέσα στα όρια του κάθε sector και στα άκρα της κυψέλης και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το τελευταίο είχε την καλύτερη απόδοση.

Στο [24] οι συγγραφείς τροποποιούν τα reuse3, SFR, PFR και SFFR σχήματα για HetNet αποτελούμενο από femtocells. Τα σχήματα αυτά συγκρίνονται σε συστήματα με διαφορετική πυκνότητα με μετρικές όπως η ρυθμαπόδοση, το QoS και fairness. Το σύστημα υπό μελέτη αποτελείται από 7 3sector κυψέλες η κάθε μια εκ των οποίων περιέχει περιοχές κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους και σε εξωτερικούς. Οι περιοχές εσωτερικής κάλυψης βρίσκονται στο εσωτερικό των σπιτιών που τοποθετούνται τυχαία μέσα στην περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης και χρησιμοποιούν ένα femtocell τυχαία τοποθετημένο στο εσωτερικό τους. Οι χρήστες χωρίζονται σε αυτούς που ανήκουν στις περιοχές εξωτερικής κάλυψης (macrocells UEs, MUEs), και εξυπηρετούνται από τα macrocells και αυτούς που ανήκουν στις περιοχές εσωτερικής κάλυψης (femtocell UEs, FUEs) και εξυπηρετούνται από τα femtocells. Οι MUEs δέχονται παρεμβολές από όλους τους κόμβους, macrocells και femtocells, που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα με το macrocell και οι FUEs από όλους τους κόμβους που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα με το femtocell.

Στο reuse3, προτείνεται τα femtocells να χρησιμοποιούν τα υπόλοιπα τμήματα του εύρους ζώνης που δεν αξιοποιούνται ανά sector, όπως φαίνεται στην Εικόνα 82 (a). Αυτό διαχωρίζει πλήρως τις συχνότητες των femtocells και macrocells με το κόστος της φασματικής απόδοσης.

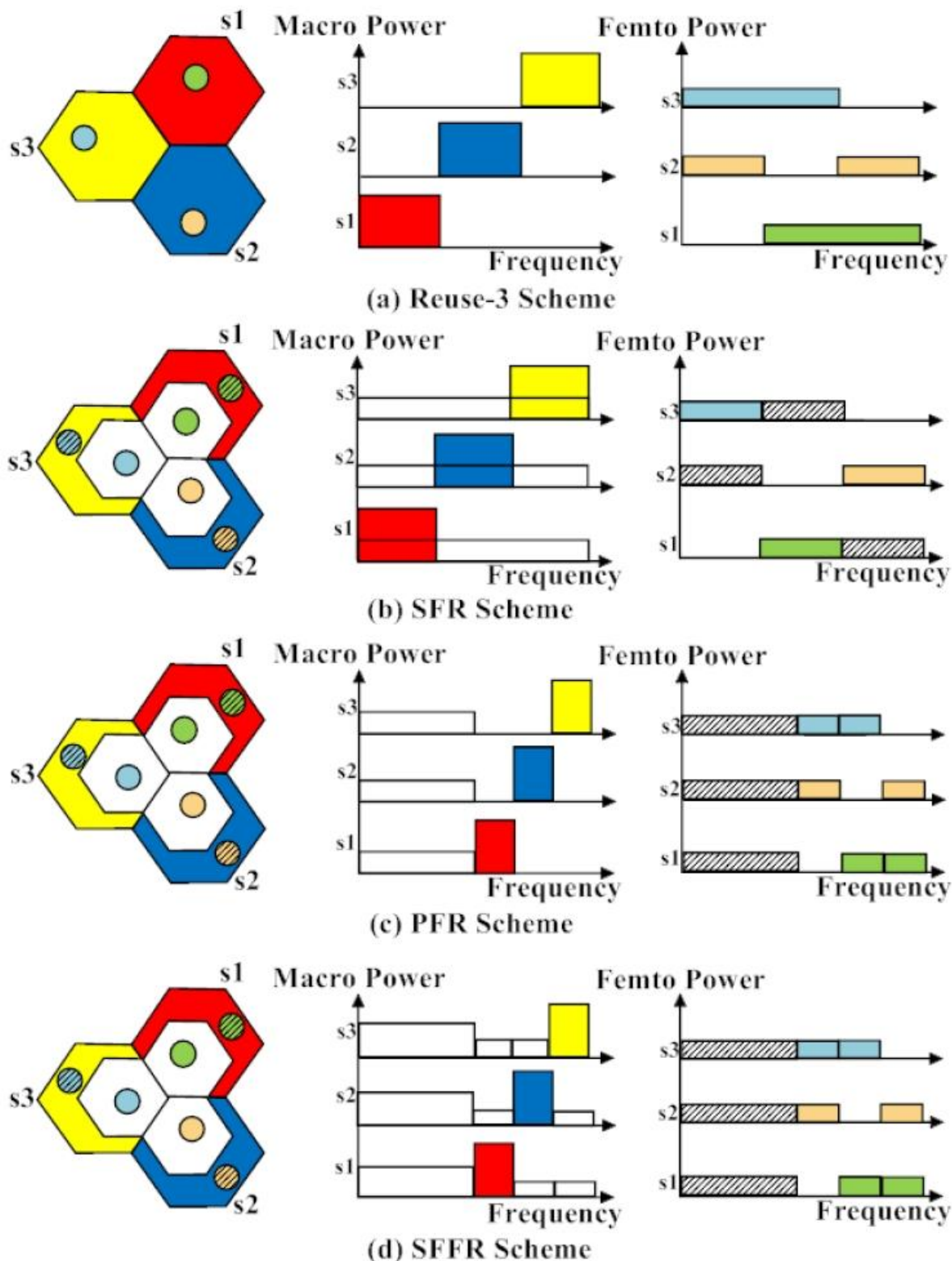
Στο SFR τα femtocells χωρίζονται σε αυτά που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης και σε αυτά που βρίσκονται στα άκρα. Στο πρώτο timeslot, οι MUEs που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλο το εύρος ζώνης με χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης. Στο δεύτερο timeslot μεταδίδουν οι MUEs που βρίσκονται στα άκρα. Το εύρος ζώνης για αυτή την μετάδοση αποτελείται από το 1/3 του συνολικού με υψηλότερη ισχύ μετάδοσης ( $\times 3$ ). Αν το εύρος ζώνης χωρίζεται στα κομμάτια A, B και C και στον ένα sector έχει ανατεθεί το A, τα femtocells στο κέντρο αυτού του sector μπορούν να χρησιμοποιήσουν το B ή το C και αυτά στα άκρα, και τα δύο. Η παραπάνω ανάθεση παρουσιάζεται στην Εικόνα 82 (b). Η αντιμετώπιση των παρεμβολών σε αυτό το σχήμα λαμβάνει χώρα ως εξής: οι macro-femto παρεμβολές στο κέντρο περιορίζονται στο πρώτο timeslot, οι femto-macro παρεμβολές στο κέντρο περιορίζονται στο 1/3 των παρεμβολών και είναι ανεκτές από τους MUEs καθώς λαμβάνουν ισχυρότερο σήμα από το macrocell, οι macro-femto παρεμβολές στα femtocells στα άκρα ελαχιστοποιούνται λόγω απόστασης και οι femto-macro παρεμβολές από τα femtocells στα άκρα είναι αμελητέες λόγω της διαφοράς στην ισχύ μετάδοσης.

Στο PFR, Εικόνα 82 (c), το εύρος ζώνης χωρίζεται σε 6 ίσα μέρη. Τα τρία πρώτα χρησιμοποιούνται από τους χρήστες στο κέντρο ενώ τα τρία επόμενα μοιράζονται στα άκρα με ορθογώνιο τρόπο. Η ισχύς μετάδοσης στο κέντρο είναι στο 1/3 της συνολικής και στα άκρα στα 2/3. Τα femtocells επίσης χωρίζονται σε αυτά στο κέντρο και τα άκρα. Τα femtocells στο κέντρο μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δυο κομμάτια του εύρους

ζώνης που δεν χρησιμοποιούνται από το κέντρο και τα άκρα στο εκάστοτε sector. Τα femtocells στα άκρα μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτά τα δύο κομμάτια συν το κοινό κομμάτι του κέντρου. Παρέχει σχεδόν ολοκληρωτική απομόνωση συχνοτήτων ανάμεσα στα femtocells και macrocells με το κόστος της φασματική απόδοσης.

Στο SFFR οι χρήστες στο κέντρο μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλο το εύρος ζώνης με την εξαίρεση του κομματιού που έχει ανατεθεί στα άκρα. Για τα δυο επιπλέον κομμάτια σε σχέση με το PFR χρησιμοποιούν μικρότερη ισχύ για την αποφυγή παρεμβολών. Η ανάθεση για τα femtocells παραμένει ίδια με το PFR. Η ανάθεση για το σχήμα αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 82 (d).





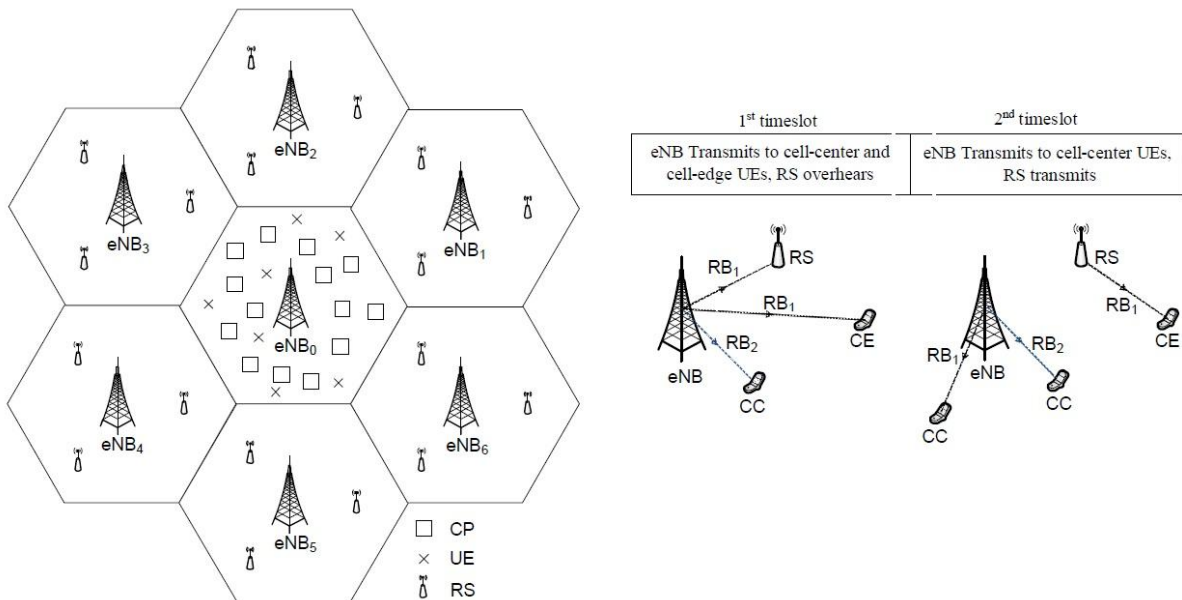
Εικόνα 82: Τροποποίηση υπάρχοντων σχημάτων για HetNets με femtocells.

Η σύγκριση των παραπάνω σχημάτων έγινε με κριτήρια την μέση ρυθμαπόδοση, το QoS και το fairness. Στο σύστημα της προσομοίωσης γίνεται η υπόθεση ότι ένας MUE θα είναι συνδεδεμένος ανά πάσα στιγμή στο macrocell και ένας FUE στα femtocells. Οι γειτονικοί κόμβοι εκπέμπουν πάντα σε πλήρη ισχύ και οι χρήστες μετακινούνται σε τυχαίες θέσεις συνεχώς.

Η συνολική χωρητικότητα ήταν μεγαλύτερη στο reuse1 αλλά πέφτει γρήγορα με το πλήθος των femtocells. Το SFR παρέχει καλύτερη απόδοση καθώς αυξάνει το πλήθος των femtocells ενώ τα reuse3, PFR και SFFR έχουν χειρότερη απόδοση εξαιτίας του περιορισμένου εύρους ζώνης. Αναφορικά με το QoS, το reuse3 παρέχει την καλύτερη απόδοση λόγω της ολοκληρωτικής απομόνωσης των συχνοτήτων, το reuse1 είχε την χειρότερη ενώ τα υπόλοιπα σχήματα παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά. Τέλος, τα reuse3 και SFR παρέχουν το καλύτερο fairness.

Το πρόβλημα της μελέτης για την τοποθέτηση RelayNodes σε ένα δίκτυο, μελετάται στο [25]. Στόχος είναι η βέλτιστη τοποθέτηση των RNs σε ένα δίκτυο για την βελτίωση της συνολικής χωρητικότητας ή της χωρητικότητας στα άκρα. Η αντιμετώπιση των παρεμβολών είναι ο δεύτερος μεγάλος στόχος.

Το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από 7 3sector κυψέλες με την κεντρική κυψέλη να αποτελεί την κυψέλη αναφοράς. Οι χρήστες μοιράζονται με τυχαίο τρόπο στην κυψέλη και χωρίζονται σε αυτούς στο κέντρο και τα άκρα με κριτήριο το SINR τους. Οι χρήστες στα άκρα συνδέονται στα RNs ενώ αυτοί στο κέντρο στον σταθμό βάσης. Μετά από μελέτη της τοπογραφίας της κυψέλης αναφοράς προκύπτει ένα σύνολο από πιθανές τοποθεσίες για τα RNs. Στις γειτονικές κυψέλες τα RNs τοποθετούνται κυκλικά γύρο από τον σταθμό βάσης στα άκρα των κυψελών. Τα RNs είναι inband, Decode-and-Forward relays και λειτουργούν σε δυο timeslots. Στο πρώτο ο σταθμός βάσης εκπέμπει σε όλους τους χρήστες. Οι RNs σε αυτό το timeslot ακούνε τα μηνύματα που προορίζονται για τους χρήστες στα άκρα και τα αποκωδικοποιούν. Στο δεύτερο timeslot οι RNs επανακωδικοποιούν και προωθούν τα μηνύματα του πρώτου timeslot στους χρήστες στα άκρα ενώ ο σταθμός βάσης συνεχίζει να εκπέμπει σε όλους τους χρήστες. Επιπλέον, ο σταθμός βάσης μπορεί να εκπέμπει στους χρήστες στο κέντρο χρησιμοποιώντας τα ίδια RBs για την επικοινωνία RN-UE εισάγοντας παρεμβολές εντός της κυψέλης. Οι παρεμβολές εκτός κυψέλης προέρχονται από τους γειτονικούς κόμβους. Τέλος, δεν εφαρμόζεται κάποιος μηχανισμός προσαρμογής της ισχύος μετάδοσης.



Εικόνα 83: Τοπολογία των RelayNodes και μετάδοση ανά timeslot.

Για την μελέτη της τοποθεσίας οι συγγραφείς καταλήγουν στους αντίστοιχους τύπους για την μέγιστη και μέση χωρητικότητα, την πιθανότητα φραγής υπηρεσίας κτλ. μέσω μαθηματικής ανάλυσης για κάθε μια από τις περιπτώσεις τοποθεσίας των RNs που



περιγράφονται παρακάτω. Οι υποθέσεις που κάνουν είναι οι παρακάτω. Οι σταθμοί βάσης και οι RNs είναι πλήρως συγχρονισμένοι, όλοι οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν στους χρήστες στο πρώτο timeslot και οι RNs στους χρήστες στα άκρα στο δεύτερο timeslot. Όλες οι κυψέλες έχουν τον ίδιο φόρτο και τα RNs μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε RB για την μετάδοση στους χρήστες τους, και αντιστρόφως, κάθε RB έχει την ίδια πιθανότητα να επιλεγεί από κάποιο RN.

Για τις τοποθεσίες των RNs, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μη χρήσης των RNs, η ομοιόμορφη τοποθέτησή τους και η τοποθέτησή τους στις βέλτιστες τοποθεσίες. Για την πρώτη περίπτωση έχουμε παρεμβολές μόνο από τους γειτονικούς κόμβους. Για την δεύτερη περίπτωση οι RNs τοποθετούνται σε κύκλο γύρω από τον σταθμό βάσης σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση οι παρεμβολές προέρχονται από τις γειτονικές κυψέλες και τους RNs στο εσωτερικό της κυψέλης αναφοράς. Επίσης, το κάθε RB μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνο ένα RN. Για την βέλτιστη τοποθέτηση, τα RNs τοποθετούνται στις βέλτιστες τοποθεσίες ενώ στις γειτονικές κυψέλες σε κύκλο όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι τοποθεσίες αυτές προκύπτουν με εξαντλητική αναζήτηση με κριτήριο την μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας της κυψέλης.

Για την μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης στα άκρα, μειώνεται η ρυθμαπόδοση στο κέντρο εξαιτίας των παρεμβολών ενώ από την άλλη η ρυθμαπόδοση στα άκρα βελτιώνεται. Για την μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης, ευνοούνται οι χρήστες στο κέντρο μιας και οι αντίστοιχες ρυθμαποδόσεις τους λαμβάνονται υπόψη και είναι καλύτερες από αυτές στα άκρα. Η τοποθέτηση των RNs μειώνει τις παρεμβολές των RNs στους χρήστες στο κέντρο αλλά δεν βελτιώνει την ρυθμαπόδοση στα άκρα. Για την αξιολόγηση της ρυθμαπόδοσης ανά χρήστη το κέντρο και ανά χρήστη στα άκρα. για διαφορετικές τιμές του φόρτου δικτύου, η βέλτιστη τοποθέτηση αυξάνει την ρυθμαπόδοση των χρηστών στα άκρα με το κόστος της μείωσης της ρυθμαπόδοσης στο κέντρο εξαιτίας των παρεμβολών.

Στο [26] προτείνεται ένα framework για την χρήση των Almost Blank Subframes (ABSs) σε ένα HetNet για την αντιμετώπιση των παρεμβολών που δέχονται οι χρήστες του σταθμού βάσης από τα femtocells. Το σύστημα υπό μελέτη αποτελείται από έναν σταθμό βάσης, ο οποίος εξυπηρετεί  $M$  χρήστες και  $N$  ομοιόμορφα κατανομημένα femtocells που λειτουργούν στην περιοχή κάλυψής του και εξυπηρετούν έναν χρήστη το καθένα. Τα femtocells λειτουργούν σε CSG. Το scheduling στον σταθμό βάσης είναι Proportionally Fair (PF). Το προτεινόμενο framework περιλαμβάνει τις εξής λειτουργίες:

**Εντοπισμός 'θυμάτων':** παρακολουθεί τους χρήστες και τους χαρακτηρίζει ή αποχαρακτηρίζει ως χρήστες που δέχονται παρεμβολές ('θύμα'). Οι χρήστες μετακινούνται συνεχώς την περιοχή κάλυψης και όταν βρεθούν στην περιοχή κάλυψης ενός femtocell δέχονται παρεμβολές σε επίπεδο να μην μπορούν να λάβουν σήματα ελέγχου. Το κριτήριο για τον εντοπισμό των θυμάτων είναι το SINR τους στο downlink. Ο μηχανισμός λαμβάνει υπόψη τις αναφορές κατά την διάρκεια των ABSs οι οποίες δεν είναι ακριβείς αναφορικά με τις συνθήκες μετάδοσης. Για τον λόγο αυτό ορίζει μια χρονική διάρκεια κατά την οποία εκτελείται ο εντοπισμός. Αν ο χρήστης εξακολουθεί να έχει χαμηλό SINR στο τέλος της περιόδου, χαρακτηρίζεται ως θύμα. Για την διάρκεια αυτή τα μηνύματα των προηγούμενων μεταδόσεων έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα από τα τωρινά.

**Ενεργοποίηση λειτουργίας ABF:** με βάση το SINR των θυμάτων, ενεργοποιεί την ABS λειτουργία στο HeNB που προκαλεί τις παρεμβολές. Για την παραπάνω λειτουργία ο σταθμός βάσης συντονίζει με το θύμα για τον καθορισμό του HeNB που προκαλεί τις παρεμβολές. Οι χρήστες παρακολουθούν συνεχώς τα γειτονικά HeNBs και αναφέρουν περιοδικά στον σταθμό βάσης. Όταν ο σταθμός βάσης εντοπίσει υψηλές παρεμβολές σε κάποιον από αυτούς, του στέλνει μήνυμα για την έναρξη της ABS λειτουργίας και

ξεκινάει το scheduling των θυμάτων στα ABSs. Όταν ο σταθμός εντοπίσει ότι οι παρεμβολές είναι χαμηλότερες από ένα όριο στέλνει μήνυμα στο HeNB να σταματήσει την ABS λειτουργία. Το πρότυπο που θα χρησιμοποιηθεί για τα ABSs εξαρτάται από τον φόρτο δικτύου στο HeNB και το επίπεδο των παρεμβολών στο θύμα και αποφασίζεται από τον σταθμό βάσης.

- **Επικοινωνία και συντονισμός:** η επικοινωνία βασίζεται σε υπάρχουσα σηματοδότηση (CQI, RSRP).
- **Βελτίωση του Scheduling:** αλλαγές ώστε να δίνεται μεγαλύτερη προτεραιότητα στα θύματα κατά την μετάδοση των ABSs και ο αποκλεισμός τους από τις μη-ABS μεταδόσεις. Η αλλαγή προτεραιότητας υλοποιείται με την κλιμάκωση, προς τα πάνω ή κάτω, του κριτηρίου επιλογής κατά το scheduling.
- **Εκτίμηση του SINR:** θα πρέπει να μπορεί να εκτιμηθεί το SINR κατά την μετάδοση των ABS μηνυμάτων. Η εκτίμηση γίνεται χρησιμοποιώντας Kalman filter παρέχοντας την αντίστοιχη μαθηματική ανάλυση.

Η αξιολόγηση του παραπάνω σχήματος έγινε μέσω προσομοίωσης στην οποία οι χρήστες θύματα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι και χρησιμοποιούν CBR εφαρμογές με σταθερό ρυθμό, ο οποίος εξαρτάται από τον φόρτο δικτύου. Η ρυθμαπόδοση του macrocell βελτιώνεται με την χρήση του ABS framework, το ίδιο ισχύει και για την ρυθμαπόδοση των θυμάτων. Η ρυθμαπόδοση των femtocells από την άλλη μειώνεται εξαιτίας των ABSs. Τέλος, το Kalman filter εντόπισε με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική τιμή του SINR.

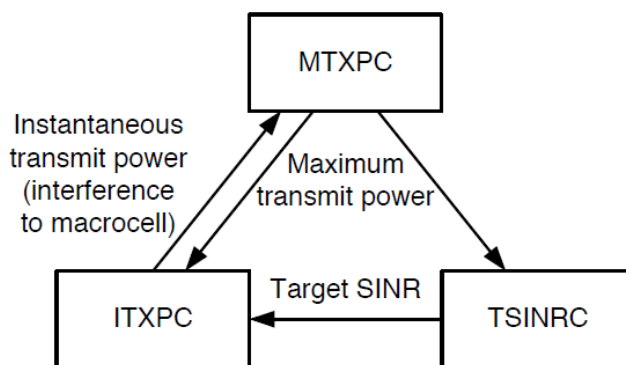
Στο [27] εξετάζεται μια κατανεμημένη και αυτό-διαχειριζόμενη αρχιτεκτονική για την διαχείριση των femtocells η οποία αποτελείται από τρεις συμπληρωματικούς μηχανισμούς και ονομάζεται Complementary Tri-Control Loops (CTRL). Η αρχιτεκτονική δεν απαιτεί αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα και προσαρμόζεται στις δυναμικές συνθήκες μετάδοσης. Στόχοι της αρχιτεκτονικής αυτής είναι η προστασία των χρηστών του macrocell από τις παρεμβολές των femtocells στο uplink, η αποδοτική χρήση των πόρων ανάμεσα στο macrocell και τα femtocells και την προστασία του uplink των femtocells από τις παρεμβολές λόγω μεταδόσεων κατά ριπές (bursty transmissions).

Για την προστασία macrocell uplink, τα femtocells χρειάζονται να ξέρουν την κατάσταση του macrocell η οποία μπορεί να μεταδίδεται από το macrocell μέσω μηνυμάτων macrocell feedback. Τα μηνύματα αυτά μεταφέρουν την πληροφορία για την φόρτο στο macrocell, δηλαδή αν ο τρέχων φόρτος στο macrocell έχει ξεπεράσει ένα threshold ή όχι, για κάθε RB. Η πληροφορία αυτή μπορεί να μεταφερθεί είτε μέσω ενός κεντρικού κόμβου στο EPC είτε μέσω ράδιο μετάδοσης.

Η αρχιτεκτονική αποτελείται από τρεις μηχανισμούς, ο καθένας με τον δικό του στόχο, οι οποίοι αλληλοσυμπληρώνονται. Ο μηχανισμός Έλεγχος Μέγιστης Ισχύος Μετάδοσης (Maximum Transmit Power Control, MTXPC), ο μηχανισμός Έλεγχος Επιθυμητού SINR (Target SINR Control, TSINRC) και ο μηχανισμός Έλεγχος Στιγμιαίας Ισχύος Μετάδοσης (Instantaneous Transmit Power Control, ITXPC). Σκοπός είναι η επίτευξη των παραπάνω στόχων, με προτεραιότητα την προστασία των χρηστών του macrocell. Ο κάθε μηχανισμός λύνει το δικό του πρόβλημα, περιοριζόμενος από τις απαιτήσεις των άλλων δυο μηχανισμών επιτυγχάνοντας έτσι τον συντονισμό. Όλες οι αποφάσεις των παραπάνω μηχανισμών λαμβάνουν χώρα στα femtocells.

Ο MTXPC μηχανισμός προστατεύει τους χρήστες του macrocell με το να ελέγχει την μέγιστη συνολική ισχύ μετάδοσης των femtocells με βάση τα feedback μηνύματα που λαμβάνει από τους χρήστες του macrocell. Απαιτείται μια MTXPC διεργασία ανά RB, μιας και το όριο φόρτου ορίζεται ανά RB, για τον καθορισμό της μέγιστης ισχύος μετάδοσης. Ο μηχανισμός TSINRC διαχειρίζεται την αποδοτική χρήση των πόρων, RBs

και ισχύς μετάδοσης, μέσω συντονισμού με τα γειτονικά femtocells για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ τους. Η ανάθεση των πόρων γίνεται με βάση τοπικές μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές προκύπτουν από έμμεσες αναφορές μιας και δεν υπάρχει διεπαφή που να ενώνει τα femtocells μεταξύ τους. Το τελικό αποτέλεσμα συντονίζεται με τον περιορισμό του μηχανισμού MTXPC. Τέλος, ο μηχανισμός ITXPC ελέγχει την στιγμιαία ισχύ μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες ώστε να προσαρμόσει την στιγμιαία τιμή του SINR σύμφωνα με την επιθυμητή τιμή του μηχανισμού TSINRC. Το SINR μπορεί να μεταβάλλεται στιγμιαία σε σχέση με την τιμή που έχει καθοριστεί από τον μηχανισμό TSINRC εξαιτίας των bursty μεταδόσεων από γειτονικά femtocells ή macrocells. Η προσαρμογή αυτή αποτελεί παρεμβολές προς το macrocell οπότε και αποτελεί είσοδο για τον μηχανισμό MTXPC. Επιπλέον, η ισχύς μετάδοσης του μηχανισμού ελέγχεται με το μέγιστο όριο τους MTXPC μηχανισμού. Η αλληλεπίδραση των μηχανισμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 84. Για τον καθένα από τους παραπάνω μηχανισμούς οι συγγραφείς παρέχουν το αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο.



Εικόνα 84: Αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανισμών της CTRL αρχιτεκτονικής.

Στο [28] εξετάζεται η χρήση της τεχνικής Ευθυγράμμισης Παρεμβολών (Interference Alignment, IA) ως τεχνική αντιμετώπισης παρεμβολών σε ένα HetNet. Στο δίκτυο αυτό τα macrocells αναφέρονται ως πρωτεύον σύστημα (primary system) ενώ τα microcells ως δευτερεύον σύστημα (secondary system). Η βασική αρχή η οποία ακολουθείται είναι ότι οι παρεμβολές του πρωτεύοντος συστήματος στο δευτερεύον θα έπρεπε να περιορίζονται ενώ αυτές του δευτερεύοντος στο πρωτεύον να γίνονται ανεκτές. Στόχος του IA είναι η σχεδίαση του σήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να αγνοηθεί από τους μη προοριζόμενους αποδέκτες του μέσω φιλτραρίσματος ενώ να μπορεί να εξαχθεί το ωφέλιμο σήμα από τους παραλήπτες προς τους οποίους προορίζεται. Η απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη πολλαπλών πεδίων (του χρόνου, της συχνότητας, του χώρου ή της κωδικοποίησης) καθώς κατά το φιλτράρισμα κάποια από τα πεδία χάνονται και το ότι ο πομπός πρέπει να γνωρίζει τις συνθήκες του καναλιού του μη προοριζόμενου αποδέκτη.

Το σύστημα αναφοράς αποτελείται από ένα macrocell το οποίο εξυπηρετεί ένα σύνολο από χρήστες macrocell και περιέχει στην περιοχή κάλυψής του ένα σύνολο από microcells. Τα microcells εξυπηρετούν ένα σύνολο από χρήστες που συνδέονται πάνω τους και μέσω μιας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας μπορούν να επεξεργαστούν συνεργατικά τα λαμβανόμενα σήματα. Κατά την μετάδοση των δυο κατηγοριών χρηστών έχουμε παρεμβολές εξαιτίας της χρήσης της ίδιας συχνότητας. Υποθέτουμε ότι οι χρήστες των microcells έχουν γνώση του CSI για το macrocell. Στο παραπάνω σύστημα οι χρήστες των microcells αποτελούν τους δευτερεύοντες πομπούς (secondary transmitters, STs) και τα macrocells τους δευτερεύοντες δέκτες (secondary receivers, SRs). Αντίστοιχα, οι χρήστες του macrocell αποτελούν τους πρωτεύοντες πομπούς (primary transmitters, PTs) και ο macrocell τον πρωτεύον δέκτη (primary

receiver, PR). Επιπλέον οι STs και ο PR θα πρέπει να γνωρίζουν ένα προκαθορισμένο διάνυσμα ( $v$ ) για την ευθυγράμμιση των παρεμβολών. Ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του, εξετάζουμε την στατική, την συντονισμένη και ασυντόνιστη μέθοδο. Κάθε μια από αυτές εξαρτάται από τον επίπεδο του συντονισμού ανάμεσα στο πρωτεύον και δευτερεύον σύστημα. Η βασική ιδέα είναι ότι οι STs θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν προ κωδικοποίηση ώστε τα ληφθέντα δευτερεύοντα σήματα στον PR να είναι ευθυγραμμισμένα με το διάνυσμα  $v$  και να μπορούν να απορριφθούν χάνοντας και ένα κομμάτι του ωφέλιμου σήματος. Η μοντελοποίηση της σηματοδοσίας παρέχεται ως μαθηματικό μοντέλο.

Για την αξιολόγηση του σχήματος παρέχονται επίσης οι τύποι, ως μαθηματικό μοντέλο, για την μέτρηση της χωρητικότητας ανάλογα με τις εξεταζόμενες τεχνικές μετάδοσης και τον τρόπο κατασκευής του διανύσματος  $v$ . Οι τεχνικές μετάδοσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η μετάδοση μόνο στο πρωτεύον σύστημα, χωρίς παρεμβολές, η μετάδοση με περιορισμένες παρεμβολές, κατά το οποίο δεν υλοποιείται αντιμετώπιση των παρεμβολών ή προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης, η μετάδοση με διαχωρισμό των πόρων, στο οποίο τα δύο συστήματα μεταδίδουν σε διαφορετικά κομμάτια του εύρους ζώνης, και η μετάδοση με ευθυγράμμιση παρεμβολών. Για την κατασκευή του διανύσματος  $v$  χρησιμοποιήθηκε η στατική μέθοδος, στην οποία το  $v$  είναι προκαθορισμένο και δεν προσαρμόζεται στις συνθήκες του καναλιού, η μέθοδος του συντονισμού, στην οποία το  $v$  υπολογίζεται και ανακοινώνεται από τον PR με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης του πρωτεύοντος συστήματος και η μέθοδος μη-συντονισμού στην οποία οι STs διαλέγουν το  $v$  ώστε να μεγιστοποιεί την απόδοση του δευτερεύοντος συστήματος και ο PR είναι υπεύθυνος για το φιλτράρισμά του.

Η αξιολόγηση έγινε με κριτήρια την συνολική χωρητικότητα, την ρυθμαπόδοση των δύο συστημάτων και την προστασία του πρωτεύοντος συστήματος. Η συνολική χωρητικότητα αυξάνεται με το πλήθος των microcells ανεξαρτήτου τεχνικής μετάδοσης. Στην τεχνική μετάδοσης με περιορισμένες παρεμβολές η βελτίωση της χωρητικότητας είναι τριπλάσια σε σχέση με την μετάδοση στο πρωτεύον σύστημα μόνο ενώ για τις άλλες τεχνικές διπλάσια. Για την ρυθμαπόδοση, η τεχνική IA έχει την καλύτερη απόδοση και συγκεκριμένα για την συντονισμένη κατασκευή του διανύσματος  $v$ . Τέλος, για την προστασία του πρωτεύοντος συστήματος το IA είχε επίσης την καλύτερη απόδοση η οποία προστατεύει πλήρως ενώ οι υπόλοιπες τεχνικές κατά 70%.

## 8 Επισκόπηση σχημάτων ICIC

Ακολουθεί ένας περιεκτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των παραπάνω σχημάτων. Συνοψίζει τους στόχους, τις μεθόδους και τις τεχνικές των σχημάτων της προηγούμενης ενότητας.

		<b>Επίπεδο συστήματος</b>	
1	Στόχος	Σύγκριση της απόδοσης διαφόρων αρχιτεκτονικών για Relay Nodes με τα σχήματα reuse1, reuse3 και Base Station Coordination (BSC) αναφορικά με την επίτευξη μέγιστης ρυθμαπόδοσης και αντιμετώπιση παρεμβολών. [18]	
	Παράμετροι	Κυψέλες αποτελούμενες από 6 sectors με τον σταθμό βάσης στο κέντρο, ένα RN ανά sector και ένα RN ανά 3 sectors για το Shared-Relaying, ένας χρήστης ανά sector, χρήση reuse6 σχήματος σε κάθε κυψέλη, χρήση ίδιας συχνότητας στα κοινά sectors για το BSC και Shared-Relaying, ύπαρξη διασύνδεσης χωρίς καθυστερήσεις και απώλειες για το BSC.	
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται	
	Κόστος σηματοδότησης	Μειωμένη ρυθμαπόδοση εξαιτίας της μετάδοσης σε δύο φάσεις και της decode-and-forward μετάδοσης στο shared-relaying.	
2	Στόχος	Μελέτη για την βελτίωση της χωρητικότητας και επέκταση της περιοχής κάλυψης ενός HetNet με την χρήση RelayNodes τύπου Type1 και Type1b σε σύγκριση με ένα ομοιογενές LTE δίκτυο. [19]	
	Παράμετροι	Σενάρια μετάδοσης (πάντα NLOS, μεικτό LOS/NLOS, πιθανοτικό LOS ή NLOS) σε αστική και αγροτική περιοχή, αγνοεί τις παρεμβολές, απόσταση σταθμών βάσης ανάλογα με την μετάδοση σε αστική/αγροτική περιοχή, τοποθέτηση και τοπολογία των RNs ανάλογα με το σενάριο μετάδοσης.	
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται	
	Κόστος σηματοδότησης	Περιορισμός ρυθμαπόδοσης εξαιτίας bottleneck στο relay link των Type1b RNs.	
		<b>Επίπεδο κόμβου</b>	
1	Αλγόριθμος	Αντιμετώπιση παρεμβολών στα femtocells μέσω femtocell Ids. [17]	
	Στόχος	Ανάθεση των RBs σε κάθε femtocell ανάλογα με την ανάθεση των γειτονικών femtocells, η οποία μεταδίδεται μεταξύ τους μέσω μοναδικών FIDs, για την αντιμετώπιση των παρεμβολών. Το κάθε FID αντιστοιχεί σε μια μοναδική ανάθεση RBs.	
	Παράμετροι	Κατασκευή των FIDs: Hadamard κωδικοποίηση, δομημένη	

		κωδικοποίηση ή μέσω τυχαίων πρώτων αριθμών, Μήκος FID: το μήκος των FIDs μετριέται σε συνεχόμενα RBs, εξασθένιση στο κανάλι.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: FIDs γειτονικών femtocells, Έξοδοι: FID και ανάθεση των RBs για το femtocell.
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: Οι παρεμβολές αποφεύγονται μέσω του συντονισμού των αναθέσεων των γειτονικών femtocells μέσω μοναδικών FIDs. Το κάθε femtocell ανακοινώνει στους γείτονές του την ανάθεσή του και αυτοί εξετάζοντας τις αναθέσεις αποφασίζει την χρήση των ελεύθερων RBs.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: τα femtocells συντονίζονται για την ανάθεση των RBs μεταδίδοντας το καθένα την ανάθεσή τους στους γειτονικούς κόμβους.
	Στρώμα	Η απόφαση για την ανάθεση γίνεται στα femtocells. (MAC)
	Κόστος επεξεργασίας	Ο εντοπισμός των FIDs γίνεται μέσω συσχετισμού με τα ήδη αποθηκευμένα FIDs, οπότε το κόστος εντοπισμού και η πολυπλοκότητα ανεβαίνει με το πλήθος των femtocells.
	Κόστος σηματοδοσίας	Ανάλογα με το πλήθος των RBs για το FID. Μεγαλύτερο μήκος σημαίνει μικρότεροι συνδυασμοί για ανάθεση αλλά πιο εύκολα εντοπισμό του FID.
2	Αλγόριθμος	Τμηματική, Δυναμική και αυτό-διαχειριζόμενη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε HetNet με RelayNodes μέσω του συνόλου των παρεμβληθέντων γειτόνων. [13]
	Στόχος	(1) αποδοτική αξιοποίηση των πόρων (2) βελτιωμένη απόδοση για του χρήστες στα άκρα (3) ευελιξία και προσαρμοστικότητα στην βελτιστοποίηση της ανάθεσης πόρων ανάλογα με τις συνθήκες στο κανάλι χρησιμοποιώντας το interference set.
	Παράμετροι	SINR threshold για τους χρήστες στο κέντρο/άκρα, ισχύς μετάδοσης για τους χρήστες στα άκρα/κέντρο, ισχύς μετάδοσης για τους σταθμούς βάσης.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: παρεμβολές από τους γειτονικού κόμβους (interference set) για κάθε sector, Έξοδοι: ανάθεση πόρων ανά sector.
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: ανάθεση πόρων μέσω συντονισμού των eNBs και των RNs, ώστε η κάθε συχνότητα να μπορεί να ανατεθεί σε οποιοδήποτε αν δεν ξεπερνιέται ένα επιτρεπτό όριο παρεμβολών. Οι πόροι ανατίθενται δυναμικά ανάμεσα σε δυο κόμβους χωρίς να χρησιμοποιούν και οι δύο την ίδια συχνότητα.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: μετάδοση του interference set το οποίο λειτουργεί ως lookup table για να αποφευχθεί η ανάθεση της ίδιας συχνότητας σε δυο κόμβους.
	Στρώμα	MAC
	Κόστος	Επεξεργασία του interference set.

	επεξεργασίας	
	Κόστος σηματοδοσίας	Μετάδοση του interference set στους γειτονικούς κόμβους.
3	Αλγόριθμος	Αντιμετώπιση παρεμβολών σε ένα HetNet μέσω ακριβούς εντοπισμού της προέλευσης. [20]
	Στόχος	Ενίσχυση ενός ICIC σχήματος μέσω ακριβούς εντοπισμού της περιοχής από την οποία προέρχονται οι παρεμβολές και συντονισμού για την αντιμετώπισή τους.
	Παράμετροι	Threshold παρεμβολών, πλήθος επιμέρους περιοχών για κάθε περιοχή κάλυψης ενός microcell, χρήση ενός ICIC σχήματος για αντιμετώπιση των παρεμβολών.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: σύνολο επιμέρους περιοχών για κάθε microcell, σύνολο των RBs που υπόκεινται παρεμβολές, Έξοδοι: ανάθεση των RBs ή μείωση της ισχύος μετάδοσης ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: όλες οι επιμέρους περιοχές είναι γνωστές σε όλους τους κόμβους. Όταν οι παρεμβολές μιας περιοχής είναι μεγαλύτερες από το threshold, ο αντίστοιχος κόμβος στέλνει το σύνολο των RBs στους υπόλοιπους κόμβους και ο καθένας από αυτούς ρυθμίζει την ανάθεσή τους ή την ισχύ μετάδοσης αν είναι η πηγή των παρεμβολών.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος : ο κάθε microcell κόμβος αποφασίζει μόνος του αν είναι η όχι η πηγή των παρεμβολών και ρυθμίζει αντίστοιχα το ICIC.
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Επεξεργασία των συνόλων των RBs που υπόκεινται αλλαγές για τον καθορισμό του αν αποτελεί την αιτία τους.
	Κόστος σηματοδοσίας	Μετάδοση συνόλου παρεμβολών και των επιμέρους περιοχών.
4	Αλγόριθμος	Παραλλαγή SFR σχήματος με δυναμική ανάθεση καναλιών. [21]
	Στόχος	Αντιμετώπιση παρεμβολών και δυναμική ανάθεση καναλιών ανάλογα με τις παρεμβολές.
	Παράμετροι	Threshold για το διαχωρισμό των χρηστών σε αυτούς σε κέντρο και τα άκρα, σύνολα χρηστών στο κέντρο και τα άκρα για κάθε περιοχή, σύνολο διαθέσιμων καναλιών σε κάθε περιοχή, συνολική ισχύς μετάδοσης.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: πλήθος διαθέσιμων καναλιών σε κάθε περιοχή, σύνολο καναλιών που χρησιμοποιούνται από τις γειτονικές κυψέλες, συνολική ισχύς μετάδοσης, threshold απόστασης χρηστών, σύνολο χρηστών στο κέντρο/άκρα Έξοδοι: ανάθεση καναλιών και ισχύος μετάδοσης για τους χρήστες στα άκρα.



	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: Διαχωρισμός εύρους ζώνης για το κέντρο και τα άκρα. Για κάθε χρήστη η ανάθεση καναλιού γίνεται με βάση τις συνθήκες μετάδοσης. Τα κανάλια που έχουν ανατεθεί αφαιρούνται από το διαθέσιμο σύνολο για αποφυγή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: το κατανεμημένο πρόβλημα της ανάθεσης μετατρέπεται σε βελτιστοποίηση της ανάθεσης σε κάθε κυψέλη, με την κυψέλη να γνωρίζει τις συνθήκες μετάδοσης για κάθε χρήστη στην περιοχή κάλυψής της.
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Αναζήτηση χρήστη και καναλιού με τις άριστες συνθήκες μετάδοσης για την ανάθεση καναλιού, για κάθε κυψέλη.
	Κόστος σηματοδότησης	Αποστολή στους γειτονικούς κόμβους του συνόλου των συχνοτήτων που χρησιμοποιείται σε κάθε κυψέλη.
5	Αλγόριθμος	Framework για την διαχείριση του εύρους ζώνης της backhaul σύνδεσης των femtocells και αντιμετώπιση παρεμβολών σε HetNet. [22]
	Στόχος	Πρόταση για ένα framework για την ενσωμάτωση των femtocells σε ένα IP δίκτυο το οποίο (1) διαχωρίζει και ρυθμίζει την χωρητικότητα της backhaul σύνδεσης ανάλογα με τις εισερχόμενες υπηρεσίες με στόχο την παροχή τουλάχιστον ενός ελάχιστου QoS ανά υπηρεσία και (2) λειτουργία του femtocell ως RelayNode όταν είναι δυνατό, για την αντιμετώπιση των παρεμβολών.
	Παράμετροι	Χρήση επιπλέον κεραιάς για την λειτουργία των RelayNode.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: εισερχόμενες υπηρεσίες, δεδομένα από το monitoring για το context των υπηρεσιών, feedback από το Relay module Έξοδοι: ρύθμιση του εύρους ζώνης για τα virtual partitions, λειτουργία σε RelayMode χρειάζεται.
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: Με το να λειτουργεί ως RelayNode, ένα femtocell προωθεί την μετάδοση ενός κοντινού τερματικού με αποτέλεσμα αυτό να μεταδίδει με μικρότερη ισχύ οπότε και προκαλεί λιγότερες παρεμβολές στα γειτονικά femtocells.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: το κάθε femtocell αποφασίζει τον διαχωρισμό της χωρητικότητας και την λειτουργία ως RelayNode ανάλογα με τον φόρτο δικτύου
	Στρώμα	Ανάμεσα στο IP Router και τα network interfaces
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται
	Κόστος σηματοδότησης	Θεωρείται αμελητέο

6	Αλγόριθμος	Δυναμικό ICIC σχήμα βασισμένο σε διαχωρισμό της κυψέλης σε περιοχές με την χρήση thresholds, βασισμένο σε reuse3. [23]
	Στόχος	Βελτίωση της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων για την βελτίωση της υπηρεσίας των χρηστών στα άκρα, μέσω ICIC σχήματος βασισμένο σε περιοχές κάλυψης και την χρήση thresholds.
	Παράμετροι	Threshold1: διαχωρισμός χρηστών σε κέντρο/άκρα, Threshold2: πλήθος κυψελών που προκαλούν παρεμβολές, περιοχές στις οποίες χωρίζεται η περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης και το εύρος ζώνης καθώς και η ισχύς μετάδοσης για την κάθε περιοχή (predefined)
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: μετρήσεις χρηστών, τιμές για τα thresholds, ένδειξη χρήσης όλης της περιοχής ή μόνο της επιτρεπτής Έξοδοι: καθορισμός περιοχής στην οποία βρίσκεται η χρήστης και του αντίστοιχου εύρους ζώνης και ισχύος μετάδοσης.
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: διαχωρισμός εύρους ζώνης βασισμένος σε reuse3, ορισμός περιοχών κάλυψης ανάλογα με τις παρεμβολές και μέγιστη ισχύ μετάδοσης για αυτές. Από την μετακίνηση τους τερματικού καθορίζεται μέσω των thresholds και των μετρήσεων του τερματικού η περιοχή στην οποία βρίσκεται και από αυτήν το εύρος ζώνης και η ισχύς που μπορεί να χρησιμοποιήσει. Ανάλογα με τις παρεμβολές ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει και εύρος ζώνης που υπόκειται εν δυνάμει σε παρεμβολές.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: μετάδοση των κομματιών του εύρους ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε κυψέλη. Η κάθε κυψέλη αποφασίζει ανάλογα με την παραπάνω πληροφορία, τα thresholds και τις μετρήσεις του χρήστη.
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται
	Κόστος σηματοδότησης	Μετάδοση του εύρους ζώνης ανά κυψέλη. Θεωρείται αμελητέο.
7	Αλγόριθμος	Αντιμετώπιση παρεμβολών μέσω beamforming σε τοπική MIMO μετάδοση. [15]
	Στόχος	Χρήση τοπικής CoMP μετάδοσης και επιλογή precoding vectors για το beamforming ώστε να μεγιστοποιείται το SINR και να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές για τους χρήστες στα άκρα.
	Παράμετροι	SINR threshold: καθορίζει τις απαιτήσεις για το ύψος των παρεμβολών το οποίο καθορίζει το πλήθος των δυνατών vectors, threshold για την απόσταση στην οποία οι χρήστες ενημερώνουν τους γειτονικούς κόμβους με τα precoding vectors
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: μετρήσεις για την κυψέλη εξυπηρέτησης/γειτονικές κυψέλες από τα τερματικά, precoding vectors από τις γειτονικές κυψέλες, threshold απόστασης, precoding vector για την

		κυψέλη εξυπηρέτησης, βελτίωση SINR για επιλογή ενός vector Έξοδοι: precoding vector σε κάθε σταθμό βάσης
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: τα τερματικά αναφέρουν σε όλες τις κυψέλες μέσα σε μια απόσταση τις μετρήσεις και ένα σύνολο από precoding vectors. Ο κάθε σταθμός βάσης διαλέγει το κατάλληλο precoding vector που μεγιστοποιεί το SINR και μειώνει τις παρεμβολές.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: οι μετρήσεις και το σύνολο των precoding vectors αναφέρονται από τους χρήστες στους σταθμούς βάσης στους οποίους παίρνεται η απόφαση για την επιλογή του precoding vector.
	Στρώμα	PHY
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται.
	Κόστος σηματοδοσίας	Δεν παρέχεται.
8	Αλγόριθμος	Αντιμετώπιση παρεμβολών με την χρήση Remote Radio Heads (RRHs) σε τοπική CoMP μετάδοση. [9]
	Στόχος	Αντιμετώπιση παρεμβολών για τους χρήστες στα άκρα με την χρήση RRHs μετατρέποντας όλους τους απομακρυσμένους κόμβους μετάδοσης σε έναν μεγάλο ενιαίο πομποδέκτη.
	Παράμετροι	Χρονική διάρκεια μετάδοσης μόνο του σταθμού βάσης και του σταθμού βάσης μαζί με τα RRHs, πλήθος χρηστών για MIMO μετάδοση, πλήθος χρηστών ανά κυψέλη.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: SINR και φασματική απόδοση για κάθε χρήστη και κόμβο μετάδοσης Έξοδοι: οι χρήστες επιλέγουν τον χρόνο μετάδοσης σταθμός βάσης, σταθμός βάσης και RRHs)
	Μέθοδος	Χρήση των RRHs για CoMP μετάδοση και εικονική επέκταση της περιοχής κάλυψης. Οι χρήστες στα άκρα επιλέγουν αν είναι καλύτερα να εκπέμπουν κατά την CoMP μετάδοση ή όχι.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: το κάθε τερματικό επιλέγει την καλύτερη στιγμή μετάδοσης ανάλογα με την φασματική απόδοση
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται
	Κόστος σηματοδοσίας	Αμελητέο: διασύνδεση σταθμού βάσης με τα RRHs μέσω οπτικών ινών
9	Αλγόριθμος	Παραλλαγές των σχημάτων reuse3, SFR, PFR και SFFR για HetNets. [24]
	Στόχος	Βελτίωση της διαχείρισης του εύρους ζώνης στα παραπάνω σχήματα για HetNets με femtocells.

	Παράμετροι	Αριθμός femtocells, SINR threshold για την μέτρηση του QoS (outage probability), απόσταση διαχωρισμού κέντρου/άκρων
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: αριθμός femtocells Έξοδοι: ανάθεση εύρους ζώνης ανάλογα με το σχήμα
	Μέθοδος	Στατικός Συντονισμός παρεμβολών: στατική ανάθεση εύρους ζώνης στα femtocells στα άκρα και το κέντρο ώστε να αξιοποιείται στο έπακρο το εύρος ζώνης ανάλογα με το σχήμα.
	Κατηγορία	Κεντριοποιημένα σχήματα: ο διαχωρισμός του εύρους ζώνης είναι στατικός και η ανάθεση γίνεται από τα eNBs
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται
	Κόστος σηματοδότησης	Δεν παρέχεται
10	Αλγόριθμος	Βέλτιστη τοποθέτηση των RNs σε ένα HetNet. [25]
	Στόχος	Μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας ή αυτής στα άκρα, με βέλτιστη τοποθέτηση των RNs ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές μέσα στη κυψέλη και των γειτονικών κυψελών.
	Παράμετροι	Πιθανές θέσεις για τα RNs, πλήθος RNs συνολική ισχύς μετάδοσης για τους σταθμούς βάσης και τα RNs, SINR threshold για τον διαχωρισμό κέντρου/άκρων
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: πιθανές θέσεις για τα RNs, πλήθος RNs Έξοδοι: τοποθέτηση των RNs στο χώρο
	Μέθοδος	Στατικός Συντονισμός παρεμβολών: εξαντλητική αναζήτηση των βέλτιστων τοποθεσιών για τα RNs, ώστε να προκαλούν λιγότερες παρεμβολές στους σταθμούς βάσης. Η ανάθεση του εύρους ζώνης γίνεται σύμφωνα με το reuse1 σχήμα.
	Κατηγορία	Καμία από τις κατηγορίες που έχουμε αναφέρει. Η μελέτη γίνεται σε επίπεδο δικτύου για την τοποθέτηση των RNs από τον διαχειριστή του δικτύου.
	Στρώμα	-
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν αναφέρεται
	Κόστος σηματοδότησης	Δεν αναφέρεται
11	Αλγόριθμος	Framework για την δυναμική ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των ABSs. [26]
	Στόχος	Αντιμετώπιση παρεμβολών σε HetNet μέσω δυναμικής ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των ABSs στο HeNB που τις προκαλεί.

	Παράμετροι	Τιμή για το SINR που καθορίζει πότε ένας χρήστης χαρακτηρίζεται ως 'θύμα'.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: μετρήσεις χρηστών (CQI, RPRS) Έξοδοι: χαρακτηρισμός χρηστών ως 'θύματα', ενεργοποίηση/απενεργοποίησης λειτουργίας ABS στο HeNB που προκαλεί παρεμβολές, ενίσχυση του scheduler ώστε να προγραμματίζει προς μετάδοση τα 'θύματα' κατά την διάρκεια των ABSs.
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: συνεχής παρακολούθηση του SINR των χρηστών και χαρακτηρισμός τους ως θύματα όταν οι παρεμβολές ξεπερνάνε ένα όριο. Ενεργοποίησης/Απενεργοποίηση ABSs το HeNB που προκαλεί τις παρεμβολές και προγραμματισμός μετάδοσης των θυμάτων κατά την διάρκεια των ABSs επηρεάζοντας την μετρική του scheduler για την επιλογή των χρηστών.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: η επιλογή του pattern για τα ABSs και η ενεργοποίηση/απενεργοποίησή τους γίνονται από τον σταθμό βάσης.
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται
	Κόστος σηματοδότησης	Δεν παρέχεται
12	Αλγόριθμος	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική για femtocells (CTRL). [27]
	Στόχος	Προστασία του uplink των χρηστών του macrocell από τις παρεμβολές του femtocell, αποδοτική χρήση των πόρων στα femtocells και προστασία του uplink των femtocells από τις burst μεταδόσεις.
	Παράμετροι	Μέρος του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: όριο φόρτου ανά κυψέλη Έξοδοι: ισχύς μετάδοσης για αντιμετώπιση burst παρεμβολών, μέγιστη ισχύς μετάδοσης για τους χρήστες του femtocell, μέγιστο SINR
	Μέθοδος	Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: τρεις αλληλοσυμπληρούμενες λειτουργίες που καθορίζουν το μέγιστο SINR, την μέγιστη ισχύ μετάδοσης και την προσωρινή ισχύ για την αντιμετώπιση burst παρεμβολών. Οι αποφάσεις από κάθε μηχανισμό λαμβάνονται με βάση το feedback ανάμεσα το eNB και το femtocell.
	Κατηγορία	Κατανεμημένος: δεν ανταλλάσσεται πληροφορία ανάμεσα στα femtocells αλλά χρειάζεται ανάμεσα στο eNB και τα femtocells.
	Στρώμα	MAC
	Κόστος επεξεργασίας	Μια διεργασία ανά RB/χρήστη για την MTPC λειτουργία

	Κόστος σηματοδότησης	Αμελητέο για το feedback ανάμεσα στο eNB-femtocell.
12	Αλγόριθμος	Χρήση Interference alignment (IA) για αντιμετώπιση παρεμβολών σε HetNet. [28]
	Στόχος	Προστασία του Uplink των macrocells από τις παρεμβολές των microcells.
	Παράμετροι	Πλήθος από Microcells, ομοιόμορφα κατανομημένοι χρήστες στην περιοχή κάλυψης, τυχαία επιλεγμένο διάνυσμα ευθυγράμμισης στην περίπτωση επιλογής από προκαθορισμένο σύνολο.
	Είσοδοι/έξοδοι	Είσοδοι: CSI για μετάδοση από το microcell προς το macrocell, διάνυσμα ευθυγράμμισης στην περίπτωση προκαθορισμένου συνόλου Έξοδοι: ευθυγραμμισμένα σήματα για μετάδοση από microcell προς macrocell
	Μέθοδος	Στατικός/Δυναμικός Συντονισμός παρεμβολών: ανάλογα με τον τρόπο επιλογής του διανύσματος ευθυγράμμισης (προκαθορισμένο σύνολο, συντονισμός, ασυντόνιστο σχήμα).
	Κατηγορία	Κατανομημένος: συντονισμός εκτελείται ανάλογα με τον τρόπο επιλογής του διανύσματος ευθυγράμμισης
	Στρώμα	PHY: precoding στα femtocells και filtering στους σταθμούς βάσης
	Κόστος επεξεργασίας	Δεν παρέχεται
	Κόστος σηματοδότησης	Συντονισμός για επιλογή διανύσματος ευθυγράμμισης

## 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε το πρόβλημα της αντιμετώπισης των παρεμβολών σε LTE και LTE-Advanced δίκτυα μελετώντας τεχνικές που εφαρμόζονται ήδη και νέες προτεινόμενες τεχνικές, τόσο σε επίπεδο συστήματος όσο και σε επίπεδο κόμβου. Από τις τεχνικές που μελετήθηκαν είναι φανερό ότι το πρόβλημα είναι πολυεπίπεδο, με διαφορετικό κόστος και περιορισμούς ανάλογα με την προσέγγιση.

Σε επίπεδο χρονοπρογραμματισμού της μετάδοσης (scheduling), είναι σημαντική η διατήρηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε ένα multiservice σύστημα στο οποίο η κάθε παρεχόμενη υπηρεσία έχει διαφορετικές απαιτήσεις και επίπεδο ικανοποίησης των χρηστών. Από αυτή την οπτική, το scheduling έχει ιδιαίτερα μεγάλη σημασία λόγω της ικανότητάς του να επιλέγει τις υπηρεσίες που θα εξυπηρετηθούν και τους πόρους που θα χρησιμοποιήσουν και θα πρέπει να μπορεί να λαμβάνει υπόψη τους φόρτους που οι υπηρεσίες αυτές επιφέρουν στο δίκτυο και το επίπεδο ικανοποίησης για την κάθε μια.

Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής ενός HetNet συστήματος οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να ικανοποιούν πρακτικούς περιορισμούς και να είναι βιώσιμοι εμπορικά. Είναι σημαντικό να διατηρείται η συμβατότητα με τα προηγούμενα Releases του προτύπου και τις συσκευές των χρηστών για τα Releases αυτά και να μην απαιτούνται ριζικές αλλαγές από την πλευρά του διαχειριστή του δικτύου. Από την οπτική των microcells οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να είναι οικονομικές και να μην απαιτούν αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα. Σημαντικός παράγοντας για την επίλυση των παρεμβολών σε ένα HetNet αποτελεί η μελέτη του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί το δίκτυο, αστικό ή αγροτικό, καθώς οι διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης σε αυτό καθορίζουν την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας. Τέλος, η δυναμική και χωρίς μελέτη εγκατάστασή τους στο δίκτυο από οικιακούς χρήστες οδηγεί στην ανάγκη να είναι αυτό-διαχειριζόμενα και να προσαρμόζονται αυτόματα στις συνθήκες του δικτύου.

Σε επίπεδο κόμβου τα σχήματα που μελετήθηκαν χρησιμοποιούν διαφορετικές μετρητικές για την αξιολόγηση της απόδοσής τους και κάνουν διαφορετικές υποθέσεις για τα συστήματα στα οποία υλοποιούνται. Όλα όμως συμφωνούν ότι η βελτίωση της υπηρεσίας στα άκρα της κυψέλης είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία του προτύπου. Στα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν οι προτεινόμενες τεχνικές συμπεριλαμβάνεται και ο περιορισμός του κόστους στον συντονισμό τους. Η μη χρήση ενός κεντρικού κόμβου για τον συντονισμό των σταθμών βάσης στα LTE/LTE-Advanced δίκτυα οδηγεί στην χρήση κατανεμημένων σχημάτων. Από αυτά, όσα χρησιμοποιούν συντονισμό, καλούνται να τον υλοποιούν με μικρό κόστος. Στα HetNets, τα σχήματα αυτά καλούνται να λύσουν και τα προβλήματα που προκύπτουν από την κοινή χρήση του εύρους ζώνης με τα microcells. Σε γενικές γραμμές όλες οι προτεινόμενες τεχνικές καλούνται να υλοποιήσουν ένα tradeoff ανάμεσα στην συνολική ρυθμαπόδοση και χωρητικότητα του συστήματος. Σημαντικό παράγοντας για το παραπάνω αποτελεί ο διαχωρισμός της κυψέλης στο κεντρικό μέρος και τα άκρα της. Από τα σχήματα που μελετήθηκαν προκύπτει ότι η αντιμετώπιση των παρεμβολών στα άκρα έχει επίπτωση στην απόδοση στο κέντρο και ότι η ανάθεση των πόρων στα άκρα και το κέντρο θα πρέπει να προσαρμόζεται δυναμικά ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης, για παράδειγμα ο φόρτος μετάδοσης των γειτονικών κυψελών. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την πλειοψηφία των σχημάτων αυτών είναι ότι ίσως θα ήταν προτιμότερη η χρήση διαφορετικών σχημάτων σε διαφορετικά σημεία του δικτύου ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης αλλά πουθενά στην βιβλιογραφία, μέχρι στιγμής, δεν έχει μελετηθεί μια τέτοια υλοποίηση.





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
ABS	Σχεδόν Άδεια Υποπλαίσια
acceptable	αποδεκτός
access link	ζεύξη πρόσβασης
acknowledgement	επιβεβαίωση
adaptive	προσαρμοζόμενος
adaptive beamforming	προσαρμοστικός σχηματισμός δέσμης
adjacent channel interference	παρεμβολές από γειτονικές συχνότητες
aggressor cell	επιτιθέμενη κυψέλη
AM	Εκπομπή Με Επιβεβαίωση
amplify-and-forward	Ενίσχυσε-και-προώθησε
anchor	σημείο αναφοράς
ARQ	αυτόματη επαναποστολή των λανθασμένων πακέτων
Array gain	Κέρδος συστοιχίας
autonomous	αυτόνομος
backhaul link	σύνδεση με το δίκτυο κορμού
bandwidth	εύρους ζώνης
barred	απαγορευμένος
Base Station	σταθμός βάσης
beamforming	σχηματισμό δέσμης
black-list	κυψέλες τις οποίες το UE δεν πρέπει να χρησιμοποιήσει
BSR	Αναφορά Κατάστασης Ενδιάμεσης Μνήμης Αποστολής
CA	συνάθροιση φερουσών
Capacity Distribution module	Στοιχείο Διαμοιρασμού της χωρητικότητας
Carrier Aggregation	Συνάθροιση Φερουσών
CC	συστατική φέρουσα
CDM	Πολυπλεξία στο πεδίο της κωδικοποίησης
CDMA	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διάρθρωση Κώδικα
Cell	Κυψέλη
cell-specific interleaving	παρεμβολή κυψελών
cell-specific scrambling	κρυπτογράφηση ανά κυψέλη
central radio controller	κεντρικός κόμβος ελέγχου
centralized	κεντριοποιημένος
channel-dependent scheduling	χρονοπρογραμματισμό με βάση την ποιότητα καναλιού
CIF	Πεδίο Ένδειξης Φέρουσας
ciphering	κρυπτογράφηση
circuit switched	μεταγωγή κυκλώματος
cochannel	ομοκαναλικό
co-channel interference	παρεμβολές από την ίδια συχνότητα
common NAS information	πληροφορία που αφορά όλους τους χρήστες
CoMP	Συντονισμένη Πολύ-σημειακή μετάδοση
conflict	σύγκρουση
connection or mobility layer	Στρώμα Διαχείρισης Σύνδεσης και Κινητότητας
Context Acquisition Information	Στοιχείο παροχής πληροφορίας για τον όγκο

	δεδομένων στο δίκτυο
context-aware	ενημερότητας περιεχομένου
control channels	κανάλια σηματοδότησης
control plane	Διαχείριση Ελέγχου Συστήματος
coordinated	τεχνικές με συντονισμό
core network	Δίκτυο πυρήνα
COUNT	μετρητής
CP	Κυκλικό Πρόθεμα
CRC	Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού
cross-carrier scheduling	χρονοπρογραμματισμού σε πολλαπλές φέρουσες
CSG	Πρόσβαση Κλειστού Τύπου
data gateway	πύλη δεδομένων
DCI	πληροφορία ελέγχου στο downlink
dead zone	νεκρή ζώνη
decode-and-forward	Αποκωδικοποίησε-και-προώθησε
dedicated NAS information	πληροφορία για συγκεκριμένο χρήστη
default bearer)	εξ' ορισμού bearer
direct link	άμεση σύνδεση
distributed	κατανεμημένος
Diversity gain	Κέρδος διαφορισμού
DL-SCH	Κοινό Μεριζόμενο Κανάλι Μεταφοράς Κατερχόμενη ζεύξης
Downlink	Κατερχόμενη Ζεύξη
DRB	φορέας μεταφοράς δεδομένων χρήστη
DRX	Διακοπτόμενη Λήψη
DRX cycle	κύκλος λειτουργίας
DRX period	αδρανής περίοδος
DTCH	Αποκλειστικό Κανάλι Μετάδοσης
dynamic	δυναμικός
dynamic scheduling	δυναμικός χρονοπρογραμματισμός
dynamic transmit-power control	δυναμική προσαρμογή της ισχύς εκπομπής
ECM-ACTIVE	ενεργή κατάσταση
ECM-IDLE	αδρανή κατάσταση
EFER	Βελτιωμένη Τμηματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
EMM	Διαχείριση Κινητικότητας στο EPS
entity	οντότητα
EPS	Διαχείριση σύνδεσης στο EPS
EPS bearer	φορέας
ETSI	Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων
fair	Δίκαιος
FDD	Αμφίδρομη επικοινωνία με Διαίρεση Συχνότητες
FDM	Πολυπλεξία πεδίο της συχνότητας
FDMA	Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης
FFR	Τμηματικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνοτήτων
First Generation	Δίκτυο πρώτης γενιάς
flat	Επίπεδος
Fourth Generation	Δίκτυο Τέταρτης γενιάς
frequency and time opportunistic	ευκαιριακός και στο επίπεδο του χρόνου και στο

	επίπεδο συχνότητας
frequency hopping	συχνή αλλαγή συχνότητας
frequency reuse	επαναχρησιμοποίηση συχνότητας
frequency-domain techniques	τεχνικές που βασίζονται στο πεδίο της συχνότητας
greedy filling	άπληστος αλγόριθμος
GSM	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
guard-period	ζώνης φύλαξης
handover	μεταπομπής
HARQ	οντότητα αποστολής/επαναποστολής
HD-FDD	Ημί-αμφίδρομη επικοινωνία με Διαίρεση Συχνότητας
Header Compression	Συμπύεση επικεφαλίδας
HeNB	Οικιακός σταθμός βάσης
HetNets	ετερογενή δίκτυα
HIZ	Ζώνη Υψηλών Παρεμβολών
HSPA	Πρόσβαση Υψηλής Ταχύτητας Πακέτων δεδομένων
IA	Ευθυγράμμισης Παρεμβολών
ICI	Διακυψελικές Παρεμβολές
ICIC	Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών
ICZ	Ζώνη Ακύρωσης Παρεμβολών
IETF	Τακτική Δύναμη Μηχανικών Ίντερνετ
IFR	Σταδιακή Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
IFZ	Ζώνη χωρίς παρεμβολές
Inactivity Timer	χρονομετρητής
inband	διαμοιρασμός ίδιας συχνότητας
integrity protection	έλεγχος ακεραιότητας
interference avoidance	αποφυγή παρεμβολών
Interference Cancellation	Ακύρωση Παρεμβολών
Interference Coordination	Συντονισμός Παρεμβολών
interference mitigation	μετρίαση παρεμβολών
Interference Randomization	Διασπορά Παρεμβολών
interfering neighbor set	σύνολο των παρεμβληθέντων γειτόνων
inter-layer interference	παρεμβολές ανάμεσα σε δύο στρώματα
ITU	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
ITU-R	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών -Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών
ITXPC	Έλεγχος Στιγμιαίας Ισχύος Μετάδοσης
IZ	Ζώνη Παρεμβολών
layers	στρώμα
Lightly-Loaded subframes	Ελαφρώς Φορτωμένα Υποπλαίσια
link adaptation	προσαρμογής στο κανάλι
LIZ	Ζώνη Χαμηλών Παρεμβολών
load balancing	διαμοιρασμός φόρτου
load management	Διαχείριση φόρτου
long BSRs	μακριές αναφορές κατάστασης ενδιάμεσης μνήμης
long cycle	μεγάλη περίοδος
lossless	χωρίς απώλειες
LTE	μακροπρόθεσμη εξέλιξη προτύπου HSPA

MAC Control Elements	μηνύματα Ελέγχου MAC
MAC-I	Κώδικας Αυθεντικοποίησης Μηνύματος για Ακεραιότητα
major	μεγάλος
mapping	τοπογράφηση
MBR	μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή bit rate
Mesh Network	δίκτυο πλέγματος
MIB	Κύριο μπλοκ πληροφοριών
minor	μικρός
MME	Διαχειριστής Κινητότητας
Mobile Broadband	Κινητή Ευρυζωνικότητα
Mobility	Κινητότητα
modification period	περίοδο τροποποίησης
MR	αλγόριθμος μέγιστης ρυθμαπόδοσης
MTXPC	Έλεγχος Μέγιστης Ισχύος Μετάδοσης
multipath fading	εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών
multiuser diversity	ποικιλομορφία συνδέσεων χρηστών
mute	σίγαση
non-adaptive	μη-προσαρμοζόμενος
non-radio aspects	συστατικά εκτός της ραδιο-επικοινωνίας
NRT	Υπηρεσίες μη-πραγματικού χρόνου
OFDM	Ορθογώνια Πολυπλεξία με Πολλαπλές Φέρουσες
OFDMA	Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης
opportunistic	Ευκαιριακός
OSG	Πρόσβαση Ανοιχτού Τύπου
outband	επικοινωνία σε διαφορετική συχνότητα
overhead	επιπλέον κόστος
overload	διαχείριση υπερφόρτωσης
packet loss rate	ρυθμός απώλειας πακέτων
packet switched	μεταγωγή πακέτου
paging	μήνυμα ειδοποίησης
paired spectrum	κατά ζεύγος φάσμα
PARP	Αναλογία Μέγιστης-Μέσης Ισχύος
PBR	Προτεραιότητα Bit Rate
PCC	Πρωταρχική Συστατική Φέρουσα
Pcell	Πρωταρχική Κυψέλη
PCRF	Πολιτική και Έλεγχος Χρέωσης
PDCP	Πρωτόκολλο Σύγκλισης Πακέτων Δεδομένων
PD SCH	Μεριζώμενο Κανάλι Κατερχόμενη ζεύξης
PDU	Πακέτο Δεδομένων Πρωτοκόλλου
persistent scheduling	περιοδικός χρονοπρογραμματισμός
PF	αναλογικά-δίκαιος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού
PFR	Μερικής Επαναχρησιμοποίησης Συχνοτήτων
P-GW	Πύλη Δικτύου Δεδομένων
pilot symbol	πιλοτικό σύμβολο
PLMN	Δίκτυο Κινητής Τηλεφωνίας
power control	διαχείριση της ισχύος μετάδοσης
PR	πρωτεύον δέκτης
precoding vector	διανύσματος προ κωδικοποίησης

Primary Segment	Πρωτεύων Τμήμα
primary system	πρωτεύον σύστημα
PT	πρωτεύων πομπός
PUSCH	Μεριζόμενο Κανάλι Ανερχόμενης ζεύξης
QoS	Ποιότητα Υπηρεσίας
radio frame	ράδιο-πλαίσιο
Random Access Procedure	Διαδικασία Τυχαίας Προσπέλασης
range expansion	επέκταση κάλυψης
RATs	τεχνολογίες πρόσβασης ράδιο-δικτύου
RB	μπλοκ πόρων
RE	στοιχείο πόρος
rebalancing	εξισορρόπηση φόρτου
receiver	δέκτης
Relay Node	κόμβος αναμετάδοσης
retransmission buffer	ενδιάμεση μνήμη επαναποστολής
reuse factor	Συντελεστής Επαναχρησιμοποίησης
RLC	Πρωτόκολλο Ελέγχου Ράδιο-ζεύξης
ROHC	Εύρωστη Συμπίεση Επικεφαλίδας
RRC	Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ράδιο-πόρων
RRC_CONNECTED	Συνδεδεμένη κατάσταση ράδιο-ζεύξης
RRC_IDLE	Αδρανής κατάσταση ράδιο-ζεύξης
RRH	Απομακρυσμένες Ραδιοσταθμός Βάσης
RRM	Διαχείριση Πόρων ραδιοεπικοινωνίας
RT	Υπηρεσίες πραγματικού χρόνου
SAC	κόμβος αποδοχής συνδέσεων
SAP	Σημεία Πρόσβασης Υπηρεσίας
SCC	Δευτερεύουσα Συστατική Φέρουσα
Scell	Δευτερεύοντες Κυψέλες
SC-FDMA	Διαίρεση Συχνότητας Μονής Φέρουσας Πολλαπλής Πρόσβασης
Scheduling	Χρονοπρογραμματισμός
S-criterion	κριτήριο επιλογής
SDM	Πολυπλεξία στο πεδίο του χώρου
SDU	Πακέτο Δεδομένων Υπηρεσίας
seamless	απρόσκοπτη
Second Generation	Δίκτυο δεύτερης γενιάς
Secondary Segment	Δευτερεύων Τμήμα
secondary system	δευτερεύον σύστημα
segmentation	κατάτμηση
semi-distributed	ημί-κατανεμημένος
semi-persistent scheduling	ημί-περιοδικός χρονοπρογραμματισμός
Service Admission Control	Στοιχείο ελέγχου αποδοχής συνδέσεων
session management layer	στρώμα διαχείρισης συνεδρίας
SFFR	Προσαρμοστική Τμηματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
SFR	Προσαρμοστική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
S-GW	Πύλη Εξυπηρέτησης
short BSRs	κοντές αναφορές κατάστασης ενδιάμεσης μνήμης
short cycle	σύντομη περίοδος
SIB	μπλοκ πληροφοριών συστήματος

SIB1	Μπλοκ Πληροφοριών Συστήματος τύπου 1
SIB2	Μπλοκ Πληροφοριών Συστήματος τύπου 2
signaling transmission	μετάδοση σηματοδότησης
single point of failure	μοναδικά σημεία αποτυχίας
slots	υποδοχές
SN	Αριθμός Ακολουθίας
SON	Αυτό-Οργανωμένα Δίκτυα
Spatial Multiplexing	Χωρική Πολυπλεξία
spatial-domain	χωρικό πεδίο
SR	δευτερεύων δέκτης
SRB	φορέας για μετάδοση σηματοδότησης
SRS	Σήμα Αναφοράς
ST	δευτερεύων πομπός
static	στατικός
S-TMSI	αριθμός αναγνώρισης
stream	ροή
sub-bands	υποζώνες
subcarrier	φέρουσα
subframe	υποπλαίσιο
suitable	κατάλληλος
system information	πληροφορία συστήματος
TA	περιοχής εντοπισμού
TDD	Αμφίδρομη επικοινωνία με διαίρεση χρόνου
TDM	πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου
TDMA	Πολύπλεξη Χρονικής Διαίρεσης Πολλαπλής Πρόσβασης
TD-SCDMA	Σύγχρονη διαίρεση Χρόνου - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
Third Generation	Δίκτυο Τρίτης γενιάς
threshold	κατώφλι
throughput	Ρυθμαπόδοση
tier	επίπεδο
time-domain techniques	τεχνικές που βασίζονται στο πεδίο του χρόνου
TM	Διαφανής Εκπομπή
traffic queues	ουρές μετάδοσης
Transmission Resource Structure	Δομή Πόρων Μετάδοσης
transport blocks	μπλοκ μεταφοράς
transport channels	κανάλια μεταφοράς
TSINRC	Έλεγχος Επιθυμητού SINR
TTI	χρονική περίοδος εκπομπής
UCI	πληροφορία ελέγχου στο uplink
UE	εξοπλισμός χρηστών
UE context	Πληροφορίες σύνδεσης χρήστη
UL-SCH	Κοινό Μεριζόμενο Κανάλι Μεταφοράς Ανερχόμενης ζεύξης
UM	Εκπομπή Χωρίς Επιβεβαίωση
unpaired spectrum	άζευκτο φάσμα
Uplink	Ανερχόμενη Ζεύξη
User context	Πληροφορία χρήστη
user data transmission	μετάδοση δεδομένων του χρήστη
user plane	Διαχείριση Δεδομένων Χρήστη



victim cell	κυψέλη θύμα
VoIP	Μετάδοση φωνής μέσω IP
white-list	κυψέλες στις οποίες το UE μπορεί να συνδεθεί
HII	Ένδειξη Παρεμβολών
MIMO	Πολλαπλής Εισόδου, Πολλαπλής Εξόδου
OI	Ένδειξη Υπερφόρτωσης

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
ABS	Almost Blank Subframe
AM	Acknowledged Mode
ARQ	Automatic Repeat Request
AS	Access Stratum
BSR	Buffer Status Report
CA	Carrier Aggregation
CA-FEI	Context-Aware Femtocell Integration
CAM	Capacity Management Module
CC	Component Carrier
CDM	Code Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
CE	Capacity Exchange
CIAM	Context Acquisition Information Module
CID	Cell ID
CIF	Carrier Indicator Field
CoMP	Coordinated Multipoint
CP	Control Plane
CP	Cyclic Prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSG	Closed Subscriber Group
CTRL	Complementary Tri-Control Loops
DCI	Downlink Control Information
DL	Downlink
DL-SCH	Downlink Shared Transport Channel
DRB	Data Radio Bearers
DRX	Discontinuous Reception
DTCH	Dedicated Traffic Channel

ECM	EPS Connection Management
ECM-ACTIVE	EPS Connection Management Active
ECM-IDLE	EPS Connection Management IDLE
FFR	Enhanced Fractional Frequency Reuse
eICIC	enhanced ICIC
EMM	EPS Mobility Management
eNB	evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FAP	Femtocell Access Point
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
FER	Frame Error Rate
FFR	Fractional Frequency Reuse
FID	Femtocell Identification
FUE	Femtocell UE
GBR	Guaranteed Bit Rate
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HD-FDD	Half-Duplex FDD
HeNB	Home eNB
HII	High Interference Indicator
HIZ	High Interference Zone
HPS	Hybrid Partitioning Scheme
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HUE	Home eNB UE
IA	Interference Alignment
ICI	Inter-cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination

ICZ	Interference Cancellation Zone
IETF	Internet Engineering Task Force
IFR	Incremental Frequency Reuse
IFZ	Interference Free Zone
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ISD	Inter-Site Distance
ITU	International Telecommunications Union
ITU-R	International Telecommunications Union – Radio Communication Sector
ITXPC	Instantaneous Transmit Power Control
IZ	Interference Zone
LIZ	Low-Interference Zone
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC-I	Message Authentication Code for Integrity
MBR	Maximum Bit Rate
MeNB	Macrocell eNB
MIB	Master Information Block
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MR	Maximum Rate
MTXPC	Maximum Transmit Power Control
MUE	Macrocell UE
NAS	Non Access Stratum
NLOS	Non-Line of Sight
NRT	Non-Real Time
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OI	Overload Indicator
OSG	Open Subscriber Group
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCC	Primary Component Carrier

PCEF	Policy Control Enforcement Function
Pcell	Primary Serving Cell
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packet Error Rate
PF	Proportional Fair
PFR	Partial Frequency Reuse
P-GW	PDN Gateway
PLMN	Public Line Mobile Network
PR	Primary Receiver
PRB	Prioritized Bit Rate
PT	Primary Transmitter
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QCI	QoS Class Identifier Channel Quality Indicator
QoS	Quality of Service
RB	Resource Block
RE	Resource Element
REB	Range Expansion Bias
RLC	Radio Link Control
RN	Relay Nodes
RNTP	Relative Narrowband Transmit Power
ROHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Control
RRC_CONNECTED	Radio Resource Control - Connected
RRC_IDLE	Radio Resource Control - Idle
RRH	Remote Radio Head
RRM	Radio Resource Management
RS	Reference Signal
RT	Real Time
SAC	Service Admission Control

SAE	System Architecture Evolution
SAP	Service Access Point
SAW	Stop-And-Wait operation
SCC	Secondary Component Carrier
Scell	Secondary Serving Cell
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SDM	Spatial Division Multiplexing
SDU	Service Data Unit
SFFR	Soft Fractional Frequency Reuse
SFR	Soft Frequency Reuse
S-GW	Serving Gateway
SI	System Information
SIB	System Information Block
SIB1	System Information Block type 1
SIB2	System Information Block 2
SN	Sequence Number
SON	Self-Organized Network
SR	Secondary Receiver
SRB	Signaling Radio Bearers
SRS	Sounding Reference Signals
ST	Secondary transmitter
TA	Tracking Area
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time-Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time-Division Synchronous Code Division Multiple Access
TFF	Traffic Flow Template
TM	Transparent Mode
TSINRC	Target SINR Control
TTI	Transmission Time Interval
UCI	Uplink Control Information
UE	User Equipment
UL	Uplink

UL-SCH	Uplink Shared Transport Channel
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	User Plane
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
VoIP	Voice over IP



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall and J. Sköld, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Associated Press, 2011.
- [2] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, Eds., LTE - The UMTS Long Term Evolution, 2nd ed., Wiley, 2011.
- [3] D. Sharma, "Study paper on scalable OFDMA Access," 2010. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/deepakecrbs/ofdma-basics>. [Accessed October 2013].
- [4] R. Kwan and C. Leung, "A Survey of Scheduling and Interference Mitigation in LTE," *Journal of Electrical and Computer Engineering - Special issue on LTE/LTE-advanced cellular communication networks*, vol. 2010, no. 1, 2010.
- [5] K. Dimou, "Interference Management within 3GPP LTE Advanced".
- [6] "LTE-Advanced and the Evolution to 4G Cellular Systems," School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, 2009. [Online]. Available: <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/bwn/ltea/projectdescription.html>. [Accessed October 2013].
- [7] "Long Term Evolution Protocol," Freescale semiconductor, [Online]. Available: [http://www.freescale.com/files/wireless\\_comm/doc/white\\_paper/LTEPTCLOVWWP.pdf](http://www.freescale.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/LTEPTCLOVWWP.pdf). [Accessed October 2013].
- [8] F. R. M. Lima, S. Wantsedt, F. R. P. Cavalcanti and W. C. Freitas Jr., "Scheduling for Improving System Capacity in Multiservice 3GPP LTE," *Journal of Electrical and Computer Engineering - Special issue on LTE/LTE-advanced cellular communication networks*, vol. 2010, no. 3, 2010.
- [9] J. Kim, D. Lee and W. Sung, "Interference coordination of heterogeneous LTE systems using remote radio heads," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2013, 2013.
- [10] J. Wannstrom, "LTE-Advanced," 3GPP, May 2012. [Online]. Available:

- ] <http://www.3gpp.org/lte-advanced>. [Accessed October 2013].
- [11 K. Chatzikokolakis, P. Spapis, M. Stamatelatos, G. Katsikas, R. Arapoglou, A. Kaloxylos and N. Alonistioti, "Spectrum Aggregation in Cognitive Radio Access Networks from Power control perspective".
- [12 A.-B. Hamza, A.-R. Hanafy, A. Abdel-Karim, A. Zahran, H. Hamza, H. Elsaid, K. Elsayed, M. Ismail, M. Kamel and M. Elkhamy, "Inter-Cell Interference Coordination".
- [13 M. Mehta, O. G. Aliu, A. Karandikar and M. A. Imran, "A Self-Organized Resource Allocation Using ICIC In Relay-Assisted Cellular Networks," 2011.
- [14 I. Guvenc, "Capacity and Fairness Analysis of Heterogeneous Networks with Range Expansion and Interference Coordination," *IEEE Communication Letters*, vol. 15, no. 10, 2011.
- [15 L. Liu, J. Zhang, J.-C. Yu and J. Lee, "Intercell Interference Coordination through Limited Feedback," *Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, vol. 2010, 2010.
- [16 Y. Xiang, J. Luo and C. Hartmann, "Inter-Cell Interference Mitigation through Flexible Resource Reuse in OFDMA based Communication Networks," in *2007, 13th European Wireless Conference EW2007*.
- [17 N. D. El-dim, E. Sourour, I. Ghaleb and K. Seddik, "Femtocell Interference Avoidance using Femtocell Identification," *28th National Radio Science Conference (NRSC)*, pp. 1-9, 2011.
- [18 S. W. Peters, A. Y. Panah, K. T. Truong and R. W. Heath Jr., "Relay Architectures for 3GPP LTE-Advanced," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, 2009.
- [19 A. B. Saleh, S. Redana, J. Hamalainen and B. Raaf, "On the Coverage Extension and Capacity Enhancement of Inband Relay Deployments in LTE-Advanced Networks," *Journal of Electrical and Computer Engineering - Special issue on LTE/LTE-advanced cellular communication networks*, vol. 2010, no. 4, 2010.

- [20 J. Huang, P. Xiao and X. Jing, "A Downlink ICIC Method Based on Region in the  
] LTE-Advanced System," *IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor  
nad Mobile Radio Communication Workshops (PIMRC Workshops)*, pp. 420 - 423,  
2010.
- [21 I. G. Fraimi, V. D. Papoutsis and S. A. Kotsopoulos, "A Decentralized Subchannel  
] Allocation Scheme with ICIC for Multi-Cell OFDMA Systems," *Global  
Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-5, 2010.
- [22 P. Makris, N. Nomikos, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, C. Skianis, J. Zhang and C.  
] Verikoukis, "A context-aware framework for the efficient integration of femtocells in  
IP and cellular infrastructures," *EURASIP Journal on Wireless Communications and  
Networking*, vol. 2013, 2013.
- [23 C. You, G. Yoon, C. Seo, S. Portugal, G. Park, T. Jung, H. Liu and I. Hwang,  
] "Intercell Interference Coordination Using Threshold-Based Region Decisions,"  
*Wireless Personal Communications*, vol. 59, no. 4, pp. 789-806, 2011.
- [24 M. M. Selim, M. El-Khamy and M. El-Sharkawy, "Enhanced Frequency Reuse  
] Schemes for Interference Management in LTE Femtocell Networks," *International  
Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 326 - 330, 2012.
- [25 O. A. Elgendy, M. H. Ismail and K. Elsayed, "On the relay placement problem in a  
] multi-cell LTE-Advanced system with co-channel interference," *IEEE 8th  
International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and  
Communications (WiMob)*, pp. 300 - 307, 2012.
- [26 M. Kame and K. Elsayed, "Performance Evaluation of a Coordinated Time-Domain  
] eICIC Framework based on ABSF in Heterogeneous LTE-Advanced Networks,"  
*IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 5326 - 5331, 2012.
- [27 J.-H. Yun and K. G. Shin, "Adaptive Interference Management of OFDMA  
] Femtocells for Co-Channel Deployment," *Selected Areas in Communications*, vol.  
29, no. 6, pp. 1225 - 1241, 2011.
- [28 S. K. Sharma, S. Chatzinotas and B. Ottersten, "Interference alignment for spectral

] coexistence of heterogeneous networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, 2013.