

Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Ασύρματα Δίκτυα LTE: Αξιολόγηση επίδοσης κατερχόμενης ζεύξης
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Πάπαδάκης Χρυσοβαλάντης Εμμανουήλ
Πατρώνυμο	Χριστόφορος
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΣΠ/ 10059
Επιβλέπων	Δρ. Βέργαδος Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής



Ημερομηνία Παράδοσης **Φεβρουάριος 2013**

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Δημήτριος Βέργαδος
Επ. Καθηγητής

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής

Παναγιώτης Κοτζανικολάου
Λέκτορας

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επόπτη καθηγητή της εργασίας μου κύριο Βέργαδο Δημήτριο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επιπλέον, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω το Διδάκτορα Πανεπιστημίου Πειραιώς κύριο Μυριδάκη Νικόλαο, που με την ψυχολογική υποστήριξη καθώς και με τις πολύτιμες και ουσιαστικές του γνώσεις και συμβουλές, βοήθησε σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη και την ανάλυση των δικτύων LTE, τα οποία αποτελούν τη σύγχρονη εξέλιξη της τεχνολογίας στα ασύρματα κινητά δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Η εργασία αποτελείται από το θεωρητικό και το πρακτικό μέρος.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στην ιστορική αναδρομή και εξέλιξη των κινητών δικτύων επικοινωνιών, από τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς έως τα σημερινά δίκτυα της 4^{ης} γενιάς. Ακολουθεί η ανάλυση του τεχνολογικού προτύπου LTE, της αρχιτεκτονικής του καθώς και των επιπέδων του, ειδικότερα του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου προσπέλασης. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται διάφοροι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος καθώς και διάφορες τεχνικές μετρίασης της διακυβελικής παρεμβολής.

Επίσης στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διατριβής, αξιολογήθηκε η επίδοση ενός δικτύου LTE με τη χρήση του προγράμματος Matlab. Σκοπός ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς και της μεταβολής των μετρικών του μέσου ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων με σκοπό την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του συστήματος, της ρυθμοαπόδοσης για τον υπολογισμό της κίνησης των δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν μέσω του διαύλου και της χωρητικότητας Shannon του καναλιού, για τον προσδιορισμό του μέγιστου δυνατού ρυθμού αξιόπιστης μετάδοσης μέσα από το κανάλι.

Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μια προσομοίωση που βασίστηκε στις προδιαγραφές του LTE-TDD αποκλειστικά και μόνο για την περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης. Δηλαδή στην περίπτωση όπου ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί ένα κινητό τερματικό, και συγκεκριμένα όταν το τερματικό χρησιμοποιεί έναν και μόνο πόρο (SU-MIMO). Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται μόνο στο Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), το οποίο αποτελεί κανάλι του φυσικού επιπέδου. Όσο αφορά την τεχνική μετάδοσης ο προσομοιωτής υποστηρίζει μόνο την περίπτωση του Spatial Multiplexing. Τέλος, τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι τα 4QAM, 16QAM και 64QAM.

Αξίζει να αναφερθεί το πλήθος των επιλογών που έχει ο χρήστης στη διάθεσή του μέσα από την προσομοίωση ώστε να αξιολογήσει τα αποτελέσματα και να εξαγάγει τα συμπεράσματά του, όσον αφορά πολλαπλές περιπτώσεις και πολλαπλά σενάρια κινητών επικοινωνιών του συγκεκριμένου τεχνολογικού προτύπου.

ABSTRACT

The scope of the present master thesis is the study and the analysis of the LTE networks, which constitute the latest technology evolution of the fourth generation of wireless mobile communication networks. The thesis consists of two sections, the theoretical and the practical one.

Firstly, there is a reference to the historical background and evolution of mobile communication networks from the first generation networks to the current fourth generation ones. There follows an analysis of the technological standard, its architecture and its layers, especially the physical layer and the mac layer. Then, several algorithms for power control and various techniques for mitigating intercell interference are presented.

Furthermore, in the framework of the present Master Thesis the performance of an LTE network has been assessed with the use of the Matlab software. The scope was the study of the behaviour and variation of the bit error rate measurement, in order to assess the reliability of the system; the study and variation of the throughput measurement, in order to evaluate the data traffic that can be transferred via the channel and the study and variation of the Shannon capacity measurement, in order to define the maximum possible reliable transmission rate via the channel. More specifically, a simulation has been developed based on the specifications of LTE-TDD only in the case of Downlink. That is, in the case that the base station is serving a mobile terminal and specifically when the terminal uses a single resource (SU-MIMO). This technique is applied only to the Physical Downlink Shared Channel (PDSCH), which is a physical layer channel. As for the transmission mode, the simulator supports only the case of Spatial Multiplexing. The modulation schemes which are supported are the 4QAM, 16QAM και 64QAM.

It is worth pointing out the variation of options that are available for the user through the application in order to assess the results and reach conclusions with regard to multiple cases and multiple scenarios of mobile communications of this specific technological standard.

Κατάλογος Περιεχομένων

Ευχαριστίες	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	4
1.1 Εξέλιξη των Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας	5
1.1.1 Συστήματα 1 ^{ης} γενιάς (Αναλογικά).....	5
1.1.2 Συστήματα 2 ^{ης} και 2+ γενιάς (Ψηφιακά).....	6
1.1.3 Συστήματα 3 ^{ης} γενιάς (WCDMA στο UMTS, CDMA2000 και TD-SCDMA).....	8
1.1.4 Συστήματα 4 ^{ης} γενιάς (4G).....	9
2. ΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ LTE	12
2.1 Τεχνολογικού υπόβαθρου LTE	12
2.1.1 Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης για το LTE	13
2.1.2 Συστήματα αμφιδρόμησης	15
2.2 Διάλειψη	17
2.3 Συστήματα μετάδοσης πολλαπλών κεραιών.....	18
2.4 Φάσμα στο LTE.....	19
2.5 Χαρακτηριστικά τεχνολογικού προτύπου LTE – Έκδοση 10	22
2.5.1 Αρχή συνάθροισης φορέων	22
2.5.2 Ενισχυμένη υποστήριξη μετάδοσης πολλαπλών κεραιών	23
2.5.3 Βελτιωμένη υποστήριξη των ετερογενών δικτύων	24
2.5.4 Αναμετάδοση	26
2.6 Χαρακτηριστικά τρέχουσας έκδοσης – Έκδοση 11.....	26
2.6.1 Συντονισμένη λήψη και μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multipoint - CoMP Reception and Transmission)	26
2.6.2 Βελτιωμένος συντονισμός διακυψελικής παρεμβολής	27
2.6.3 Βελτιωμένη συνάθροιση φορέων.....	28
2.7 Προδιαγραφές της επόμενης έκδοσης – Έκδοση 12	28
2.7.1 Βελτιώσεις της τεχνικής MIMO για την κατερχόμενη ζεύξη	28
2.7.2 Επικοινωνία μηχανής – προς μηχανή χαμηλού κόστους.....	28
2.7.3 Φορέας νέου τύπου	29
2.7.4 Βελτιώσεις των small cells.....	29

2.7.5	Επικοινωνία συσκευής προς συσκευή	30
2.7.6	Διασυνεργασία 3GPP / Wifi	30
2.7.7	Βελτιώσεις κινητικότητας στα ετερογενή δίκτυα	30
2.8	Αρχιτεκτονική συστήματος	31
2.8.1	Δίκτυο κορμού (Core Network).....	31
2.8.2	Δίκτυο Ραδιο-πρόσβασης (Radio-Access Network).....	32
2.8.3	Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοδιεπαφής.....	32
2.9	Επισκόπηση φυσικού επιπέδου.....	34
2.9.1	Φυσικά κανάλια	34
2.9.2	Ιδιότητες φυσικού επιπέδου	35
2.9.3	Κανάλια Μεταφοράς: Πως να μεταδοθεί.....	35
2.9.4	Δομή πόρων μετάδοσης	36
2.9.5	Δομή πλαισίου	37
2.9.6	Προσαρμογή συνδέσμου: Έλεγχος ισχύος και έλεγχος ρυθμού	40
2.9.7	Τεχνική υβριδικής αίτησης αυτόματης επανάληψης.....	41
2.10	Επισκόπηση επιπέδου προσπέλασης	42
2.10.1	Λογικά Κανάλια: Τι να μεταδοθεί.....	42
2.10.2	Χρονοπρογραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι στο πεδίο του χρόνου ..	43
2.10.3	Χρονοπρογραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι στο πεδίο της συχνότητας	48
2.10.4	Χρονοπρογραμματισμός και συμπεριφορά κίνησης.....	48
3.	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ.....	50
3.1	Αλληλεπίδραση συντονισμού διακυψελικής παρεμβολής, χρονοπρογραμματισμός και έλεγχος ισχύος	51
3.2	Συμβιβασμοί του συντονισμού διακυψελικής παρεμβολής.....	53
3.3	Τεχνικές μετρίασης διακυψελικής παρεμβολής.....	54
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ	56
4.1	Αντιστοίχιση πληροφορίας σε Codewords	57
4.2	Περίπλεξη.....	57
4.3	Διαμόρφωση	57
4.4	Απεικόνιση επιπέδων.....	58
4.5	Χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόγχου.....	58
4.5.1	Προκωδίκευση με βάση το Codebook	58

4.5.2	Το Codebook του μηχανισμού προκωδίκευσης του LTE	59
4.6	Απεικόνιση των στοιχείων των πόρων.....	61
4.7	Διαμόρφωση OFDM και εισαγωγή κυκλικού προθέματος.....	62
4.8	Δημιουργία καναλιού	63
4.9	Αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των στοιχείων των πόρων.....	64
4.10	Εκτίμηση καναλιού.....	64
4.11	Αποδιαμόρφωση OFDM.....	65
4.12	Ισοσταθμιστής μηδενισμού της διασυμβολικής παρεμβολής	65
4.13	Αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των επιπέδων.....	65
4.14	Αποδιαμόρφωση.....	65
4.15	Αποπερίπλεξη	65
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	66
5.1	Διεξαγωγή 1 ^{ου} σεναρίου	67
5.1.1	Περίπτωση MIMO 2x2.....	68
5.1.2	Περίπτωση MIMO 4x4.....	70
5.2	Διεξαγωγή 2 ^{ου} σεναρίου	71
5.2.1	Περίπτωση MIMO 2x2.....	72
5.2.2	Περίπτωση MIMO 4x4.....	73
5.3	Διεξαγωγή 3 ^{ου} σεναρίου	73
5.3.1	Περίπτωση MIMO 2x2.....	73
5.3.2	Περίπτωση MIMO 4x4.....	74
5.4	Διεξαγωγή 4 ^{ου} σεναρίου	75
5.4.1	Περίπτωση MIMO 2x2.....	75
5.4.2	Περίπτωση MIMO 4x4.....	75
5.5	Συγκριτικά αποτελέσματα	76
5.5.1	1 ^{ου} σεναρίου EPA 5Hz, 1.4 MHz, 16QAM.....	76
5.5.2	2 ^{ου} σεναρίου EPA 5Hz, 5 MHz, 16QAM	77
5.5.3	3 ^{ου} σεναρίου EPA 5Hz, 1.4 MHz, 64QAM.....	78
5.5.4	4 ^{ου} σεναρίου EPA 5Hz, 1.4 MHz, 4QAM	79
6.	Συμπεράσματα.....	81
6.1	Αποτίμηση	81
6.2	Μελλοντικές προεκτάσεις.....	83
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	83

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 88

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1 ΚΙΝΗΤΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΡΥΘΜΟΑΠΟΔΟΣΗΣ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [2]	2
ΣΧΗΜΑ 2 ΣΥΝΔΡΟΜΗΤΕΣ ITU WORLD TELECOMMUNICATIONS / ICT, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [5]	4
ΣΧΗΜΑ 3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [8]	5
ΣΧΗΜΑ 4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ GSM, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [6]	7
ΣΧΗΜΑ 5 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ GPRS, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [6]	7
ΣΧΗΜΑ 6 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ OFDM [15]	13
ΣΧΗΜΑ 7 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ OFDM, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [16]	14
ΣΧΗΜΑ 8 ΔΟΜΗ UPLINK / DOWNLINK ΧΡΟΝΟΥ – ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ FDD ΚΑΙ TDD, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [18]	15
ΣΧΗΜΑ 9 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ DUPLEX, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [18]	16
ΣΧΗΜΑ 10 ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ ΑΠΟ ΤΟ UPLINK ΣΤΟ DOWNLINK ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤDD, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [20]	17
ΣΧΗΜΑ 11 ΑΡΧΗ ΔΙΑΛΕΙΨΗΣ [21]	18
ΣΧΗΜΑ 12 ΣΧΗΜΑΤΑ ΛΗΨΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ (ΠΑΝΩ ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ (ΠΑΝΩ ΔΕΞΙΑ), ΧΩΡΙΚΗΣ ΠΟΛΥΠΛΕΙΙΑΣ 2Χ2 (ΚΑΤΩ ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΜΙΜΟ (ΚΑΤΩ ΔΕΞΙΑ) [21]	19
ΣΧΗΜΑ 13 ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗ REL-8, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [23]	22
ΣΧΗΜΑ 14 ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗ REL-10, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [14]	23
ΣΧΗΜΑ 15 ΕΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΕΣ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΠΙΚΟΚΥΨΕΛΕΣ ΑΠΟ ΜΑΚΡΟΚΥΨΕΛΗ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [14]	25
ΣΧΗΜΑ 16 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ SAE EPC, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [18]	31
ΣΧΗΜΑ 17 ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΡΑΔΙΟΠΡΑΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [18]	32
ΣΧΗΜΑ 18 ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΡΑΔΙΟΔΙΕΠΑΦΗΣ LTE, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [28]	33
ΣΧΗΜΑ 19 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [30]	34
ΣΧΗΜΑ 20 ΔΟΜΗ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΟ ΣΥΝΔΕΣΜΟ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [32]	37
ΣΧΗΜΑ 21 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΥΠΟΥ 1, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [29]	37
ΣΧΗΜΑ 22 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΥΠΟΥ 2, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [29]	38
ΣΧΗΜΑ 23 Α) ΈΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ Β) ΈΛΕΓΧΟΣ ΡΟΗΣ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [30]	41
ΣΧΗΜΑ 24 ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΚΑΝΑΛΙ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [18]	44
ΣΧΗΜΑ 25 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΡΙΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ SCHEDULING ΓΙΑ ΔΥΟ ΧΡΗΣΤΕΣ, ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ: Α) MAXC/I, Β) ROUNDROBIN ΚΑΙ Γ) PROPORTIONALFAIR. Ο ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΟΣ ΧΡΗΣΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΤΟΝΗ ΓΡΑΜΜΗ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [18]	45
ΣΧΗΜΑ 26 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ Α) ΓΙΑ ΠΛΗΡΗ ΠΡΟΣΩΡΙΝΟΥ ΕΝΤΑΜΙΕΥΤΗ ΚΑΙ Β) ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΦΥΛΛΙΣΗΣ ΙΣΤΟΥ [30]	49
ΣΧΗΜΑ 27 ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [34]	51
ΣΧΗΜΑ 28 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ POWERCONTROL ΚΑΙ ΣΤΟ FULLPOWER, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [34]	52
ΣΧΗΜΑ 29 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [34]	53
ΣΧΗΜΑ 30 Η ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΡΥΘΜΟΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ROUNDROBIN ΚΑΙ PROPORTIONALFAIR ΓΙΑ ΧΩΡΙΣ / ΜΕ ΕΝΔΟΚΥΨΕΛΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΙΣΧΥΟΣ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [34]	53
ΣΧΗΜΑ 31 ΤΑ ΤΡΙΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [35]	56
ΣΧΗΜΑ 32 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [36]	58
ΣΧΗΜΑ 33 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [36]	61
ΣΧΗΜΑ 34 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΥΟ ΚΕΡΑΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ [36]	62
ΣΧΗΜΑ 35 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ [36]	62
ΣΧΗΜΑ 36 ΡΑΔΙΟΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΟ ΠΡΟΘΕΜΑ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [38]	63

ΣΧΗΜΑ 37 ΤΑ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΣΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ CP ΑΝΤΙΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΛΟΥ OFDM, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [38]	63
ΣΧΗΜΑ 38 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΜΒΟΛΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ, ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ [30].....	64

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ.....	68
ΕΙΚΟΝΑ 2 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΚΑΡΤΕΛΑΣ ENVIRONMENTS ΓΙΑ ΜΙΜΟ 2x2	68
ΕΙΚΟΝΑ 3 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΚΑΡΤΕΛΑΣ SYSTEMS ΓΙΑ ΜΙΜΟ 2x2	69
ΕΙΚΟΝΑ 4 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΝ ΚΑΡΤΕΛΑΣ SIMULATIONS ΓΙΑ ΜΙΜΟ 2x2	69
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 1.4 MHz, 16QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 2x2	70
ΕΙΚΟΝΑ 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 1.4 MHz, 16QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 4x4	71
ΕΙΚΟΝΑ 7 ΑΥΞΗΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ ΣΕ 5 MHz ΓΙΑ ΤΟ 2 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	72
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 5 MHz, 16QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 2x2.....	72
ΕΙΚΟΝΑ 9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 5 MHz, 16QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 4x4.....	73
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 1.4 MHz, 64QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 2x2	74
ΕΙΚΟΝΑ 11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 1.4 MHz, 64QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 4x4	74
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 1.4 MHz, 4QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 2x2.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΜΕ ΕΡΑ 5Hz, 1.4 MHz, 4QAM ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ 4x4	76
ΕΙΚΟΝΑ 14 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 1 ^ο Υ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΜΙΜΟ 2x2 Vs ΜΙΜΟ 4x4	77
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 2ΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΜΙΜΟ 2x2 Vs ΜΙΜΟ 4x4	78
ΕΙΚΟΝΑ 16 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 3 ^ο Υ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΜΙΜΟ 2x2 Vs ΜΙΜΟ 4x4	79
ΕΙΚΟΝΑ 17 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 4 ^ο Υ ΣΕΝΑΡΙΟΥ ΜΙΜΟ 2x2 Vs ΜΙΜΟ 4x4	80

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΩΝ W-CDMA, HSPA, HSPA+, LTE, LTE-ADVANCED [10]	9
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΖΩΝΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ [22]	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 ΤΟ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΔΙΑΙΡΕΙΤΑΙ ΣΕ ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΛΟΚΑΔΕΣ ΠΟΡΩΝ [31] ..	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4 ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΗΣ - ΑΝΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΖΕΥΞΗΣ [29]	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΕΙΔΙΚΟΥ ΥΠΟΠΛΑΙΣΙΟΥ (ΜΕΓΕΘΗ ΤΩΝ DWPTS/GP/UPPTS) [29]	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 CODEBOOK ΠΡΟΚΩΔΙΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΥΟ ΚΕΡΑΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ [37]	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 7 CODEBOOK ΠΡΟΚΩΔΙΚΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ [37]	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 8 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 1ΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 9 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 2ΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 10 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 3ΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 11 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 4ΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 12 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	81

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε κινητά τερματικά είναι πλέον μια πραγματικότητα, καθώς τα μέλη της γενιάς του διαδικτύου αυξάνουν τη συνήθεια τους για ευρυζωνική πρόσβαση οπουδήποτε πηγαίνουν, και όχι μόνο στο σπίτι ή στο γραφείο. Έως το 2016 αναμένεται να υπάρχουν κοντά στα 5 δισεκατομμύρια κινητές ευρυζωνικές συνδρομές σε παγκόσμιο επίπεδο και περίπου το 90 τοις εκατό αυτών των συνδρομών θα περιλαμβάνει τη χρήση φορητών συσκευών.

Ολοένα και περισσότεροι άνθρωποι χρησιμοποιούν τα κινητά τους τηλέφωνα, και συνδέονται με τη φορητούς υπολογιστές σε ασύρματα τοπικά δίκτυα. Η μετάβαση προς την παροχή ολοκληρωμένων ευρυζωνικών υπηρεσιών από τα κινητά ευρυζωνικά συστήματα επετεύχθη με το Long Term Evolution που προσφέρει πανταχού παρούσα κάλυψη και περιαγωγή με τις υπάρχουσες υποδομές δικτύων 2G και 3G. Η γνώση που αποκτήθηκε από παλαιότερα τεχνολογικά πρότυπα δείχνει ότι όταν οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων (network) παρέχουν καλή κάλυψη, προσφορές υπηρεσιών και κινητών τηλεφώνων η κινητή ευρυζωνικότητα αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο.

Η κίνηση των πακέτων δεδομένων ξεπέρασε την φωνητική κίνηση κατά τη διάρκεια του Μαΐου 2007 με βάση ένα παγκόσμιο μέσο όρο φόρτου κίνησης ενός δικτύου τρίτης γενιάς. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εισαγωγή του προτύπου HSPA (High Speed Packet Access) στα δίκτυα. Οι συσκευές που παρέχουν ίντερνετ μέσω των κινητών δικτύων (USB sticks) και οι κάρτες ασύρματης πρόσβασης (PCMCIA) έκαναν πρώτες την εμφάνισή τους και στη συνέχεια ακολούθησαν τα smartphones. Αρκετοί φορείς εκμετάλλευσης δικτύων παρατήρησαν έως και τέσσερις φορές αύξηση της κίνησης δεδομένων σε διάστημα τριών μηνών από την ημέρα που ξεκίνησε η λειτουργία της HSPA. Πολλοί επιπλέον παράγοντες που ευνοούν τη ραγδαία ανέλιξη των κινητών υπηρεσιών ευρυζωνικότητας είναι οι αντίστοιχες ενσύρματες τιμές: οι ανταγωνιστικές τιμές και επιδόσεις, η ασφάλεια και φυσικά η ευκολία.

Η υποστήριξη κινητικότητας έχει ενισχύσει σημαντικά ορισμένες ευρυζωνικές εφαρμογές. Με την εισαγωγή των smartphones, παρατηρήθηκε μια έκρηξη στην κοινωνική δικτύωση, στις μηχανές αναζήτησης, στα παιχνίδια, στην παρουσίαση εφαρμογών και του content-sharing όπως το YouTube. Με την υποστήριξη της κινητικότητας αυτές οι εφαρμογές γίνονται όλο και πιο πολύτιμες για τους χρήστες. Το User-Generated content (οιδηδήποτε μπορεί να δημιουργήσει ένας χρήστης δημοσιεύοντας το στο διαδίκτυο) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς αλλάζει το πρότυπο κίνησης με αποτέλεσμα η μετάδοση στο uplink να καθίσταται πιο σημαντική από αυτή του downlink [1].

Η βελτιωμένη ταχύτητα και η χαμηλή λανθάνουσα του παρέχονται από το LTE θα προσφέρουν μια πολύ βελτιωμένη εμπειρία στον τελικό χρήστη για όλες τις εταιρικές υπηρεσίες:

- Για εφαρμογές όπου η ρυθμοαπόδοση δεδομένων είναι σημαντική, όπως: γρηγορότερο e-mail και ανέγερμα αρχείων, βελτιωμένη σύνδεση σε VPN, ίντερνετ υψηλής ταχύτητας κτλ.
- Για διαδραστικές εφαρμογές όπου η λανθάνουσα είναι κρίσιμη, όπως: IMS (IP Multimedia Subsystem) based VoIP, mail και file synchronization με ένα online εξυπηρετητή, εφαρμογές peer-to-peer όπως το "NetMeeting", πολυμεσικές υπηρεσίες SIP που περιλαμβάνει συνδιάσκεψη φωνής και βίντεο μέσω IP video και voice conference μέσω IP, κοινή χρήση εφαρμογών, κτλ.

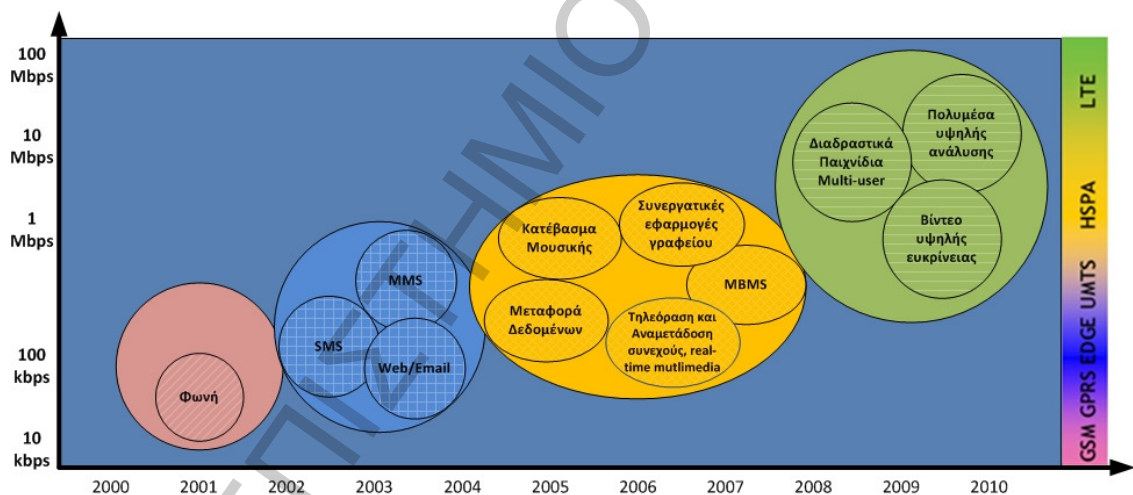
Εκτός από τις τυπικές εταιρικές εφαρμογές, αναμένουμε αυξημένο ενδιαφέρον από τις κάθετες αγορές, όπου κλειδί τους είναι η ακρίβεια, η αξιοπιστία και η αμεσότητα της πληροφορίας, όπως: ιατρικές εφαρμογές όπου η καθυστέρηση και η υψηλή ανάλυση της εικόνας είναι αρκετά σημαντικοί παράγοντες, επικοινωνία machine-to-machine, όπου η ασφάλεια και η αμεσότητα είναι ζωτικής σημασίας, δίκτυο πλοήγησης πραγματικού χρόνου κ.α.

Ένα μεγάλο ποσοστό της αγοράς θα επωφεληθεί από τις βελτιώσεις που εξέδωσε το LTE για όλες τις εφαρμογές person-to-person και τις εφαρμογές διαδικτυακής κοινότητας, όπως: Push-to-See, βελτιωμένη ποιότητα για VoIP, ανέγερμα / κατέγερμα φωτογραφιών και βίντεο σε προσωπικά ιστολόγια, online gaming, κινητά κοινωνικά δίκτυα (όπως YouTube, facebook), εφαρμογές τύπου "Second life", κ.α.

Εκτός από αυτές τις βελτιώσεις, το LTE θα επιτρέψει την υποστήριξη υπηρεσιών, όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας (ή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας) και διαδραστικά παιχνίδια multi-user:

- Η τηλεόραση HD απαιτεί εύρος ζώνης μεταξύ 10 και 20 Mbps (18 Mbps, για παράδειγμα με το πρότυπο Blue Ray), το οποίο είναι υψηλότερο από τις δυνατότητες του HSPA.
- Το Διαδραστικό multi-user gaming είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στην καθυστέρηση: η πολύ χαμηλή λανθάνουσα που προσφέρεται από το LTE (λιγότερο από 10ms έναντι 60ms του HSPA) είναι το κλειδί για τα παιχνίδια fighting, αγώνων αυτοκινήτου, ή οποιαδήποτε παιχνίδια δράσης που αφορούν ένα μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών. Επιπλέον, η υψηλότερη ρυθμοαπόδοση που προσφέρεται θα επιτρέψει βιντεοπαιχνίδια υψηλής ανάλυσης.

Τέλος το LTE θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη υπηρεσιών N-urle για το σπίτι (IP TV, Διαδίκτυο, τηλέφωνο, πακέτα που συνδυάζουν διαδίκτυο, τηλέφωνο και τηλεόραση). Η αυξανόμενη ανάγκη για ευρυζωνική πρόσβαση στο σπίτι θα οδηγήσει σε ανάγκη για ευρυζωνικές υπηρεσίες στις κινητές επικοινωνίες για δύο κύριους λόγους. Πρώτον, όσο οι συνδρομητές συνηθίζουν σε υψηλότερες ταχύτητες στο σπίτι, θα απαιτήσουν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας στο κινητό περιβάλλον έτσι ώστε, να επωφεληθούν από μια απρόσκοπτη εμπειρία. Ο δεύτερος λόγος είναι η δυνατότητα προσφοράς μεγαλύτερου εύρους ζώνης σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η ρυθμοαπόδοση του ADSL δεν είναι πλέον επαρκής και οι οπτικές ίνες μπορεί να μην είναι οικονομικά συμφέρουσες σε σύγκριση με το LTE. Σε αυτές τις περιοχές, η ίδια υποδομή του LTE θα παρέχει υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, καθώς και ευρυζωνική πρόσβαση στο σπίτι, φέρνοντας οικονομίες κλίμακας [2].



Σχήμα 1 Κινητές υπηρεσίες και μεταβολές ρυθμοαπόδοσης, επανασχεδιασμένο από [2]

Η παρούσα διπλωματική δομείται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο 1^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια αναδρομή στην ιστορία των συστημάτων κινητής επικοινωνίας που αναφέρεται στα βασικά χαρακτηριστικά και στις λειτουργίες τους. Περιλαμβάνει όλα τα στάδια της εξέλιξης των συστημάτων αυτών από τα αναλογικά κινητά δίκτυα πρώτης γενιάς έως και τα τελευταία ενιαία δίκτυα τέταρτης γενιάς

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανάλυση των λειτουργιών και των χαρακτηριστικών του τεχνολογικού προτύπου LTE. Δηλαδή της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται στον κατερχόμενο σύνδεσμο και των λειτουργιών αμφιδρόμησης με διαίρεση χρόνου και με διαίρεση συχνότητας. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην τεχνική διάλειτουργίας, στα συστήματα μετάδοσης πολλαπλών κεραιών, στις συχνότητες που λειτουργεί το τεχνολογικό πρότυπο LTE καθώς και στα χαρακτηριστικά της τελευταίας έκδοσής του. Ακολουθεί η αναφορά στη δομή της αρχιτεκτονικής των δικτύων, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο δίκτυο κορμού και στο δίκτυο

ραδιοπρόσβασης, καθώς και στα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν. Τέλος γίνεται μια αναλυτική επισκόπηση τόσο στο φυσικό επίπεδο όσο και στο επίπεδο προσπέλασης.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** αναλύονται οι τεχνικές διαχείρισης ισχύος και παρεμβολής. Συγκεκριμένα αναλύονται οι ενότητες της αλληλεπίδρασης του μηχανισμού συντονισμού διακυβελικής παρεμβολής με το χρονοπρογραμματισμό και τον έλεγχο ισχύος, καθώς και των τεχνικών μετρίωσης διακυβελικής παρεμβολής. Πραγματοποιείται αναλυτική αναφορά στις τεχνικές ήπιας και κλασματικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

Στο **4^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται αναλυτικά ο κώδικας με τον οποίο υλοποιήθηκε η παρούσα εφαρμογή καθώς και η θεωρία που τον συνοδεύει ώστε να κατανοηθεί πλήρως ο τρόπος προγραμματισμού της, καθώς και η πλήρης κατανόηση της λειτουργίας της.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** αναλύονται τα σενάρια που αναπτύχθηκαν. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα στιγμιότυπα του εκάστοτε σεναρίου τόσο για τον τρόπο ανάπτυξης του όσο και για τις γραφικές παραστάσεις των γραφημάτων που εξάγονται. Τέλος παρουσιάζεται η αξιολόγηση βάσει των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις για το κάθε σενάριο ξεχωριστά καθώς και η αξιολόγηση των συγκριτικών αποτελεσμάτων των σεναρίων.

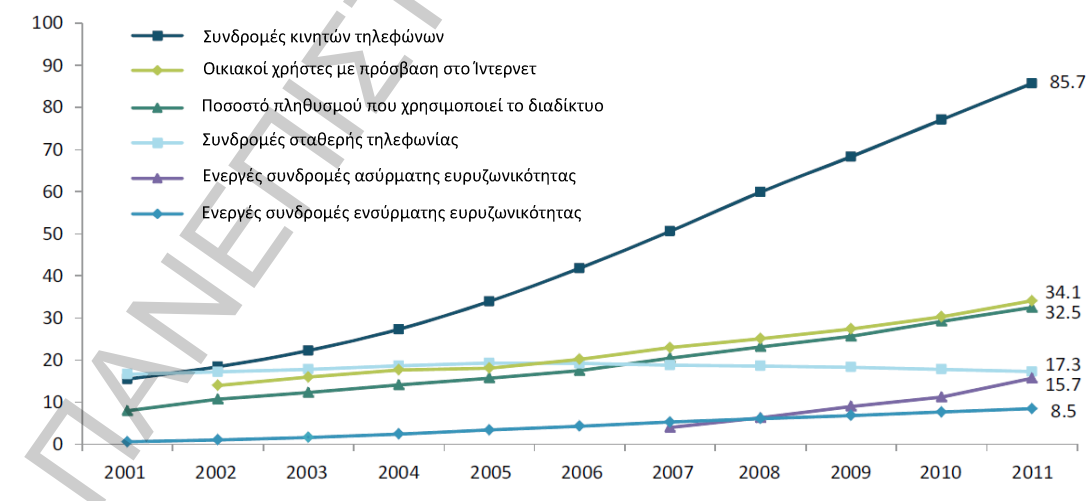
Τέλος, στο **6^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση, καθώς δίδονται και ιδέες για μελλοντικές της επεκτάσεις.

1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τα τελευταία έξι χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση της ασύρματης βιομηχανίας, τόσο όσον αφορά στην τεχνολογία όσο και στον αριθμό των συνδρομητών. Μετά την αλλαγή του αιώνα υπήρξε μια σαφής στροφή από την σταθερή προς την κινητή τηλεφωνία. Υπολογίστηκε πως μέχρι το τέλος του 2011 (πιο πρόσφατη έρευνα) οι χρήστες των κινητών τηλεφώνων παγκοσμίως ήταν 4 φορές περισσότεροι από αυτούς της ενσύρματης επικοινωνίας (Σχήμα 2). Τόσο οι φορείς εκμετάλλευσης κινητών δικτύων όσο και οι προμηθευτές έχουν αντιληφθεί ότι ο σωστός και αποτελεσματικός σχεδιασμός αποφέρει ανάλογη αποτελεσματικότητα στις επιδόσεις των δικτύων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των δικτύων και των υπηρεσιών που παρέχονται στους συνδρομητές [3].

Τα τεχνολογικά επιτεύγματα, καθώς και η συνύπαρξη των 2G, 2.5G και 3G δικτύων, συνέβαλαν ώστε ο αντίκτυπος των παρεχόμενων υπηρεσιών στην αποδοτικότητα του δικτύου να είναι καίριας σημασίας. Αναπτύχθηκαν πάρα πολλά σενάρια σχεδίασης δικτύων κινητών επικοινωνιών τόσο για τις τρεις γενιές όσο και για τις ενδιάμεσες, ωστόσο έπρεπε να εξεταστεί και η διαλειτουργικότητα μεταξύ αυτών των δικτύων [4].

Τα δίκτυα 1G τα οποία έγιναν διαθέσιμα στις αρχές της δεκαετίας του '80, παραπέμπουν σε αναλογικές κυβελικές τεχνολογίες. Τα δίκτυα 2G υποδηλώνουν τα πρώτα ψηφιακά συστήματα, τα οποία εισήγαγαν υπηρεσίες, όπως αυτές των σύντομων μηνυμάτων και της μεταφοράς δεδομένων σε χαμηλές ταχύτητες. Οι κύριες τεχνολογίες των δικτύων 2^{ης} γενιάς είναι το CDMA2000 1xRTT και το GSM, παρόλο που το CDMA2000 1xRTT πολλές φορές κατηγοριοποιείται ως δίκτυο 3^{ης} γενιάς, διότι ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ρυθμοαπόδοσης της τάξης των 144 kbps. Η τεχνολογία EDGE ανταποκρίνεται εξίσου καλά σε αυτήν την τάξη μεγέθους ρυθμοαπόδοσης. Οι τεχνολογίες 2G αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του '90. Οι προδιαγραφές των τεχνολογιών των δικτύων 3^{ης} γενιάς καθορίστηκαν από την ITU (International Telecommunication Union) ως μέρος του έργου International Mobile Telephone 2000 (IMT-2000), όπου τα ψηφιακά δίκτυα έπρεπε να παρέχουν σε κινητά με γρήγορη ταχύτητα ρυθμοαπόδοσης της τάξης των 144 kbps, σε κινητά με ταχύτητα βαδίσματος ρυθμοαπόδοσης μεγέθους 384 kbps και σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου ρυθμοαπόδοσης έως 2Mbps. Οι τεχνολογίες που αντιπροσωπεύουν τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, οι οποίες αναπτύχθηκαν την τελευταία δεκαετία είναι οι TD-SCDMA, CDMA2000 EV-DO, UMTS-HSPA καθώς και η τεχνολογία HSPA+.



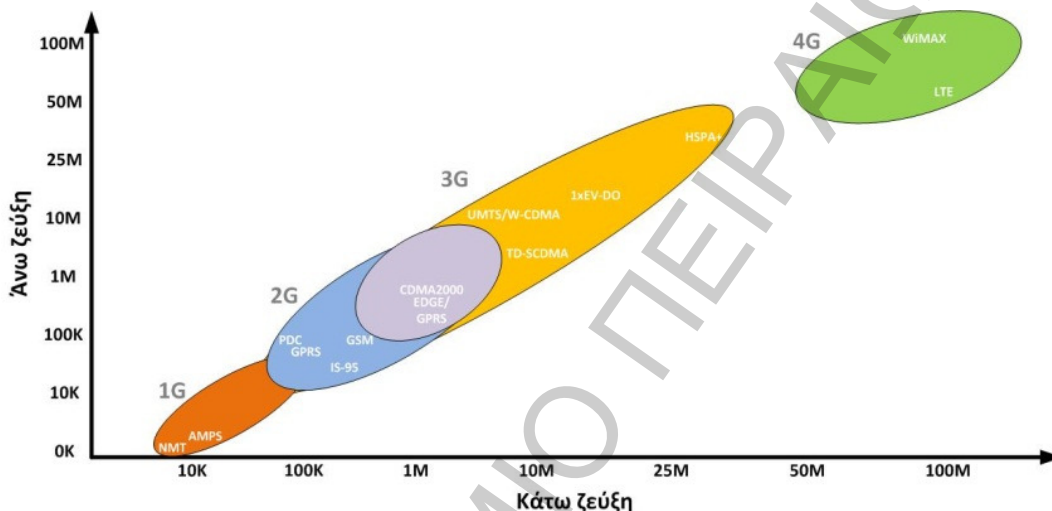
Σχήμα 2 Συνδρομητές ITU World Telecommunication/ICT, επανασχεδιασμένο από [5]

Το 2008 η ITU καθόρισε τις προδιαγραφές των τεχνολογιών IMT-Advanced οι οποίες αποτέλεσαν το θεμέλιο των τεχνολογιών 4G. Αυτές οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν: τη συχνότητα λειτουργίας των ραδιοκαναλιών έως 40 MHz και εξαιρετικά υψηλή φασματική απόδοση. Η ITU πρότεινε την τότε συχνότητα λειτουργίας των ραδιοκαναλιών έως

100 MHz και μέγιστη φασματική απόδοση 15 bps/Hz με αποτέλεσμα την επίτευξη μιας θεωρητικής ρυθμοαπόδοσης της τάξης του 1,5 Gbps. Σε παλαιότερες προδιαγραφές καθοριζόταν ως στόχος ρυθμοαπόδοση της τάξης του 1 Gbps όσον αφορά τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Έτσι κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία νέων τεχνολογιών όπως το LTE-Advanced και το IEEE 802.16m, οι οποίες θα υποστήριζαν αυτά τα μεγέθη ρυθμοαπόδοσης [7].

1.1 Εξέλιξη των Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Η εξέλιξη των κινητών κυψελικών δικτύων έχει κατηγοριοποιηθεί σε γενεές όπως ακολουθεί στο Σχήμα 3:



Σχήμα 3 Εξέλιξη προτύπων ασυρμάτων δικτύων, επανασχεδιασμένο από [8]

1.1.1 Συστήματα 1^{ης} γενιάς (Αναλογικά)

Το 1980 ήταν η αφετηρία της εποχής των κινητών επικοινωνιών. Έκτοτε, τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές καθώς και έχουν σημειώσει μεγάλη ανάπτυξη. Τα κινητά συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν αναλογικές μεταδόσεις για τις υπηρεσίες φωνής. Το πρώτο κυψελωτό σύστημα στον κόσμο ξεκίνησε να λειτουργεί το 1979 από την εταιρία Telephone και Telegraph (NTT) στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Δύο χρόνια αργότερα, η κυψελωτή εποχή εισχώρησε στην Ευρώπη. Τα δύο πιο διαδεδομένα αναλογικά συστήματα ήταν το Nordic Mobile Telephones (NMT) και το Total Access Communication Systems (TACS). Εκτός απ' αυτά, το 1980 αναπτύχθηκαν και άλλα αναλογικά συστήματα σε όλη την Ευρώπη. Όλα αυτά τα συστήματα προσέφεραν μεταπομπή και δυνατότητες περιαγωγής, όμως τα δεν ήταν σε θέση να υποστηρίξουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των χωρών. Αυτή ήταν ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της πρώτης γενιάς των κινητών δικτύων.

Το σύστημα Advanced Mobile Phone System (AMPS) ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1982 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Το σύστημα υποστήριζε εύρος ζώνης της τάξης των 40MHz στη ζώνη συχνοτήτων 800 – 900 MHz, που είχε καθοριστεί από τη Federal Communications Commission (FCC). Το 1988 εκχωρήθηκε στο AMPS ένα επιπρόσθετο εύρος ζώνης της τάξης των 10MHz, το οποίο ονομάστηκε Expanded Spectrum (ES) και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στο Σικάγο σε μια έκταση 2100 τετραγωνικών μιλίων. Το AMPS υποστήριζε 832 κανάλια με ρυθμό δεδομένων 10 kbps. Μολονότι στην προηγούμενη εφαρμογή του AMPS χρησιμοποιήθηκαν παγκατευθυντικές κεραίες, διαπιστώθηκε ότι η χρήση κατευθυντικών κεραίων θα απέφερε καλύτερα αποτελέσματα στην επαναχρησιμοποίηση των κυψελών. Στην πραγματικότητα, ο μικρότερος συντελεστής επαναχρησιμοποίησης που θα πληρούσε το λόγο σήματος προς παρεμβολή (SIR) στα 18dB με τη χρήση κατευθυντικών κεραίων 120 μοιρών βρέθηκε να είναι 7.

Ως εκ τούτου, ορίστηκε ένας κυβελικός συντελεστής επαναχρησιμοποίησης για το AMPS ($K=7$). Οι μεταδόσεις από τους σταθμούς βάσης προς τα κινητά τερματικά μέσω του καναλιού προώθησης (forward channel) χρησιμοποιούσαν συχνότητες στο φάσμα των 869-894 MHz. Το αντίστροφο κανάλι που υλοποιεί μεταδόσεις από τα κινητά τερματικά προς τους σταθμούς βάσης χρησιμοποιούσε συχνότητες στο φάσμα των 824-849 MHz. Τα συστήματα AMPS και TACS χρησιμοποιούν την τεχνική της διαμόρφωσης συχνότητας για τις ραδιομεταδόσεις. Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση πολυπλέκεται σε ένα σύστημα FDMA [3].

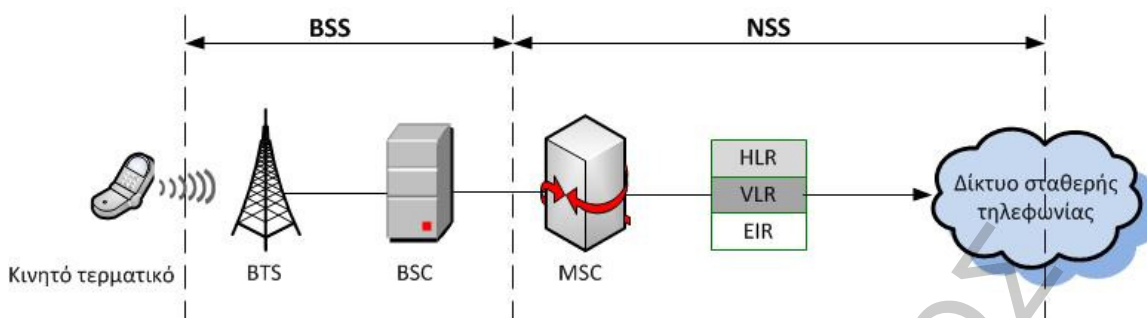
1.1.2 Συστήματα 2^{ης} και 2+ γενιάς (Ψηφιακά)

Τα κινητά συστήματα δεύτερης γενιάς αναπτύχθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1980. Αυτά τα συστήματα υποστήριζαν χαμηλό ρυθμό δεδομένων, καθώς και παραδοσιακές υπηρεσίες φωνής. Συγκρίνοντας τα με αυτά της 1^{ης} γενιάς, τα κινητά συστήματα της 2^{ης} χρησιμοποιούν τεχνικές πρόσβασης όπως: την TDMA (Time Division Multiple Access) και τη CDMA (Code Division Multiple Access). Κατά συνέπεια σε σύγκριση με τα συστήματα της πρώτης γενιάς, προσφέρουν υψηλότερη φασματική απόδοση, καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και πιο προηγμένη περιαγωγή. Στην Ευρώπη για την εφαρμογή ενός ενιαίου προτύπου αναπτύχθηκε το GSM (Global System for Mobile Communications). Αυτό επέτρεψε αδιάλειπτες υπηρεσίες πέρα από τα όρια της εκάστοτε χώρας μέσω της διεθνούς περιαγωγής. Το GSM χρησιμοποιεί την τεχνολογία TDMA για την υποστήριξη πολλαπλών χρηστών. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του, που διήρκησε περισσότερο από 20 χρόνια, το GSM βελτιωνόταν συνεχώς ώστε να προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες στους χρήστες. Οι νέες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν με βάση το αρχικό σύστημα GSM οδήγησαν σε πιο προηγμένα συστήματα γνωστά και ως συστήματα 2,5 γενιάς (2.5G).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής υπήρχαν τρεις άξονες ανάπτυξης ψηφιακών κυβελωτών συστημάτων 2^{ης} γενιάς. Το πρώτο ψηφιακό σύστημα που αναπτύχθηκε το 1991 ήταν το IS-54 (North America TDMA Digital Cellular), του οποίου μια νέα έκδοση, που προσέφερε περισσότερες υπηρεσίες ήταν το IS-136 (1996). Εν τω μεταξύ, το IS-95 (CDMA One) αναπτύχθηκε το 1993. Η US Federal Communications Commission (FCC) εγκαθίδρυσε επίσης, μία νέα πλοκάδα φάσματος στη ζώνη των 1900 MHz (PCS), (GSM1900). Στην Ιαπωνία το σύστημα Personal Digital Cellular (PDC), γνωστό ως JDC (Japanese Digital Cellular), έκανε την εμφάνισή του το 1990 [3].

Αρχιτεκτονική του GSM:

Το υποσύστημα σταθμών βάσης (Base Station Subsystem, BSS) αποτελείται από τις κύριες μονάδες αυτού του συστήματος, που περιέχει τους σταθμούς βάσης πομποδεκτών (Base Transceiver Stations, BTS) και τους ελεγκτές σταθμών βάσης (Base Station Controllers, BSC). Το υποσύστημα μεταγωγής δικτύου (Network Switching Subsystem, NSS) αποτελεί άλλη μία κύρια μονάδα που περιέχει το MSC (Mobile Switching Centre) το οποίο συνδέεται με τον καταχωρητή θέσης επισκεπτών (Visitor Location Register, VLR), τον καταχωρητή αρχικής τοποθεσίας μητρώου (Home Location Register, HLR) και τον καταχωρητή ταυτότητας εξοπλισμού (Equipment Identity Register, EIR), Σχήμα 4. Το δίκτυο GSM είναι σε θέση να παρέχει όλες τις βασικές υπηρεσίες οι οποίες απαιτούν ταχύτητες έως 9.6 kbps, fax, κτλ. Επίσης το δίκτυο GSM μπορεί να διασυνδεθεί με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN) ή με το δίκτυο ISDN. Σύμφωνα με αυτή την παραδοχή, εισήχθη ένα νέος σχεδιασμός στα κινητά κέντρα μεταγωγής των συστημάτων δεύτερης γενιάς. Ειδικότερα, η χρήση των ελεγκτών σταθμού βάσης (BSCs) απλουστεύει το φορτίο που διατίθεται στο MSC (mobile switching center) το οποίο απαντήθηκε για πρώτη φορά στα συστήματα της πρώτης γενιάς. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει την προτυποποίηση της διεπαφής μεταξύ του MSC και του BSC. Συνεπώς, έχει δοθεί προσοχή στη διαλειτουργικότητα και την προτυποποίηση των συστημάτων δεύτερης γενιάς από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project), έτσι ώστε το φέρον σήματα μπορεί να απασχολήσει διαφορετικούς κατασκευαστές των MSC και BSCs [3].



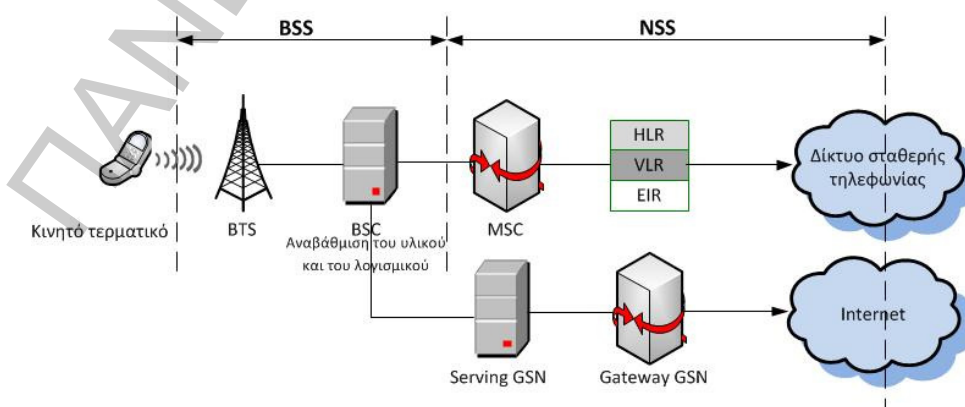
Σχήμα 4 Αρχιτεκτονική δικτύου GSM, επαναχεδιασμένο από [6]

GSM και VAS (Value Added Services):

Η επόμενη εξέλιξη του συστήματος GSM ήταν η προσθήκη δύο υπηρεσιών: του Voice Mail Service (VMS) και του Short Message Service Centre (SMSC). Η εμπορική επιτυχία του SMSC αποδείχθηκε απίστευτα μεγάλη, τόσο πολύ ώστε σε ορισμένα δίκτυα η κίνηση SMS αποτελεί ένα μείζον μερίδιο της συνολικής κίνησης. Παράλληλα με το VAS καθιερώθηκαν επίσης και τα IN (Intelligent services), όπου παρέχει πλέον στους φορείς τη δυνατότητα δημιουργίας μια ολοκληρωμένη γκάμας νέων υπηρεσιών. Η ανάδειξη των υπηρεσιών της πρόληψης της τηλεπικοινωνιακής απάτης (Fraud Management) και των προπληρωμένων υπηρεσιών οφείλονται στις υπηρεσίες IN [3].

GSM και GPRS (General Packet Radio Services):

Όσο αυξανόταν η απαίτηση για την ασύρματη αποστολή δεδομένων, προστίθονταν νέοι κόμβοι στο ήδη υπάρχον σύστημα GSM. Οι δύο αυτοί επιπλέον κόμβοι ήταν ο SGSN (Serving GPRS) και ο GGSN (Gateway GPRS), Σχήμα 5. Οι κόμβοι αυτοί επέτρεπαν την αποστολή πακέτων μέσω ασύρματων καναλιών. Το κομμάτι του δικτύου που διαχειρίζεται τα πακέτα δεδομένων ονομάζεται "packet core network". Το "packet core network" αποτελείται από τους δρομολογητές IP, τους δρομολογητές firewall και τους DNS (Domain Name Servers). Αυτό επιτρέπει την ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο με το ρυθμό διφύων (Bit Rate) να αγγίζει ταχύτητες έως 150 kbps, στην περίπτωση όπου οι συνθήκες μετάδοσης είναι ιδανικές. Η προσαρμογή προς τα δίκτυα 2.5G ξεκίνησε με την τεχνολογία GPRS (General Packet Radio Service). Το GPRS επέτρεψε την εισαγωγή της τεχνολογίας μεταγωγής πακέτων (packet-switching) στα δίκτυα GSM, μικρότερο χρόνο εγκατάστασης για τις συνδέσεις ISP και παρέχει τη δυνατότητα χρέωσης του όγκου των δεδομένων που αποστέλλονται και όχι τη χρέωση του χρόνου παραμονής στο δίκτυο. Η μεταγωγή πακέτων είναι μια τεχνική, όπου η πληροφορία (φωνή ή δεδομένα) που πρόκειται να αποσταλεί χωρίζεται σε πακέτα, των πολύ λίγων Kbytes το καθένα, τα οποία στη συνέχεια δρομολογούνται σε διαφορετικούς προορισμούς ανάλογα με τη διεύθυνση προορισμού που υπάρχει σε κάθε πακέτο. Το GPRS υποστηρίζει ευέλικτη μετάδοση δεδομένων καθώς και συνεχή σύνδεση με το δίκτυο. Το GPRS είναι το πιο σημαντικό βήμα προς τα δίκτυα της τρίτης γενιάς [3].



Σχήμα 5 Αρχιτεκτονική δικτύου GPRS, επαναχεδιασμένο από [6]

GSM και EDGE (Enhanced Data rates in GSM Environment):

Καθώς αυξάνονταν τόσο οι υπηρεσίες φωνής όσο και οι υπηρεσίες διακίνησης δεδομένων στα συστήματα, κρίθηκε αναγκαία η αύξηση του ρυθμού δεδομένων. Αυτό έγινε με τη χρησιμοποίηση εξελιγμένων μεθόδων κωδικοποίησης και ως εκ τούτου επιτεύχθηκε αύξηση του ρυθμού των δεδομένων έως και 384 kbps. Όσο αφορά την εφαρμογή της τεχνολογίας EDGE χρειάστηκαν σχετικά μικρές αλλαγές στο υλικό όπως και στο λογισμικό του δικτύου, καθώς χρησιμοποιεί την ίδια δομή πλαισίου TDMA, την ίδια λογική καναλιού και εύρος ζώνης φέροντος μεγέθους 200 kHz όπως τα δίκτυα GSM. Καθώς το EDGE συνυπήρχε με το 3G WCDMA, μπορούσαν να επιτευχθούν ρυθμοί δεδομένων ασύγχρονης μεταφοράς μεγέθους 2 Mbps. Τα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς εξακολούθησαν να κυριαρχούν στη βιομηχανία των κινητών επικοινωνιών ανά τον κόσμο και μετά την ανάπτυξη των συστημάτων τρίτης γενιάς (3G), η διείσδυση των οποίων ήταν αρχικά περιορισμένη εξαιτίας διαφόρων τεχνολογικών λόγων [3].

1.1.3 Συστήματα 3^{ης} γενιάς (WCDMA στο UMTS, CDMA2000 και TD-SCDMA)

Στα συστήματα EDGE ήταν δυνατή η μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, όμως η μεταφορά των πακέτων εξακολουθούσε να συμπεριφέρεται στη ραδιοδιεπαφή σαν κλήση μεταγωγής κυκλώματος. Επομένως, ένα μέρος της αποδοτικότητας της σύνδεσης των πακέτων χάνεται εξαιτίας του κυκλώματος μεταγωγής, καθώς το κύκλωμα μεταγωγής κάνει χρήση των πόρων του δικτύου καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Εξάλλου, τα πρότυπα για την ανάπτυξη των δικτύων διέφεραν από περιοχή σε περιοχή. Συνεπώς, αποφασίστηκε σχεδίαση ενός δικτύου, το οποίο θα παρείχε υπηρεσίες ανεξάρτητα της τεχνολογίας που υποστήριζε το εκάστοτε δίκτυο και που τα πρότυπα σχεδίασής του θα ήταν ίδια σε παγκόσμιο επίπεδο. Έτσι δημιουργήθηκε το 3G [4].

Η ITU καθόρισε τις προδιαγραφές των δικτύων 3^{ης} γενιάς με το πρότυπο IMT-2000. Ο οργανισμός 3rd Generation Partnership προτυποποίησε ένα κινητό σύστημα που πληροί τις προδιαγραφές του προτύπου IMT-2000. Στην Ευρώπη ονομάστηκε UMTS (Universal Terrestrial Mobile System), που καθορίζεται από το ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Το ITU-T (ITU's Telecommunication Standardization Sector) έχρησε ως IMT2000 τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, ενώ cdma2000 είναι το όνομα της αντίστοιχης αμερικάνικης έκδοσης των δικτύων τρίτης γενιάς. Το WCDMA αποτελεί την ασύρματη τεχνολογία του UMTS. Οι κύριες μονάδες περιέχουν σταθμό βάσης, το RNC (Radio Network Controller), πλήν του WMSC (Wideband CDMA Mobile Switching Centre) και του SGSN/GGSN.

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς επιτρέπουν στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να προσφέρουν στους χρήστες ένα ευρύτερο και ακόμη πιο προηγμένο φάσμα υπηρεσιών, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μεγαλύτερη χωρητικότητα του δικτύου μέσω της βελτίωσης της φασματικής αποδοτικότητας. Το φάσμα των υπηρεσιών περιλαμβάνει: ασύρματη τηλεφωνία φωνής ευρείας περιοχής, βίντεο-κλήσεις και υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων, τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (HSPA) ικανής να προσφέρει ταχύτητες έως 14,4 Mbps για την κάτω ζεύξη και 5.8 Mbps στην άνω ζεύξη αντίστοιχα.

Το πρώτο εμπορικό δίκτυο τρίτης γενιάς που είναι βασισμένο στην τεχνολογία WCDMA παρουσιάστηκε από την εταιρία NTT DoCoMo στην Ιαπωνία τον Οκτώβριο του 2001. Το δεύτερο εμπορικό δίκτυο τρίτης γενιάς ήταν βασισμένο στην τεχνολογία 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized) και παρουσιάστηκε από τη SK Telecom στη Νότια Κορέα τον Ιανουάριο του 2002. Επακολούθησε άλλο ένα δίκτυο βασισμένο στην ίδια τεχνολογία (EV-DO), από την KTF, πάλι στη Νότια Κορέα το Μάιο της ίδιας χρονιάς. Η μαζική παροχή εμπορικών υπηρεσιών 3G ξεκίνησε στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ιταλία το Μάρτιο του 2003 από την εταιρία 3. Το δίκτυο ήταν βασισμένο στην τεχνολογία WCDMA. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, αναπτύχθηκε από τη Monet Mobile Networks, καθώς και το δεύτερο εμπορικό δίκτυο που αναπτύχθηκε από τη Verizon Wireless τον Οκτώβριο του 2003, ήταν βασισμένα στην τεχνολογία CDMA2000 1xEV-DO. Όπως προαναφέρθηκε, το πρώτο δίκτυο του νότιου ημισφαιρίου εισήχθη από τη Hutchison Telecommunications τον Απρίλιο του 2003, κάνοντας χρήση της τεχνολογίας UMTS. Το πρώτο δίκτυο τρίτης γενιάς στην Αφρική, συγκεκριμένα στο Μαυρίκιο, αναπτύχθηκε από την EMTel το 2004, κάνοντας χρήση της τεχνολογίας UMTS. Στη βόρεια Αφρική, και συγκεκριμένα στο Μαρόκο, εγκαινιάστηκε το πρώτο δίκτυο 3G στα τέλη Μαρτίου το 2006, από την εταιρία WANA με βάση την τεχνολογία WCDMA.

Σε ορισμένες χώρες καθυστέρησε η είσοδος των δικτύων τρίτης γενιάς εξαιτίας του τεράστιου κόστους των πρόσθετων τελών αδειοδότησης φάσματος (τα τέλη αδειοδότησης σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες ήταν ιδιαίτερα υψηλά). Σε πολλές χώρες τα δίκτυα τρίτης γενιάς δε χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα συχνοτήτων με αυτό των 2G, με αποτέλεσμα την απαίτηση δημιουργίας καινούργιων υποδομών και αδειοδότησης νέου φάσματος συχνοτήτων. Εξαιρέση αποτελούν οι Η.Π.Α, καθώς το φάσμα συχνοτήτων που υποστηρίζει υπηρεσίες τρίτης γενιάς λειτουργεί στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων με αυτό της προηγούμενης γενιάς. Άλλες καθυστερήσεις οφείλονταν στα έξοδα της αναβάθμισης του εξοπλισμού για τα νέα συστήματα. Ακόμη και μέσα στο 2010 αρκετές μεγάλες χώρες, όπως η Ινδονησία, δεν είχαν συνάψει συμφωνία για την αδειοδότηση του 3G και οι συνδρομητές περίμεναν εναγωνίως τις υπηρεσίες τρίτης γενιάς. Ακόμη και η Κίνα καθυστέρησε στην ανάπτυξη των δικτύων τρίτης γενιάς. Τον Ιανουάριο του 2009 ξεκίνησε η λειτουργία των συστημάτων 3G στην Κίνα. Αλλά έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι τρεις μεγάλες εταιρείες αδειοδοτήθηκαν για να λειτουργήσουν δίκτυο 3G, ωστόσο και οι τρεις με διαφορετικά πρότυπα. Η China Mobile ανέπτυξε το δίκτυό της σύμφωνα με το TD-SCDMA, η China Unicom σύμφωνα με το WCDMA και η China Telecom σύμφωνα με το CDMA2000[4].

1.1.4 Συστήματα 4^{ης} γενιάς (All-IP)

Η εμφάνιση νέων τεχνολογιών στον τομέα των κινητών συστημάτων επικοινωνίας καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση νέων υπηρεσιών από τους χρήστες, ώθησαν τους ερευνητές και τις βιομηχανίες να αναπτύξουν τα συστήματα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G). Η βασική ιδέα των δικτύων τέταρτης γενιάς είναι η ανάπτυξη των δικτύων All-IP. Αυτό σημαίνει πως ο χρήστης θα πρέπει να έχει κάλυψη από οποιοδήποτε δίκτυο IP, είτε πρόκειται για ασύρματο κυψελωτό δίκτυο, είτε για δίκτυο WLAN, είτε για δορυφορικό δίκτυο. Σε αντίθεση με τα δίκτυα της τρίτης γενιάς, αυτά της 4^{ης} γενιάς (LTE, WiMAX), επιδιώκουν να ανεβάσουν την εμπειρία των χρηστών σε νέα επίπεδα καθώς και την ικανότητα πολλαπλών υπηρεσιών ενσωματώνοντας όλες τις ήδη υπάρχουσες κινητές τεχνολογίες. Η νέα αυτή γενιά ασυρμάτων επικοινωνιών έχει ως σκοπό να συμπληρώσει και να αντικαταστήσει τα κινητά συστήματα των προηγούμενων γενεών όπως: GSM - Global System for Mobile Communications, GPRS - General Packet Radio Service, IMT-2000 - International Mobile Communications, Wi-Fi - Wireless Fidelity, Bluetooth.

Ο βασικός λόγος για τη μετάβαση στο All-IP είναι η ανάγκη ύπαρξης μιας κοινής πλατφόρμας για όλες τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα, και η εναρμόνιση με τις προσδοκίες των χρηστών από την πληθώρα των υπηρεσιών που θα παρέχονται. Οι υπηρεσίες των δικτύων 4G, ξεκίνησαν το 2010, αλλά αναμένεται να είναι εμπορικά διαθέσιμες με πλήρη ανάπτυξη δικτύου το 2014-15[3].

Τα συστήματα IMT-advanced υποστηρίζουν εφαρμογές κινητικότητας low to high και ένα ευρύ φάσμα δεδομένων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας σε ένα περιβάλλον πολλαπλών χρηστών. Ταχύτητες της τάξεως των 100Mbps και 1Gbps είναι οι καθιερωμένοι στόχοι σε συνθήκες υψηλής και χαμηλής κινητικότητας αντίστοιχα.

Επίσης, παρέχουν νέες δυνατότητες στο φυσικό επίπεδο της ραδιοδιεπαφής, ένα καλύτερο επίπεδο διαχείρισης και ελέγχου των ραδιοπόρων, προηγμένες δυνατότητες στο κανάλι φάσματος και στη σύνθεση εύρους ζώνης όπως και βελτίωση της απόδοσης σε όλα τα επίπεδα, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών ελέγχου της ποιότητας των υπηρεσιών. Απώτερος σκοπός των συστημάτων της 4^{ης} γενιάς είναι η δημιουργία ενός παγκοσμίου ετερογενούς δικτύου στο οποίο θα ενσωματωθούν τα δίκτυα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς[9].

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά δικτύων W-CDMA, HSPA, HSPA+, LTE, LTE-Advanced Error! Unknown switch argument.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΚΑΤΕΒΑΣΜΑΤΟΣ	ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΜΕΣΗ ΡΥΘΜΟΑΠΟΔΟΣΗ		
			ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ 5MHz	ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ 10MHz	ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ 20MHz
W-CDMA	Έως 384kbps	0.14bps/Hz	0.7Mbps		

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΚΑΤΕΒΑΣΜΑΤΟΣ	ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΜΕΣΗ ΡΥΘΜΟΑΠΟΔΟΣΗ		
			ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ 5MHz	ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ 10MHz	ΠΟΜΠΟΔΕΚΤΗΣ 20MHz
HSPA	Έως 14.4Mbps	0.4bps/Hz	2Mbps		
HSPA+	Έως 42 Mbps	0.9bps/Hz	4.5Mbps	9Mbps	
LTE	Έως 45Mbps (5MHz) Έως 326Mbps (20MHz)	1.4bps/Hz (10MHz)	6Mbps	14Mbps	30Mbps
LTE-Advanced	Έως 1Gbps downlink (χρήση έως 50 MHz)	1.8bps/Hz (20MHz)	8Mbps	17Mbps	36Mbps

Συμβαδίζοντας με τους ρυθμούς ανάπτυξης των τεχνολογιών των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, τα δίκτυα τέταρτης γενιάς προβάλλουν ως η επικρατέστερη τεχνολογία. Οι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό είναι οι ακόλουθοι:

❖ Υψηλή επίδοση

Οι ειδικοί του κλάδου επισημαίνουν ότι οι χρήστες δεν είναι σε θέση να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα του πλούσιου πολυμεσικού περιεχομένου δια μέσου των ασυρμάτων δικτύων 3^{ης} γενιάς. Αντίθετα η τέταρτη γενιά δικτύων είναι σε θέση να προσφέρει βίντεο εξαιρετικά υψηλής ποιότητας συγκρίσιμη με την ποιότητα της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας. Οι ασύρματες λήψεις μπορούν να προσεγγίσουν ταχύτητες έως και 100Mbps, δηλαδή 50 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που μπορούν να προσφέρουν τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς [11].

❖ Διαλειτουργικότητα και εύκολη περιαγωγή

Τα πολλαπλά πρότυπα της τεχνολογίας 3G κάνουν δύσκολη την περιαγωγή και την διαλειτουργικότητα ανάμεσα στα διάφορα δίκτυα, ενώ σε αντίθεση το 4G παρέχει ένα παγκόσμιο πρότυπο το οποίο με τη σειρά του υποστηρίζει παγκόσμια κινητικότητα. Τα διάφορα ετερογενή δίκτυα ασύρματης πρόσβασης συχνά διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την κάλυψη, το ρυθμό μεταφοράς των δεδομένων, το λανθάνοντα χρόνο και το ποσοστό απωλειών. Ως εκ τούτου, καθ' ένα από αυτά είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να υποστηρίζει μια συγκεκριμένη γκάμα υπηρεσιών και συσκευών. Η τεχνολογία 4G θα περιλαμβάνει διάφορους τύπους τεμαχικών, οι οποίοι ενδέχεται να χρειαστεί να παρέχουν κοινές υπηρεσίες, ανεξάρτητα από τις δυνατότητες τους [12].

❖ Πλήρως συγκλινόμενες υπηρεσίες

Στην περίπτωση που ένας χρήστης θέλει να έχει πρόσβαση στο δίκτυο ανεξάρτητα από το είδος της πλατφόρμας: κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, PDA's μπορεί να το κάνει στα 4G, τα οποία παρέχουν αρκετά έξυπνη και ευέλικτη συνδεσιμότητα ώστε να υποστηρίζει video, τηλεφωνία VoIP, κινούμενες ή μη εικόνες, e-mail, πλοήγηση στο διαδίκτυο, ηλεκτρονικό εμπόριο και υπηρεσίες Location-based μέσα από μια ευρεία ποικιλία συσκευών. Αυτό συνεπάγεται πλήρη ελευθερία για τους συνδρομητές [9].

❖ Χαμηλό Κόστος

Τα συστήματα 4G έχουν αποδειχθεί πιο φθηνές λύσεις από αυτά των 3G διότι η όλη επένδυση μπορεί να υλοποιηθεί σε ήδη υπάρχοντα δίκτυα, συνεπώς δεν απαιτείται η εξ' αρχής υλοποίηση και δεν απαιτείται επιπλέον φάσμα από τις φέρουσες πράγματα που κοστίζει. Εκτός του ότι επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις με χαμηλότερο κόστος, τα συστήματα 4^{ης} γενιάς είναι πιο αποδοτικά φασματικά, πράγμα που σημαίνει ότι λιγότερο φάσμα προσφέρει περισσότερες υπηρεσίες χρησιμοποιώντας λιγότερους πόρους [9].

❖ *Συσκευές: Πιο φιλικές διεπαφές ως προς το χρήστη*

Οι συσκευές 4G βασίζονται περισσότερο στην εικόνα και στην ικανότητα αντίληψης των αναγκών του χρήστη παρά στο κείμενο και στο μενού όπως κάνουν οι συσκευές παλαιότερων γενεών. Επίσης έχουν την ικανότητα να αλληλεπιδρούν κατάλληλα με το περιβάλλον τους και να ενεργούν ανάλογα [9].

❖ *Βελτιωμένες υπηρεσίες GPS*

Μια έκδοση τέταρτης γενιάς της τεχνολογίας GPS δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να είναι εικονικά παρόντες σε διαφορετικά μέρη [9].

❖ *Επεκτασιμότητα*

Είναι η πιο προκλητική πτυχή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Αναφέρεται στην ικανότητα χειρισμού ενός συνεχώς αυξανόμενου αριθμού χρηστών και υπηρεσιών. Δεδομένου ότι, το επίπεδο IP core του 4G είναι εύκολα επεκτάσιμο, είναι ιδανικό για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης [9].

❖ *Διαχείριση λειτουργίας κρίσιμων εφαρμογών*

Οι φυσικές καταστροφές μπορούν να επηρεάσουν και να αποσυντονίσουν το σύνολο των επικοινωνιακών υποδομών. Η γρήγορη αποκατάσταση της επικοινωνίας είναι ουσιώδης. Με τις ευρυζωνικές ασύρματες κινητές επικοινωνίες, το Ίντερνετ και οι υπηρεσίες βίντεο θα μπορούσαν να αποκατασταθούν μέσα σε λίγες ώρες, αντί για ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες, που απαιτούνται για την αποκατάσταση των ενσύρματων επικοινωνιών [9].

2. ΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ LTE

Η ανάπτυξη των κινητών ευρυζωνικών συστημάτων 4ης γενιάς στηρίζεται στην ευέλικτη τεχνολογία ραδιοπρόσβασης LTE, η οποία προτυποποιήθηκε από τη 3GPP και αναπτύσσεται ραγδαία. Ήδη τα πρώτα συστήματα βρίσκονται σε πλήρη εμπορική λειτουργία. Τα συστήματα αυτά βασίζονται στην πρώτη έκδοση του LTE, συγκεκριμένα στην 3GPP Rel-8, που ολοκληρώθηκε το 2008. Η συγκεκριμένη έκδοση παρέχει μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό αποστολής έως 300 Mbit/s στον κατερχόμενο σύνδεσμο, έως 75 Mbit/s στον ανερχόμενο σύνδεσμο, μονόδρομη καθυστέρηση του ραδιοδικτύου μικρότερης των 5ms, αποτελεσματικότερη χρήση του ραδιοφάσματος σε σύγκριση με τα συστήματα της 3ης γενιάς και μια νέα επίπεδη αρχιτεκτονική ραδιοδικτύου που σχεδιάστηκε για την απλοποίηση της λειτουργίας και της μείωσης του κόστους των υποδομών.

Το LTE παρέχει ευελιξία στο φάσμα συχνοτήτων, υποστηρίζει τόσο τη συχνοδιακριτική αμφίδρομη επικοινωνία (Frequency Domain Duplex, FDD) όσο και τη χρονοδιακριτική αμφίδρομη επικοινωνία (Time Domain Duplex, TDD) και στοχεύει σε μια πιο μαλή εξέλιξη συγκριτικά με τα προηγούμενα συστήματα 3GPP, όπως: Time Division Synchronous Code, Division Multiple Access (TD-SCDMA) και Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)/High Speed Packet Access (HSPA), και από τα συστήματα 3GPP2 όπως είναι το cdma2000.

Η τεχνολογία ραδιοπρόσβασης LTE εξελίσσεται συνεχώς με κύριο στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων των χρηστών. Ήδη στην έκδοση Rel-9 που ολοκληρώθηκε το 2009, υποστηρίζονταν υπηρεσίες αναπαραστάσης εκπομπής (broadcast)/αναπαραστάσης πολυδιανομής (multicast), ενίσχυση της λειτουργίας των κλήσεων έκτακτης ανάγκης καθώς και διαμόρφωση ακτίνας/δέσμης (beam-forming) διπλού επιπέδου όσον αφορά τον κατερχόμενο σύνδεσμο.

Στη συνέχεια ο κύριος στόχος της 3GPP ήταν η διάθεση της έκδοσης Rel-10. Ένας ακόμη σημαντικός στόχος της Rel-10 ήταν η διασφάλιση του γεγονότος ότι το πρότυπο LTE θα πληρούσε όλες τις προϋποθέσεις του International Mobile Telecommunications-Advanced όπως αυτές καθορίστηκαν από την Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU). Η ονομασία LTE-Advanced που χρησιμοποιείται από τη Rel-10 και έπειτα οφείλεται στο IMT-Advanced [13].

2.1 Τεχνολογικό υπόβαθρο του LTE

Το LTE είναι μια τεχνολογία ραδιοπρόσβασης που βασίζεται στην ορθογωνική πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM), με την κλασική μέθοδο OFDM στον κατερχόμενο σύνδεσμο και στη Fourier μετασχηματισμένη OFDM (DFT-spread OFDM) στον ανερχόμενο σύνδεσμο. Η DFTS-OFDM επιτρέπει αποτελεσματικότερη ενίσχυση της λειτουργίας, παρέχοντας στους χρήστες τη δυνατότητα λιγότερης κατανάλωσης ενέργειας. Την ίδια στιγμή με την OFDM αποφεύγεται η ανάγκη εξισορρόπησης στην πλευρά του δέκτη. Η χρήση της OFDM στον κατερχόμενο σύνδεσμο και ταυτόχρονα της DFTS-OFDM στον ανερχόμενο σύνδεσμο, ελαχιστοποιεί την πολυπλοκότητα τόσο από τη μεριά του δέκτη όσο και από τη μεριά του πομπού. Συνεπώς αυτό οδηγεί σε μείωση της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού του χρήστη αλλά και σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Το μεταδιδόμενο σήμα διαιρείται σε υποπλαίσια (subframes) διάρκειας 1ms το καθένα και τα δέκα υποπλαίσια αποτελούν ένα ραδιοπλαίσιο. Οι μεταδόσεις των δεδομένων από το σταθμό βάσης σε κάθε υποπλαίσιο είναι προγραμματισμένες δυναμικά. Κάθε υποπλαίσιο του κατερχόμενου συνδέσμου χωρίζεται σε 14 σύμβολα OFDM. Αυτά αποτελούνται από μια περιοχή ελέγχου και από μια περιοχή δεδομένων. Η περιοχή ελέγχου καταλαμβάνει 1-3 σύμβολα OFDM, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της σηματοδότησης που προκύπτει από το σταθμό βάσης προς το κινητό τερματικό. Ο έλεγχος αυτός περιλαμβάνει τις αποφάσεις χρονοδρομολόγησης και την ανάδραση (feedback) της υβριδικής-αυτόματης αίτησης επαναλήψεως (HARQ). Η περιοχή δεδομένων αποτελείται από τα υπόλοιπα σύμβολα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων προς το κινητό τερματικό. Επίσης σε κάθε υποπλαίσιο του κατερχόμενου συνδέσμου μεταδίδονται σήματα αναφοράς κυψέλης. Αυτά τα σήματα αναφοράς χρησιμοποιούνται για την αποδιαμόρφωση των δεδομένων από την πλευρά

του χρήστη, για τους σκοπούς μέτρησης π.χ. σήματα αναφοράς που μεταδίδονται από τον εξοπλισμό του χρήστη προς το σταθμό βάσης όσον αφορά την κατάσταση του καναλιού [13].

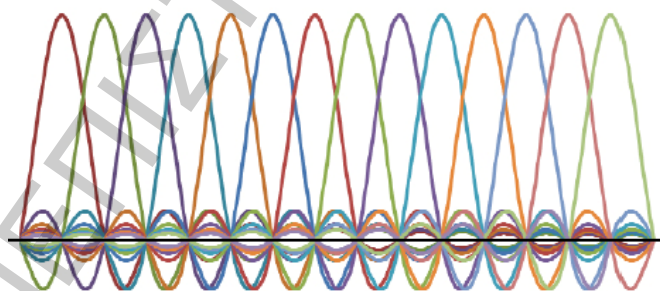
Η ευελιξία του φάσματος είναι μία από τις βασικές ιδιότητες της ραδιοτεχνολογίας LTE, καθώς ορίζεται ένα μεγάλο φάσμα εύρους ζώνης. Επίσης υποστηρίζεται τόσο η λειτουργία FDD όσο και η TDD με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η λειτουργία τόσο του συζευγμένου όσο και του ασύζευκτου φάσματος. Ακόμη μία καίρια προδιαγραφή του LTE απαιτεί την περιπτή κατάτμηση και επιδιώκει τη συσχέτιση των λειτουργιών FDD και TDD, διατηρώντας παράλληλα την πιθανότητα αξιοποίησης της αμφίδρομης διασποράς, όπως είναι η αβεβαιότητα του καναλιού στη λειτουργία TDD. Κατά τη διαδικασία της ευθυγράμμισης αυτών των δύο αμφίδρομων σχημάτων στο μέγιστο δυνατό βαθμό, όχι μόνο ενισχύεται δυναμικά η καθιέρωση και η προτυποποίηση της τεχνολογίας αλλά βελτιώνεται ακόμη περισσότερο η οικονομία κλίμακας [14].

Η υποστήριξη μετάδοσης πολλαπλών κεραιών είναι αναπόσπαστο κομμάτι της ραδιοτεχνολογίας από την πρώτη κιάλας έκδοση. Τα συστήματα πολλαπλών κεραιών του κατερχόμενου συνδέσμου που υποστηρίζει το LTE παρέχουν ποικιλία τεχνικών κωδίκησης, χωρική πολυπλεξία (όπως single-user MIMO, (SU - MIMO) και multi-user MIMO, (MU-MIMO) και επιπλέον διαμόρφωση ακτίνας/δέσμης [13].

2.1.1 Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης για το LTE

Βασικές αρχές της μεθόδου OFDM

Η Ορθογωνική Πολύπλεξη με Διάρθρωση Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) είναι μία από τις πολλές μεθόδους μετάδοσης πολλαπλής φέρουσας, πιθανότατα και σημαντικότερη. Στην τεχνική OFDM, κάθε τμήμα των δεδομένων εισόδου μεταδίδεται σε ένα από τα διαθέσιμα υποφέροντα. Επομένως, η OFDM παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τη γνωστή τεχνική της πολύπλεξης με διάρθρωση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing, FDM). Σε αντίθεση με την τεχνική FDM όπου στα υποφέροντα μπορεί να προκληθεί παρεμβολή μεταξύ τους. Συνεπώς, δεν υπάρχει ανάγκη ευρείων ζωνών φύλαξης για την παροχή αξιοπιστίας, όπως γινόταν στη FDM. Επομένως, προκειμένου να είναι εφικτή η ανάκτηση των μεταδιδόμενων συμβόλων στο δέκτη, τα υποφέροντα θα πρέπει να βρίσκονται στο πεδίο συχνότητας, έτσι ώστε η ενέργεια των παρεμβολών που προκαλούνται από κάθε υποφέρον να γίνεται ακριβώς μηδέν στην κεντρική συχνότητα των άλλων, Σχήμα 6.



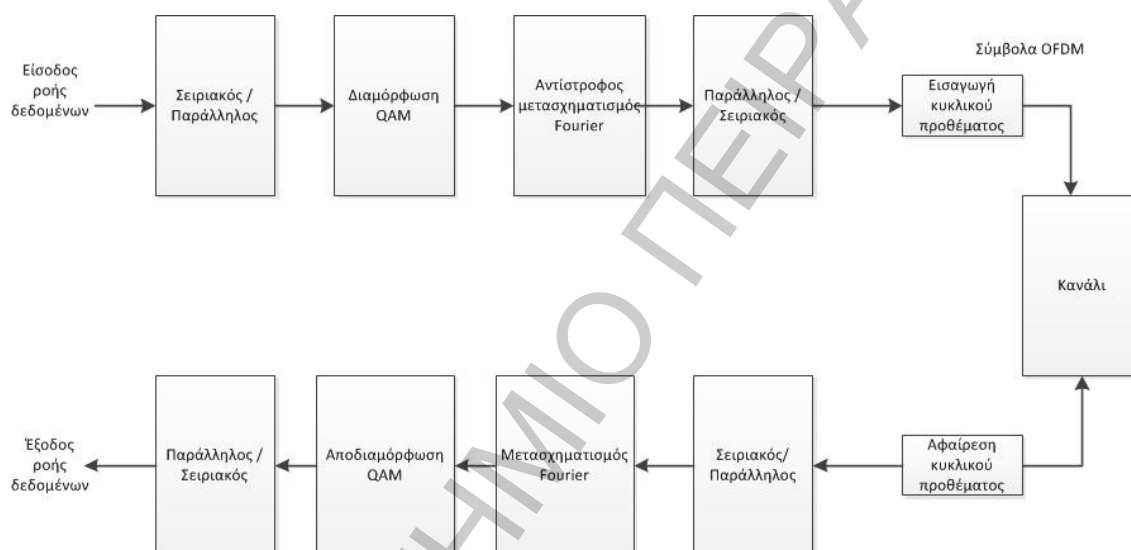
Σχήμα 6 Κατανομή φάσματος OFDM [15]

Άρα, το σήμα που διαμορφώνεται σε κάθε υποφέρον είναι «ορθογώνιο» και τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν επιτυχώς στο δέκτη.

Παρόλο που τα κύρια συστήματα OFDM χρειάζονται ένα μεγάλο αριθμό ταλαντωτών υψηλής ακρίβειας, η ανάπτυξη τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος επέτρεψε την υλοποίηση πομπών και δεκτών OFDM που κάνουν χρήση των αλγορίθμων IFFT και FFT αντίστοιχα, έτσι ώστε να μειωθεί σημαντικά η πολυπλοκότητα του υλικού.

Στο επόμενο Σχήμα 7, ακολουθεί ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός συστήματος OFDM. Αρχικά, ο πομπός διασπά το αρχικό σήμα σε περαιτέρω N υποσημάτα χαμηλότερης ταχύτητας και τα μεταδίδει παράλληλα σε N ορθογώνιες φέρουσες με τη χρήση ενός σειριακού/παράλληλου μετατροπέα, όπου καθεμία θα μεταδίδεται σε ένα υποφέρον. Ακολουθεί

η ομαδοποίηση των δυφίων και η απεικόνισή τους σε σύμβολα QAM. Στη συνέχεια τα σύμβολα μεταφέρονται από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου με την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT), όπου πλέον θα αποκαλούνται ως σύμβολα OFDM. Τέλος, προστίθεται ένα κυκλικό πρόθεμα, το οποίο τοποθετείται στην αρχή κάθε συμβόλου OFDM. Η εισαγωγή του κυκλικού προθέματος έχει ως σκοπό την μείωση τόσο της διασυμβολικής (Inter-Symbol Interference, ISI) όσο και της διακαναλικής παρεμβολής (Inter-Channel Interference, ICI). Στην άλλη πλευρά, όσον αφορά το δέκτη, αφαιρείται αρχικά το κυκλικό πρόθεμα καθώς πλέον μεταφέρει αλλοιωμένα δεδομένα. Έπειτα με την εφαρμογή του FFT τα σύμβολα που βρίσκονται στο πεδίο του χρόνου μετατρέπονται σε σύμβολα QAM (στα οποία έχει προκληθεί θόρυβος) στο πεδίο της συχνότητας. Τα σύμβολα QAM επεξεργάζονται από ένα ανιχνευτή (π.χ. απότομος περιοριστής, (hard limiter) και απεικονίζονται με βάση το δυαδικό σύστημα και προχωρούν στο τελευταίο στάδιο όπου με τη χρήση ενός παράλληλου/σειριακού μετατροπέα, συνδυάζεται το αποτέλεσμα της δυαδικής πληροφορίας και αποκαθίσταται η αρχική ακολουθία [16].



Σχήμα 7 Χαρακτηριστικό υπόδειγμα διαγράμματος συστήματος OFDM, επανασχεδιασμένο από [16]

Βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων OFDMA και SC-FDMA

Στον κατερχόμενο σύνδεσμο χρησιμοποιείται το σύστημα πολλαπλής πρόσβασης OFDMA, το οποίο βασίζεται στην τεχνική της ορθογωνικής πολύπλεξης με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM). Η βασική αρχή του είναι ο διαχωρισμός του ρυθμού δεδομένων για τη μετάδοση πολλών ορθογωνικών υποφερόντων στενής ζώνης μετάδοσης (narrowband) μέσω μιας λειτουργίας αντίστροφου ταχύ μετασχηματισμού Fourier, όπου επιτρέπει την αύξηση της χρονικής περιόδου των συμβόλων. Η αύξηση της χρονικής περιόδου των συμβόλων μαζί με τη χρήση ενός διαστήματος προστασίας (guard interval) που προσάπτεται στην αρχή κάθε συμβόλου OFDM παρέχει στην τεχνολογία μεγάλη σιβαρότητα κατά της μετάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Μια λειτουργία του διαστήματος προστασίας είναι το λεγόμενο κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix, CP). Όσο το κυκλικό πρόθεμα έχει μεγαλύτερη διάρκεια από τη μέγιστη καθυστέρηση του καναλιού, αποφεύγονται οι υποβαθμίσεις του καναλιού εξαιτίας της διασυμβολικής (Inter-Symbol Interference) και της διαφερωντικής παρεμβολής (Inter-Carrier Interference). Η χρήση των υποφερόντων στενής ζώνης έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός καναλιού που θα είναι σταθερό για κάθε δεδομένη υποζώνη και το οποίο θα διευκολύνει την ισοστάθμιση στο δέκτη. Τέλος, δεδομένου ότι αυτά τα υποφέροντα είναι αμοιβαίως ορθογωνικά, επιτρέπεται μεταξύ τους η αλληλοεπικάλυψη, αποδίδοντας ένα σύστημα εξαιρετικής φασματικής απόδοσης. Παρ' όλα αυτά τα οφέλη, τα συστήματα OFDM παρουσιάζουν επίσης και ορισμένα μειονεκτήματα: ευαισθησία στη μετατόπιση Doppler, προβλήματα συγχρονισμού και άσκοπη κατανάλωση ενέργειας λόγω του μεγάλου λόγου της μέγιστης προς την μέση τιμή (Peak to Average Power Ratio, PAPR).

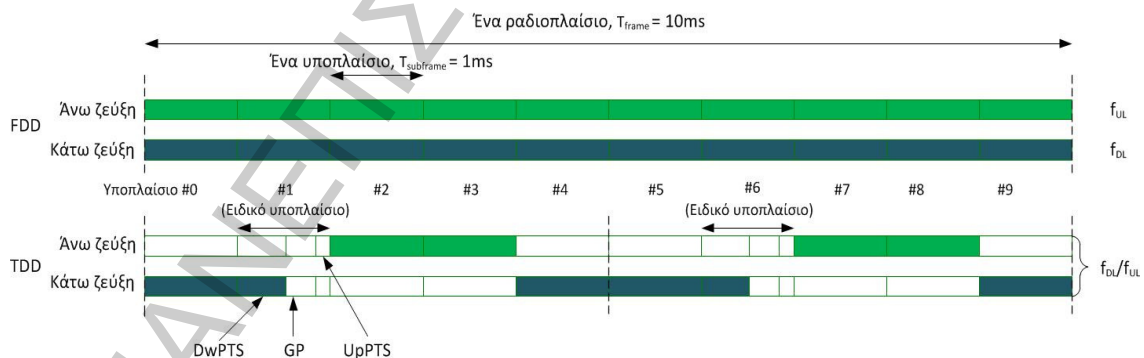
Το SC-FDMA είναι ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης βασισμένο στην τεχνική της πολύπλεξης απλού φέροντος με διαίρεση συχνότητας (single-carrier frequency-division multiplexing, SC-FDM), που συχνά αναφέρεται και ως ένα διευρυμένο σύστημα OFDMA διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT-spread OFDM). Βασική αρχή του είναι η ίδια όπως και του συστήματος OFDM, συνεπώς υπάρχουν τα ίδια οφέλη όσο αφορά τις πολλαπλές διαδρομές μετρίασης και την ισοστάθμιση της χαμηλής πολυπλοκότητας. Η διαφορά όμως που υπάρχει παρουσιάζεται στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier όπου πραγματοποιείται πριν τον αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT), όπου εκτείνει τα σύμβολα δεδομένων με τη χρήση όλων των υποφερόντων που μεταφέρουν πληροφορία και έτσι παράγεται μια εικονική δομή απλού φέροντος. Κατά συνέπεια η τεχνική SC-FDM προσφέρει μικρότερο PAPR συγκριτικά με την OFDM. Η συγκεκριμένη ιδιότητα κάνει την τεχνική SC-OFDM καταλληλότερη για μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης, καθώς το κινητό τερματικό επωφελείται όσον αφορά την αποδοτικότητα της μεταδιδόμενης ισχύος. Αφενός μεν, η διεύρυνση του DFT επιτρέπει την επιλεκτικότητα συχνότητας για το κανάλι που θα αξιοποιηθεί, δεδομένου ότι όλα τα σύμβολα υπάρχουν σε όλα τα υποφέροντα. Αφετέρου, όταν η αποδιεύρυνση του DFT εκτελείται στο δέκτη, ο θόρυβος εξαπλώνεται σε όλα τα υποφέροντα και δημιουργεί ένα φαινόμενο που ονομάζεται ενίσχυση θορύβου, το οποίο υποβαθμίζει την απόδοση της τεχνικής SC-FDM και προϋποθέτει τη χρήση μιας πιο σύνθετης ισοστάθμισης στο δέκτη, η οποία βασίζεται στην ιδέα της ελαχιστοποίησης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος [17].

2.1.2 Συστήματα αμφιδρόμησης

Το κύριο χαρακτηριστικό της ραδιοτεχνολογίας LTE είναι ο μεγάλος βαθμός ευελιξίας του φάσματος. Στόχος είναι να καταστεί δυνατή η ανάπτυξη της ραδιοπρόσβασης σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, με διαφορετικές λειτουργίες αμφιδρόμησης και με διαφορετικά μεγέθη του διαθέσιμου φάσματος [18].

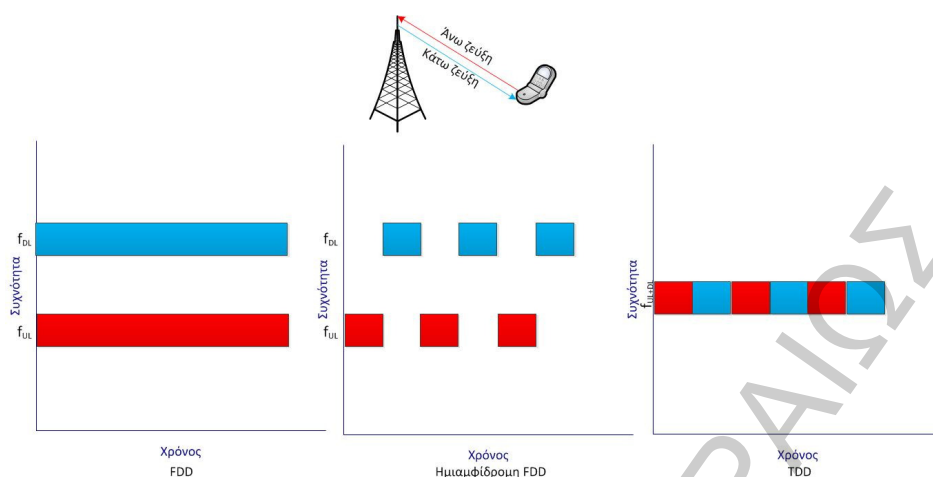
Ευελιξία στην αμφιδρομη λειτουργία

Ένα σημαντικό κομμάτι των προδιαγραφών του LTE σύμφωνα με την ευελιξία του φάσματος, είναι η δυνατότητα της πρόσβασης τόσο σε συζευγμένο (paired) όσο και σε ασύζευκτο (unpaired) φάσμα. Επομένως το LTE υποστηρίζει αντίστοιχα και τη λειτουργία FDD αλλά και την TDD, σύμφωνα με την εκάστοτε δομή που απεικονίζεται στο Σχήμα 8. Αν και τις περισσότερες φορές η δομή του πεδίου του χρόνου είναι ίδια τόσο για το FDD και όσο και για το TDD, υπάρχουν μερικές διαφορές, κυρίως στην περίπτωση του TDD όπου κάνει την εμφάνιση του ένα ειδικό υποπλαίσιο. Αυτό το ειδικό υποπλαίσιο είναι υπεύθυνο για την διασφάλιση του απαραίτητου χρόνου φύλαξης για την εναλλαγή από downlink σε uplink.



Σχήμα 8 Δομή uplink / downlink χρόνου – συχνότητας για FDD και TDD, επανασχεδιασμένο από [18]

Η λειτουργία FDD που απεικονίζεται στα αριστερά του Σχήμα 9, υποδηλώνει ότι η μετάδοση στην καθοδική ζεύξη και στην ανοδική ζεύξη λαμβάνει χώρα σε διαφορετικές, επαρκώς διαχωρισμένες ζώνες συχνοτήτων. Η λειτουργία TDD που απεικονίζεται στα δεξιά του Σχήμα 9 υποδηλώνει ότι η μετάδοση στην καθοδική ζεύξη και στην ανοδική ζεύξη λαμβάνει χώρα σε διαφορετικές μή αλληλεπικαλυπτόμενες χρονοσχισμές. Επομένως το TDD μπορεί να λειτουργήσει σε ασύζευκτο φάσμα σε αντίθεση με το FDD που μπορεί να λειτουργήσει σε συζευγμένο φάσμα [19].



Σχήμα 9 Συχνότητα και διαίρεση χρόνου duplex, επανασχεδιασμένο από [18]

Συχνοδιαίρετική αμφίδρομη επικοινωνία

Στην περίπτωση της λειτουργίας FDD (επάνω μέρος του Σχήμα 8), υπάρχουν δύο φέρουσες συχνότητες, μία για την ανερχόμενη μετάδοση (f_{UL}) και μία για την κατερχόμενη μετάδοση (f_{DL}). Έτσι κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου υπάρχουν δέκα υποπλάγια για τον ανερχόμενο και τον κατερχόμενο σύνδεσμο αντίστοιχα. Ωστόσο, η ανερχόμενη και η κατερχόμενη μετάδοση μπορούν να συνυπάρξουν ταυτόχρονα στην ίδια κυψέλη. Ο διαχωρισμός των μεταδόσεων κατερχόμενου και ανερχόμενου συνδέσμου επιτυγχάνεται με φίλτρα αποστολής/λήψης, γνωστά ως φίλτρα αμφιδρόμησης. Ακόμη και εάν συμβεί παράλληλη μετάδοση στον ανερχόμενο και στον κατερχόμενο σύνδεσμο, όσον αφορά τη λειτουργία FDD, το τερματικό μπορεί να λειτουργήσει αμφίδρομα ή ημιαμφίδρομα για μια συγκεκριμένη ζώνη συχνότητας, ανάλογα με το αν ισχύει ή όχι η περίπτωση της ταυτόχρονης μετάδοσης και λήψης. Όσον αφορά την περίπτωση της αμφιδρόμησης, η μετάδοση και η λήψη μπορεί να συμβεί ταυτόχρονα για ένα τερματικό σε αντίθεση με την ημιαμφιδρόμηση όπου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη της πληροφορίας. Η υποστήριξη του half-duplex συνιστά στα τερματικά τη χρήση απλουστευμένων εφαρμογών εξαιτίας των χαμηλών απαιτήσεων που έχουν τα φίλτρα αμφιδρόμησης. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για ορισμένες ζώνες συχνοτήτων που έχουν στενό διάκενο αμφιδρόμησης.

Επομένως, η υποστήριξη της λειτουργίας αμφιδρόμησης εξαρτάται από τη ζώνη συχνότητας. Το τερματικό μπορεί να μεταδώσει σε ορισμένες ζώνες ημιαμφίδρομα και στις υπόλοιπες που απομένουν να μεταδώσει αμφίδρομα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα αμφιδρόμησης / ημιαμφιδρόμησης μετάδοσης καθορίζεται από το εκάστοτε τερματικό. Ο σταθμός βάσης λειτουργεί ημιαμφίδρομα ανεξάρτητα των δυνατοτήτων του κάθε τερματικού. Συνεπώς εφόσον οι δομές μεταδόσεις και οι σχέσεις χρονισμού είναι πανομοιότυπες μεταξύ αμφιδρόμησης και ημιαμφιδρόμησης επικοινωνίας μια κυψέλη μπορεί να εξυπηρετήσει τερματικά FDD δύο ταχυτήτων δηλαδή τόσο αμφιδρόμων όσο και ημιαμφιδρόμων. Ωστόσο η ημιαμφιδρόμη μετάδοση έχει αντίκτυπο στους υποστηριζόμενους ρυθμούς δεδομένων που μπορούν να παρεχθούν από ή σε ένα κινητό τερματικό καθώς δε μπορεί να μεταδώσει σε όλα τα υποπλάγια του ανερχόμενου συνδέσμου.

Ως εκ τούτου, η χωρητικότητα της κυψέλης δεν επηρεάζεται από μια τέτοια περίπτωση, καθώς σε ένα δεδομένο υποπλάσιο υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης από διαφορετικά τερματικά τόσο στον ανερχόμενο όσο και στον κατερχόμενο σύνδεσμο. Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη από τις αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού. Συνεπώς, η ημιαμφιδρόμη επικοινωνία θα μπορούσε να θεωρηθεί ως περιορισμός. Εάν ένα τερματικό έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε μια λήψη (downlink) να προηγείται μιας αποστολής (uplink) σε ένα υποπλάσιο τότε είναι απαραίτητη η χρήση ενός χρόνου φύλαξης. Αυτός ο χρόνος φύλαξης είναι χρήσιμος για την εναλλαγή από την λειτουργία της λήψης σε αυτήν της αποστολής. Σε αυτού του είδους τις περιπτώσεις, αυτό επιτυγχάνεται με την παράλειψη των τελευταίων συμβόλων OFDM στον κατερχόμενο σύνδεσμο [20].

Χρονοδιακριτική αμφίδρομη επικοινωνία

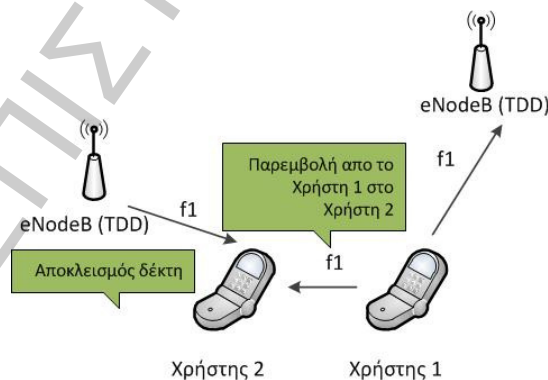
Στην περίπτωση της λειτουργίας TDD (κάτω μέρος του Σχήμα 8) υπάρχει μόνο μία φέρουσα συχνότητα και οι μεταδόσεις τόσο στο downlink όσο και στο uplink διαχωρίζονται στο πεδίο του χρόνου με βάση την κυψέλη.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα μερικά υποπλάισια κατανέμονται και στον κατερχόμενο αλλά και στον ανερχόμενο σύνδεσμο, με την εναλλαγή μεταξύ ανερχόμενου και κατερχόμενου συνδέσμου να πραγματοποιείται στο ειδικό υποπλάισιο (κυρίως στο 1^ο υποπλάισιο και μερικές φορές στο 6^ο).

Όπως η λειτουργία FDD, έτσι και η TDD υποστηρίζει εύρος ζώνης από 1.4 MHz έως 20 MHz και ανάλογα με τη ζώνη συχνοτήτων ο αριθμός των υποστηριζόμενων εύρων ζώνης μπορεί να είναι μικρότερος του συνολικού εύρους.

Η λειτουργία TDD μπορεί να υλοποιηθεί σε μια ασύζευκτη (unpaired) ζώνη συχνότητας ή σε δύο συζευγμένες (paired) ξεχωριστά, σε αντίθεση με τη λειτουργία FDD όπου απαιτείται πάντα ένα ζεύγος ζωνών, με εύλογο διαχωρισμό μεταξύ καθοδικής και ανοδικής ζεύξης, γνωστός και ως αμφίδρομος διαχωρισμός. Σε μια εφαρμογή FDDUE συνήθως απαιτείται ένα φίλτρο αμφίδρομησης όταν διευκολύνεται η ταυτόχρονη λήψη και μετάδοση. Στη λειτουργία TDD δεν απαιτείται τέτοιο φίλτρο στο κινητό τερματικό. Η πολυπλοκότητα του φίλτρου της αμφίδρομησης μετάδοσης αυξάνεται όταν οι ζώνες συχνοτήτων της ανερχόμενης και της κατερχόμενης ζεύξης είναι σε κοντινή απόσταση. Σε μερικές μελλοντικές κατανομές φάσματος προβλέπεται ότι θα είναι ευκολότερη η εύρεση ασύζευκτων κατανομών παρά συζευγμένων, με ένα αισθητό διαχωρισμό duplex αυξανόντας έτσι περαιτέρω το πεδίο εφαρμογής της λειτουργίας TDD.

Εν τούτοις, καθώς το downlink και το uplink μοιράζονται την ίδια ζώνη συχνότητας, μπορεί να προκληθεί παρεμβολή μεταξύ αυτών των σημάτων, σε αυτές τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 10, με τη χρήση του TDD στην ίδια συχνότητα, χωρίς συντονισμό και το συγχρονισμό μεταξύ των τοποθεσιών στην ίδια περιοχή κάλυψης. Για εξάπλωση με συντονισμό στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, τα τερματικά που είναι συνδεδεμένα στις κυψέλες με διαφορετικό χρονοδιάγραμμα ή / και διαφορετική κατανομή ανοδικής ζεύξης/καθοδικής ζεύξης μπορούν να προκαλέσουν αποκλεισμό στους υπόλοιπους χρήστες. Στο LTE TDD οι σταθμοί βάσης πρέπει να συγχρονιστούν στο ίδιο πλαίσιο όταν πρόκειται για την ίδια περιοχή κάλυψης με σκοπό την αποφυγή της διακυβελικής παρεμβολής. Αυτό λοιπόν, μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση δορυφορικών λύσεων όπως το GPS, Galileo, ή έχοντας ένα άλλο εξωτερικό χρονισμό αναφοράς, τον οποίο να μοιράζονται οι σταθμοί βάσης εντός της ίδιας περιοχής κάλυψης [20].

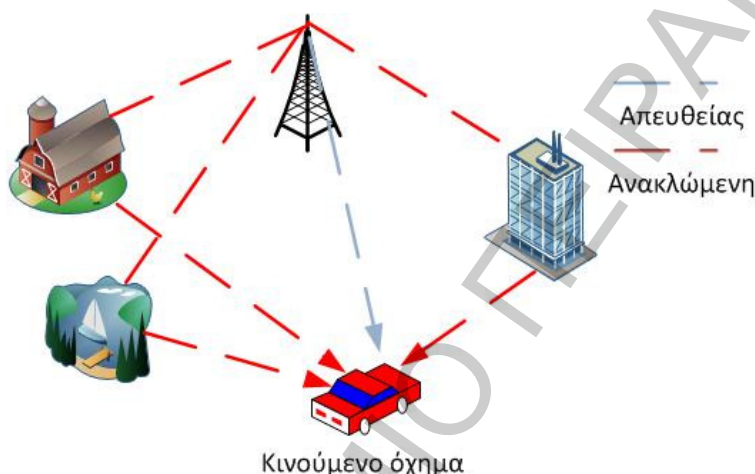


Σχήμα 10 Παρεμβολές από το uplink στο downlink στην περίπτωση της ασυντονιστής λειτουργία TDD, επανασχεδιασμένο από [20]

2.2 Διάλειψη

Υπό πραγματικές συνθήκες, το σήμα από μια κεραία εκπομπής φθάνει στην κεραία του δέκτη, όχι μόνο μέσω απευθείας οπτικής επαφής, αλλά και μέσω πολλαπλών διαδρομών διάδοσης. Αυτή η δάδοση πολλαπλής διαδρομής ονομάζεται διάλειψη. Ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα εκπεμπόμενο σήμα ανακλάται από αντικείμενα, όπως είναι τα κτίρια. Ως αποτέλεσμα, το σήμα εκπομπής σταξιδεύει κατά μήκος διαφορετικών διαδρομών

αντανάκλασης προς το δέκτη, Σχήμα 11. Ο δέκτης εντοπίζει όλα αυτά τα σήματα, τα οποία έχουν συνήθως διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις, επίπεδα, φάσεις, όπως επίσης και μετατοπίσεις συχνότητας εξαιτίας του φαινομένου Doppler (που προκαλείται από κινούμενους πομπούς ή δέκτες). Σε ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων – πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output, MIMO), υπάρχει ένα κανάλι διάλωσης μεταξύ κάθε ζεύγους πομπού και δέκτη. Μολονότι, η απόδοση ενός συστήματος μιας κεραίας εκπομπής - μιας κεραίας λήψης (Single Input Single Output, SISO), υποβαθμίζεται από τη διεργασία της διάλωσης, τα συστήματα MIMO λειτουργούν καλύτερα υπό συνθήκες πολλαπλής διαδρομής, π.χ. σε περιβάλλοντα με ισχυρή διάλωση. Η διάλωση αποτελεί μια βασική συνιστώσα στα συστήματα MIMO, καθώς αρκετά διαφορετικοί, π.χ. στην καλύτερη περίπτωση, ασυσχέτιστοι δίαυλοι διάλωσης οφείλουν να διακρίνουν τις διάφορες ροές δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές κεραίες εκπομπής [21].



Σχήμα 11 Αρχή διάλωσης [21]

Ένα καλύτερο σενάριο, είναι αυτό των ασυσχέτιστων διαύλων διάλωσης. Υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, τα κανάλια διάλωσης δεν είναι εντελώς ανεξάρτητα μεταξύ τους, λόγω της γεωμετρικής διάταξης των κεραιών. Συνεπώς, για τις δοκιμές της τεχνικής MIMO, είναι απαραίτητη η προσομοίωση των συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών και των διαφορετικών καναλιών διάλωσης. Μόνο με το συσχετισμό μεταξύ των μεμονωμένων καναλιών μπορεί να επιτευχθεί μια ρεαλιστική προσομοίωση ολόκληρου του συστήματος MIMO. Αυτό είναι σημαντικό, δεδομένου ότι για τα συστήματα MIMO το όφελος εξαρτάται από το βαθμό συσχέτισης του καναλιού. Για παράδειγμα, όσο υψηλότερη είναι η στατιστική ανεξαρτησία των διαφορετικών καναλιών διάλωσης, τόσο καλύτερη είναι η επιτεύξιμη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων [21].

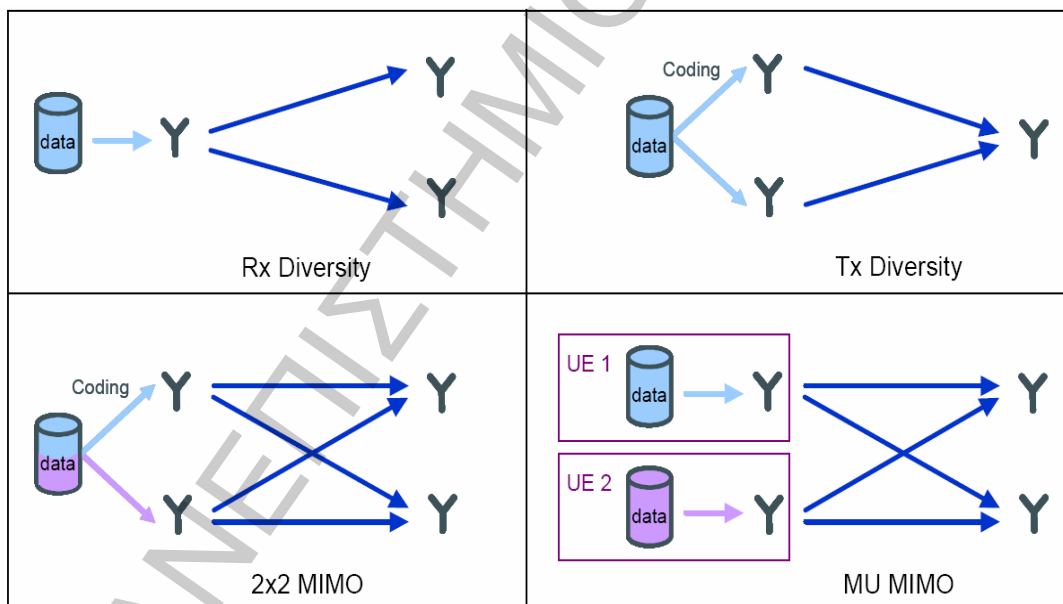
2.3 Συστήματα μετάδοσης πολλαπλών κεραιών

Όταν αναφερόμαστε σε συστήματα MIMO, πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των συστημάτων χωρικού διαφορισμού (spatial diversity) και των συστημάτων χωρικής πολλαπλής (spatial multiplexing).

Ο χωρικός διαφορισμός αποτελεί μια τεχνική MIMO η οποία χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες εκπομπής και λήψης για την αύξηση της ανθεκτικότητας των δεδομένων μετάδοσης, άρα έμμεσα και των αποτελεσματικών ρυθμών δεδομένων. Ουσιαστικά, ο χωρικός διαφορισμός υποδηλώνει την ταυτόχρονη μεταφορά ροής δεδομένων στην ίδια συχνότητα, έτσι ώστε οι κεραίες λήψης να λαμβάνουν αντίγραφο του σήματος. Επίσης, εφαρμόζεται μια επιπρόσθετη κωδίκευση του σήματος antenna-specific πριν αυτό οδηγηθεί προς μετάδοση, με σκοπό την αύξηση του φαινομένου του διαφορισμού. Αυτό σημαίνει πως κάθε κεραία μεταδίδει την ίδια ροή πληροφορίας, αλλά με διαφορετική κωδίκευση. Συχνά χρησιμοποιείται η κωδίκευση χώρου-χρόνου σύμφωνα με τον Alamouti. Στην πλευρά του δέκτη, τα σήματα από τις κεραίες εκπομπής λαμβάνονται από τις κεραίες σύμφωνα με διαφορετικά,

ιδανικά συσχετίστα μονοπάτια διάδοσης. Αυτό μετριάζει τα φαινόμενα διάλειασης, διότι τα σήματα είναι απίθανο να επηρεάζονται κατά τον ίδιο τρόπο, από τις διαδικασίες διάλειασης διαφορετικών καναλιών διάδοσης. Συνεπώς, βελτιώνεται τόσο ο σηματοθορυβικός λόγος στην πλευρά του δέκτη όσο και η ανθεκτικότητα των δεδομένων μετάδοσης. Η διαφορική εκπομπή (transmit diversity), (multiple input, single output – MISO) και τα συστήματα λήψης διαφορισμού (single input, multiple output – SIMO) ανήκουν στην κατηγορία των συστημάτων χωρικού διαφορισμού, Σχήμα 12.

Η χωρική πολυπλεξία ή “true MIMO” είναι μια διαφορετική τεχνική, που χρησιμοποιείται για τη σημαντική αύξηση του ρυθμού δεδομένων καθώς και για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού. Η χωρική πολυπλεξία ουσιαστικά σημαίνει την ταυτόχρονη μεταφορά ροής δεδομένων στην ίδια συχνότητα κάνοντας χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης. Για παράδειγμα, η πλήρης αξιοποίηση της χωρικής διάστασης του ραδιοδιαύλου. Σε αντίθεση με το χωρικό διαφορισμό, στη χωρική πολυπλεξία δε συναντάμε περιττή αποστολή δεδομένων. Η ροή δεδομένων που είναι προς μετάδοση θα χωριστεί σε ανεξάρτητες ροές δεδομένων, οι οποίες αποστέλλονται μέσω διαφορετικών κεραιών εκπομπής. Έτσι η χωρική πολυπλεξία αυξάνει το ρυθμό δεδομένων για την περίπτωση του ενός χρήστη ή τη συνολική χωρητικότητα για την περίπτωση πολλαπλών χρηστών. Για την περίπτωση του single-user (SU) MIMO, οι μεταδιδόμενες ροές δεδομένων ανήκουν μόνο σε ένα χρήστη, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων για αυτόν το μεμονωμένο χρήστη. Για την περίπτωση του (MU) MIMO ή αλλιώς συνεργατικής MIMO, οι μεταδιδόμενες ροές δεδομένων ανήκουν σε διαφορετικούς χρήστες, οι οποίοι κάνουν όμως χρήση του ίδιου ραδιοδιαύλου. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του ραδιοδιαύλου, ενώ ο ρυθμός δεδομένων για το μεμονωμένο χρήστη παραμένει αμετάβλητος. Επίσης, ο εξοπλισμός του χρήστη (User Equipment) θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ακριβώς μία κεραιά μετάδοσης, Σχήμα 12[21].



Σχήμα 12 Σχήματα λήψης διαφορισμού (πάνω αριστερά), εκπομπής διαφορισμού (πάνω δεξιά), χωρικής πολυπλεξίας 2x2 (κάτω αριστερά) και πολλαπλών χρηστών MIMO (κάτω δεξιά)[21]

2.4 Φάσμα στο LTE

Το LTE μπορεί να αναπτυχθεί σε ήδη υπάρχουσες ζώνες, που έχουν οριστεί από το IMT αλλά φυσικά και σε ζώνες που θα οριστούν στο εγγύς μέλλον. Η δυνατότητα λειτουργίας μιας ραδιοτεχνολογίας σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, δεν είναι από μόνο του κάτι καινούργιο. Για παράδειγμα τα κινητά τερματικά quad-band στο GSM λειτουργούν συνήθως στις ζώνες συχνοτήτων 850, 900, 1800 (DCS, Digital Cellular Service), και 1900 MHz (Personal Cellular Service, PCS). Από την σκοπιά της λειτουργικότητας της ραδιοπρόσβασης, αυτό δεν έχει

κανένα ή έχει περιορισμένο αντίκτυπο και οι προδιαγραφές του φυσικού στρώματος δεν αναφέρονται σε κάποια συγκεκριμένη ζώνη συχνότητας.

Υπάρχει ένας ολοένα αυξανόμενος αριθμός ζωνών συχνότητων που ορίζονται ως υποψήφιες για χρήση στο LTE. Πολλές από αυτές τις ζώνες χρησιμοποιούνται ήδη από άλλα κυψελωτά συστήματα προηγούμενης τεχνολογίας, ενώ άλλες δεν έχουν διατεθεί προς το παρόν. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το φάσμα του FDD απαιτεί συζευγμένες ζώνες, μία για το uplink και μία για το downlink, ενώ το TDD απαιτεί μόνο μία ζώνη, καθώς το uplink και το downlink βρίσκονται στην ίδια ζώνη συχνότητας. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν διαφορετικές κατανομές συχνότητων για το TDD και το FDD. Όταν μιλάμε για ζώνες συχνότητων αναφερόμαστε σε κατανομημένους αριθμούς. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 2 που ακολουθεί, οι ζώνες συχνότητων μεταξύ 1 – 24 έχουν διατεθεί για συζευγμένο (paired) φάσμα, δηλαδή FDD, και οι ζώνες συχνότητων 33 – 43 διατίθενται για ασύζευκτο φάσμα, δηλαδή TDD.

Υπάρχει περίπτωση τα κινητά τερματικά να εντοπίσουν και τους δύο αυτούς τύπους σε μία ζώνη συχνότητας, οπότε θα πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσουν ποιο είδος μετάδοσης πραγματοποιείται σε εκείνη τη συγκεκριμένη ζώνη συχνότητας στην περιοχή όπου βρίσκονται.

Οι ζώνες συχνότητων για FDD LTE κατανέμονται κατά ζεύγη έτσι ώστε να επιτρέπεται η ταυτόχρονη μετάδοση σε δύο ζώνες συχνότητων. Επιπλέον, οι ζώνες έχουν επαρκή απόσταση μεταξύ τους, ώστε τα μεταδιδόμενα σήματα να επηρεάζουν όσο το δυνατό λιγότερο την απόδοση του δέκτη. Ο διαχωρισμός πρέπει να είναι επαρκής ώστε να καταστεί δυνατό το roll-off του φιλτραρίσματος από την κεραία, ώστε να υπάρχει μια επαρκής εξασθένηση του εκπεμπόμενου σήματος εντός της λαμβανόμενης ζώνης.

Οι κατανομές συχνότητων TDD LTE δεν είναι συνδυασμένες σε ζεύξη για το λόγο ότι ο ανερχόμενος και ο κατερχόμενος σύνδεσμος μοιράζονται την ίδια συχνότητα με την τεχνική της χρονικής πολυπλεξίας [18].

Πίνακας 2 Κατανομή ζωνών συχνότητων και οι αντίστοιχες περιοχές λειτουργίας [22]

ΖΩΝΕΣ LTE	UPLINK (MHZ)	DOWNLINK (MHZ)	ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣΗΣ (MHZ)	ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ (MHZ)	ΣΧΗΜΑ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣΗΣ	ΚΥΡΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΧΡΗΣΗΣ
1	1920 - 1980	2110 - 2170	190	60	FDD	Κίνα, Ιαπωνία, Ευρώπη, Ασία, Αυστραλία
2	1850 - 1910	1930 - 1990	80	60	FDD	Ν.Αμερική, Β.Αμερική
3	1710 - 1785	1805 - 1880	95	75	FDD	Ευρώπη, Κίνα, Ασία, Αυστραλία, Αφρική
4	1710 - 1755	2110 - 2155	400	45	FDD	Ν.Αμερική, Β.Αμερική
5	824 - 849	869 - 894	45	25	FDD	Ν.Αμερική, Β.Αμερική, Αυστραλία, Ασία, Αφρική
6	830 - 840	875 - 885	45	10	FDD	Ιαπωνία
7	2500 - 2570	2620 - 2690	120	70	FDD	Ευρώπη, Ν.Αμερική, Ασία, Αφρική, Αυστραλία
8	880 - 915	925 - 960	45	35	FDD	Ευρώπη, Ν.Αμερική, Ασία, Αφρική, Αυστραλία
9	1749,9 - 1784,9	1844,9 - 1879,9	95	35	FDD	Ιαπωνία

ΖΩΝΕΣ LTE	UPLINK (MHZ)	DOWNLINK (MHZ)	ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣΗΣ (MHZ)	ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ (MHZ)	ΣΧΗΜΑ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣΗΣ	ΚΥΡΙΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΧΡΗΣΗΣ
10	1710 - 1770	2110 - 2170	400	60	FDD	Ν.Αμερική, Β.Αμερική
11	1427,9 - 1452,9	1475,9 - 1500,9	48	35	FDD	Ιαπωνία
12	698 - 716	728 - 746	30	18	FDD	Β.Αμερική
13	777 - 787	746 - 756	31	10	FDD	Β.Αμερική
14	788 - 798	758 - 768	30	10	FDD	Β.Αμερική
17	704 - 716	734 - 746	30	12	FDD	Β.Αμερική
18	815 - 830	860 - 875	45	15	FDD	Ν.Αμερική, Β.Αμερική, Αυστραλία, Ασία, Αφρική
19	830 - 845	875 - 890	45	15	FDD	Ν.Αμερική, Β.Αμερική, Αυστραλία, Ασία, Αφρική
20	832 - 862	791 - 821	41	30	FDD	Ευρώπη
21	1447,9 - 1462,9	1495,5 - 1510,9	48	15	FDD	Ιαπωνία
22	3410 - 3500	3510 - 3600	100	90	FDD	
24	1626,5 - 1660,5	1525 - 1559	101,5	34	FDD	
33	1900 - 1920	-	-	20	TDD	
34	2010 - 2025	-	-	15	TDD	Κίνα
35	1850 - 1910	-	-	60	TDD	
36	1930 - 1990	-	-	60	TDD	
37	1910 - 1930	-	-	20	TDD	
38	2570 - 2620	-	-	50	TDD	Ευρώπη
39	1880 - 1920	-	-	40	TDD	Κίνα
40	2300 - 2400	-	-	100	TDD	Κίνα, Ασία
41	2496 - 2690	-	-	194	TDD	
42	3400 - 3600	-	-	200	TDD	
43	3600 - 3800	-	-	200	TDD	

Οι προσθήκες συχνοτήτων ή και ζευγών συχνοτήτων είναι αποτέλεσμα των διαπραγματεύσεων κατά των ρυθμιστικών συνεδριάσεων της ITU για το ψηφιακό μέρισμα, καθώς επίσης και από την πίεση για τη διεύρυνση νέων υπηρεσιών και εφαρμογών. Πολλές από τις νέες κατανομές φάσματος είναι σχετικά μικρού μεγέθους, συνήθως είναι της τάξης των 10 – 20 MHz σε εύρος ζώνης, πράγμα το οποίο έχει αναγνωριστεί ως ένα σημαντικό τεχνολογικό πρόβλημα, καθώς το

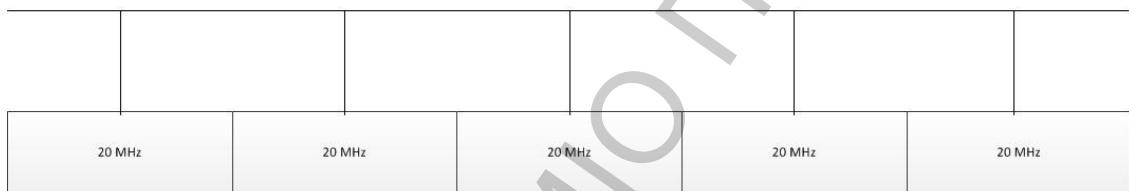
LTE-Advanced χρειάζεται εύρος ζώνης των 100MHz, και πιθανόν να χρειαστεί συνάθροιση πολλών φορέων σε ένα ευρύ σύνολο συχνοτήτων[18].

2.5 Χαρακτηριστικά τεχνολογικού προτύπου LTE-Έκδοση 10

2.5.1 Αρχή συνάθροισης φορέων

Ήδη από τη πρώτη έκδοση της ραδιοτεχνολογίας LTE (Rel-8) παρέχεται εκτεταμένη υποστήριξη για την ανάπτυξη διαφόρων χαρακτηριστικών της δέσμευσης του φάσματος, που κυμαίνεται περίπου από 1.4 MHz έως 20 MHz τόσο σε συμμετρικές όσο και σε ασύμμετρες μπάντες συχνοτήτων. Στη Rel-10 το μεταδιδόμενο εύρος ζώνης μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω μέσω της αποκαλούμενης συνάθροισης φορέων (Carrier Aggregation), όπου πολλαπλές συνιστώσες φέρουσας συναθροίζονται και χρησιμοποιούνται από κοινού για μετάδοση από και προς έναν και μόνο κινητό τερματικό. Μπορεί να γίνει συνάθροιση έως πέντε φέρουσων συνιστωσών, όπου η καθεμία μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικό εύρος ζώνης, επιτρέποντας εύρος ζώνης χωρητικότητα έως 100 MHz, Σχήμα 13. Η αναδρομική συμβατότητα ανταποκρίνεται σε κάθε συνιστώσα φέρουσας που χρησιμοποιεί τη δομή Rel-8. Στη γενική περίπτωση μπορεί να συναθροιστεί διαφορετικός αριθμός συνιστωσών φέρουσας για τον κατερχόμενο και τον ανερχόμενο σύνδεσμο.

Πέντε συνιστώσες φέρουσας -> Συνολικό εύρος ζώνης 100 MHz



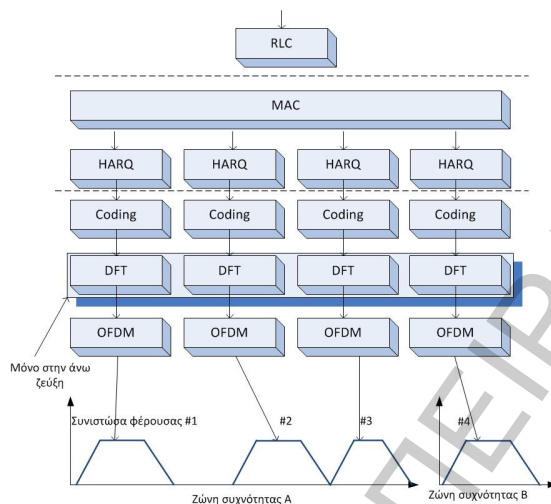
Σχήμα 13 Συνάθροιση φορέων στη Rel-8, επανασχεδιασμένο από[23]

Όσο αφορά τη συχνότητα των διαφορετικών συνιστωσών φέρουσας, μπορούν να διακριθούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες: συνάθροιση intra-band συνεχόμενων φερόντων (βλ. συνάθροιση #2 και #3 από το Σχήμα 14), συνάθροιση inter-band (#1 και #4), και συνάθροιση intra-band μη-συνεχόμενων φερόντων. Η δυνατότητα συνάθροισης μη γειτονικών συνιστωσών φέρουσας επιτρέπει τη χρήση του καταμηθέντος φάσματος. Οι φορείς με το καταμηθέν φάσμα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού που βασίζονται στη διαθεσιμότητα ενός συνολικού εύρους ζώνης ακόμη και αν δε διαθέτουν κατανομή ενιαίου ευρυζωνικού (wideband) φάσματος. Απ' την οπτική γωνία του φάσματος ζώνης βάσης (baseband), δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις περιπτώσεις και όλες υποστηρίζονται από τη Rel-10. Ωστόσο η πολυπλοκότητα της εφαρμογής της ραδιοσυχνότητας (RF) είναι πολύ διαφορετική με την πρώτη περίπτωση να είναι λιγότερο περίπλοκη. Έτσι αν και η συνάθροιση του φάσματος υποστηρίζεται από τις βασικές προδιαγραφές, η πραγματική εφαρμογή θα είναι ιδιαίτερα περιορισμένη συμπεριλαμβανομένου του προσδιορισμού περιορισμένων περιπτώσεων συνάθροισης και συνάθροισης διάσπαρτων φασμάτων που υποστηρίζονται μόνο από πιο προηγμένα τερματικά. Αν και η χρήση του καταμηθέντος ραδιοφάσματος και η επέκταση του συνολικού εύρους ζώνης πέρα από τα 20 MHz είναι δύο σημαντικές περιπτώσεις της συνάθροισης φορέων, υπάρχουν και άλλες χρήσιμες περιπτώσεις όπου είναι χρήσιμη η συνάθροιση φορέων εντός συνεχόμενου φάσματος των 20 MHz. Ένα παράδειγμα είναι η ανάπτυξη ετερογενών υποδομών.

Ο σχεδιασμός και οι αναμεταδόσεις των υβριδικών - αυτόματων αιτήσεων επανάληψης χειρίζονται ξεχωριστά για κάθε συνιστώσα φέρουσας, Σχήμα 14. Αρχικά, ο έλεγχος σηματοδότησης μεταδίδεται με την ίδια συνιστώσα φέρουσας με τα αντίστοιχα δεδομένα. Εναλλακτικά είναι πιθανή η χρήση του χρονοπρογραμματισμού cross-carrier, όπου η σηματοδότησή του μεταδίδεται στο τερματικό σε άλλη συνιστώσα φέρουσας από εκείνη των δεδομένων.

Για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας του εξοπλισμού του χρήστη, το ανάλογο τερματικό που υποστηρίζει τη δυνατότητα συνάθροισης φορέων συνήθως λαμβάνει σε μια συνιστώσα φέρουσας, την πρωτεύουσα συνιστώσα φέρουσας. Η λήψη των δευτερευουσών συνιστωσών

φέρουσας μπορούν τάχιστα να ενεργοποιηθούν /απενεργοποιηθούν στον εξοπλισμό του χρήστη από το σταθμό βάσης μέσω της σηματοδότησης του επιπέδου MAC. Παρόμοια στον ανερχόμενο σύνδεσμο όλη η σηματοδότηση ανάδρασης μεταδίδεται στην πρωτεύουσα συνιστώσα φέρουσας και οι δευτερεύουσες συνιστώσες φέρουσας ενεργοποιούνται όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο, Σχήμα 14[14], [24].



Σχήμα 14 Συνάθροιση φορέων στη Rel-10, επανασχεδιασμένο από [14]

2.5.2 Ενισχυμένη υποστήριξη μετάδοσης πολλαπλών κεραιών

Η ραδιοτεχνολογία υποστηρίζει μια μεγάλη ποικιλία τεχνικών πολλαπλών κεραιών από την πρώτη κιάλας έκδοση. Αυτή περιέχει ποικιλότητα μετάδοσης στον κατερχόμενο σύνδεσμο που βασίζεται στην κωδικοποίηση πλοκάδας χώρου - συχνότητας (Space-Frequency Block Coding) για την περίπτωση εκπομπής δύο κεραιών και της SFBC σε συνδυασμό με την εκπομπή διαφορισμού μεταγωγής - συχνότητας (Frequency-Switched Transmit Diversity, FSTD). Ακόμα, στον κατερχόμενο σύνδεσμο ο κωδικοβιβλιοπαγές μηχανισμός προκωδικοποίησης παρέχει τη δυνατότητα της πολύ-επίπεδης μετάδοσης (χωρική πολυπλεξία) έως τεσσάρων στρωμάτων, η οποία υποστηρίζεται από τη Rel-8. Αυτή με τη σειρά της παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής βαθμίδος (rank-adaptation) στη μονοστρωματική μετάδοση με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση κωδικοβιβλιο-παγούς ακτίνας/δέσμης καθώς και μιας βασικής μορφής MIMO πολλαπλών χρηστών όπου οι πόροι διαφορετικών στρωμάτων ίδιας χρονοσυχνότητας (time-frequency) μπορούν να ανατεθούν σε διαφορετικά τερματικά.

Οι παραπάνω τεχνικές πολλαπλών κεραιών βασίζονται στις προαναφερόμενες κυψελοειδής αναφορές των σημάτων αποδιαμόρφωσης καθώς και στην απόκτηση της ανάδρασης (feedback) όσο αφορά την κατάσταση του καναλιού από το τερματικό προς το σταθμό βάσης. Επιπλέον, η εκπομπή συγκεκριμένων αναφορών των σημάτων από το τερματικό του χρήστη για την υποστήριξη μονοστρωματικής διαμόρφωσης ακτίνας/δέσμης είναι μέρος της Rel-8. Η διαστρωματική μετάδοση υποστηρίζεται από τη Rel-9. Οι αναδρομικές αναφορές σημάτων από την πλευρά του κινητού τερματικού προκωδικοποιούνται μαζί με τα δεδομένα, συνεπώς τα βάρη του μηχανισμού προκωδικοποίησης δεν περιορίζονται από κάποιο συγκεκριμένο κωδικοβιβλίο και δε χρειάζεται να γίνουν γνωστά στο δέκτη. Μία σημαντική εφαρμογή είναι η δημιουργία ακτίνας/δέσμης με περισσότερες από τέσσερις κεραιές, και στην τεχνική TDD οι στρατηγικές μετάδοσης reciprocity-based.

Στη Rel-10, η χωρική πολυπλεξία του κατερχόμενου συνδέσμου επεκτείνεται για να υποστηρίξει έως και οχτώ-στρωματική μετάδοση με ένα ενισχυμένο σήμα αναφοράς της δομής. Λαμβάνοντας υπόψη τις κυψελοειδής αναφορές σημάτων, για ανώτερης τάξης χωρική πολυπλεξία την καθιστά λιγότερο ελκυστική, καθώς οι επίφορτοι (overhead) των αναφορών από τα σήματα δεν είναι ανάλογες του βαθμού της στιγμιαίας μετάδοσης, αλλά ανάλογες του μέγιστου υποστηριζόμενου βαθμού μετάδοσης. Ως εκ τούτου, η Rel-10, εισάγει μια εκτεταμένη υποστήριξη σημάτων αναφοράς συγκεκριμένων τερματικών για αποδιαμόρφωση έως και οχτώ

επιπέδων. Επίσης, η αναφορά της πληροφορίας της κατάστασης του καναλιού βασίζεται σ' ένα ξεχωριστό σύνολο σημάτων αναφοράς που εκπέμπονται στην κυψέλη που είναι γνωστά ως σήματα αναφορών καναλιού CSI (Channel State Information). Τα σήματα αναφορών καναλιού είναι σχετικά αραιά συχνοτικά (κάθε 12° υπο-φέρον, αντιστοιχεί σε 180 kHz), αλλά συχνά μεταδίδονται από τις κεραιές προς το σταθμό βάσης. Η περιοδικότητα μπορεί να ρυθμιστεί συνήθως μια φορά ανά 10 ms. Σε αντίθεση με τα σήματα αναφοράς εξειδικευμένων τερματικών, όπου είναι πυκνότερα στη συχνότητα και μεταδίδονται μόνο όταν μεταδίδονται δεδομένα στο αντίστοιχο επίπεδο. Διαχωρίζοντας τη δομή του σήματος αναφοράς που υποστηρίζει αποδιαμόρφωση από εκείνη που εκτιμά την κατάσταση του καναλιού, αυτό επιφέρει τη μείωση του επιφορτου του σήματος αναφοράς, ιδιαίτερα για υψηλούς βαθμούς χωρικής πολυπλεξίας και επιτρέπει την εφαρμογή διαφόρων συστημάτων που υποστηρίζουν διαμόρφωση ακτίνας/δέσμης.

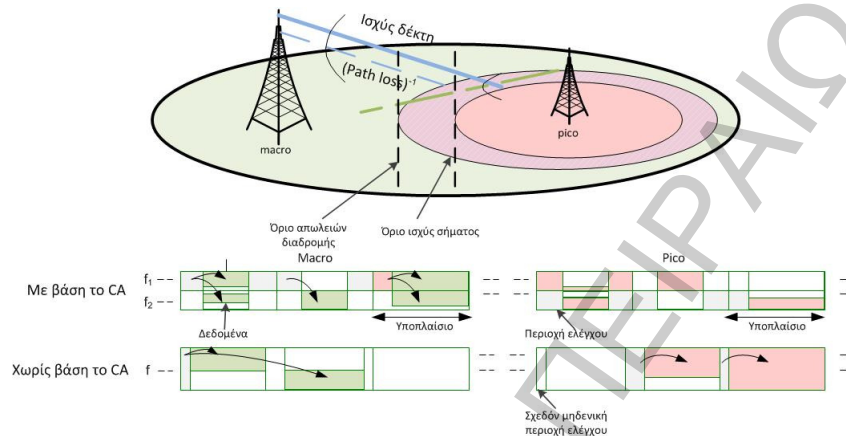
Η χωρική πολυπλεξία μέχρι τεσσάρων επιπέδων του ανερχόμενου συνδέσμου, υποστηρίζεται και αυτή από τη Rel-10. Ένα κωδικοβιβλίου-παγές σύστημα, όπου ο χρονοπρογραμματιστής βρίσκεται στο σταθμό βάσης καθορίζει τον πίνακα προκωδίκευσης που πρέπει να εφαρμόζεται στο τερματικό. Ο επιλεγμένος πίνακας προκωδίκευσης χρησιμοποιείται στις μεταδόσεις δεδομένων του ανερχόμενου συνδέσμου καθώς και στα ανερχόμενα αποκωδικοποιημένα σήματα αναφορών. Για να διευκολυνθεί η επιλογή του πρωτύπου πίνακα στο τερματικό, τα φερέφωνα σήματα αναφορών ενισχύονται ώστε να υποστηρίξουν έως και τέσσερις κεραιές [14], [24].

2.5.3 Βελτιωμένη υποστήριξη των ετερογενών δικτύων

Με την ταχέως αυξανόμενη χρήση της κινητής ευρυζωνικότητας, ο όγκος των δεδομένων που διακινούνται από τους χρήστες στο δίκτυο γίνεται ολοένα και μεγαλύτερος. Σε μια πρακτική εφαρμογή ο ρυθμός δεδομένων του τελικού χρήστη εξαρτάται από σημαντικούς παράγοντες όπως: η απόσταση του τερματικού από το σταθμό βάσης, εάν ο χρήστης βρίσκεται indoors ή outdoors κ.α. Δεδομένου ότι, οι πιθανότητες βελτίωσης της επίδοσης του συνδέσμου ή της αύξησης της εκπνευμένης ισχύος είναι περιορισμένες, η υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων του τελικού χρήστη απαιτεί μια πυκνότερη υποδομή. Το πυκνότερο δίκτυο όχι μόνο έχει την ικανότητα να αυξήσει το ρυθμό των διακινούμενων δεδομένων αλλά μπορεί ακόμη να αυξήσει τη συνολική χωρητικότητα όσο αυξάνεται ο αριθμός των τοποθεσιών. Ένα ενδεχόμενο είναι μια απλή πύκνωση ενός υπάρχοντος μακροδικτύου, αλλά όταν οι χρήστες είναι άκρως ομαδοποιημένοι. Μια αξιολογη προσέγγιση είναι η υλοποίηση μιας μακροκυψέλης που θα εξασφαλίζει τη βασική κάλυψη με πολλαπλές πικροκυψέλες ενέργειας low-output όπου αυτές χρειάζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 15. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας στρατηγικής είναι μια ετερογενής υποδομή με δύο ή και περισσότερα επίπεδα κυψελών. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι πρόκειται για μια στρατηγική ανάπτυξης και όχι μέρος μιας τεχνολογίας. Αυτή η στρατηγική ανάπτυξης υλοποιείται ήδη στη Rel - 8/9. Ωστόσο η Rel-10 προσφέρει κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά, αναδεικνύοντας έτσι τις ετερογενείς υποδομές.

Σε μια ετερογενή υποδομή, η συνεργασία των κυψελών (πχ. σε ποια κυψέλη θα πρέπει να συνδεθεί ένα κινητό τερματικό) κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο. Το ποσοστό του ρυθμού δεδομένων ενός ανερχόμενου συνδέσμου είναι ουσιαστικά επωφελές να συνδεθεί στην κυψέλη με τη μικρότερη απώλεια διαδρομής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων με δεδομένη ισχύ εκπομπής, αντί των παραδοσιακών μεθόδων όπου η σύνδεση γινόταν στην κυψέλη με τον ισχυρότερο λαμβανόμενο κατερχόμενο σύνδεσμο. Η καλύτερη κυψέλη για τη συνεργασία των κατερχόμενων συνδέσμων εξαρτάται από το φόρτο. Η σύνδεση χαμηλού φόρτου στην κυψέλη με τον ισχυρότερο λαμβανόμενο κατερχόμενο σύνδεσμο προσφέρει τους υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, ενώ σε υψηλό φόρτο ίσως είναι προτιμότερη η σύνδεση στον κόμβο που καταναλώνει τη λιγότερη ενέργεια, διότι παρέχει επαναχρησιμοποίηση των πόρων του κατερχόμενου συνδέσμου μεταξύ των κυψελών που εξυπηρετούνται από τους κόμβους χαμηλής ισχύος. Επίσης, είναι σημαντικό να υπολογιστεί η οπισθοζευκτική χωρητικότητα του κόμβου χαμηλής ισχύος. Συνεπώς, οι στρατηγικές συνεργασίας των κυψελών σε μια ετερογενή υποδομή είναι τετριμμένες. Έτσι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνολική απόδοση του δικτύου. Παρόλο που οποιαδήποτε συνεργασία κυψελών δε βασίζεται αποκλειστικά στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος του κατερχόμενου συνδέσμου, αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει σε μια κατάσταση παρεμβολής

στο δίκτυο, όπου η καλυπτόμενη περιοχή από τον ανερχόμενο σύνδεσμο μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτήν του κατερχόμενου συνδέσμου, δηλαδή να υπάρχει μια περιοχή γύρω από το κόμβο χαμηλής ισχύος όπου η μετάδοση της κατερχόμενης ζεύξης (από τον κόμβο προς το τερματικό) υπόκειται σε ισχυρές παρεμβολές από τη μακροκυψέλη. Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή που προκαλείται από το τερματικό στην εξωτερική περιοχή κάλυψης του κόμβου χαμηλής ισχύος, που οφείλεται στη διαφορά της ισχύος εξόδου ανάμεσα στη μακροκυψέλη high-power και τον κόμβο low-power, είναι σημαντικά χαμηλότερος σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό ομοιογενές δίκτυο μακροκυψελών.



Σχήμα 15 Ετερογενής υποδομή με επικαλυπτόμενες πολλαπλές πικοκυψέλες από μακροκυψέλη, επανασχεδιασμένο από [14]

Για τα δεδομένα ενός υποπλαισίου, αυτό δεν είναι σημαντικό πρόβλημα καθώς ο μηχανισμός συντονισμού διακυβελικής παρεμβολής (inter-cell interference coordination, ICIC) που υποστηρίζεται ήδη από τη Rel-8, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να συντονίσει δυναμικά τη χρήση των πόρων ανάμεσα στα στρώματα των κυψελών, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η επικάλυψη της χρήσης των πόρων. Τα στρώματα των κυψελών μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με το ποιες συχνότητες προτίθενται να εκτελέσουν μεταδόσεις στο εγγύς μέλλον, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αναμενόμενη παρεμβολή.

Ο έλεγχος σηματοδότησης κάθε υποπλαισίου είναι πιο προβληματικός δεδομένου ότι καλύπτει όλο το εύρος ζώνης της κυψέλης και δεν υπόκειται στο μηχανισμό συντονισμού διακυβελικής παρεμβολής. Η Rel-10 υποστηρίζει δύο συστήματα χειρισμού γι' αυτό το ζήτημα. Τα συστήματα Carrier Aggregation-based (CA-based) και non-Carrier Aggregation-based (non-CA-based).

Στα συστήματα CA-based, η αρχή συνάθροισης φορέων χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τον έλεγχο σηματοδότησης για τα διαφορετικά στρώματα κυψελών. Τουλάχιστον μια συνιστώσα φέρουσα σε κάθε στρώμα της κυψέλης προστατεύεται από την παρεμβολή άλλων στρωμάτων κυψελών με το να μη μεταδίδει τον έλεγχο σηματοδότησης στην εν λόγω συνιστώσα φέρουσα. Για παράδειγμα, ο μακροσταθμός βάσης μεταδίδει τον έλεγχο σηματοδότησης στη συνιστώσα φέρουσα f_1 και όχι στη συνιστώσα φέρουσα f_2 , καθώς η κατάσταση είναι η ανάποδη στους κόμβους χαμηλής ισχύος που βρίσκονται εντός της κάλυψης της μακροκυψέλης. Ο προγραμματισμός cross-carrier χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό των δεδομένων σε όλες τις συνιστώσες φέρουσες σε κάθε επίπεδο της κυψέλης στα πλαίσια του μηχανισμού συντονισμού διακυβελικής παρεμβολής. Στην ουσία, δημιουργείται επαναχρησιμοποίηση συχνότητας για τον έλεγχο σηματοδότησης επιτρέποντας στα τερματικά να αξιοποιούν δυναμικά όλο το εύρος ζώνης (ως εκ τούτου υποστηρίζουν τους μέγιστους ρυθμούς δεδομένων) όσο αφορά το κομμάτι των δεδομένων. Παραδείγματος χάριν, ένας φορέας με εύρος ζώνης φάσματος 20 MHz, μπορεί να ρυθμίσει δύο συνιστώσες φέρουσες των 10 MHz η καθεμία και να χρησιμοποιήσει την αρχή συνάθροισης φορέων όπως έχει περιγραφεί παραπάνω.

Στα συστήματα non-CA-based υπάρχει μια μοναδική συνιστώσα φέρουσα f_{sc} όλα τα στρώματα της κυψέλης. Ο διαχωρισμός διαίρεσης χρόνου του ελέγχου σηματοδότησης στα διαφορετικά επίπεδα της κυψέλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό το χειρισμό της

παρεμβολής. Τουλάχιστον ορισμένα υποπλάισια του επιπέδου χαμηλότερης ισχύος της κυψέλης προστατεύονται από την παρεμβολή από το μακρο-επίπεδο σιγάροντας τον έλεγχο σηματοδότησης στα συγκεκριμένα υποπλάισια. Ωστόσο, για λόγους αναδρομικής συμβατότητας οι κυψελοειδής αναφορές σημάτων θα πρέπει να μεταδίδονται από τη μακροκυψέλη και τα τερματικά που συνδέονται στον κόμβο χαμηλής ισχύος θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν μηχανισμούς ακύρωσης παρεμβολών για τη μετρίασή τους [14], [24].

2.5.4 Αναμετάδοση

Η LTE Rel-10 επεκτείνει ακόμη περισσότερο τη ραδιοτεχνολογία με την υποστήριξη της αναμετάδοσης. Με τη λειτουργία της αναμετάδοσης το τερματικό επικοινωνεί με το δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης που είναι ασύρματα συνδεδεμένος με ένα κυψελοδοτή χρησιμοποιώντας την τεχνολογία της ραδιοδιεπαφής LTE. Ο κυψελοδοτής εκτός από τις αναμεταδόσεις εξυπηρετεί άμεσα και τα τερματικά. Ο σύνδεσμος του κυψελοδοτή μπορεί να λειτουργήσει στην ίδια συχνότητα με τη σύνδεση του τερματικού ("inband relaying") ή σε διαφορετική ("outband relaying"). Από την οπτική γωνία του χρήστη με τη λύση αναμετάδοσης 3GPP "Type 1", ο κόμβος αναμετάδοσης θα παρουσιάζεται ως μια κοινή κυψέλη. Αυτό έχει ως σημαντικό πλεονέκτημα την απλοποίηση της εφαρμογής του χρήστη και την επίτευξη της αναδρομικής συμβατότητας, (δλδ. να είναι προσβάσιμη από τερματικά της LTE Rel-8). Στην ουσία ο αναμεταδοτής είναι ένας σταθμός βάσης χαμηλής ισχύος, ασύρματα συνδεδεμένος με το υπόλοιπο κομμάτι του δικτύου. Ένα από τα πιο αξιολόγητα χαρακτηριστικά του αναμεταδοτή είναι η ασύρματη οπισθοδοτήση LTE-based καθώς αυτή μπορεί και παρέχει ένα απλό τρόπο για τη βελτίωση της κάλυψης, (πχ. τοποθετώντας μεταγωγείς στα προβληματικά σημεία των εσωτερικών χώρων). Σε μεταγενέστερο στάδιο, εάν αυτό επιτρέπεται από την κατάσταση της κίνησης, ο σύνδεσμος του κυψελοδοτή θα μπορούσε να αντικατασταθεί, για παράδειγμα, από μια οπτική ίνα με σκοπό τη χρήση των ραδιοπύργων στον κυψελοδοτή για την επικοινωνία με το τερματικό αντί για την εκτέλεση της αναμετάδοσης.

Λόγω του ότι ο πομπός του αναμεταδοτή προκαλεί παρεμβολή στον ίδιο του το δέκτη, η ταυτόχρονη μετάδοση από τον κυψελοδοτή προς τον αναμεταδοτή και από τον αναμεταδοτή προς το τερματικό μπορεί να μην είναι εφικτή εκτός και αν υπάρχει επαρκής απομόνωση των εισερχόμενων και εξερχόμενων σημάτων. Αυτό θα επιτευχθεί ασφαλώς με συγκεκριμένες, καλώς διαχωρισμένες και απομονωμένες διατάξεις κεραιών ή με τη χρήση της αναμετάδοσης outband. Παρόμοια ο αναμεταδοτής δε θα μπορεί να λάβει τις μεταδόσεις από τερματικά όταν μεταδίδει ταυτόχρονα προς τον κυψελοδοτή. Στη Rel-10 χρησιμοποιώντας υποπλάισια MBSFN Multicast-Broadcast Single Frequency Network) για τη χρήση της παρεμβολής, δημιουργείται ένα "κενό" μεταξύ των μεταδόσεων από τον αναμεταδοτή προς το κινητό τερματικό. Σ' ένα υποπλάισιο MBSFN, το πρώτο σύμβολο από τα δύο OFDM σύμβολα του υποπλαισίου μεταδίδονται ως συνήθως μεταφέροντας κυψελοειδή σήματα αναφορών και τη σηματοδότηση ελέγχου του κατερχόμενου συνδέσμου, καθώς το υπόλοιπο ενός υποπλαισίου MBSFN δε χρησιμοποιείται. Συνεπώς το υπόλοιπο του υποπλαισίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία μεταξύ κυψελοδοτή και αναμεταδοτή. Τα αντίστοιχα "κενά" του ανερχόμενου συνδέσμου δημιουργούνται με το να μηχρονοπρογραμματιστεί μετάδοση σε μερικά υποπλάισια από το τερματικό προς τον αναμεταδοτή [14], [24].

2.6 Χαρακτηριστικά τρέχουσας έκδοσης – Έκδοση 11

Η τρέχουσα έκδοση που έχει γίνει διαθέσιμη στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων ήδη από το πρώτο τρίμηνο του 2012 είναι η Rel – 11, ενώ η Rel – 12 που θα αποτελεί και την εξέλιξη της αναμένεται να γίνει διαθέσιμη το 2014. Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά που ενσωματώθηκαν στην Rel – 10, ώστε να προκύψει η Rel – 11 [25].

2.6.1 Συντονισμένη λήψη και μετάδοση πολλαπλών σημείων (Coordinated Multipoint - CoMP Reception and Transmission)

Η συντονισμένη λήψη και μετάδοση πολλαπλών σημείων είναι μία ευρεία έννοια που αναφέρεται σε οποιοδήποτε τύπο συντονισμού μεταξύ ραδιοεπικοινωνιών που

πραγματοποιούνται σε γειτονικές κυψέλες. Σκοπός της είναι η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στα όρια της κυψέλης καθώς και η συνολική ρυθμοαπόδοση της κυψέλης.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες, οι οποίες θα περιγραφούν από τη σκοπιά της κατερχόμενης ζεύξης. Στο συντονισμένο χρονοπρογραμματισμό και στη συντονισμένη δημιουργία ακτίνας/δέσμης (Coordinated Scheduling, CS / Coordinated Beamforming, CB), το κινητό τερματικό λαμβάνει δεδομένα από μια κυψέλη κάθε φορά, την κυψέλη που το εξυπηρετεί. Ωστόσο, η κυψέλη που εξυπηρετεί το κινητό τερματικό μπορεί να συντονίζεται χρονοπρογραμματισμό της και τις διαδικασίες δημιουργίας ακτίνας / δέσμης με εκκίνηση των γειτονικών κυψελών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η διακυβελική παρεμβολή.

Στη μεικτή διεργασία (Joint Processing, JP), ένα κινητό τερματικό λαμβάνει δεδομένα από πολλαπλές κυψέλες. Αυτές οι κυψέλες μπορούν να είναι υπό τον έλεγχο ενός σταθμού βάσης, πράγμα που είναι σχετικά εύκολο στην υλοποίηση. Εναλλακτικά, οι κυψέλες μπορούν να είναι υπό τον έλεγχο πολλαπλών σταθμών βάσης, πράγμα το οποίο προσφέρει καλύτερη απόδοση αλλά δυσκολεύει περισσότερο την οπισθόζευξη και το συγχρονισμό.

Οι κυψέλες που χρησιμοποιούνται για τη μεικτή διεργασία μπορούν να μεταδίδουν τα ίδια ρεύματα πληροφορίας (data streams), στην περίπτωση που οι κυψέλες λειτουργούν ως πομπό διαφορισμού. (Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται στην ήπια μεταπομπή του UMTS). Εναλλακτικά, οι κυψέλες μπορούν να μεταδώσουν διαφορετικά ρεύματα πληροφορίας στην περίπτωση της χωρικής πολυπλεξίας. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως συνεργατική MIMO και έχει ορισμένες ομοιότητες με την τεχνική MIMO πολλαπλών χρηστών, με τη διαφορά ότι αντί να διαχωρίζονται οι θύρες των κεραιών σε δύο διαφορετικές συσκευές, διαχωρίζονται οι κεραιές του δικτύου σε δύο διαφορετικές κυψέλες [25].

2.6.2 Βελτιωμένος συντονισμός διακυβελικής παρεμβολής

Για την μετρίαση της διακυβελικής παρεμβολής στα small cells (σημεία ασύρματης πρόσβασης, χαμηλής ισχύος και αυξημένης χωρητικότητας), το LTE – Advanced εισάγει ένα χαρακτηριστικό του χρονοδιακριτικού συντονισμού διακυβελικής παρεμβολής που ονομάζεται σχεδόν κενά υποπλάισια (Almost Blank Subframes, ABS). Το ABS δημιουργεί προστατευμένους πόρους, πιο συγκεκριμένα, υποπλάισια κατά τη διάρκεια των οποίων το στρώμα του small cell υπόκειται σε σημαντικά μειωμένη διακυβελική παρεμβολή. Το στρώμα του small cell μπορεί να επωφελείται με το να χρονοπρογραμματίζει τους απομακρυσμένους χρήστες στα σχεδόν κενά υποπλάισια, ενώ οι χρήστες που βρίσκονται στο εσωτερικό της κυψέλης χρονοπρογραμματίζονται στα κανονικά υποπλάισια. Από την άλλη πλευρά, το στρώμα της μακροκυψέλης χρονοπρογραμματίζει κατά τη διάρκεια των προστατευμένων υποπλαισίων μόνο τους χρήστες που βρίσκονται στο εσωτερικό της κυψέλης ή καθόλου χρήστες, ενώ τους απομακρυσμένους χρήστες τους χρονοπρογραμματίζει με άλλο τρόπο. Ο βελτιωμένος συντονισμός της διακυβελικής παρεμβολής απαιτεί τον αυστηρό συγχρονισμό και συντονισμό μεταξύ των σταθμών βάσης εξαιτίας του πεδίου χρόνου. Καθώς η επέκταση του εύρους της κυψέλης (Cell Range Expansion, CRE), το οποίο επιτρέπει στο κινητό τερματικό να εξυπηρετηθεί από μια κυψέλη με ασθενέστερη ισχύ λήψης, είναι συγκεκριμένη, το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει ακόμα πιο ισχυρές πολώσεις για τα προηγμένα κινητά τερματικά που έχουν

δέκτες ακύρωσης παρεμβολών. Αυτοί οι δέκτες μπορούν να ανεχθούν διακυβελική παρεμβολή υψηλότερης έντασης, ως αποτέλεσμα μεγαλύτερων πολώσεων CRE καθώς αυτοί είναι ακόμη σε θέση να εντοπίζουν και να επικοινωνούν με small cells κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Επειδή το ABS και το CRE είναι προσαρμοστικά και δυναμικά, μπορούν να θεωρηθούν ως μια πύχη των αυτο-βελτιούμενων δικτύων (Self Organizing Networks, SONs). Ειδικότερα, ο σταθμός βάσης παρέχει λειτουργίες διαχείρισης των ραδιοπόρων οι οποίες επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση των πολώσεων CRE καθώς και τη βελτιστοποίηση της αναλογίας των προστατευόμενων πόρων ABS. Συνεπώς, οι πόροι μπορούν να προσαρμοστούν ιδανικά ως προς τον τρέχοντα φόρτο του δικτύου, καταλήγωντας σε μεγαλύτερη ενεργειακή και φασματική αποδοτική λειτουργία καθώς και σε μείωση του κόστους για τους φορείς εκμετάλλευσης. Ο βελτιωμένος συντονισμός διακυβελικής παρεμβολής μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως ένα συμπλήρωμα της συντονισμένης λήψης και μετάδοσης πολλαπλών σημείων καθώς και οι δύο αυτές λειτουργίες έχουν ως απώτερο στόχο τη βελτίωση της ρυθμοαπόδοσης στα όρια της κυψέλης [25].

Η συντονισμένη λήψη και μετάδοση πολλαπλών σημείων προσπαθείνα εκμεταλλευτείτο γεγονός,ότι οι απομακρυσμένοι χρήστες λαμβάνουν πολλαπλά ισχυρά σήματα από πολλαπλούς σταθμούς βάσης, ενώ ο βελτιωμένος συντονισμός διακυβελικής παρεμβολής προσπαθεί να αποφύγει τις ισχυρότερες παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες. Αυτό το γεγονός παρέχει στο φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου έλεγχο και επιλογή για τη βελτιστοποίηση των ετερογενών δικτύων, στα οποία τα smallcells αυξάνουν τον αριθμό των απομακρυσμένων χρηστών εξαιτίας της εισαγωγής πρόσθετων κυψελών.

2.6.3 Βελτιωμένη συνάθροιση φορέων

Υπάρχουν τρία κύρια ζητήματα όσον αφορά τη συνάθροιση φορέων Η συνάθροιση φορέων καθώς το πρότυπο LTE εξελίσσεται και βελτιώνεται. Οι προδιαγραφές βελτιώθηκαν με τη χρήση περισσότερων συνιστωσών φέρουσας και πλοκάδων πόρων με αποτέλεσμα την αύξηση ρυθμός δεδομένων κορυφής του εκάστοτε κινητού τερματικού. Επίσης, υπήρξε βελτίωση στην υποστήριξη συνάθροισης φορέων σε περισσότερες ζώνες συχνοτήτων FDD και TDD.

Τέλος το κινητό τερματικό μπορεί να χρησιμοποιεί πολλαπλές τιμές προώθησης χρονισμού στην ανερχόμενη ζεύξη, μία για κάθε συνιστώσα φέρουσας. Αυτό είναι χρήσιμο, στην περίπτωση που η συνάθροιση φορέων χρησιμοποιείται σε σύνδεση με την αναμετάδοση, καθώς επιτρέπει στο κινητό τερματικό την αποστολή μιας συνιστώσας φέρουσας σε ένα δότη σταθμό βάσης και μιας άλλης με διαφορετικό προωθητικό χρονισμό σε ένα κόμβο διαβίβασης [25].

2.7 Προδιαγραφές της επόμενης έκδοσης – Έκδοση 12

Με την έκδοση Rel – 12 θα ξεκινήσει η δημιουργία μιας νέας τεχνολογίας, αυτής της LTE – B, η οποία θα αποτελεί την εξέλιξη του LTE – Advanced. Έτσι θα ξεκινήσει μια άλλη εποχή για τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών, η εποχή των κινητών δικτύων της 5^{ης} γενιάς. Τα χαρακτηριστικά της Rel – 12 αναφέρονται παρακάτω.

2.7.1 Βελτιώσεις τεχνικής MIMO για την κατερχόμενη ζεύξη

Συνεχίζοντας τις βελτιώσεις των τεχνολογιών των κεραιών, οι βελτιώσεις των σταθμών βάσης της μακροκυψέλης επιτυγχάνονται με την αξιοποίηση μιας αυξημένης επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και με τη μειωμένη παρεμβολή στο χωρικό πεδίο.

Εξαιτίας της επαναχρησιμοποίησης του υπάρχοντος τόπου κυψέλης και του δικτύου μεταφοράς παρέχονται στους φορείς εκμετάλλευσης ελκυστικές βελτιώσεις της χωρητικότητας με εύλογα κόστη.

Πιθανές αλλαγές στις προδιαγραφές θα επηρεάσουν κύριως την ανάδραση των σημάτων αναφορών CSI. Επίσης, με την εισαγωγή νέων Precoding Matrix Indicator θα επιτευχθεί λεπτότερη κοκκίότητα με αποτέλεσμα την υποστήριξη περισσότερων λειτουργιών για τις κεραίες. Τέλος, θα υποστηρίζονται νέα σήματα αναφοράς CSI [26].

2.7.2 Επικοινωνία μηχανής – προς μηχανή χαμηλού κόστους

Αναμένεται μια μαζική αύξηση της επικοινωνίας μηχανής προς μηχανή (M2M). Οι συσκευές και η κίνηση προβλέπεται να υποστηρίξουν έξυπνα δίκτυα, μεταφορές, logistics, ηλεκτρονική υγεία, ενέργεια, ασφαλείς εφαρμογές κλπ. Συνεπώς, η ραδιοδιεπαφή του LTE θα πρέπει να είναι προετοιμασμένη για την αποτελεσματική υποστήριξη των μικρών μη συχνών πακέτων χρησιμοποιώντας συσκευές πολύ χαμηλού κόστους, χαμηλής πολυπλοκότητας και χαμηλής ισχύος.

Επίσης, για τη βελτίωση της ενδοκιριακής διείσδυσης προβλέπονται βελτιώσεις όσον αφορά τον προϋπολογισμό της ζεύξης στην περίπτωση που τα κινητά τερματικά επικοινωνίας τύπου μηχανής (Machine Type Communication) είναι εγκατεστημένα σε υπόγεια κτιρίων ή σε θέσεις που προστατεύονται από μεταλλική επένδυση ή μόνωση, μεταλλικά παράθυρα ή παραδοσιακά

χοντρά τοιχώματα. Επομένως αυτά τα κινητά τερματικά θα υποστούν μεγαλύτερες απώλειες διείσδυσης στη ραδιοδιεπαφή σε σύγκριση με τις κανονικές συσκευές LTE[26].

2.7.3 Φορέας νέου τύπου

Το LTE – Advanced ανέκαθεν περιοριζόταν σε οπισθόδοτες συμβατές φέρουσες. Αφενός μεν, αυτό βοηθάει την ομαλή μετάβαση στις νέες εκδόσεις που προκύπτουν, αφετέρου υπάρχουν περιορισμοί στην εισαγωγή νέων τεχνολογιών. Μία από τις επιπτώσεις της συμβατότητας οπισθοδότησης είναι η ανάγκη της συνεχούς μετάδοσης των κοινών συμβόλων αναφοράς (Common Reference Symbols, CRS) σε κάθε υποπλάισιο σε ολόκληρο εύρος ζώνης. Αυτό απαγορεύει την προσωρινή απενεργοποίηση μιας κυψέλης και αποτελεί περιττό επίφορτο στην περίπτωση της μη-κωδικοβιβλίου-παγούς διαμόρφωσης ακτίνας / δέσμης που κάνει χρήση συγκεκριμένων συμβόλων αναφοράς.

Ένας νέος τύπος φορέα επιτρέπει την απενεργοποίηση των κυψελών, τουλάχιστο προσωρινά και θα ελαχιστοποιήσει τον επίφορτο και την παρεμβολή από τα κοινά σύμβολα αναφοράς, με τη μεγιστοποίηση της χρήσης των αποκλειστικών συμβόλων αναφοράς προς διαμόρφωση που απαιτούνται για τις προηγμένες τεχνολογίες των κεραιών.

Επιπλέον, νέες μορφές εύρους ζώνης μπορούν να τεθούν σε εφαρμογή για την υποστήριξη όλων των ειδών εύρους ζώνης.

Ο φορέας νέου τύπου θα μπορούσε να λειτουργήσει ως εναλλάκτης φορέα, μαζί με ένα άλλο φορέα LTE/LTE-A φορέα ή εναλλακτικά, ως αυτόνομος συμβατός μή - οπισθόδοτος φορέας[26].

2.7.4 Βελτιώσεις των small cells

Η περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας του δικτύου θεωρείται ως ένα από τα βασικά στοιχεία για την αύξηση της αποδοτικότητας του φάσματος. Φέρνοντας τα κινητά τερματικά πλησιέστερα στους κόμβους του δικτύου βελτιώνεται ο λόγος σήματος προς παρεμβολή, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση με τη χρήση της προσαρμοστικής κωδίκευσης / διαμόρφωσης και της τεχνικής MIMO. Η απόδοση του συστήματος μπορεί να αυξηθεί με την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας πόρων, γνωστή ως κυψελοδιασμός (cell - splitting). Η επίδραση των ετερογενών δικτύων στη λειτουργία των small cells ποικίλλει. Π.χ. μεγαλύτερη δυναμική του λόγου σήματος προς παρεμβολή, αυξημένος ρυθμός μεταπομπής, κ.α.

Δύο είναι τα ενδεχόμενα σενάρια. Το πρώτο είναι το σενάριο που αφορά την τοπική πρόσβαση με διαχωρισμένη συχνότητα, όπου γίνεται χρήση διαφορετικών στρωμάτων συχνότητας για τα small cells. Στο δεύτερο σενάριο μπορεί να είναι εφικτή και η τοπική πρόσβαση ενσωματωμένης συχνότητας (frequency - integrated), όπου οι μακροκυψέλες και οι μικροκυψέλες χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα και όπου τα small cells ενσωματώνονται πλήρως στο δίκτυο. Ανάλογα με το σενάριο, απαιτούνται διαφορετικές μέθοδοι για την εκχώρηση ταυτότητας σε κάθε κυψέλη και για την υποστήριξη των κινητών τερματικών στην εύρεση και χρήση των αντίστοιχων small cells. Για τα small cells, ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση υψηλών συχνοτήτων θα οριστούν νέες κανονιστικές απαιτήσεις καθώς θα διεξαχθούν και νέες μελέτες. Η χρήση διαφορετικών σχημάτων TDD που βασίζονται στην αμφιδρόμηση μπορεί να αποδειχθεί αποδοτική. Μια πιο δυναμική κατανομή υποφερώντων τόσο στην ανερχόμενη ζεύξη όσο και στην κατερχόμενη, σε απομονωμένες συστάδες κυψελών, θα μπορούσε να ταιριάζει με τη στιγμιαία τοπική κατάσταση της κυκλοφορίας. Για την αποφυγή σοβαρών παρεμβολών μπορεί να απαιτούνται η προηγμένη ανίχνευση και δέσμευση πόρων.

Σίγουρα η πλήρης ενσωματωμένη τοπική πρόσβαση του δεύτερου σεναρίου μοιάζει με μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο για τις βελτιώσεις της απόδοσης. Τα small cells επεκτείνουν τις μακροκυψέλες με την ίδια ταυτοποίηση φυσικού επιπέδου ή με δυναμικά εκχωρημένες εικονικές ταυτότητες κυψελών που επαναχρησιμοποιούνται στο χωρικό πεδίο.

Τα small cells παρέχουν ένα γρήγορο αγωγό δεδομένων με ένα προϋπολογισμό ζεύξης που είναι βελτιωμένος σε μεγάλο βαθμό, λόγω της γειννίας του κόμβου του δικτύου. Αντίθετα, η μακροκυψέλη παρέχει παγκυψελικά τις πληροφορίες του συστήματος, επίσης παρέχει τον έλεγχο των ραδιοπόρων που περιλαμβάνουν την καθοδήγηση της κίνησης, την επιλογή της φέρουσας και την υποστήριξη του εντοπισμού των πλησιέστερων small cells από τα κινητά

τερματικά. Άλλα οφέλη περιλαμβάνουν την ενίσχυση της κινητικότητας σε τέτοια σενάρια ετερογενών δικτύων και την διαφάνεια των smallcells προς το κινητό τερματικό. Έτσι το κινητό τερματικό δε χρειάζεται να γνωρίζει καν την τοπική πρόσβαση.

Αυτή η αρχιτεκτονική απαιτεί την ενσωμάτωση των smallcells στο δίκτυο μέσω διεπαφών ultra-fast ή καλύτερα μέσω μιας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας ζώνης βάσης. Αυτό θα μπορούσε να εμποδίσει την επιλογή των πολλαπλών προμηθευτών για μακροκυψέλες και smallcells στην ίδια γεωγραφική περιοχή [26].

2.7.5 Επικοινωνία συσκευής προς συσκευή

Η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των κινητών τερματικών που βρίσκονται σε γειννίαση. Εκτός του ότι, θα πρέπει να καλυφθούν θέματα όπως της κατανάλωσης ενέργειας, της ελάττωσης της παρεμβολής και της επέκτασης της κάλυψης, το τεχνολογικό πρότυπο LTE θα πρέπει να καλύψει και το θέμα της δημόσιας ασφάλειας. Έως σήμερα γίνεται χρήση διαφορετικών τεχνολογιών για τα δημόσια κυψελωτά δίκτυα και για τα αποκλειστικά δημόσια δίκτυα ασφαλείας. Το LTE προωθείται ήδη σε παγκόσμιο επίπεδο ως το μελλοντικό σύστημα δημόσιας ασφάλειας. Απαξιακί προτυποποιηθεί, θα αναπτυχθούν νέες εφαρμογές και υπηρεσίες που βασίζονται στην εγγύτητα. Δίνεται περισσότερη έμφαση στην επικοινωνία συσκευής με συσκευή, η οποία είναι ελεγχόμενη από το δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος σηματοδότησης καθώς και η δέσμευση των πόρων διεκπεραιώνεται από το δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο μπορεί η ποιότητα των υπηρεσιών να είναι εγγυημένη και ο φορέας εκμετάλλευσης παραμένει στον έλεγχο μετάδοσης. Παρά το γεγονός ότι η προτυποποίηση δεν έχει ξεκινήσει ακόμα, μπορεί να υποθεθεί ότι θα προτιμηθούν τα συστήματα που είναι διαφανή ως προς τον εξοπλισμό του χρήστη.

Παρά όλα αυτά, μπορεί να υπάρχουν αντίθετες απαιτήσεις από το δημόσιο τομέα της ασφάλειας, όπως η περίπτωση μιας καταστροφής, όπου το δίκτυο θα μπορεί να έχει πέσει, ωστόσο η επικοινωνία μεταξύ των δυνάμεων ασφαλείας θα πρέπει να εξακολουθεί να είναι δυνατή. Αυτό μπορεί να απαιτεί μια νέα προδιαγραφή να υποστηρίξει ένα αυτόματο έλεγχο από τα κινητά τερματικά μια υβριδική προσέγγιση με ένα κατανεμημένο έλεγχο ανάμεσα στο δίκτυο και τα κινητά τερματικά [26].

2.7.6 Διασυνεργασία 3GPP / Wifi

Οι σταθμοί βάσης που υποστηρίζουν ασύρματη πρόσβαση στο ίντερνετ (Wifi) χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετό διάστημα. Όμως η διασυνεργασία περιορίζεται στις λειτουργίες (αναγνώριση χρήστη / εξουσιοδότηση χρήσης υπηρεσιών, κοστολόγηση) του δικτύου πυρήνα. Παρόλο που η προδιαγραφή υποστηρίζει την κινητικότητα, η περαιτέρω βελτιστοποίηση θεωρείται ευεργετική για την εξισορρόπηση του φόρτου, για την παροχή υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας καθώς και για τη βελτιστοποιημένη κατανάλωση της ενέργειας της μπαταρίας, όταν γίνεται η χρήση της τεχνολογίας Wifi σε συνδυασμό με τα κυψελωτά δίκτυα. Σήμερα, ο εντοπισμός και οι λειτουργίες του Wifi είναι ζητήματα που διαχειρίζονται τα κινητά τερματικά (UE based) ενώ στο μέλλον αυτά τα ζητήματα θα τα διαχειρίζεται ο φορέας εκμετάλλευσης. Αυτό θα επιτρέψει την υλοποίηση εξυπνότερων δικτύων, τα οποία θα εξετάζουν το φόρτο της κυψέλης, το φόρτο μεταφοράς στο δίκτυο, την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχονται στο χρήστη ή την ποιότητα της καλύτερης ραδιοζεύξης κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας [26].

2.7.7 Βελτιώσεις κινητικότητας στα ετερογενή δίκτυα

Από μελέτες διαπιστώθηκε πως η απόδοση της μεταπομπής των ετερογενών δικτύων δεν είναι τόσο ικανοποιητική όσο των αμιγών υλοποιήσεων δικτύων μακροκυψέλης. Επιπλέον αποδείχθηκε ότι η ταχύτητα του κινητού τερματικού επιδρά σημαντικά στην απόδοση της μεταπομπής και ότι απαιτούνται προσεγγισμένες ρυθμίσεις ασυνεχούς λήψης ώστε να μην επηρεαστεί αρνητικά η μεταπομπή. Ο στόχος είναι η ενίσχυση της μεταπομπής σε περιβάλλοντα ετερογενών δικτύων, (π.χ. βαθμός αποτυχίας, ελαχιστοποίηση φαινομένων ping – pong, ανάκαμψη έπειτα από αποτυχία της ραδιοζεύξης) με την παράλληλη υποστήριξη της κινητικότητας των κινητών τερματικών και την υποστήριξη μακρύτερων κύκλων ασυνεχούς

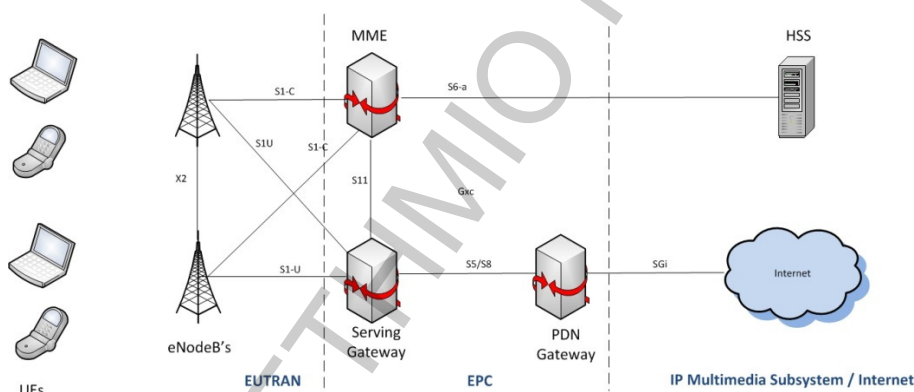
λήψης. Επίσης, θα αναπτυχθούν βελτιώσεις, όσον αφορά την κινητικότητα σε περιβάλλοντα smallcell με έμφαση στην ενδο-συχνότητα (Inter-frequency)[26].

2.8 Αρχιτεκτονική συστήματος

Οι προδιαγραφές του LTE σχετίστηκαν από την πλευρά της πρόσβασης με τις εξελίξεις της επίγειας ραδιοπρόσβασης (Evolved-UTRA, E-UTRA) του UMTS, και του επίγειου δικτύου ραδιοπρόσβασης του UMTS (Evolved-UTRAN, E-UTRAN) και από την πλευρά του δικτύου με την εξέλιξη του δικτύου κορμού πακέτων (Evolved Packet Core, EPC). Το E-UTRAN είναι γνωστό ως LTE ενώ το EPC καλείται και προηγμένη αρχιτεκτονική συστήματος (System Architecture Evolution, SAE). Το SAE αναπτύχθηκε για να καλύψει τις απαιτήσεις του LTE, ώστε να παρέχει βελτιωμένη χωρητικότητα δεδομένων, μειωμένη λανθάνουσα κατάσταση και χαμηλό κόστος (δαπάνες κεφαλαίου και λειτουργικών δαπανών), και την υποστήριξη ρύθμισης στη μεταγωγή πακέτων.

Η αρχιτεκτονική του LTE αποτελείται από δύο μέρη: το δίκτυο κορμού (EUTRANodeB, EUTRAN) και το δίκτυο πρόσβασης (Evolved Packet Core, EPC). Αυτά τα δύο μέρη απαρτίζουν ένα Evolved Packet System (EPS). Το EPS δρομολογεί το πακέτο IP από το Packet Data Network Gateway (P-GW) έως στο κινητό τερματικό User Equipment (UE) με ένα δεδομένο Quality of Service (QoS), που ονομάζεται EPS bearer.

Όσον αφορά το δίκτυο κορμού αυτό αποτελείται από πολλές λογικές οντότητες, ενώ αντίθετα το δίκτυο πρόσβασης απαρτίζεται από μία και μόνο μονάδα, τον evolved NodeB (eNodeB), ο οποίος συνδέεται με τα κινητά τερματικά[27].



Σχήμα 16 Αρχιτεκτονική δικτύου SAE EPC, επανασχεδιασμένο από[18]

2.8.1 Δίκτυο κορμού (Core Network)

Το EPC υποστηρίζει την πρόσβαση μόνο στο πεδίο μεταγωγής πακέτων και όχι στο πεδίο μεταγωγής κυκλώματος. Αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς τύπους κόμβων, ορισμένοι από τους οποίους περιγράφονται παρακάτω.

Ο φορέας διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Entity, MME) αποτελεί το επίπεδο-ελέγχου του EPC. Οι αρμοδιότητές του, περιλαμβάνουν τη σύνδεση/απώλεια των φορέων (bearers) σε ένα τερματικό, το χειρισμό των μεταβάσεων (transitions) από IDLE σε ACTIVE και το χειρισμό των κλειδιών ασφαλείας. Η λειτουργία μεταξύ του EPC και του τερματικού συχνά αναφέρεται ως στρώμα μη πρόσβασης (Non-Access Stratum, NAS), για το διαχωρισμό από το στρώμα πρόσβασης όπου διαχειρίζεται τη λειτουργία μεταξύ του τερματικού και του δικτύου πρόσβασης.

Η Serving Gateway (S-GW) είναι ο κόμβος στο επίπεδο-χρήστη που συνδέει το EPC και το LTE-RAN. Λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος της κινητικότητας όταν τα τερματικά κινούνται μεταξύ των eNodeBs, καθώς και ως κρίκος κινητικότητας μεταξύ άλλων τεχνολογιών 3GPP (GSM/GPRS και HSPA). Η συλλογή πληροφοριών και τα στατιστικά στοιχεία που απαιτούνται για τη χρέωση χειρίζονται επίσης από τη S-GW.

Η PacketDataNetworkGateway (PDNGateway, P-GW) συνδέει το EPC με το διαδίκτυο. Επίσης, χειρίζεται την κατανομή της διεύθυνσης IP για ένα συγκεκριμένο τερματικό, καθώς και την ποιότητα των υπηρεσιών σύμφωνα με την πολιτική που ελέγχεται από τη PCRF. Ακόμα λειτουργεί και ως συνδετικός κρίκος της κινητικότητας μεταξύ λοιπών τεχνολογιών όπως της CDMA2000, που συνδέεται με το EPC.

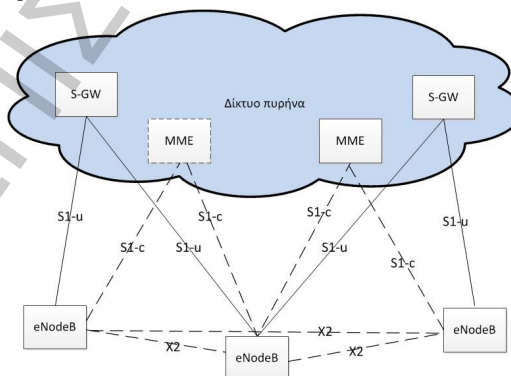
Επιπλέον το EPC περιέχει επίσης άλλους τύπους κόμβων, όπως την εν γένει πολιτική και τους κανόνες που διέπουν την παροχή κάθε υπηρεσίας (Policy and Charging Rules Function, PCRF) και τον κόμβο της κεντρικής συνδρομητικής υπηρεσίας (Home Subscriber Service, HSS), όπου στην ουσία είναι μια βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για τον εκάστοτε συνδρομητή. Υπάρχουν επίσης ορισμένοι επιπλέον κόμβοι που υποστηρίζουν την τεχνολογία Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS)[18].

2.8.2 Δίκτυο Ραδιο-πρόσβασης (Radio-Access Network)

Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης χρησιμοποιεί μια επίπεδη αρχιτεκτονική και αποτελείται ουσιαστικά από έναν μόνο κόμβο, τον eNodeB. Ο eNodeB είναι υπεύθυνος για όλες τις ραδιολειτουργίες που σχετίζονται με μία ή περισσότερες κυψέλες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ο eNodeB είναι ένας λογικός κόμβος και όχι μια φυσική υλοποίηση. Μια κοινή εφαρμογή του eNodeB, είναι μια τοποθεσία τριών τομεών, όπου ένας σταθμός βάσης χειρίζεται τις μεταδόσεις τριών κυψελών, αν και υπάρχουν και άλλες εφαρμογές, όπως πολλά radioheads να είναι συνδεδεμένα σε μια μονάδα επεξεργασίας φάσματος ζώνης βάσης. Ένα παράδειγμα του τελευταίου, είναι ένας μεγάλος αριθμός κυψελών εσωτερικού χώρου, ή αρκετές κυψέλες κατά μήκος ενός αυτοκινητοδρόμου, ανήκουν στον ίδιο eNodeB. Έτσι, ένας σταθμός βάσης είναι μια πιθανή εφαρμογή του, αλλά δεν είναι το ίδιο όπως, ένας eNodeB.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 17, ο eNodeB είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο EPC μέσω της διεπαφής S1 η οποία χωρίζεται σε δύο μέρη: την S1-U η οποία μεταφέρει κίνηση δεδομένων μεταξύ eNodeB και τη Serving-GW, και την S1-C η οποία είναι διεπαφή μόνο σηματοδότησης μεταξύ του eNodeB και του MME. Ένας eNodeB μπορεί να συνδεθεί με πολλαπλές MMEs/S-GWs για την κατανομή και τον πλεονασμό του φορτίου.

Η διεπαφή X2, που συνδέει μεταξύ τους, τους eNodeB χρησιμοποιείται κυρίως για την υποστήριξη της κινητικότητας ενεργού τρόπου (active-mode). Αυτή η διεπαφή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για λειτουργίες τεχνικών διαχείρισης πολυκυψελικών ραδιοπάρων, όπως του συντονισμού διακυψελικής παρεμβολής. Η διεπαφή X2 χρησιμοποιείται επίσης για την υποστήριξη της κινητικότητας χωρίς απώλειες μεταξύ των γειτονικών κυψελών μέσω της προώθησης των πακέτων[18].

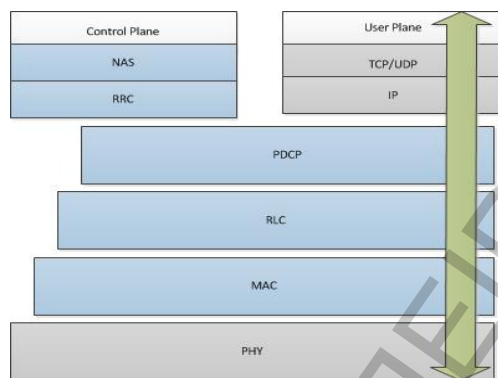


Σχήμα 17 Διεπαφές ραδιοπρόσβασης στο δίκτυο, επανασχεδιασμένο από [18]

2.8.3 Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοδιεπαφής

Τα στρώματα που εκτελούν τις λειτουργίες στη ραδιοδιεπαφή είναι: το Packet Data Convergence Protocol (PDCP), το Radio Link Protocol (RLC), το Medium Access Control (MAC) και το PHY. Για τον έλεγχο της σηματοδότησης χρησιμοποιείται το στρώμα Radio Resource Control (RRC), το οποίο μεταφέρει την πληροφορία NAS στη ραδιοδιεπαφή. Το υποστρώμα PDCP απεικονίζει τον κόμβο EPS στον ασύρματο κόμβο E-UTRAN και εκτελεί

συμπίεση κεφαλίδας (Robust Header Compression - ROHC). Το υποστρώμα RLC απεικονίζει τον κόμβο E-UTRA σε ένα λογικό κανάλι και εκτελεί κατάτμηση (segmentation), μεταφορά αλληλουχίας και επαναμετάδοση. Το υποστρώμα MAC με τη σειρά του απεικονίζει το λογικό κανάλι σε ένα κανάλι μεταφοράς και είναι υπεύθυνο για την HARQ και τον χρονοπρογραμματισμό. Τέλος, το φυσικό στρώμα απεικονίζει το κανάλι μεταφοράς σε ένα φυσικό κανάλι και εκτελεί κωδίκευση καναλιού, διαμόρφωση κτλ. Η στοίβα πρωτοκόλλων της ραδιοδιεπαφής απεικονίζεται στο **Error! Unknown switch argument.** σε επίπεδο ελέγχου και σε επίπεδο χρήστη [29].



Σχήμα 18 Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοδιεπαφής LTE, επανασχεδιασμένο από [28]

Το πρωτόκολλο της ραδιοδιεπαφής LTE συντίθεται από τα παρακάτω στρώματα:

- **Radio Resource Control (RRC):** Το στρώμα RRC εκτελεί τις λειτουργίες control plane συμπεριλαμβανομένων του paging, της συντήρησης και έκδοσης της διαχείρισης RRC connection-security handling-mobility καθώς και της διαχείρισης της ποιότητας των υπηρεσιών [29].
- **Packet Data Convergence Protocol (PDCP):** Οι κύριες λειτουργίες του υποστρώματος PDCP περιέχουν: τη συμπίεση και αποσυμπίεση των κεφαλίδων των πακέτων IP με βάση το πρωτόκολλο συμπίεσης Robust Header Compression (ROHC), την κρυπτογράφηση και την μετάδοση των δεδομένων καθώς και την προστασία της ακεραιότητάς τους. Στον eNodeB και στο UE υπάρχει μόνο μια οντότητα PDCP για κάθε ραδιοφορέα [29].
- **Radio Link Control (RLC):** Οι κύριες λειτουργίες του υποστρώματος RLC είναι: η κατάτμηση και συνένωση των δεδομένων, η διόρθωση σφαλμάτων μέσω του πρωτοκόλλου Automatic Repeat Request (ARQ) και η αλληλουχία παράδοσης των πακέτων στα υψηλότερα στρώματα. Υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας [29].
 - **The Transparent Mode (TM):** Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι η απλούστερη καθώς δεν υποστηρίζει προσθήκη κεφαλίδας RLC, κατάτμηση ή συνένωση των δεδομένων και χρησιμοποιείται για συγκεκριμένο σκοπό όπως: Τυχαία πρόσβαση (Random Access) [29].
 - **The Unacknowledged Mode (UM):** Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό των απωλεσμένων πακέτων, την αναδιάταξη και την επανασυναρμολόγησή τους αλλά δεν απαιτεί την αναμετάδοση των χαμένων δεδομένων του πρωτοκόλλου (PDUs) [29].
 - **The Acknowledged Mode (AM):** Αυτή η λειτουργία είναι η πιο σύνθετη και έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να ζητάει την αναμετάδοση των χαμένων PDUs εκτός των χαρακτηριστικών που υποστηρίζονται από τη λειτουργία UM [29].

Στον eNodeB και στο UE υπάρχει μόνο μια οντότητα PDCP για κάθε ραδιοφορέα.

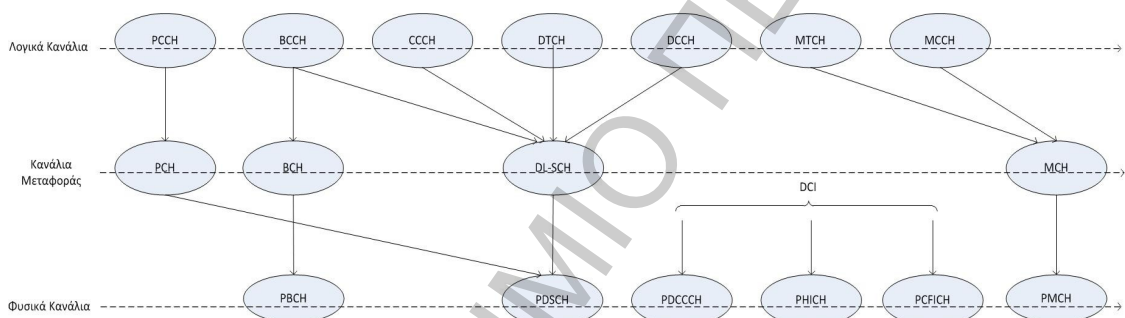
- **Medium Access Control:** Οι κύριες λειτουργίες του υποστρώματος MAC περιέχουν: διόρθωση λαθών μέσω του μηχανισμού Hybrid-ARQ (HARQ), απεικόνιση μεταξύ των λογικών καναλιών και των καναλιών μεταφοράς, πολύπλεξη/αποπολύπλεξη των RLC PDUs στις πλοκάδες μεταφοράς (transport blocks), το χειρισμό

προτεραιότητας μεταξύ των λογικών διαύλων ενός κινητού τερματικού και τον χειρισμό προτεραιότητας μεταξύ των κινητών τερματικών μέσω του δυναμικού χρονοπρογραμματισμού. Επίσης, το υποστρώμα MAC είναι υπεύθυνο για την επιλογή της μορφής μεταφοράς των χρονοπρογραμματισμένων κινητών τερματικών, η οποία περιλαμβάνει την επιλογή του τύπου διαμόρφωσης, του ρυθμού κωδίκευσης, της τάξης MIMO και του επιπέδου ισχύος. Υπάρχει μόνο μια οντότητα MAC τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στο κινητό τερματικό [29].

- **PHY:** Η κύρια λειτουργία του στρώματος PHY είναι η πραγματική μετάδοση και διαβίβαση των δεδομένων υπο τη μορφή πλοκάδων μεταφοράς. Είναι επίσης υπεύθυνο για διάφορους μηχανισμούς ελέγχου, όπως της σηματοδότησης H-ARQ, της σηματοδότησης των χρονοπρογραμματισμένων κατανομών, καθώς και των μετρικών του καναλιού [29].

2.9 Επισκόπηση φυσικού επιπέδου

Το φυσικό επίπεδο είναι αρμόδιο για την κωδίκευση, τη διεργασία της τεχνικής H-ARQ, τη διαμόρφωση, τη διεργασία πολλαπλών κεραιών και τη απεικόνιση του σήματος στους κατάλληλους φυσικούς πόρους τόσο του χρόνου όσο και της συχνότητας. Επίσης, χειρίζεται τη απεικόνιση των καναλιών μεταφοράς στα φυσικά κανάλια, όπως αυτό απεικονίζεται στο [30].



Σχήμα 19 Απεικόνιση καναλιών κατερχόμενου συνδέσμου, επανασχεδιασμένο από [30]

Το φυσικό επίπεδο παρέχει υπηρεσίες στο επίπεδο προσπέλασης με τη μορφή των καναλιών μεταφοράς. Η μετάδοση των δεδομένων τόσο στην άνω ζεύξη όσο και στην κάτω ζεύξη χρησιμοποιεί τους τύπους καναλιών UL-SCH και DL-SCH αντίστοιχα. Στην περίπτωση της χωρικής πολυπλεξίας χρησιμοποιούνται έως δύο πλοκάδες μεταφοράς ανά TTI σε DL-SCH ή UL-SCH. Στην περίπτωση της συνάθροισης φορέων υπάρχει μία πλοκάδα μεταφοράς DL-SCH (ή UL-SCH) ανά φέρουσα συνιστώσα [30].

2.9.1 Φυσικά κανάλια

Τα φυσικά κανάλια που ορίζονται στο πρότυπο LTE είναι:

- Το **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)**: Είναι το κύριο φυσικό κανάλι που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων unicast (η αποστολή πλαισίων από ένα αποστολέα σε ένα και μόνο παραλήπτη δικτύου), αλλά και για μεταδόσεις εντοπισμού θέσης [29].
- Το **Physical Broadcast Channel (PBCH)**: Μεταφέρει μέρος της πληροφορίας του συστήματος που απαιτείται από το τερματικό για την πρόσβαση στο δίκτυο [29].
- Το **Physical Multicast Channel (PMCH)**: Χρησιμοποιείται για τη λειτουργία MBSFN [29].
- Το **Physical Downlink Control Channel (PDCCH)**: Ενημερώνει το κινητό τερματικό για την εκχώρηση πόρων στο PCH και στο DL-SCH καθώς και για πληροφορίες hybrid-ARQ όσον αφορά το DL-SCH [29].
- Το **Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel (PHICH)**: μεταφέρει την επιβεβαίωση hybrid-ARQ, η οποία υποδεικνύει στο τερματικό εάν μία πλοκάδα μεταφοράς θα πρέπει να αναμεταδοθεί ή όχι [29].

- Το **PhysicalControlFormatIndicatorChannel(PCFICH)**: Ενημερώνει τα κινητά τερματικά για τον αριθμό των συμβόλων OFDM που χρησιμοποιούνται στο PDCCH [29].
- Το **PhysicalUplinkSharedChannel(PUSCH)**: Είναι το κανάλι της αντίθετης περίπτωσης του PDSCH. Υπάρχει το πολύ ένα PUSCH ανά συνιστώσα μεταφοράς ανερχόμενης ζεύξης ανά τερματικό [29].
- Το **PhysicalUplinkControlChannel(PUCCH)**: Χρησιμοποιείται από το τερματικό για την αποστολή επιβεβαιώσεων hybrid-ARQ, υποδεικνύοντας στον eNodeB αν οι πλοκάδες μεταφοράς της κατερχόμενης ζεύξης ελήφθησαν επιτυχώς ή όχι, για την αποστολή αναφορών για την κατάσταση του καναλιού και για την αίτηση εκχώρησης πόρων για τη μετάδοση δεδομένων στην άνω ζεύξη. Υπάρχει το πολύ ένα PUCCH ανά κινητό τερματικό [29].
- Το **Physical Random-Access Channel (PRACH)**: Χρησιμοποιείται για τυχαία πρόσβαση [29].

2.9.2 Ιδιότητες φυσικού επιπέδου

Το φυσικό επίπεδο υποστηρίζει διαφορετικά εύρη ζώνης από 1.4 MHz έως 20 MHz, με απόσταση υποφορέων 15 kHz. Επίσης, υποστηρίζεται και μια απόσταση υποφορέων 7.5 kHz, η οποία χρησιμοποιείται για το LTE eMBMS (evolved Multimedia Broadcast and Multicast Service). Και στις δύο περιπτώσεις, η απόσταση των υποφερόντων είναι ανεξάρτητη από το εύρος ζώνης. Ο μέγιστος αριθμός πλοκάδας πόρων (Resource Block, RB), (ο όρος αυτός περιγράφεται παρακάτω) που υποστηρίζεται από το ανάλογο εύρος ζώνης φαίνεται στον Πίνακα 3 [30].

Πίνακας 3 Το διαθέσιμο εύρος ζώνης του κατερχόμενου συνδέσμου διαιρείται σε φυσικές πλοκάδες πόρων [31]

Εύρος ζώνης (MHz)	1.25	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0
Εύρος ζώνης υποφερόντων (kHz)	15					
Εύρος ζώνης φυσικών μπλόκ πόρων (kHz)	180					
Αριθμός διαθέσιμων φυσικών μπλόκ πόρων	6	12	25	50	75	100

2.9.3 Κανάλια Μεταφοράς: Πως να μεταδοθεί

Τα κανάλια μεταφοράς χρησιμοποιούνται από το φυσικό επίπεδο για την προσφορά υπηρεσιών στο επίπεδο MAC. Ένα κανάλι μεταφοράς χαρακτηρίζεται πώς μεταφέρονται τα δεδομένα και με ποια χαρακτηριστικά μέσω της ραδιοδιεπαφής. Αυτό είναι το σχήμα διαμόρφωσης, κωδίκευσης και της απεικόνισης των κεραιών. Συγκριτικά με τα UTRA/HSPA, ο αριθμός των καναλιών μεταφοράς στο LTE μειώνεται καθώς δεν υπάρχουν αφιερωμένα κανάλια [29].

Το LTE ορίζει δύο οντότητες MAC: μία στο UE και μία στο E-UTRAN, οι οποίες χειρίζονται τα ακόλουθα κανάλια καθοδικής ζεύξης/ανοδικής ζεύξης:

A. Κανάλια μεταφοράς καθοδικής ζεύξης

- **DownlinkSharedChannel (DL-SCH)**: Χρησιμοποιείται για την μετάδοση των δεδομένων στην κατερχόμενη ζεύξη και περιέχει δεδομένα ελέγχου και κίνησης. Συνεπώς είναι άμεσα συνδεδεμένο με τα κανάλια λογικού ελέγχου και λογικής κίνησης. Υποστηρίζει HARQ και δυναμική προσαρμογή ζεύξης, μπορεί να μεταδώσει τα δεδομένα broadcast σε όλη την κυψέλη και υποστηρίζει μη συνεχή

λήψη (DRX) για την εξοικονόμηση ενέργειας του κινητού τερματικού. Τέλος, υποστηρίζει τη μετάδοση Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)[29].

- **BroadcastChannel (BCH):** Ένα κανάλι καθοδικής ζεύξης που συσχετίζεται με το λογικό κανάλι BCCH. Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση broadcast των πληροφοριών σε όλο το εύρος της κυψέλης. Έχει ένα προ-ορισμένο σχήμα μετάδοσης που καθορίζεται από τις προδιαγραφές[29].
- **MulticastChannel (MCH):** Ένα κανάλι που συσχετίζεται με τα λογικά κανάλια MCCH και MTCH για τις υπηρεσίες multicast/broadcast. Υποστηρίζει μετάδοση Multicast/BroadcastSingleFrequencyNetwork (MBSFN), η οποία μεταδίδει την ίδια πληροφορία κάνοντας χρήση των ίδιων ραδιοπύλων από τους σταθμούς βάσης πολλαπλού συγχρονισμού σε πολλαπλούς χρήστες[29].
- **PagingChannel (PCH):** Συσχετίζεται με το λογικό κανάλι PCCH. Απεικονίζεται σε δυναμικά κατενεμημένους ραδιοπύλους και απαιτείται για μεταδόσεις broadcast σε όλο το εύρος της κυψέλης. Μεταδίδεται στο PhysicalDownlinkSharedChannel (PDSCH) και υποστηρίζει ασυνεχή λήψη. Επίσης μεταδίδει πληροφορίες ανίχνευσης και υποστηρίζει τη λειτουργία ασυνεχούς λήψης ώστε το κινητό τερματικό να έχει τη δυνατότητα της επανάπαυσης ή μή, για την ανίχνευση του καναλιού σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα[29].

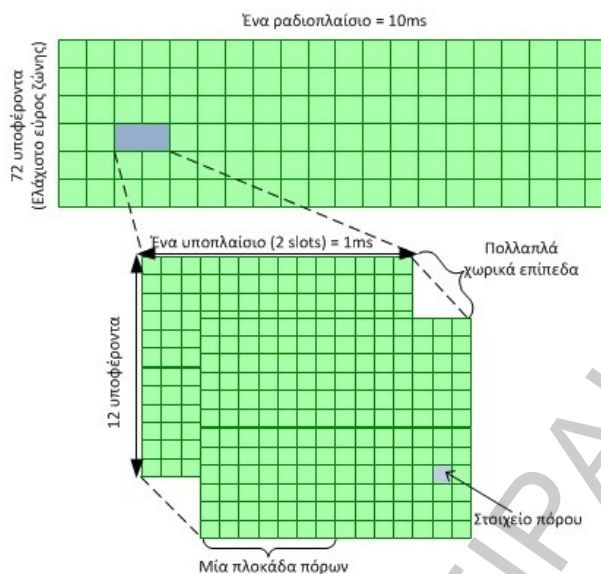
B. Κανάλια μεταφοράς ανοδικής ζεύξης

- **DownlinkSharedChannel (UL-SCH):** Είναι το αντίστοιχο κανάλι του DL-SCH στην ανερχόμενη ζεύξη. Μπορεί να συσχετιστεί με τα λογικά κανάλια CCCH, DCCH και DTSCH. Υποστηρίζει HARQ, δυναμική προσαρμογή συνδέσμου καθώς και δυναμική ή semi-persistent κατανομή των ραδιοπύλων[29].
- **RandomAccessChannel (RACH):** Ένα ειδικό κανάλι μεταφοράς, τυχαίας πρόσβασης, το οποίο δε σχετίζεται με κανένα λογικό κανάλι. Μεταδίδει σχετικά μικρές ποσότητες δεδομένων στην περίπτωση της αρχικής πρόσβασης ή στην περίπτωση του RRC μεταδίδει αλλαγές καταστάσεων[29].

2.9.4 Δομή πόρων μετάδοσης

Στην κατερχόμενη ζεύξη οι πόροι μετάδοσης καταλαμβάνουν χρόνο, συχνότητα και χώρο. Η χωροταξική διάσταση που μετριέται σε “layers”, είναι προσβάσιμη μέσω των πολλαπλών “antennaports” του σταθμού βάσης, όπου για κάθε θύρα της κεραίας παρέχεται ένα σήμα αναφοράς, ώστε να επιτραπεί η εκτίμηση του ραδιοκαναλιού από το κινητό τερματικό. Οι πόροι χρόνου-συχνότητας για κάθε θύρα μετάδοσης διαιρούνται όπως ακολουθεί: Η μεγαλύτερη μονάδα χρόνου είναι ένα ραδιοπλαίσιο, το οποίο με τη σειρά του διαιρείται σε 10 υποπλαίσια, όπου τα τελευταία με τη σειρά τους διαιρούνται σε 2 χρονικές θυρίδες το καθένα. Κάθε slot περιλαμβάνει 7 σύμβολα OFDM στην περίπτωση όπου το κυκλικό πρόθεμα (cyclicprefix) είναι τύπου normal και 6 σύμβολα στην περίπτωση που το κυκλικό πρόθεμα είναι τύπου (extended). Όσο αφορά το πεδίο της συχνότητας οι πόροι είναι συγκεντρωμένοι σε ομάδες των 12 subcarriers (καταλαμβάνοντας έτσι ένα σύνολο 180 KHz με μια απόσταση των υποφορέων της τάξης των 15 KHz), έτσι ώστε μια μονάδα των 12 υποφορέων, διάρκειας μια χρονικής θυρίδας να αποτελεί μια πλοκάδα πόρων.

Τη μικρότερη μονάδα μια πλοκάδας πόρων αποτελεί το στοιχείο πόρου (ResourceElement, RE). Αυτό αποτελείται από ένα υποφέρον στο πεδίο της συχνότητας και ένα σύμβολο OFDM στο πεδίο του χρόνου. Συνεπώς μια πλοκάδα πόρων αποτελείται από 84 στοιχεία πόρων όσον αφορά την περίπτωση του κυκλικού προθέματος “normal” και από 74 στοιχεία πόρων για την περίπτωση του κυκλικού προθέματος “extended”. Η αναλυτική παρουσίαση της μορφής μιας πλοκάδας μεταφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 20 που ακολουθεί[29]:



Σχήμα 20 Δομή πόρων για τον κατερχόμενο σύνδεσμο, επανασχεδιασμένο από [32]

2.9.5 Δομή πλαισίου

Οι μεταδόσεις τόσο του κατερχόμενου όσο και του ανερχόμενου συνδέσμου οργανώνονται σε ραδιοπλαίσια με διάρκεια $T_f = 10 \text{ ms}$.

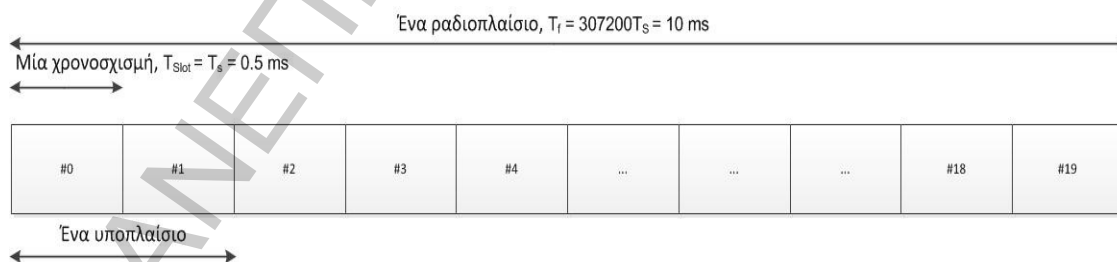
Υποστηρίζονται δύο δομές ραδιοπλαισίων:

- Τύπος 1 που εφαρμόζεται στο FDD
- Τύπος 2 που εφαρμόζεται στο TDD

Δομή πλαισίου τύπου 1

Η δομή πλαισίου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 21 που ακολουθεί εφαρμόζεται τόσο σε αμφίδρομες όσο και σε ημιαμφίδρομες μεταδόσεις FDD. Κάθε ραδιοπλαίσιο έχει διάρκεια $T_f = 307200 \cdot T_s = 10 \text{ ms}$ και αποτελείται από 20 χρονικές θυρίδες διάρκειας $T_{\text{slot}} = 15360 \cdot T_s = 0.5 \text{ ms}$, αριθμημένα από 0-19. Ένα υποπλαίσιο ορίζεται ως δύο διαδοχικές χρονικές θυρίδες όπου το υποπλαίσιο αποτελείται από τις χρονικές θυρίδες $2i$ και $2i+1$.

Στην περίπτωση του FDD, είναι διαθέσιμα 10 υποπλαίσια για την ανωδική και την καθοδική ζεύξη αντίστοιχα σε κάθε διάστημα 10 ms.



Σχήμα 21 Δομή πλαισίου τύπου 1, επανασχεδιασμένο από [29]

Δομή πλαισίου τύπου 2

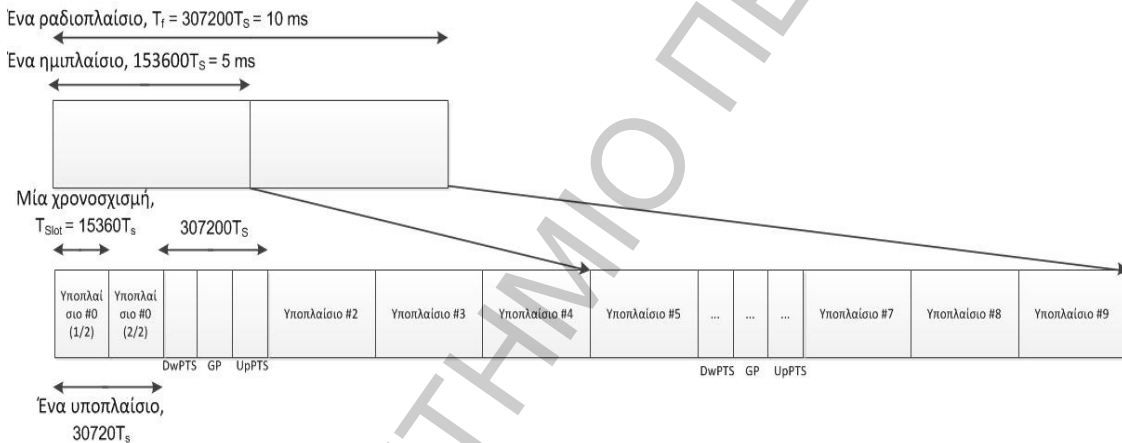
Η δομή πλαισίου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 22 που ακολουθεί εφαρμόζεται στο TDD. Κάθε ραδιοπλαίσιο διάρκειας $T_f = 307200 \cdot T_s = 10 \text{ ms}$ αποτελείται από 2 ημιπλαίσια διάρκειας $153600 \cdot T_s = 5 \text{ ms}$ το καθένα. Κάθε ημιπλαίσιο με τη σειρά του διαρείται σε 5 υποπλαίσια διάρκειας $30720 \cdot T_s = 1 \text{ ms}$. Οι υποστηριζόμενες ρυθμίσεις της ανωδικής ζεύξης / καθοδικής ζεύξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4, όπου για κάθε υποπλαίσιο ενός ραδιοπλαισίου το "D" συμβολίζει το υποπλαίσιο που προορίζεται για τη μετάδοση της κατερχόμενης ζεύξης, το "U" το αντίστοιχο που προορίζεται για τη μετάδοση της ανερχόμενης ζεύξης και το "S" συμβολίζει το

ειδικό υποπλαίσιο με τα τρία πεδία DwPTS, GP και UpPTS. Τα πεδία διαμορφώνονται ξεχωριστά όσον αφορά τη διάρκεια τους, Πίνακας 5. Παρόλ' αυτά το συνολικό τους μήκος θα πρέπει να είναι $30720 \cdot T_s = 1 \text{ ms}$. Κάθε υποπλαίσιο l ορίζεται ως 2 χρονικές θυρίδες, $2i$ και $2i+1$ διάρκειας $T_{slot} = 15360 \cdot T_s = 0.5 \text{ ms}$ για κάθε υποπλαίσιο.

Η διάρκεια του GP εξαρτάται από το χρόνο διάδοσης του σήματος από το σταθμό βάσης στον επιτελή σταθμό, και αντίστροφα καθώς και από το χρόνο που απαιτεί ο επιτελής σταθμός για την εναλλαγή από τη διαδικασία της λήψης σε αυτήν της αποστολής. Η τιμή του GP διαμορφώνεται από το δίκτυο με βάση το μέγεθος της κυψέλης.

Επειδή το συνολικό μήκος του ειδικού υποπλαισίου παραμένει σταθερό και το μήκος του GP ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της κυψέλης τα μήκη των DwPTS και UpPTS θα πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα. Για την λειτουργία του LTETDD προσφέρονται εννέα διαφορετικές διαμορφώσεις του subframe.

Ενώ το GP διαχωρίζει τη μετάδοση από τη λήψη τα υπόλοιπα ειδικά πεδία χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων. Το πεδίο DwPTS μεταφέρει συγχρονισμό και δεδομένα καθώς και το κανάλι ελέγχου καθοδικής ζεύξης για την μετάδοση πληροφοριών ελέγχου και χρονοπρογραμματισμού. Το πεδίο UpPTS χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του τυχαίου φυσικού καναλιού πρόσβασης (Physical Random Access Channel, PRACH) και το σήμα αναφοράς ακρόασης (Sounding Reference Signal, SRS)[29].



Σχήμα 22 Δομή πλαισίου τύπου 2, επανασχεδιασμένο από [29]

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης του LTETDD είναι το ότι μπορεί να αλλάξει δυναμικά την ισορροπία και τα χαρακτηριστικά της ανοδικής ζεύξης / καθοδικής ζεύξης ώστε να ανταποκρίνεται στις συνθήκες φορτίου.

Υποστηρίζονται διαμορφώσεις ανοδικής ζεύξης / καθοδικής ζεύξης τόσο με 5 ms όσο και με 10 ms Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity. Στην περίπτωση των 5 ms Downlink-to-Uplink Switch-point Periodicity, το ειδικό υποπλαίσιο υπάρχει και στα δύο ημιπλαίσια, ενώ στην περίπτωση των 10 ms Downlink-to-Uplink Switch-point Periodicity, το ειδικό υποπλαίσιο υπάρχει μόνο στο πρώτο ημιπλαίσιο.

Τα υποπλαίσια 0 και 5 και το DwPTS χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης. Το UpPTS και το υποπλαίσιο που ακολουθεί αμέσως μετά το ειδικό υποπλαίσιο χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης[29].

Πίνακας 4 Ρυθμίσεις κατερχόμενης - ανερχόμενης ζεύξης [29]

UPLINK-DOWNLINK CONFIGURATION	DOWNLINK TO UPLINK SWITCH PERIODICITY	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΠΛΑΙΣΙΟΥ
-------------------------------	---------------------------------------	---------------------

UPLINK-DOWNLINK CONFIGURATION	DOWNLINK TO UPLINK SWITCH PERIODICITY	ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΠΟΠΛΑΙΣΙΟΥ									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Πίνακας 5 Ρύθμιση ειδικού υποπλαισίου (μεγέθη των DwPTS/GP/UpPTS)[29]

ΡΥΘΜΙΣΗ ΕΙΔΙΚΟΥ ΥΠΟΠΛΑΙΣΙΟΥ	NORMAL ΚΥΚΛΙΚΟ ΠΡΟΘΕΜΑ ΣΤΟ DOWNLINK		EXTENDED ΚΥΚΛΙΚΟ ΠΡΟΘΕΜΑ ΣΤΟ DOWNLINK			
	DwPTS	UpPTS ΣΤΟ UPLINK	DwPTS	UpPTS ΣΤΟ UPLINK		
0	$6592 \cdot T_s$	Normal	Extended	$7680 \cdot T_s$	Normal	Extended
1	$19760 \cdot T_s$	$2192 \cdot T_s$	$2560 \cdot T_s$	$20480 \cdot T_s$	$2192 \cdot T_s$	$2560 \cdot T_s$
2	$21952 \cdot T_s$			$23040 \cdot T_s$		
3	$24144 \cdot T_s$			$25600 \cdot T_s$		
4	$26336 \cdot T_s$			$7680 \cdot T_s$	$4384 \cdot T_s$	$5120 \cdot T_s$
5	$6592 \cdot T_s$	$20480 \cdot T_s$				
6	$19760 \cdot T_s$	$4384 \cdot T_s$	$5120 \cdot T_s$	$23040 \cdot T_s$	-	-
7	$21952 \cdot T_s$			-		
8	$24144 \cdot T_s$			-		

2.9.6 Προσαρμογή συνδέσμου: Έλεγχος ισχύος και έλεγχος ρυθμού

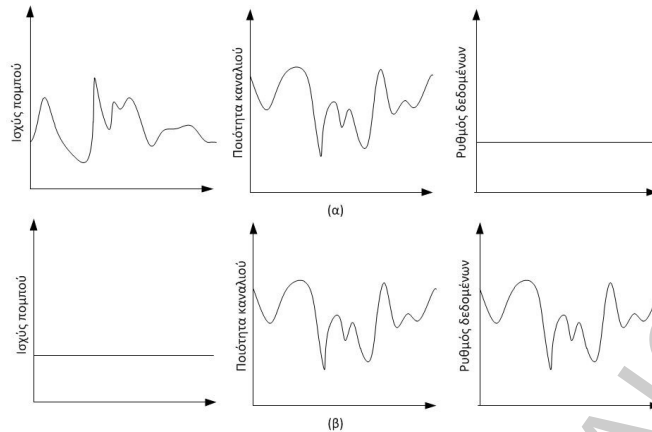
Ο δυναμικός έλεγχος ισχύος μετάδοσης χρησιμοποιήθηκε στα συστήματα που ήταν βασισμένα στην τεχνική CDMA όπως: WCDMA και cdma2000 για την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων στις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού. Ο δυναμικός έλεγχος ισχύος προσαρμόζει δυναμικά την ισχύ μετάδοσης της ραδιοζεύξης για την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων και των διαφορών στις στιγμιαίες συνθήκες καναλιού.

Ο στόχος αυτών των προσαρμογών είναι η διατήρηση μιας σχεδόν σταθερής τιμής του λόγου της ενέργειας ανά δυφίο (Energy per bit - E_b) προς την φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου (Noise Power Spectral Density - N_0) στο δέκτη, με αποτέλεσμα την επιτυχή μετάδοση των δεδομένων με χαμηλή πιθανότητα σφάλματος. Καταρχήν, ο έλεγχος ισχύος μετάδοσης αυξάνει την ισχύ του πομπού, όταν η ραδιοζεύξη υποκειται σε συνθήκες φωτός (και αντίστροφα). Συνεπώς, η ισχύς μετάδοσης είναι ουσιαστικά αντίστροφα ανάλογη της ποιότητας του καναλιού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 23(α). Αυτό το γεγονός οδηγεί σε ένα σταθερό ρυθμό δεδομένων ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις του καναλιού, πράγμα που είναι χρήσιμο για τις υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, όπως είναι οι υπηρεσίες φωνής. Ο έλεγχος μετάδοσης - ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος προσαρμογής συνδέσμου, δηλαδή προσαρμογής των παραμέτρων μετάδοσης. Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς μετάδοσης προσαρμόζεται στις διαφορές και στις διακυμάνσεις των στιγμιαίων συνθηκών του καναλιού ώστε ο λαμβανόμενος εισερχόμενος λόγος ενέργειας δυφίου προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b/N_0) να διατηρείται σε ένα επιθυμητό επίπεδο.

Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις των κινητών επικοινωνιών, ειδικά στην περίπτωση της κίνησης πακέτων - δεδομένων, δεν υπάρχει η επιτακτική ανάγκη της παροχής ενός σταθερού ρυθμού δεδομένων μέσω της ραδιοζεύξης. Από την πλευρά του χρήστη ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων θα πρέπει να είναι ο υψηλότερος που μπορεί να επιτευχθεί. Στην πραγματικότητα, ακόμη και στις περιπτώσεις υπηρεσιών «σταθερού ρυθμού», όπως είναι οι υπηρεσίες φωνής και βίντεο, οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις στο ρυθμό δεδομένων συχνά δεν είναι πρόβλημα, όσο ο μέσος ρυθμός δεδομένων παραμένει σταθερός, λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή του μέσου όρου για κάποιο σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Στις περιπτώσεις που δεν απαιτείται ένας σταθερός ρυθμός μετάδοσης ένας εναλλακτικός τρόπος του ελέγχου ισχύος μετάδοσης είναι η λύση της προσαρμογής σύνδεσμου μέσω του δυναμικού ελέγχου ρυθμού (dynamic rate control). Ο έλεγχος ρυθμού δεν αποσκοπεί στην επίτευξη ενός σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ανεξάρτητα από τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού. Αντίθετα, με τον έλεγχο ρυθμού, προσαρμόζεται δυναμικά ο ρυθμός δεδομένων για την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων των συνθηκών του καναλιού. Σε περιπτώσεις, πλεονεκτικών συνθηκών καναλιού αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων (και αντίστροφα). Έτσι ο έλεγχος ρυθμού διατηρεί το E_b/N_0

$\sim P/R$ σε επιθυμητό επίπεδο, όχι με τη ρύθμιση της ισχύος μετάδοσης. Παλλά με τη ρύθμιση του

ρυθμού δεδομένων R . Αυτό επεικονίζεται στο Σχήμα 23(β) **Error! Unknown switch argument..**



Σχήμα 23α) Έλεγχος ισχύος β) Έλεγχος ροής, επανασχεδιασμένο από [30]

Μπορεί να αποδειχθεί ότι ο έλεγχος ρυθμού είναι πιο αποδοτικός από τον έλεγχο ισχύος. Κατ' αρχήν ο έλεγχος ρυθμού υποδηλώνει ότι ο ενισχυτής ισχύος μεταδίδει πάντα σε πλήρη ισχύ, επομένως είναι αποτελεσματική η χρησιμοποίησή του. Από την άλλη πλευρά, ο έλεγχος ισχύος έχει ως αποτέλεσμα, τη μη επαρκή αξιοποίηση του ενισχυτή ισχύος στις περισσότερες περιπτώσεις, καθώς η ισχύς μετάδοσης είναι μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή.

Πρακτικά, ο ρυθμός δεδομένων της ραδιοζεύξης ελέγχεται από την προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης ή/και από την προσαρμογή του ρυθμού κωδίκευσης. Σε περίπτωση που οι συνθήκες είναι πλεονεκτικές ο E_b/N_0 είναι υψηλός στο δέκτη και ο κύριος περιορισμός του ρυθμού δεδομένων είναι το εύρος ζώνης της ραδιοζεύξης. Ως εκ τούτου, σε περιπτώσεις που το σχήμα διαμόρφωσης είναι υψηλότερης τάξης όπως, 16QAM ή 64QAM, είναι κατάλληλος ένας υψηλός ρυθμός κωδίκευσης. Αντίστοιχα, σε φτωχές συνθήκες με σχήμα διαμόρφωσης όπως αυτό της QPSK, είναι κατάλληλος ένας χαμηλός ρυθμός κωδίκευσης. Για το λόγο αυτό, η προσαρμογή συνδέσμου μέσω του ελέγχου ρυθμού αναφέρεται ως προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδίκευση (Adaptive Modulation Coding, AMC) [30].

2.9.7 Τεχνική υβριδικής αίτησης αυτόματης επανάληψης

Το φυσικό επίπεδο στο LTE υποστηρίζει την τεχνική HARQ στα διαμοιραζόμενα φυσικά κανάλια κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης, με ξεχωριστά κανάλια ελέγχου με σκοπό την αποστολή των σχετικών αναδράσεων αναγνώρισης. Στη λειτουργία FDD, είναι διαθέσιμες οχτώ διεργασίες Stop-And-Wait (SAW) HARQ τόσο στο downlink όσο και στο uplink με ένα τυπικό Round-Trip Time (RTT) των 8ms. Κάθε διεργασία HARQ απαιτεί μια ξεχωριστή κατανομή ήπιου προσωρινού ενταμιευτή στην πλευρά του δέκτη για το συνδυασμό των αναμεταδόσεων. Στην FDD κάθε διεργασία HARQ αναγνωρίζεται με ένα μοναδικό δείκτη διεργασίας των 3 διφύων, τον HARQ process Identifier (HARQID). Στη λειτουργία TDD χρησιμοποιούνται και δείκτες διεργασίας των 4 διφύων.

Υπάρχουν διάφορα πεδία στην πληροφορία ελέγχου καθοδικής ζεύξης ώστε να βοηθούν την λειτουργία της διαδικασίας HARQ. Αυτά είναι:

- **New Data Indicator (NDI):** Κινητοποιείται όταν αρχίζει η αποστολή ενός νέου πακέτου.
- **Redundancy Version (RV):** Υποδικνεί την RV που επιλέγεται για τη μετάδοση ή την αναμετάδοση.
- **MCS:** Το σχήμα διαμόρφωσης και κωδίκευσης.

Η HARQ καθοδικής ζεύξης του LTE είναι ασύγχρονη και προσαρμοστική και γι' αυτό κάθε μετάδοση του κατερχόμενου συνδέσμου συνοδεύεται από σαφή σηματοδότηση πληροφοριών ελέγχου. Η HARQ του ανερχόμενου συνδέσμου είναι σύγχρονη και ενίοτε προσαρμοστική. Η μη προσαρμοστική λειτουργία απαιτεί μια προκαθορισμένη ακολουθία RV 0,2,3,1,0,2,3,1,... για επιτυχημένες αποστολές πακέτου λόγω της απουσίας σαφούς σηματοδότησης ελέγχου. Η προσαρμοστική λειτουργία έχει σαφή σηματοδότηση RV. Επίσης, υπάρχουν και άλλες λειτουργίες στην ανοδική ζεύξη, η ακολουθία RV συνδυάζεται με άλλες πληροφορίες ελέγχου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του επιφορτού σηματοδότησης. Στην κανονική περίπτωση

υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοίχιση μεταξύ των μεταδιδόμενων πακέτων και των αναγνωριστικών. Στην περίπτωση της λειτουργίας TDD, τα υποπλάγια κατηγοριοποιούνται ως υποπλάγια ανοδικής ή καθοδικής ζεύξης και είναι σχεδιασμένα σύμφωνα με μια κυψελοστραφή βάση, η οποία περιορίζει τους χρόνους κατά τη διάρκεια των οποίων αποστέλλονται οι χορηγίες των πόρων, τα δεδομένα, οι γνωστοποιήσεις και οι επαναμεταδόσεις [33].

2.10 Επισκόπηση επιπέδου προσπέλασης

Το επίπεδο προσπέλασης στο μέσο είναι το χαμηλότερο υπόστρωμα του δεύτερου επιπέδου της στοιβας πρωτοκόλλων του LTE. Η σύνδεση με το φυσικό επίπεδο παρακάτω επιτυγχάνεται μέσω καναλιών μεταφοράς και η σύνδεση μεταξύ του παραπάνω RLC γίνεται μέσω λογικών καναλιών. Το επίπεδο MAC προσφέρει πολυπλεξία και αποπολυπλεξία μεταξύ των λογικών καναλιών και των καναλιών μεταφοράς. Όσο αφορά τη μετάδοση το επίπεδο MAC κατασκευάζει MACPDUs, γνωστές ως πλοκάδες μεταφοράς, οι οποίες είναι αποδεκτές από τα MACSDUs μέσω λογικών καναλιών και όσο αφορά την λήψη ανακτώνται MACSDUs από τα MACPDUs που λαμβάνονται μέσω των καναλιών μεταφοράς [33].

2.10.1 Λογικά Κανάλια: Τι να μεταδοθεί

Τα λογικά κανάλια χρησιμοποιούνται από το επίπεδο MAC για την παροχή υπηρεσιών στο RLC. Κάθε λογικό κανάλι ορίζεται με βάση το είδος της πληροφορίας που μεταφέρει. Στο LTE υπάρχουν δύο είδη λογικών καναλιών τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με την υπηρεσία την οποία παρέχουν: τα λογικά κανάλια ελέγχου και τα λογικά κανάλια κίνησης [29].

Τα λογικά κανάλια ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά πληροφορίας του επιπέδου ελέγχου χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Broadcast Control Channel (BCCH):** Γίνεται χρήση ενός κοινού καναλιού κατερχόμενης ζεύξης το οποίο μεταδίδει broadcast τις πληροφορίες ελέγχου του συστήματος στα κινητά τερματικά της κυψέλης, συμπεριλαμβανομένων του εύρους ζώνης του συστήματος κατερχόμενης ζεύξης, τις ρυθμίσεις της κεραίας, και της ισχύος του σήματος αναφοράς. Λόγω του μεγάλου μεγέθους της πληροφορίας που μεταφέρεται στο BCCH, το κανάλι απεικονίζεται σε δύο διαφορετικά κανάλια μεταφοράς: στο κανάλι μετάδοσης (Broadcast Channel, BCH) και στο κοινόχρηστο κανάλι κατερχόμενης ζεύξης (Downlink Shared Channel, DL-SCH) [29].
- **Multicast Control Channel (MCCH):** Κανάλι κατερχόμενης ζεύξης από ένα σε πολλά σημεία (point-to-multipoint) που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφορίας ελέγχου στους χρήστες της κυψέλης. Χρησιμοποιείται μόνο από χρήστες που λαμβάνουν υπηρεσίες multicast/broadcast [29].
- **Paging Control Channel (PCCH):** Κανάλι κατερχόμενης ζεύξης που μεταφέρει πληροφορίες εντοπισμού και ειδοποιήσεις αλλαγών στους καταχωρημένους χρήστες της κυψέλης [29].
- **Common Control Channel (CCCH):** Αμφίδρομο κανάλι για τη μετάδοση πληροφορίας ελέγχου μεταξύ του δικτύου και των χρηστών που δεν έχουν σύνδεση RRC με το δίκτυο, πράγμα που σημαίνει ότι το κινητό τερματικό δε συνδέεται με το δίκτυο, όπως στην κατάσταση αναμονής. Το CCCH χρησιμοποιείται πιο συχνά κατά τη μέθοδο της τυχαίας πρόσβασης [29].
- **Dedicated Control Channel (DCCH):** Αμφίδρομο κανάλι από ένα σε ένα σημείο (point-to-point), που μεταδίδει συγκεκριμένες πληροφορίες ελέγχου μεταξύ του κινητού τερματικού και του δικτύου. Χρησιμοποιείται από κινητά τερματικά που έχουν σύνδεση RRC [29].

Τα λογικά κανάλια κίνησης, τα οποία πρόκειται να μεταφέρουν τις πληροφορίες του επιπέδου χρήστη, περιλαμβάνουν:

- **Dedicated Control Channel (DTCH):** Αμφίδρομο κανάλι ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης από ένα σε ένα σημείο (point-to-point), το οποίο χρησιμοποιείται μεταξύ ενός δεδομένου κινητού τερματικού και του δικτύου [29].

- **MulticastTrafficChannel (MTCH):** Μονόδρομο κανάλι από ένα σε πολλά σημεία (point-to-multipoint) που μεταδίδει δεδομένα κίνησης από το δίκτυο στα κινητά τερματικά. Σχετίζεται με τις υπηρεσίες multicast/broadcast[29].

2.10.2 Χρονοπρογραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλιστο πεδίο του χρόνου

Ο χρονοπρογραμματισμός ελέγχει την κατανομή των κοινόχρηστων πόρων μεταξύ των χρηστών σε κάθε χρονική στιγμή. Είναι στενά συνδεδεμένος με την προσαρμογή συνδέσμου και συχνά θεωρούνται ως μια κοινή λειτουργία. Οι αρχές του χρονοπρογραμματισμού καθώς και το ποιοι πόροι διαμοιράζονται μεταξύ των χρηστών διαφέρουν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ραδιοδιεπαφής.

A. Χρονοπρογραμματισμός κάτω ζεύξης

Στον κατερχόμενο σύνδεσμο, οι μεταδόσεις σε διαφορετικά τερματικά που βρίσκονται εντός της κυψέλης συνήθως είναι ορθογωνικές μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει τουλάχιστο θεωρητικά, πως δεν υπάρχει ενδοκυψελική παρεμβολή μεταξύ των μεταδόσεων. Η ενδοκυψελική ορθογωνιότητα του κατερχόμενου συνδέσμου, μπορεί να επιτευχθεί στο πεδίο του χρόνου (Time-Division Multiplexing), στο πεδίο της συχνότητας (Frequency-Domain Multiplexing), ή στο πεδίο του κώδικα (Code-Domain Multiplexing). Επιπλέον, το χωρικό πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό των χρηστών, τουλάχιστο με οιονεί ορθογώνιο τρόπο, μεταξύ διαφορετικών διατάξεων κεραιών. Αυτό συχνά αναφέρεται ως πολυπλεξία διαίρεσης χώρου, αν και στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μία ή περισσότερες από τις παραπάνω στρατηγικές πολυπλεξίας.

Για τα πακέτα δεδομένων, όπου η κίνηση είναι πολύ συχνά σποραδική μπορεί να αποδειχθεί ότι η TDM είναι προτιμότερη από θεωρητική άποψη και ως εκ τούτου είναι συνήθως ένας καίριος παράγοντας του κατερχόμενου συνδέσμου. Ωστόσο, η TDM συνδυάζεται συχνά με το διαμοιρασμό των ραδιοπόρων τόσο στο πεδίο συχνότητας όσο και στο πεδίο κώδικα. Στην περίπτωση της ραδιοτεχνολογίας LTE η πολυπλεξία του κατερχόμενου συνδέσμου είναι ένας συνδυασμός της FDM και TDM.

Όταν πραγματοποιούνται παράλληλες μεταδόσεις σε πολλαπλούς χρήστες, είτε με τη χρήση FDM είτε με τη χρήση CDM, υπάρχει ένας στιγμιαίος διαμοιρασμός της συνολικής διαθέσιμης ισχύος εκπομπής. Με άλλα λόγια, δεν είναι διαμοιρασμένοι μόνο οι πόροι χρόνου / συχνότητας / κώδικα αλλά και οι πόροι ισχύος στο σταθμό βάσης.

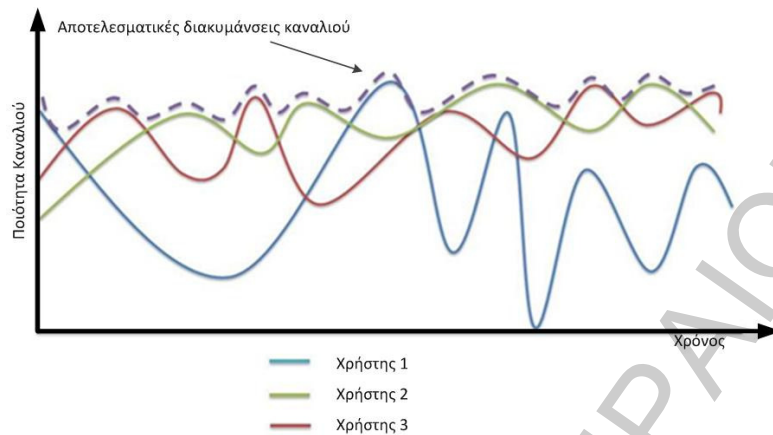
Θεωρείται μια καθοδική ζεύξη TDM – based με ένα χρήστη να χρονοπρογραμματίζεται σε μια χρονική στιγμή. Σε αυτήν την περίπτωση, η χρησιμοποίηση των ραδιοπόρων είναι η μέγιστη αν σε κάθε χρονική στιγμή όλοι οι πόροι εκχωρούνται στο χρήστη με την καλύτερη στιγμιαία συνθήκη καναλιού.

- Στην περίπτωση που η προσαρμογή συνδέσμου βασίζεται στον έλεγχο ισχύος, αυτό σημαίνει ότι για ένα δεδομένο ρυθμό δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατώτατη πιθανή ισχύς μετάδοσης. Συνεπώς, ελαχιστοποιείται η παρεμβολή στις μεταδόσεις των άλλων κυψελών για μια δεδομένη χρησιμοποίηση ζεύξης.
- Στην περίπτωση που η προσαρμογή συνδέσμου βασίζεται στον έλεγχο ρυθμού, αυτό σημαίνει ότι για μια δεδομένη ισχύ εκπομπής επιτυγχάνεται ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων, ή με άλλα λόγια, επιτυγχάνεται η υψηλότερη χρησιμοποίηση ζεύξης για μια δεδομένη παρεμβολή στις άλλες κυψέλες.

Ωστόσο, εάν στον κατερχόμενο σύνδεσμο εφαρμοστεί ο έλεγχος ισχύος – μετάδοσης σε συνδυασμό με το χρονοπρογραμματισμό TDM, αυτό σημαίνει ότι δε θα γίνει πλήρης χρησιμοποίηση της συνολικής ισχύος μετάδοσης της κυψέλης. Συνεπώς, προτιμάται ο έλεγχος ρυθμού.

Η στρατηγική που περιγράφηκε είναι ένα παράδειγμα χρονοπρογραμματισμού εξαρτώμενου από το κανάλι, που ο χρονοπρογραμματιστής λαμβάνει υπόψη του τις στιγμιαίες συνθήκες της ραδιοζεύξης. Ο χρονοπρογραμματισμός του χρήστη με τις καλύτερες στιγμιαίες ραδιοσυνθήκες συχνά αναφέρεται ως χρονοπρογραμματισμός max – C / I (ή μέγιστου ρυθμού). Καθώς, οι ραδιοσυνθήκες των ραδιοζεύξεων εντός της κυψέλης, συνήθως ποικίλλουν σε κάθε χρονική

στιγμή υπάρχει σχεδόν πάντα μια ραδιοζεύξη της οποίας η ποιότητα του καναλιού είναι κοντά στο ζενίθ, Σχήμα 24[18].



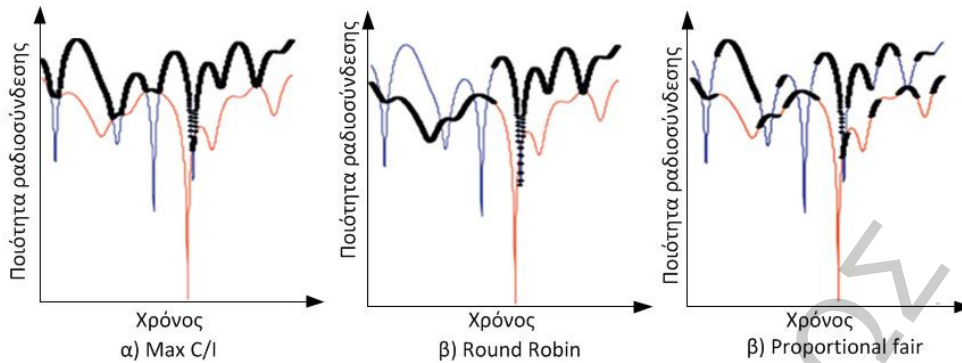
Σχήμα 24 Χρονοπρογραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι, επανασχεδιασμένο από [18]

Συνεπώς, το κανάλι που χρησιμοποιείται για μετάδοση θα έχει υψηλή ποιότητα και με τον έλεγχο ρυθμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υψηλός ρυθμός μετάδοσης. Αυτό μεταφράζεται ως ένα σύστημα υψηλής χωρητικότητας. Το κέρδος που επιτυγχάνεται μεταδίδοντας στους χρήστες με ευνοϊκές συνθήκες ραδιοζεύξης είναι κοινώς γνωστό ως διαφορισμός πολλαπλών χρηστών (multi-user diversity). Τα κέρδη του διαφορισμού πολλαπλών χρηστών είναι μεγαλύτερα, οι διακυμάνσεις του καναλιού είναι οι μεγαλύτερες και ο αριθμός των χρηστών είναι ο μεγαλύτερος. Επομένως, σε αντίθεση με τη συνηθισμένη άποψη ότι η ταχεία διάλεια (αιφνίδια μεταβολές στην ποιότητα της ραδιοζεύξης) είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που πρέπει να καταπολεμηθεί, το ενδεχόμενο του εξαρτώμενου από το κανάλι χρονοπρογραμματισμού σημαίνει ότι η διάλεια είναι στην πραγματικότητα δυνητικά ωφέλιμη και πρέπει να αξιοποιηθεί.

Μαθηματικά ο χρονοπρογραμματιστής $\max - C / I$ εξυπηρετεί το χρήστη k που:

$$\arg \max_{i \in \mathcal{R}_k} R_i$$

όπου R_i είναι ο στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων του χρήστη i . Παρά το γεγονός ότι, από την άποψη της χωρητικότητας του συστήματος, ο χρονοπρογραμματισμός $\max - C / I$ είναι αποδοτικός, αυτή η αρχή του χρονοπρογραμματισμού δεν θα είναι δίκαιη σε όλες τις καταστάσεις. Αν κατά μέσο όρο όλα τα τερματικά, αντιμετωπίζουν παρόμοιες συνθήκες καναλιού και μεγάλες διακυμάνσεις στις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού είναι για παράδειγμα εξαιτίας, της ταχείας διάλεια πολλαπλών διαδρομών. Συνεπώς, όλοι οι χρήστες θα αντιμετωπίσουν το ίδιο μέσο ρυθμό δεδομένων. Οι όποιες διακυμάνσεις του στιγμιαίου ρυθμού δεδομένων είναι απότομες και συχνά δεν είναι καν αισθητές από τον χρήστη. Ωστόσο, στην πράξη, διαφορετικά τερματικά θα αντιμετωπίσουν διαφορετικές (βραχυπρόθεσμες) μέσες συνθήκες καναλιού. Για παράδειγμα, εξαιτίας των διαφορών της απόστασης και των διαλείψεων σκίασης μεταξύ του σταθμού βάσης και του τερματικού. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συνθήκες του καναλιού που αντιμετωπίζονται από ένα και μόνο τερματικό για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορεί να είναι χειρότερες από τις συνθήκες καναλιού που αντιμετωπίζονται από άλλα τερματικά. Στη συνέχεια με μια στρατηγική χρονοπρογραμματισμού $\max - C / I$, ουσιαστικά θα αγνοηθεί το τερματικό με τις κακές συνθήκες καναλιού, και έτσι το τερματικό αυτό δε θα χρονοπρογραμματιστεί ποτέ. Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 25(α), όπου χρησιμοποιείται ένας χρονοπρογραμματιστής $\max - C / I$, για το χρονοπρογραμματισμό δύο διαφορετικών χρηστών με διαφορετική μέση ποιότητα καναλιού. Παρατηρείται, πως περίπου όλη την ώρα έχει χρονοπρογραμματιστεί ο ίδιος χρήστης. Παρόλο που αυτό το γεγονός οδηγεί σε υψηλότερη χωρητικότητα του συστήματος, αυτή η κατάσταση συχνά δεν είναι αποδεκτή από την άποψη της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών [18].



Σχήμα 25 Παράδειγμα τριών διαφορετικών αλγορίθμων scheduling για δύο χρήστες, με διαφορετικό μέσο όρο ποιότητας καναλιού: a) maxC/I, b) roundrobin και c) proportionalfair. Ο επιλεγμένος χρήστης απεικονίζεται με την έντονη γραμμή, επανασχεδιασμένο από [18]

Μια εναλλακτική στρατηγική είναι ο χρονοπρογραμματισμός round-robin που απεικονίζεται στο παραπάνω Σχήμα 25(β). Αυτή η στρατηγική χρονοπρογραμματισμού επιτρέπει στους χρήστες την εκ περιτροπής χρήση των μεριζόμενων πόρων, χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού. Ο χρονοπρογραμματισμός round-robin μπορεί να θεωρηθεί ως δίκαιο με την έννοια ότι σε κάθε ζεύξη επικοινωνίας παραχωρείται ο ίδιος αριθμός ραδιοπόρων. Ωστόσο, ο χρονοπρογραμματισμός round-robin δεν είναι δίκαιο με την έννοια ότι δεν παρέχει την ίδια ποιότητα υπηρεσιών σε όλες τις ζεύξεις επικοινωνίας. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να διατεθούν περισσότεροι ραδιοπόροι (περισσότερος χρόνος) στις ζεύξεις επικοινωνίας με κακές συνθήκες καναλιού. Επιπλέον, όσο ο χρονοπρογραμματισμός round-robin δε λαμβάνει υπόψη του τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού κατά τη διαδικασία του χρονοπρογραμματισμού, αυτό θα επιφέρει μείωση των συνολικών επιδόσεων του συστήματος αλλά πιο ίση ποιότητα υπηρεσίας μεταξύ των ζεύξεων επικοινωνίας συγκριτικά με τον χρονοπρογραμματισμό max-C/I.

Συνεπώς, αυτό που χρειάζεται είναι μια στρατηγική χρονοπρογραμματισμού που να είναι ικανή να αξιοποιήσει τις ταχείες διακυμάνσεις του καναλιού ώστε να αναδείξει τη συνολική ρυθμοαπόδοση της κυψέλης καθώς εξασφαλίζει την ίδια μέση ρυθμοαπόδοση χρήση, για όλους τους χρήστες, ή τουλάχιστο μια ελάχιστη ασφαλή ρυθμοαπόδοση για όλους τους χρήστες.

Με βάση τα παραπάνω ένας πρακτικός χρονοπρογραμματιστής θα πρέπει να λειτουργεί κάπου ενδιάμεσα μεταξύ του χρονοπρογραμματιστή max-C/I και του χρονοπρογραμματιστή round-robin. Συνεπάγεται δηλαδή ότι θα πρέπει να αξιοποιεί όσο περισσότερο γίνεται τις ταχείες διακυμάνσεις των συνθηκών του καναλιού καθώς και να διατηρεί κάμποσο βαθμό δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου χρονοπρογραμματιστή είναι ο proportional-fair, που απεικονίζεται στο παραπάνω Σχήμα 25(γ). Σε αυτή τη στρατηγική, οι μεριζόμενοι πόροι διατίθενται στο χρήστη με τις σχετικά καλύτερες συνθήκες ραδιοζεύξης, πράγμα που σημαίνει ότι σε κάθε χρονική στιγμή ο χρονοπρογραμματιστής proportional-fair εξυπηρετεί το χρήστη k που:

$$\arg \max_i \frac{R_i}{\bar{R}_i}$$

όπου R_i είναι ο στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων του χρήστη i και \bar{R}_i είναι ο μέσος ρυθμός δεδομένων για το χρήστη i . Ο μέσος ρυθμός υπολογίζεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου T_{PF} . Για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής χρήσης των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων του καναλιού και ταυτόχρονα της οριοθέτησης των μακροπρόθεσμων διαφορών της ποιότητας της υπηρεσίας σε αποδεκτό επίπεδο, η σταθερά χρόνου T_{PF} θα πρέπει να είναι μεγαλύτερης διάρκειας από τη σταθερά χρόνου των βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων. Συγχρόνως, η σταθερά χρόνου T_{PF} θα πρέπει να είναι επαρκώς σύντομη με σκοπό οι διακυμάνσεις της ποιότητας εντός του χρονικού διαστήματος T_{PF} να μην γίνονται ισχυρά αισθητές από το χρήστη. Τυπικά, η σταθερά χρόνου T_{PF} μπορεί να είναι της τάξεως του ενός δευτερολέπτου.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού είναι συνήθως ζήτημα του σταθμού βάσης και κάτι που δεν καθορίζεται συνήθως σε κάθε πρότυπο. Αυτά

που πρέπει να προσδιοριστούν σε ένα πρότυπο για την υποστήριξη του εξαρτώμενου από το κανάλι χρονοπρογραμματισμού είναι οι μετρήσεις / αναφορές της ποιότητας του καναλιού καθώς και η σηματοδότηση που απαιτείται για τη δυναμική κατανομή των πόρων [18].

B. Χρονοπρογραμματισμός άνω ζεύξης

Ο χρονοπρογραμματισμός εφαρμόζεται εξίσου στις μεταδόσεις του ανερχόμενου συνδέσμου, και σε μεγάλο βαθμό μπορούν να θεωρηθούν οι ίδιες αρχές, αν και υπάρχουν μεταξύ τους κάποιες διαφορές.

Η ισχύς του πόρου του ανερχόμενου συνδέσμου κατανέμεται μεταξύ των χρηστών, καθώς στον κατερχόμενο σύνδεσμο ο πόρος ισχύος είναι συγκεντρωμένος στο σταθμό βάσης. Επιπλέον η μέγιστη ισχύς εκπομπής του ανερχόμενου συνδέσμου ενός τερματικού, είναι συνήθως χαμηλότερη από την ισχύ εξόδου του σταθμού βάσης. Αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στην στρατηγική του χρονοπρογραμματισμού. Σε αντίθεση με τον κατερχόμενο σύνδεσμο, όπου συχνά χρησιμοποιείται η τεχνική TDMA, ο χρονοπρογραμματισμός του ανερχόμενου συνδέσμου συνήθως βασίζεται στο μεριζόμενο πεδίο του χρόνου / της συχνότητας / του κώδικα, καθώς ένα τερματικό μπορεί να μην έχει επαρκή ισχύ για την αποτελεσματική αξιοποίηση της χωρητικότητας της ζεύξης.

Παρόμοια με την περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης, ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός είναι εξίσου αποδοτικός στην περίπτωση της ανερχόμενης ζεύξης. Σημαντικό αντίκτυπο στην στρατηγική χρονοπρογραμματισμού της ανερχόμενης ζεύξης έχουν τα χαρακτηριστικά (εάν η ανερχόμενη ζεύξη είναι βασισμένη σε ορθογωνική ή μη - ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση, τύπος της προσαρμογής συνδέσμου) της υποκείμενης ραδιοδιεπαφής.

Στην περίπτωση ενός μη - ορθογωνικού συστήματος πολλαπλής πρόσβασης, όπως είναι το CDMA, είναι απαραίτητος ο έλεγχος ισχύος για τη σωστή λειτουργία. Ο σκοπός του ελέγχου ισχύος είναι να ελέγχει το λαμβανόμενο E_b/N_0 ώστε να μπορεί να ανακτάται η εισερχόμενη πληροφορία. Ωστόσο, σε ένα μη-ορθογωνικό περιβάλλον πολλαπλής πρόσβασης, ο έλεγχος ισχύος αποσκοπεί επίσης, στον έλεγχο του βαθμού της παρεμβολής που επηρεάζει τους άλλους χρήστες. Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως το μέγιστο ανεκτό επίπεδο παρεμβολής στο σταθμό βάσης ενός μεριζούμενου πόρου. Ακόμη και αν, από την πλευρά του χρήστη, θα ήταν αποδοτική η μετάδοση σε πλήρη ισχύ για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων, αυτό μπορεί να μην είναι αποδεκτό από την πλευρά της παρεμβολής, καθώς σε αυτή την περίπτωση τα άλλα κινητά τερματικά δε θα είναι σε θέση να μεταφέρουν με επιτυχία οποιαδήποτε δεδομένα. Συνεπώς με τη μη - ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση, χρονοπρογραμματίζοντας ένα τερματικό όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι ευνοϊκές αυτό δε συνεπάγεται υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, η παρεμβολή που προκαλείται στα άλλα κινητά τερματικά της κυψέλης κατά τη διάρκεια της ταυτόχρονης μετάδοσης. Με άλλα λόγια, η εισερχόμενη ισχύς (άρα και ο ρυθμός δεδομένων) είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τις συνθήκες του καναλιού τη στιγμή της μετάδοσης χάρη στον έλεγχο ισχύος. Ενώ η εκπεμπόμενη ισχύς εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού κατά τη στιγμή της μετάδοσης. Επομένως, ακόμα και αν σε αυτό το παράδειγμα ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός, δεν παρέχει άμεσο κέρδος όσον αφορά έναν υψηλότερο ρυθμό δεδομένων από το τερματικό, ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός θα εξακολουθεί να παρέχει κέρδος για το σύστημα εξαιτίας της μειωμένης ενδοκυψελικής παρεμβολής.

Συμπεραίνεται ότι, στο σύστημα μη - ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης θεωρείται πως δεν υπάρχουν όρια στην ισχύ εκπομπής των τερματικών. Πρακτικά, η ισχύς μετάδοσης ενός κινητού τερματικού είναι άνω φραγμένη, εξαιτίας κανονιστικών λόγων και λόγων υλοποίησης. Χρονοπρογραμματίζοντας για μετάδοση ένα κινητό τερματικό σε ευνοϊκές συνθήκες καναλιού μειώνεται η πιθανότητα του κινητού τερματικού να έχει ανεπαρκή ισχύ για την αξιοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού.

Στην περίπτωση του ορθογωνικού συστήματος πολλαπλής πρόσβασης, δεν είναι αναγκαίος ο ενδοκυψελικός έλεγχος ισχύος και τα πλεονεκτήματα του εξαρτώμενου από το κανάλι χρονοπρογραμματισμού μοιάζουν με αυτά της κατερχόμενης ζεύξης. Κατ' αρχήν, όσον αφορά τη λειτουργία *intra - cell*, το τερματικό μπορεί να εκπέμψει σε πλήρη ισχύ και ο χρονοπρογραμματιστής εκχωρεί ένα μέρος των ορθογωνικών πόρων (πρακτικά ένα μέρος του συνολικού εύρους ζώνης) στο τερματικό για τη μετάδοση. Οι εναπομείναντες ορθογωνικοί πόροι

μπορούν να εκχωρηθούν σε άλλους χρήστες. Ωστόσο, οι περιορισμοί της υλοποίησης, για παράδειγμα, η διαρροή μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων το περιορισμένο δυναμικό εύρος στο κύκλωμα δέκτη μπορούν να θέσουν περαιτέρω περιορισμούς όσον αφορά τη μέγιστη ανεκτή διαφορά ισχύος μεταξύ των σημάτων από την ταυτόχρονη μετάδοση των τερματικών. Συνεπώς, είναι αναγκαίος κάποιος βαθμός ελέγχου της ισχύος, έτσι ώστε η κατάσταση να μπορεί να καταστεί παρόμοια με την περίπτωση της μή - ορθογωνικής.

Η ορθογωνική και η μή - ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση θεωρείται κυρίως ως ενδοκυψελική πολλαπλή πρόσβαση. Επομένως, σε πολλά πρακτικά συστήματα εφαρμόζεται η καθολική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μεταξύ των κυψελών. Σε αυτήν την περίπτωση, η διακυψελική πολλαπλή πρόσβαση είναι μή - ορθογωνική, ανεξάρτητα από την ενδοκυψελική πολλαπλή πρόσβαση η οποία θέτει όρια στην επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής του τερματικού.

Ανεξάρτητα με το αν χρησιμοποιείται ορθογωνική ή μή - ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες βασικές αρχές χρονοπρογραμματισμού όπως και στον κατερχόμενο σύνδεσμο. Ένας χρονοπρογραμματιστής max-C/I θα αναθέσει όλους τους πόρους του ανερχόμενου συνδέσμου στο τερματικό με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού της ανερχόμενης ζεύξης. Εάν δε ληφθούν υπόψη τυχόν περιορισμοί ισχύος στο τερματικό αυτό θα οδηγήσει στη μέγιστη χωρητικότητα (σε μια απομονωμένη κυψέλη).

Στην περίπτωση ενός συστήματος μή-ορθογωνικής πρόσβασης μια πιθανή στρατηγική χρονοπρογραμματισμού είναι η greedy - filling. Με τη στρατηγική χρονοπρογραμματισμού greedy - filling στο τερματικό με τις καλύτερες ραδιοσυνθήκες εκχωρείται όσο το δυνατόν υψηλότερος ρυθμός δεδομένων. Εάν το επίπεδο παρεμβολής στο δέκτη είναι μικρότερο του μέγιστου ανεκτού επιπέδου, το τερματικό με τις δευτερεύουσες καλύτερες συνθήκες καναλιού έχει και αυτό το δικαίωμα να μεταδώσει και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται με περισσότερα τερματικά έως ότου επιτευχθεί το μέγιστο ανεκτό επίπεδο παρεμβολής στο δέκτη. Αυτή η στρατηγική μεγιστοποιεί την αξιοποίηση της ασύρματης διεπαφής, όμως αυτό επιτυγχάνεται με κόστος τις δυνητικά μεγάλες διαφορές στους ρυθμούς δεδομένων μεταξύ των χρηστών. Στην ακραία περίπτωση, που ο χρήστης βρίσκεται στα όρια της κυψέλης με ανεπαρκής συνθήκες καναλιού ενδέχεται να μην του επιτραπεί η μετάδοση σε όλους.

Επίσης μπορούν να προβλεφθούν στρατηγικές μεταξύ της greedy-filling και της max-C/I. Για παράδειγμα, διαφορετικές στρατηγικές αναλογικού - δικαίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη συμπεριληφθέντος συντελεστή στάθμισης για κάθε χρήση, ο οποίος να είναι ανάλογος του λόγου των στιγμιαίων και μέσων τιμών του ρυθμού δεδομένων στο αναλόγιο greedy-filling.

Οι παραπάνω στρατηγικές χρονοπρογραμματισμού προϋποθέτουν τη γνώση των στιγμιαίων συνθηκών της ραδιοζεύξης. Στις περιπτώσεις που στο χρονοπρογραμματιστή δεν είναι διαθέσιμη κάποια πληροφορία όσον αφορά την ποιότητα της ραδιοζεύξης του ανερχόμενου συνδέσμου, χρησιμοποιείται ο χρονοπρογραμματισμός round-robin. Παρόμοια με την κατερχόμενη ζεύξη, ο χρονοπρογραμματισμός round-robin προϋποθέτει τερματικά που αναλαμβάνουν τη μετάδοση εκ περιτροπής, δημιουργώντας μια λειτουργία που μοιάζει περίπου με αυτής της TDMA με ορθογωνιότητα μεταξύ των χρηστών στο πεδίο του χρόνου. Μολονότι ο χρονοπρογραμματισμός round-robin είναι απλός, απέχει από τη βέλτιστη στρατηγική χρονοπρογραμματισμού.

Ωστόσο, η ισχύς εκπομπής ενός τερματικού είναι περιορισμένη με αποτέλεσμα να απαιτείται επιπλέον μερισμός των πόρων της ανερχόμενης ζεύξης στο πεδίο της συχνότητας / κώδικα. Αυτό το γεγονός έχει αντίκτυπο στις αποφάσεις χρονοπρογραμματισμού. Για παράδειγμα, τα τερματικά τα οποία βρίσκονται μακριά από το σταθμό βάσης τυπικά λειτουργούν στην περιοχική περιορισμένης ισχύος. Επομένως, για ένα τερματικό που βρίσκεται μακριά από το σταθμό βάσης, η αύξηση του εύρους ζώνης δε θα οδηγήσει στην αύξηση του ρυθμού δεδομένων και είναι προτιμώτερη η εκχώρηση ενός μικρού μέρους του εύρους ζώνης στο συγκεκριμένο τερματικό και το υπόλοιπο να εκχωρηθεί στα άλλα τερματικά. Σε αντίθεση με τα τερματικά που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης όπου η αύξηση του εύρους ζώνης θα επιφέρει αύξηση του ρυθμού δεδομένων [18].

2.10.3 Χρονοπρογραμματισμός εξαρτώμενος από το κανάλι στο πεδίο της συχνότητας

Οι διακυμάνσεις του καναλιού στο πεδίο του χρόνου μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος με την εφαρμογή του εξαρτώμενου από το κανάλι χρονοπρογραμματισμού σε συνδυασμό με το δυναμικό έλεγχο ρυθμού. Ωστόσο, εάν ο χρονοπρογραμματιστής έχει πρόσβαση στο πεδίο της συχνότητας μέσω της μετάδοσης OFDM, τόσο ο χρονοπρογραμματισμός όσο και η προσαρμογή συνδέσμου μπορούν να υφίστανται στο πεδίο της συχνότητας.

Η προσαρμογή συνδέσμου στο πεδίο της συχνότητας, υποδηλώνει ότι, η γνώση σχετικά με τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού και στο πεδίο της συχνότητας, αυτό συνεπάγεται γνώση σχετικά με την εξασθένιση, καθώς και γνώση όσον αφορά το επίπεδο θορύβου/παρεμβολής κάθε υποφερόντος OFDM, έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς / ο ρυθμός δεδομένων κάθε φέροντος OFDM να μπορεί να προσαρμόζεται μεμονωμένα με σκοπό τη βέλτιστη αξιοποίηση.

Παρόμοια, ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός στο πεδίο της συχνότητας, υποδηλώνει ότι, με βάση τη γνώση σχετικά με τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού και στο πεδίο της συχνότητας, γίνεται χρήση διαφορετικών υποφερόντων για τη μετάδοση από / προς διαφορετικά τερματικά. Τα κέρδη του χρονοπρογραμματισμού από την αξιοποίηση των διακυμάνσεων στο πεδίο της συχνότητας είναι παρόμοια με εκείνα που λαμβάνονται από τις διακυμάνσεις στο πεδίο του χρόνου. Προφανώς, σε περιπτώσεις που η ποιότητα του καναλιού διαφέρει σημαντικά με τη συχνότητα, καθώς η ποιότητα του καναλιού ποικίλλει αργά μεταβάλλεται μόνο με το χρόνο, ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα του συστήματος. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας κατάστασης είναι ένα ενδοκυκλικό σύστημα ευρείας ζώνης με χαμηλή κινητικότητα, όπου η ποιότητα διαφέρει αργά μόνο με το χρόνο [18].

2.10.4 Χρονοπρογραμματισμός και συμπεριφορά κίνησης

Σε συστήματα χαμηλού φόρτου υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού. Δηλαδή, όταν ένας χρήστης ή σε μερικές περιπτώσεις και περισσότεροι χρήστες έχουν στο σταθμό βάσης σε κάθε στιγμή του χρονοπρογραμματισμού δεδομένα προς μετάδοση. Οι διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού είναι κυρίως σε υψηλό φόρτο. Ωστόσο, όχι μόνο ο φόρτος αλλά και η κυκλοφοριακή συμπεριφορά επηρεάζει την συνολική απόδοση του χρονοπρογραμματισμού.

Ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις της ραδιοποιότητας. Γενικά, η μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη στην ποιότητα των υπηρεσιών είναι επιθυμητή σε κάποιο βαθμό και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του χρονοπρογραμματιστή. Ωστόσο, καθώς η ρυθμοαπόδοση του συστήματος μειώνεται επιβάλλεται περισσότερη δικαιοσύνη, δηλαδή είναι απαραίτητος ένας ισολογισμός (trade-off) μεταξύ της δικαιοσύνης και της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος. Στη διαδικασία του trade-off είναι σημαντικόν να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, δεδομένου ότι έχουν σημαντική επίδραση στο trade-off μεταξύ της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος και της ποιότητας των υπηρεσιών.

Για να φανερα αυτό, μελετώνται τρεις διαφορετικοί χρονοπρογραμματιστές κατερχόμενης ζεύξης:

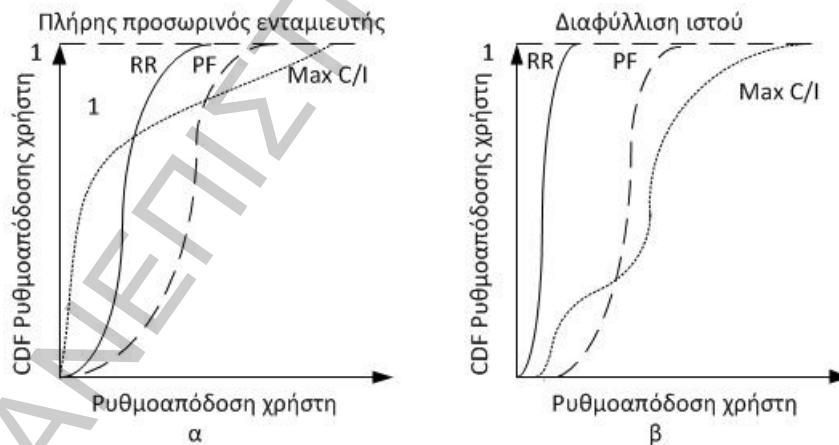
- i. Χρονοπρογραμματιστής round-robin, όπου δε λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες του καναλιού.
- ii. Χρονοπρογραμματιστής αναλογικής δικαιοσύνης, όπου αξιοποιούνται οι βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις, διατηρώντας παράλληλα το μακροπρόθεσμο μέσο ρυθμό δεδομένων.
- iii. Χρονοπρογραμματιστής μέγιστης παρεμβολής μεταξύ φερουσών (max-C/I), όπου χρονοπρογραμματίζεται ο χρήστης με την καλύτερη στιγμιαία ποιότητα καναλιού με σχετικούς και απόλυτους όρους.

Στην περίπτωση ενός πλήρη προσωρινού ενταμιευτή, όπου υπάρχουν πάντα διαθέσιμα δεδομένα στο σταθμό βάσης για όλα τα κινητά τερματικά της κυψέλης, ο χρονοπρογραμματιστής max-C/I θα έχει πολύ χαμηλό ή και καθόλου αποτέλεσμα στη ρυθμοαπόδοση των χρηστών με

χαμηλή μέση ποιότητα καναλιού που βρίσκονται στα όρια των κυψελών. Ο λόγος είναι ότι, στο χρονοπρογραμματισμό max-C/I όλοι οι πόροι για μετάδοση εκχωρούνται στο τερματικό, του οποίου οι συνθήκες καναλιού υποστηρίζουν τον υψηλότερο ρυθμό δεδομένων. Ο χρήστης που βρίσκεται στα όρια της κυψέλης θα χρονοπρογραμματιστεί μόνο στη περίπτωση περιπτώσεων (εξαιτίας μιας βαθιάς διάλειψης του χρήστη που βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης) που ο χρήστης στα όρια της κυψέλης συναντάει ευνοϊκότερες συνθήκες από το χρήστη που βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης. Αντίθετα, ένας χρονοπρογραμματιστής αναλογικού-δικαίου θα διασφαλίσει κάποιο βαθμό δικαιοσύνης επιλέγοντας το χρήστη που υποστηρίζει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων σε σχέση με το μέσο ρυθμό δεδομένων του. Επομένως, οι χρήστες τείνουν να είναι χρονοπρογραμματισμένοι στις κορυφές διάλειψης, ανεξάρτητα από την ποιότητα. Έτσι, θα χρονοπρογραμματιστούν οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια των κυψελών με αποτέλεσμα να υφίσταται κάποιος βαθμός δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών.

Στην περίπτωση των ριπταίων πακέτων δεδομένων, η κατάσταση είναι διαφορετική. Οι προσωρινοί ενταμιευτές των χρηστών είναι πεπερασμένοι και σε πολλές περιπτώσεις, άδεια. Παραδείγματος χάριν, μια ιστοσελίδα έχει συγκεκριμένο μέγεθος και μετά τη μετάδοσή της, δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα για αποστολή προς το τερματικό, έως ότου ο χρήστης αιτηθεί μια νέα σελίδα επιλέγοντας κάποιο υπέρσύνδεσμο. Στην προκειμένη περίπτωση, ο χρονοπρογραμματιστής max-C/I μπορεί ακόμη να προσφέρει ένα ορισμένο βαθμό δικαιοσύνης. Μόλις, αδειάσει ο προσωρινός ενταμιευτής του χρήστη με την υψηλότερη παρεμβολή μεταξύ φερουσών (C/I), θα χρονοπρογραμματιστεί ένας άλλος χρήστης με μη κενό προσωρινό ενταμιευτή που θα έχει την υψηλότερη παρεμβολή μεταξύ φερουσών και ίσως καθεξής. Αυτή είναι η διαφορά μεταξύ του πλήρη προσωρινού ενταμιευτή και της κίνησης διαφύλλισης ιστού όπως φαίνεται στο Σχήμα 26. Ο χρονοπρογραμματιστής αναλογικού-δικαίου έχει παρόμοια απόδοση και στις δύο περιπτώσεις.

Προφανώς, ο βαθμός δικαιοσύνης που εισάγεται από τις ιδιότητες της κυκλοφορίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πραγματική κίνηση. Ένας σχεδιασμός πραγματοποιείται με ορισμένες παραδοχές που μπορεί να είναι λιγότερο επιθυμητές σε ένα πραγματικό δίκτυο όπου το πρότυπο κυκλοφορίας μπορεί να διαφέρει από τις παραδοχές που έγιναν κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Επομένως, ο βασισμός αποκλειστικά στις ιδιότητες της κυκλοφορίας δεν είναι μια καλή στρατηγική. Τέλος, ο χρονοπρογραμματισμός δεν θα πρέπει να σχεδιάζεται μόνο με βάση την περίπτωση του πλήρη προσωρινού ενταμιευτή [30].



Σχήμα 26 Απεικόνιση της αρχής συμπεριφοράς διαφορετικών στρατηγικών προγραμματισμού α) για πλήρη προσωρινού ενταμιευτή και β) για το μοντέλο κίνησης διαφύλλισης ιστού [30]

3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

Τα συστήματα είναι βασισμένα στην *τεχνική* πολλαπλής πρόσβασης OFDMA δεν επηρεάζονται από την παρεμβολή των πολυπλεγμένων χρηστών που βρίσκονται εντός της κυψέλης όσο επιτυγχάνεται επαρκής της συγχρονισμός συχνότητας. Ωστόσο, όταν πρόκειται για την εφαρμογή της OFDMA σε ένα κυψελικό περιβάλλον, η διακυψελική παρεμβολή μεταξύ γειτονικών κυψελών μπορεί να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση στην απόδοση του συστήματος. Αυτό το γεγονός σχετίζεται περισσότερο με την απόδοση των χρηστών, οι οποίοι λειτουργούν στα όρια της κυψέλης.

Οι τεχνικές συντονισμού διακυψελικής παρεμβολής, για τα πολυκυψελικά συστήματα συμπεριλαμβανομένων των: Global System Mobile Communications (GSM), Enhanced General Packet Radio Service (EGPRS), Enhanced Data Rates GSM Evolution (EDGE), και του Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), αποτέλεσαν καίριο θέμα έρευνας, καθώς τα συστήματα αυτά άρχισαν να κερδίζουν δημοτικότητα.

Το LTE βασίζεται σε ένα νέο σύστημα ραδιοδιεπαφής. Το σύστημα αυτό είναι βασισμένο σε μια επίπεδη αρχιτεκτονική, όπου οι σταθμοί βάσης λειτουργούν με ένα κατενεμημένο τρόπο και δεν ελέγχονται από κάποιο κεντρικό κόμβο, όπως ένα σταθμό βάσης ελέγχου (Base Station Controller) ή από ένα ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης (Radio Network Controller).

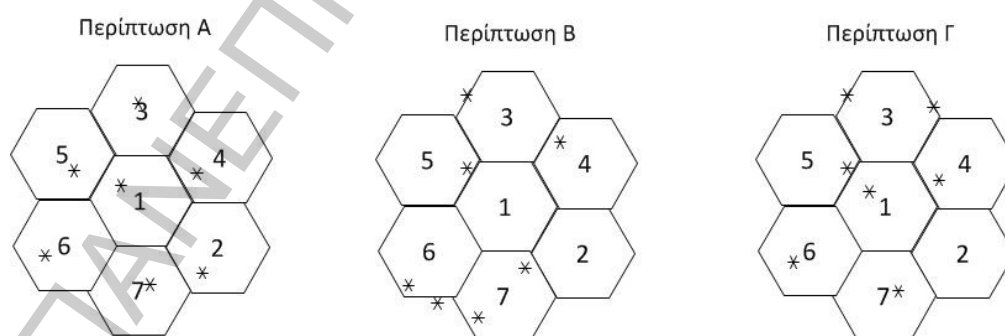
Οι υψηλοί στόχοι επιδόσεων, το νέο φυσικό επίπεδο και η αρχιτεκτονική novel flat ("no RNC") αποτέλεσαν το έναυσμα για ένα νέο κύκλο μελετών – τόσο εντός της ακαδημαϊκής κοινότητας όσο και της βιομηχανίας, γενικά για τη διαχείριση των ραδιοπόρων και ειδικότερα για τη διαχείριση των παρεμβολών. Μια σειρά σημαντικών εργασιών, διατύπωσαν το πρόβλημα του συντονισμού της διακυψελικής παρεμβολής ως ένα έργο βελτιστοποίησης, όπου στόχος του είναι η μεγιστοποίηση της πολυκυψελικής ρυθμοαπόδοσης που υπόκειται σε περιορισμένη απόδοση ενέργειας, σε περιορισμό των ενδοκυψελικών μεταδόσεων, της απόδοσης, της ορθότητας των στόχων ή των ελάχιστων απαιτήσεων ρυθμού δικτύου. Ενώ τα μοντέλα βελτιστοποίησης δίνουν μια εικόνα για τα ανώτερα όρια των επιδόσεων ICIC, στην πραγματικότητα η υλοποίηση αυτών των σχεδόν βέλτιστων μηχανισμών συνήθως δεν είναι εφικτή ή είναι οικονομικότερη ως προς τα πραγματικά συστήματα. Πράγματι οι σημερινοί μηχανισμοί ICIC (Inter-cell Interference Coordination) που έχουν μελετηθεί από το 3GPP κατασκευάζονται με αισθητά χαμηλότερη ευρετική πολυπλοκότητα. Από την πλευρά του σχεδιασμού του συστήματος, οι μηχανισμοί ICIC χωρίς (ή με αργή) διακυψελική επικοινωνία με βάση κάποιο προ-ρυθμισμένο κανόνα κατανομής πλοκάδων μεταφοράς OFDM είναι ιδιαίτερα

ελκυστικοί. Παράλληλα σε μια άλλη σειρά εργασιών πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει τα λεγόμενα μοντέλα συγκρούσεων όπου αναλύουν το ρυθμό σφάλματος των bit/packet και τη ρυθμοαπόδοση πολυκυψελικών συστημάτων, υποθέτοντας συνήθως ασυντόνιστη (τυχαία ή εξαρτώμενη από το κανάλι) κατανομή των υποφορέων στις διαφορετικές κυψέλες των πολυκυψελικών συστημάτων. Κατά τη διαδικασία της προτυποποίησης, το 3GPP έχει μελετήσει διεξοδικά ένα εύρος ελκυστικών και εφικτών αλγορίθμων συντονισμού παρεμβολής με τη χρήση προηγμένων προσομοιώσεων. Το αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από τη βιομηχανία είναι μια βαθιά κατανόηση των tradeoffs σε συνδυασμό με τις τεχνικές συντονισμού παρεμβολής. Δηλαδή μια ευρεία συναίνεση όσον αφορά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο πρέπει να λειτουργούν τα πρακτικά συστήματα ICIC. Καθώς, και μια ισχυρή υποστήριξη του προτύπου LTE, που επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων τη ρύθμιση των μηχανισμών ICIC, ώστε να ταιριάζει με το ανάλογο σενάριο ανάπτυξης, με την εκάστοτε κίνηση φορτίου και με τους ανάλογους στόχους απόδοσης [34].

3.1 Αλληλεπίδραση συντονισμού διακυψελικής παρεμβολής, χρονοπρογραμματισμός και έλεγχος ισχύος

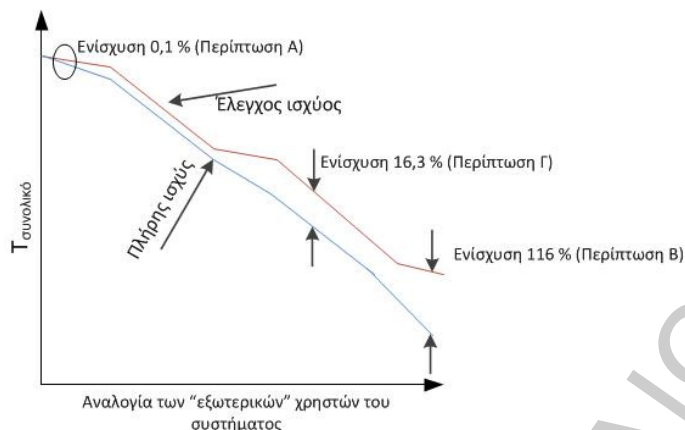
Στα συστήματα OFDMA, η διακυψελική παρεμβολή μπορεί να θεωρηθεί και ως σύγκρουση ανάμεσα στις πλοκάδες πόρων. Σε τέτοια μοντέλα σύγκρουσης, η συνολική απόδοση του συστήματος καθορίζεται από τις πιθανότητες σύγκρουσης και τις επιπτώσεις μιας δεδομένης σύγκρουσης όσο αφορά το SINR (Signal Interference Noise Ratio) που σχετίζεται με τις συγκρουόμενες πλοκάδες πόρων. Επομένως, οι μηχανισμοί ICIC στοχεύουν στη μείωση των πιθανοτήτων σύγκρουσης και στην μετρίαση της υποβάθμισης του SINR που μπορούν να προκαλέσουν τέτοιου είδους συγκρούσεις. Για παράδειγμα, γειτονικές κυψέλες μπορεί να έχουν κάποιες συγκεκριμένες προτιμήσεις κυψέλων, για διαφορετικά υποσύνολα πλοκάδων πόρων, ή γειτονικές κυψέλες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μειωμένη ισχύ για συγκρουόμενες πλοκάδες πόρων.

Για την κατανόηση των πιθανών οφελών ενός τέτοιου διακυψελικού καναλιού ή/και τεχνικών ελέγχου ισχύος, εξετάζουμε τις τρεις περιπτώσεις του 7-κυψελικού συστήματος του Σχήμα 27. Σε αυτό το σύστημα υπάρχει ενιαία εξυπηρέτηση του χρήστη ανά κυψέλη, ο οποίος βρίσκεται εντός της κυψέλης και κοντά στο σταθμό βάσης (Περίπτωση Α), ή στα όρια της κυψέλης (Περίπτωση Β). Στην Περίπτωση Γ κάποιοι χρήστες βρίσκονται εντός και κάποιοι εκτός των ορίων της κυψέλης. Θα υποθέσουμε ότι η ενιαία εξυπηρέτηση χρήστη σε κάθε κελί είναι χρονοπρογραμματισμένη για όλες τις πλοκάδες πόρων, αυτό σημαίνει ότι όλες οι πλοκάδες πόρων της κυψέλης συγκρούονται με πιθανότητα 1 [34].



Σχήμα 27 Οι τρεις περιπτώσεις του σεναρίου, επανασχεδιασμένο από [34]

Το Σχήμα 28 απεικονίζει την συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος χωρίς / με βέλτιστο (διακυψελικό) έλεγχο ισχύος σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις.

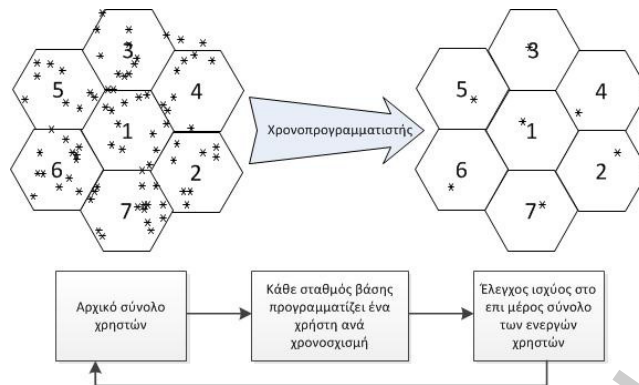


Σχήμα 28 Απεικόνιση του κέρδους για τις τρεις περιπτώσεις στο powercontrol και στο fullpower, επανασχεδιασμένο από [34]

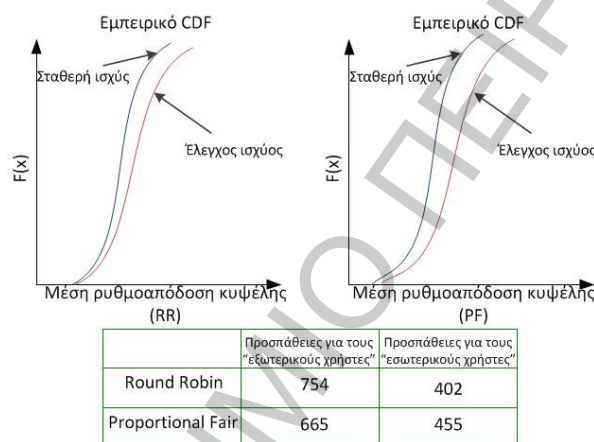
Η συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος ως συνάρτηση του λόγου των εξωτερικών χρηστών απεικονίζεται στο άνω μέρος του Σχήμα 28. Όταν όλοι οι χρήστες βρίσκονται εντός των ορίων της κυψέλης (Περίπτωση Α), ουσιαστικά δεν υπάρχει κέρδος χρησιμοποιώντας τον διακυψελικό έλεγχο ισχύος. Αντίθετα στην Περίπτωση Β, υπάρχει ουσιαστικό κέρδος μειώνοντας την ισχύ (απεικονίζεται η περίπτωση της καθοδικής ζεύξης) σε κάθε πλοκάδα πόρων. Αυτό το απλό παράδειγμα αποδυναμώνει τη χρησιμότητα της πλήρους ισχύος σε όλες τις κυψέλες, μπορεί να είναι το καλύτερο ανάλογα βέβαια και με τις θέσεις των χρηστών.

Σε πιο ρεαλιστικές περιπτώσεις, διαφορετικοί χρήστες χρονοπρογραμματίζονται σε διαφορετικές πλοκάδες πόρων σε κάθε κυψέλη και έτσι το σύνολο των συγκρουόμενων πλοκάδων των πόρων αλλάζει δυναμικά τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα.

Προκειμένου να αξιολογηθεί δυναμικά η επίδοση της ICIC σε αυτή την κατάσταση, ας θεωρήσουμε το παράδειγμα του Σχήμα 29. Οι χρήστες κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή κάλυψης η οποία αποτελείται από επτά κυψέλες. Ο χρονοπρογραμματιστής λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε στιγμή εκπομπής επιλέγεται μόνον ένας χρήστης για μετάδοση ανά κυψέλη. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο χρονοπρογραμματισμένος χρήστης μεταδίδει σε κάθε πλοκάδα πόρου, με αποτέλεσμα κάθε πλοκάδα πόρου να συγκρούεται στο σύστημα μετάδοσης. Έτσι, ουσιαστικά η παρούσα περίπτωση μεσολαβεί μεταξύ της Α και της Β περίπτωσης του προηγούμενου παραδείγματος. Στην περίπτωση του χρονοπρογραμματισμού round-robin οι χρήστες χρονοπρογραμματίζονται ανεξάρτητα από τις στιγμιαίες συνθήκες του καναλιού, καθώς οι χρονοπρογραμματιστές αναλογικής διακαιοσύνης λαμβάνουν υπόψη τις παρελθοντικές συνθήκες καναλιού των χρηστών όπως και την παρελθοντική ρυθμοαπόδοσή τους στο παρελθόν. Στο Σχήμα 30 παρατηρούμε πως το κέρδος ελέγχου ισχύος της διακυψελικής παρεμβολής είναι μικρότερο στην περίπτωση του proportional fair. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αλγόριθμος proportional fair προσπαθεί να αυξήσει την απόδοση κάθε κυψέλης, με τον χρονοπρογραμματίζοντας συχνότερα τους χρήστες εντός της κυψέλης συχνότερα, ο οποίος περιορίζει τη δυνατότητα συντονισμού της διακυψελικής ισχύος σε σύγκριση με τον αλγόριθμο του round-robin. Αυτό το αποτέλεσμα φανερώνει πως τα κέρδη ICIC εξαρτώνται από το χρονοπρογραμματιστή που χρησιμοποιείται. Ο εξαρτώμενος από το κανάλι χρονοπρογραμματισμός τείνει να περιορίσει το ενδεχόμενο όφελος του διακυψελικού συντονισμού [34].



Σχήμα 29 Σύστημα εξυπηρέτησης πολλαπλών χρηστών, επανασχεδιασμένο από Error! Unknown switch argument.



Σχήμα 30 Η πιθανότητα κατανομής της ρυθμοαπόδοσης του συνολικού συστήματος για τους αλγόριθμους roundrobin και proportionalfair για χωρίς / με ενδοκυψελικό έλεγχο ισχύος, επανασχεδιασμένο από [34]

3.2 Συμβιβασμοί του συντονισμού διακυψελικής παρεμβολής

Τόσο από τη θεωρητική πλευρά όσο και από την πλευρά της προτυποποίησης, ένα καίριο ζήτημα είναι ο καθορισμός για το τι πληροφορία και σε ποια χρονοκλίμακα θα αναγγελθεί από τους κινητούς σταθμούς (Mobile Stations, MS) και ποιο μέρος της πληροφορίας θα διατεθεί στους σταθμούς βάσης (κατανομή πληροφορίας) είτε μέσω επικοινωνίας μεταξύ των σταθμών βάσης είτε μέσω της λειτουργίας και της συντήρησης του υποσυστήματος, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συνολικού συστήματος (δηλαδή του πολυκυψελικού). Αυτό είναι ένα μη τετριμμένο ζήτημα, διότι πρέπει να αντιμετωπίσει τους εξής συμβιβασμούς:

- Όπως είδαμε προηγουμένως, ο συντονισμός μεταξύ σταθμών βάσης μπορεί να αυξήσει τη συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος εις βάρος της (πιθανώς πολύ εκτεταμένης) οπισθοδοτικής επικοινωνίας και της ενδοκομβικής επεξεργασίας.
- Περιορίζοντας τη χρήση μερικών πλοκάδων πόρων OFDM μειώνεται ή εξαλείφεται το ποσοστό συγκρούσεων μεταξύ των πλοκάδων πόρων, εις βάρος των υπο-αξιοποίησης ραδιοπόρων, χάνοντας ένα μεγάλο μέρος του διαφορισμού πολλαπλών χρηστών σε ένα περιβάλλον επιλεκτικής συχνότητας. Αυτό σημαίνει πως, η αποφυγή των διακυψελικών συγκρούσεων μπορεί να απαγορεύσει τη χρήση υποφερόντων ή των πλοκάδων πόρων, που στιγμιαία βρίσκονται σε καλές συνθήκες διάλωσης.
- Η μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης συχνά οδηγεί σε αθέμιτη κατανομή των πόρων, οι οποίοι με τη σειρά τους μπορούν να οδηγήσουν σε παραβιάσεις της ποιότητας των υπηρεσιών.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η πρώτη περίπτωση συμβιβασμού, έχει προταθεί να γίνει διάκριση μεταξύ δύο χρονικών κλιμάκων. Η κατανομή πόρων στο επίπεδο OFDM frame, είναι υπεύθυνη για την κατανομή των πόρων και της ισχύος όσο αφορά τη διάρκειά του επόμενου διαστήματος χρονοπρογραμματισμού. Συνεπώς το πλαίσιο είναι βασική μονάδα χειρισμού των πόρων στο επίπεδο του σταθμού βάσης και ενδείκνυται για τον ενδοκυψελικό προγραμματισμό και την κατανομή των πόρων. Αντίθετα ένα superframe OFDM, που αποτελείται από ένα αριθμό διαδοχικών πλαισίων, ενδείκνυται για το διακυψελικό συντονισμό των πόρων συμπεριλαμβανομένης της αποφυγής σύγκρουσης μεταξύ των πόρων και του διακυψελικού ελέγχου ισχύος.

Ο δεύτερος συμβιβασμός μπορεί να αντιμετωπιστεί, συγκρίνοντας ένα κανάλι με άγνωστη κατανομή πόρων με μια ευκαιριακή κατανομή στο επίπεδο του σταθμού βάσης (frame), με ή και χωρίς διακυψελικό συντονισμό των πλοκάδων των πόρων. Ο συνδυασμός αυτών των δύο πτυχών, (διακυψελικός συντονισμός σε επίπεδο superframe και καιροσκοπικός χρονοπρογραμματισμός σε επίπεδο πλαισίου) δημιουργεί διαφορετικές στρατηγικές κατανομής των πόρων. Όλες υποστηρίζουν επαναχρησιμοποίηση συχνότητας με συντελεστή ένα, σύμφωνα με την καλά παγιωμένη άποψη ότι τα στατικά συστήματα επαναχρησιμοποίησης είναι κατώτερα από τις δυναμικές προσεγγίσεις ICIC που επιτρέπουν την πλήρη επαναχρησιμοποίηση του κατανεμηθέντος φάσματος.

Τέλος ο τρίτος συμβιβασμός, μπορεί να αντιμετωπιστεί επιτρέποντας ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο αριθμό πλοκάδων πόρων (r_{min} και r_{max} αντίστοιχα) να συνδέεται με κάθε χρήστη και απαιτώντας ότι ο αριθμός των πλοκάδων των πόρων που διατίθενται για κάθε χρήστη να πρέπει να βρίσκεται μεταξύ αυτών των τιμών. Αυτή η προσέγγιση αναδεικνύει ένα πρόβλημα όσον αφορά τη μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης, ότι ακόμη και στους πιο άτυχους χρήστες θα πρέπει να χορηγείται ένας συγκεκριμένος ελάχιστος αριθμός πλοκάδων πόρων (θεωρώντας τον κατώτατο ρυθμό διαμόρφωσης και κωδίκευσης), δηλαδή ένα ελάχιστος εγγυημένος ρυθμός διόδων (Guaranteed Bit Rate, GBR) [34].

3.3 Τεχνικές μετρίασης διακυψελικής παρεμβολής

Η μετάδοση των συμβόλων πληροφορίας γίνεται διαδοχικά και όχι παράλληλα διατηρώντας την ορθογωνική μετάδοση μεταξύ των χρηστών εντός της κυψέλης. Συνεπώς δεν υπάρχει διακυψελική παρεμβολή στον ανερχόμενο σύνδεσμο παρά μόνο στον κατερχόμενο. Εφόσον ολόκληρο ή μέρος του φάσματος επαναχρησιμοποιείται σε γειτονικές κυψέλες, υπάρχει διακυψελική παρεμβολή, ειδικά όταν δύο ή περισσότεροι χρήστες βρίσκονται στο όριο γειτονικών κυψελών χρησιμοποιώντας την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Η διακυψελική παρεμβολή περιορίζει την απόδοση του συστήματος.

Συνήθως, στα κυψελικά συστήματα, η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας εφαρμόζεται με σκοπό την εγγύηση της απόδοσης στα όρια της κυψέλης. Παρόλ' αυτά η ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή των τεχνικών CDMA στα ασύρματα συστήματα δεύτερης και τρίτης γενιάς απέδειξε την ανωτερότητα της καθολικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας όσον αφορά τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας της ραδιοδιεπαφής. Ο ρόλος των τεχνικών μετρίασης της διακυψελικής παρεμβολής είναι καθοριστικός.

Ο συντονισμός της διακυψελικής παρεμβολής επιτρέπει στις γειτονικές κυψέλες τη διαχείριση του φάσματος με συντονισμένο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διακυψελική παρεμβολή. Οι τεχνικές μείωσης διακυψελικής παρεμβολής μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: τυχαιοποίησης, ακύρωσης και συντονισμού της διακυψελικής παρεμβολής. Η τεχνική της τυχαιοποίησης έχει ως στόχο την τυχαιοποίηση της παρεμβολής ώστε να προβλέψει την εμφάνιση των χειρότερων περιπτώσεων παρεμβολής. Παραδείγματα τυχαιοποίησης της παρεμβολής είναι η άμεση εξάπλωση (Direct Spread, DS) της φασματικής εξάπλωσης που χρησιμοποιείται στα δίκτυα CDMA και η αναπήδηση συχνότητας που χρησιμοποιείται στο δίκτυο GSM/GPRS. Η τεχνική της ακύρωσης εφαρμόζει ορισμένες τεχνικές που ανήκουν στο φυσικό επίπεδο σε παρεμβαίνοντες πομπούς (interferers) μηδενικής δυναμικής. Για παράδειγμα, στις συστοιχίες προσαρμοστικών κεραιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν μερικοί βαθμοί ελευθερίας για την ακύρωση των παρεμβολών. Εναλλακτικά οι ισχυροί παρεμβαίνοντες πομποί μπορούν να εντοπιστούν και στη συνέχεια να αφαιρεθούν από το λαμβανόμενο σήμα, όπως γίνεται στο δέκτη διαδοχικής εξάλειψης παρεμβολών (Successive

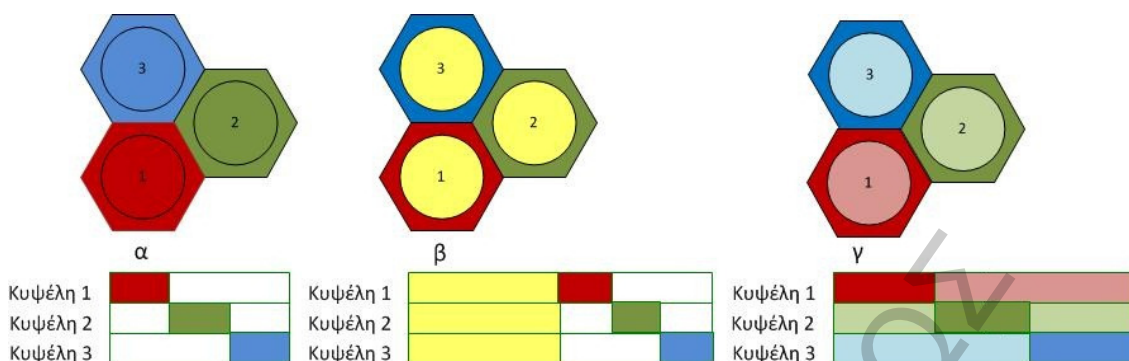
Interference Cancellation, SIC). Ενώ στο συντονισμό της διακυψελικής παρεμβολής, η εκχώρηση των ραδιοπόρων είναι συντονισμένη μεταξύ των γειτονικών κυψελών, έτσι ώστε να εξαληφθούν οι εκχωρήσεις που θα προκαλούσαν ισχυρή παρεμβολή μεταξύ των αυτών των κυψελών. Συνεπώς, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους, ο μηχανισμός συντονισμού της διακυψελικής παρεμβολής είναι μια τεχνική διαχείρισης ραδιοπόρων (Radio Resource Management, RRM).

Γενικά, υπάρχει ένα trade-off μεταξύ του συνολικού δικτύου ή της ρυθμοαπόδοσης και των ρυθμών δεδομένων που εξυπηρετούν τους χρήστες που βρίσκονται στην κεντρική περιοχή της κυψέλης. Η εύρεση ενός απλού και ταυτόχρονα αποτελεσματικού τρόπου για τον έλεγχο αυτού του trade-off είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Η ραδιοτεχνολογία LTE περιλαμβάνει μια πληθώρα μηχανισμών για τον έλεγχο της παρεμβολής μεταξύ γειτονικών κυψελών. Τα προτυποποιημένα συστήματα ICIC βασίζονται κατά κύριο λόγο στο μεριζόμενο πεδίο συχνότητας μεταξύ των κυψελών και στη προσαρμογή των ισχύων μετάδοσης. Η διεπαφή X2 που συνδέει τους eNodeBs περιλαμβάνει προτυποποιημένη σηματοδότηση για τη μεταφορά της παρεμβολής και τον χρονοπρογραμματισμό της πληροφορίας.

Ανεξάρτητα αν εφαρμόζεται η τυχαίοποίηση, η καθολική επαναχρησιμοποίηση είναι αυτοτελώς περιορισμένη παρεμβολικά και η φασματική απόδοση των χρηστών που λειτουργούν στα όρια της κυψέλης με μοναδιαία επαναχρησιμοποίηση είναι φτωχή. Η ρυθμοαπόδοση αυτών των απομακρυσμένων χρηστών μπορεί να βελτιωθεί είτε μέσω της εκχώρησης περισσότερης ισχύος (έλεγχος ισχύος), είτε μέσω της εκχώρησης μεγαλύτερου εύρους ζώνης (χρονοπρογραμματισμός). Στην πραγματικότητα αυτές οι δύο προσεγγίσεις είναι ισοδύναμες όσον αφορά τους απομακρυσμένους χρήστες, καθώς με χαμηλό σηματοθροβικό λόγο ο ρυθμός είναι ανάλογος της ισχύος και του εύρους ζώνης. Στην αντίθετη περίπτωση, όσον αφορά τους μη απομακρυσμένους χρήστες με καλό σηματοθροβικό λόγο ο ρυθμός αυξάνεται λογαριθμικά με την ισχύ αλλά γραμμικά με το εύρος ζώνης. Η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας μπορεί να μετατοπίσει την κατανομή του σηματοθροβικού προς υψηλότερες τιμές. Αυτό το γεγονός είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό ως προς την αύξηση του ρυθμού των απομακρυσμένων χρηστών. Όμως, για τους μη απομακρυσμένους χρήστες η μείωση του εύρους ζώνης που επιβάλλεται από ένα στατικό σύστημα επαναχρησιμοποίησης, υπερτερεί κατά πολύ από οποιοδήποτε κέρδος που οφείλεται στη βελτίωση του σηματοθροβικού λόγου. Το Σχήμα 31(α) απεικονίζει ένα στατικό σύστημα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.

Η κλασματική επαναχρησιμοποίηση (Fractional Frequency Reuse, FFR) επιχειρεί να αντισταθμίσει τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνικών με τη μέθοδο επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας για τους απομακρυσμένους χρήστες και με τη μέθοδο μοναδιαίας επαναχρησιμοποίησης για τους μη απομακρυσμένους χρήστες. Έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές της κλασματικής επαναχρησιμοποίησης. Με την τεχνική FFR Σχήμα 31(β), το συνολικό διαθέσιμο φάσμα συχνότητων διαχωρίζεται σε δύο ζώνες. Η πρώτη ζώνη υποστηρίζει μοναδιαία επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και εκχωρείται στους χρήστες που βρίσκονται στην κεντρική περιοχή της κυψέλης, σε όλες τις κυψέλες. Η δεύτερη ζώνη διαιρείται περαιτέρω σε ένα πρότυπο στατικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας μεταξύ των κυψελών και οι πόροι εκχωρούνται στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης.

Μια άλλη παραλλαγή είναι η λεγόμενη προσέγγιση της ήπιας επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (Soft Frequency Reuse, SFR), Σχήμα 31(γ). Στην περίπτωση αυτή, το διαθέσιμο φάσμα συχνότητων διαχωρίζεται σε σύνολα υποζωνών, όπου σε κάθε κυψέλη εκχωρείται μια "επιλεγμένη" υποζώνη σύμφωνα με το πρότυπο επαναχρησιμοποίησης. Σε όλες τις κυψέλες εξακολουθεί να επιτρέπεται η χρήση κάθε υποζώνης, παρόλο που για κάθε κυψέλη επιτρέπεται η υψηλότερη ισχύς για την επιλεγμένη υποζώνη της. Οι πόροι στην επιλεγμένη υποζώνη εκχωρούνται ξανά στους απομακρυσμένους χρήστες ενώ στους μη απομακρυσμένους χρήστες εκχωρούνται πόροι στις μη επιλεγμένες υποζώνες. Με αυτό τον τρόπο, ένας μη απομακρυσμένος χρήστης θα είναι ομοδιαυλικός με ένα απομακρυσμένο χρήστη της γειτονικής κυψέλης. Γενικά, η SFR θα πρέπει να παρουσιάζει καλύτερη φασματική απόδοση απ' ό,τι η FFR, καθώς επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση της επιλεγμένης υποζώνης μιας κυψέλης από μη απομακρυσμένους χρήστες μιας γειτονικής κυψέλης. Ωστόσο, για την SFR, τα επίπεδα ισχύος για τις διαφορετικές υποζώνες θα πρέπει να αντισταθμίζονται ώστε να περιορίζεται η παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών κυψελών σε αποδεκτά επίπεδα.



Σχήμα 31 Τα τρία πρότυπα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, επανασχεδιασμένο από [35]

Για την υλοποίηση των δύο αυτών τεχνικών, γενικά έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση των χρηστών της κυψέλης σε δύο ομάδες, στην ομάδα CEUs (απομακρυσμένοι χρήστες – όρια κυψέλης) και στην ομάδα CCUs (μή απομακρυσμένοι χρήστες – κέντρο κυψέλης) με βάση την πληροφορία της γεωμετρίας ή της θέσης. Στη συνέχεια ακολουθεί η κατανομή των χρηστών σε διαφορετικές ζώνες μεκατάλληλη επαναχρησιμοποίηση ή/ και μεκατάλληλα επίπεδα ισχύος. Η εκχώρηση των πόρων και οι μεταδόσεις των διαφορετικών ελέγχονται από τους σταθμούς βάσης που τους εξυπηρετούν για τον αποτελεσματικό συντονισμό της παρεμβολής.

Ωστόσο, η κλασματική επαναχρησιμοποίηση συνεπάγεται αρκετούς περιορισμούς στα πρακτικά συστήματα. Πρώτον, η διαίρεση των χρηστών και των πόρων σε υποσύνολα μειώνει την απόδοση συγκέντρωσης (trunking efficiency) δεδομένου ότι το ποσοστό των CEUs και των CCUs ποικίλει δυναμικά και ποτέ δεν ταιριάζει τέλεια με τη διαίρεση των πόρων μεταξύ των υποζωνών. Δεύτερον, η διαίρεση των ζωνών συχνότητας σε μικρότερες υποζώνες μειώνει το διαφορισμό της συχνότητας ιδίως για τους απομακρυσμένους χρήστες. Τρίτον, κάθε μία από αυτές τις τεχνικές επαναχρησιμοποίησης δεν είναι πολύ ευέλικτη στην προσαρμογή των ποικίλων τύπων φόρτου (π.χ. ανισορροπίες μεταξύ CEUs και CCUs ή μεταξύ διαφορετικών γειτονικών κυψελών) επομένως το πρότυπο επαναχρησιμοποίησης θα πρέπει να αναδιαρθρώνεται κάθε φορά που εισάγεται μια κυψέλη στο σύστημα [35].

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα βήματα που υλοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθοδολογίας που ακολουθεί το τεχνολογικό πρότυπο LTE. Η μεθοδολογία όσο αφορά το πρώτο μέρος της διαδικασίας αποστολής δεδομένων στην κάτω ζεύξη απαρτίζεται από τα παρακάτω κύρια στάδια: περίπλεξη για την τυχαιοποίηση των παρεμβολών που τις προκαλούν γειτονικές κυψέλες και εν συνεχεία εφαρμογή σχήματος διαμόρφωσης με σκοπό την αντικατάσταση των διφύων με μιγαδικές ακολουθίες. Ακολουθεί η απεικόνιση των ακολουθιών σε ρεύματα πληροφορίας. Επόμενο βήμα είναι η προκωδίκευση χωρικής πολυπλεξίας των συμβόλων σε κάθε επίπεδο, ώστε να επιτραπεί η ταυτόχρονη μετάδοση δεσμών από τις θύρες των κεραιών. Σειρά έχει η απεικόνιση των συμβόλων για κάθε θύρα της κεραιάς σε στοιχεία πόρων. Τέλος, ακολουθεί η δημιουργία του μιγαδικού σήματος OFDM για την ανθεκτικότητα του σήματος στη διασπορά καθυστέρησης, καθώς και η εισαγωγή του κυκλικού προθέματος για την αποφυγή υψηλής διασυμβολικής παρεμβολής.

Στη συνέχεια δημιουργείται το κανάλι απ' όπου και θα μεταδοθεί η πληροφορία που διακινείται από το σταθμό βάσης προς το κινητό τερματικό. Πιο συγκεκριμένα το κανάλι ορίζεται από την έτοιμη συνάρτηση μιμοχαντικής βιβλιοθήκης του Matlab στο οποίο η διάλεια Rayleigh ορίζεται με προτεροθέτηση. Τέλος, το κανάλι εισάγει λευκό γκαουσιανό θόρυβο. Αυτό το στάδιο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως συνδετικός κρίκος του πρώτου με του δεύτερου μέρους της όλης διαδικασίας που ακολουθείται.

Στο δεύτερο μέρος, το οποίο αποτελεί και αντίστροφη διαδικασία του πρώτου, πραγματοποιούνται τα παρακάτω βήματα: αποδιαμόρφωση OFDM και αφαίρεση του κυκλικού προθέματος, αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των στοιχείων των πόρων, η εκτίμηση του καναλιού για τον υπολογισμό του πίνακα της κρουστικής απόκρισης και ο μηδενισμός της διασυμβολικής παρεμβολής με τη χρήση ενός ισοσταθμιστή zero-forcing. Τέλος, ακολουθούν η αντίστροφη απεικόνιση των πόρων, η αποδιαμόρφωση των ακολουθιών από μιγαδικές σε δυαδικές και η αποπερίπλεξη για την πλήρη ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας. Πιο αναλυτικά:

4.1 Αντιστοίχιση πληροφορίας σε Codewords

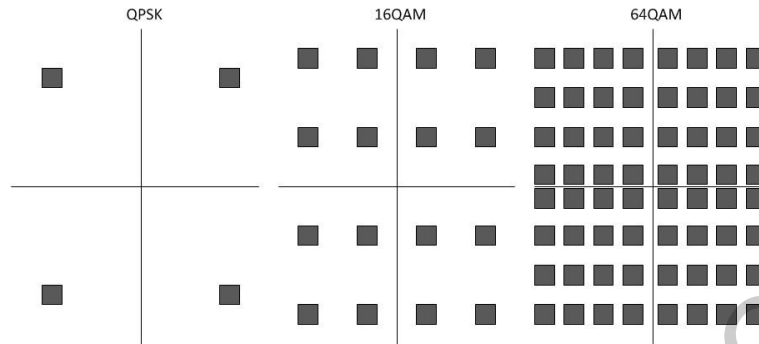
Στην περίπτωση της μετάδοσης πολλαπλών κεραιών (MIMO), μπορεί να υπάρχουν έως και δύο πλοκάδες μεταφοράς δυναμικού μεγέθους, για κάθε χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI), όπου κάθε πλοκάδα μεταφοράς αντιστοιχείται σε μια κωδικολέξη. Όσον αφορά την κατερχόμενη ζεύξη, για κάθε codeword εφαρμόζεται η τεχνική HARQ. Κάθε διεργασία HARQ απαιτεί μια ανατροφοδότηση σηματοδότησης ACK/ NACK στην ανερχόμενη ζεύξη. Ακόμη και στην περίπτωση όπου ο κατερχόμενος σύνδεσμος υφίσταται χωρική πολυπλεξία με έως και τέσσερις κεραιές μετάδοσης, οι κωδικολέξεις θα είναι δύο, με σκοπό την ελάττωση της σηματοδοσίας προς τον ανερχόμενο σύνδεσμο [30]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.1).

4.2 Περίπλεξη

Συνήθως στο LTE χρησιμοποιείται μια συχνότητα για κάθε κυψέλη. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι όλες οι κυψέλες της συστάδας λειτουργούν στις ίδιες μπάντες συχνοτήτων. Για τα κινητά τερματικά που κινούνται στα όρια της κυψέλης αυτό σημαίνει ότι θα προκληθεί παρεμβολή μεγάλου μεγέθους τόσο για την περίπτωση τόσο του κατερχόμενου όσο και του ανερχόμενου συνδέσμου. Με τη βοήθεια της περίπλεξης ελαττώνεται η διακυψελική παρεμβολή καθώς σε κάθε κυψέλη αντιστοιχίζεται μια διαφορετική ακολουθία scrambling (504 συνδυασμοί). Η τεχνική του scrambling στην ουσία μετατρέπει τα διφύατου δέχεται ο scrambler σαν είσοδο σε ψευδοτυχαίες ακολουθίες σύμφωνα με την πρόσθεση modulo 2. Σκοπός λοιπόν είναι η τυχαιοποίηση των παρεμβολών που προκαλούνται από γειτονικές κυψέλες με αποτέλεσμα την πλήρη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων του καναλιού [30]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.2).

4.3 Διαμόρφωση

Στην περίπτωση του σχήματος διαμόρφωσης QPSK (4-QAM), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες εκδόσεις των συστημάτων τρίτης γενιάς (WCDMA και CDMA2000), για την κατερχόμενη ζεύξη, το αλφάβητο διαμόρφωσης αποτελείται από τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις. Αυτές οι καταστάσεις, μπορούν να αναπαρισταθούν ως σημεία σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων όπως στο Σχήμα 32. Μετέσσερις διαφορετικές καταστάσεις σηματοδότησης, η QPSK επιτρέπει τη γνωστοποίηση πληροφορίας μεγέθους έως 2 διφύων κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος συμβόλου-διαμόρφωσης. Με το σχήμα διαμόρφωσης 16QAM είναι διαθέσιμες 16 καταστάσεις. Η χρήση αυτού του σχήματος επιτρέπει τη γνωστοποίηση πληροφορίας μεγέθους έως 4 διφύων κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος συμβόλου – διαμόρφωσης. Το επόμενο σχήμα διαμόρφωσης που υποστηρίζεται από το LTE επιτρέπει τη γνωστοποίηση πληροφορίας μεγέθους έως 6 διφύων κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος συμβόλου – διαμόρφωσης, το γνωστό 64QAM [36]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.3).



Σχήμα 32 Απεικόνιση συμβόλων για την εκάστοτε περίπτωση διαμόρφωσης, επανασχεδιασμένο από[36]

4.4 Απεικόνιση επιπέδων

Όσο αφορά την απεικόνιση της πληροφορίας σε επίπεδα θα πρέπει να αναφερθεί πως στο συγκεκριμένο κομμάτι της διαδικασίας αποστολής, η πληροφορία που ήταν μοιρασμένη σε κωδικολέξεις σε αυτό το σημείο θα χωριστεί σε ρεύματα πληροφορίας. Στην περίπτωση των δύο κεραιών μετάδοσης, ταυτόχρονα μιλάμε και για δύο επίπεδα, η πληροφορία που περιέχεται στην πρώτη κωδικολέξη μεταφέρεται αυτούσια, πλέον ως stream, στο πρώτο επίπεδο άρα στο πρώτο port της κεραιάς. Η πληροφορία που υπάρχει στη δεύτερη κωδικολέξη περνάει αυτούσια στο δεύτερο επίπεδο ταυτόχρονα και στο δεύτερο port της κεραιάς μετάδοσης. Όσο αφορά την περίπτωση των τεσσάρων κεραιών μετάδοσης, εδώ συναντάμε κάτι πιο σύνθετο. Τα μονά στοιχεία της πρώτης κωδικολέξης μεταφέρονται στο πρώτο port της κεραιάς και τα ζυγά της ίδιας κωδικολέξης μεταφέρονται στο δεύτερο port της κεραιάς μετάδοσης. Ακολουθεί ανάλογη διαδικασία για τα στοιχεία της δεύτερης κωδικολέξης. Δηλαδή τα μονά στοιχεία της δεύτερης κωδικολέξης μεταφέρονται στο τρίτο port της κεραιάς και τα ζυγά της δεύτερης κωδικολέξης μεταφέρονται στο τέταρτο port της κεραιάς μετάδοσης[36]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.4).

4.5 Χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόγχου

Αυτή η λειτουργία υποστηρίζει την χωρική πολυπλεξία έως τεσσάρων στρωμάτων που πολυπλέκονται με έως και τέσσερις κεραιές αντίστοιχα, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων. Για να καταστεί δυνατή η εκτίμηση του καναλιού στο δέκτη, ο σταθμός βάσης μεταδίδει ειδικά σήματα αναφοράς κυψέλης (CRS), τα οποία κατανέμονται σε διάφορα στοιχεία πόρων (RE) και σε διάφορες χρονικές θυρίδες. Το κινητό τερματικό στέλνει μια απάντηση σχετικά με την κατάσταση καναλιού, που περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το ποιο προκωδίκευση προτιμάται από το καθορισμένο Codebook. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα ευρετήριο (πίνακας δεικτών προκωδίκευσης, ή PMI) που ορίζεται στο codebook. Για την ακρίβεια είναι ένας πίνακας με πιθανούς υποπίνακες προκωδίκευσης που είναι γνωστός και στις δύο πλευρές[37].

4.5.1 Προκωδίκευση με βάση το Codebook

Στην προκωδίκευση οι πολλαπλές ροές σημάτων ακολουθίας εκπέμπονται από τις κεραιές εκπομπής με ανεξάρτητη και κατάλληλη στάθμιση ανά κεραιά με τέτοιο τρόπο ώστε η ρυθμοαπόδοση του συνδέσμου να μεγιστοποιείται κατά την έξοδο στο δέκτη.

Οι πίνακες προκωδίκευσης μπορούν ή και όχι να εξαρτώνται από το κανάλι. Όσο για το ποιος πίνακας θα χρησιμοποιηθεί, αυτό εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των επαρκώς ακριβών πληροφοριών καναλιού από την πλευρά εκπομπής.

Όταν τα στοιχεία του πίνακα επιλέγονται από ένα πίνακα προκωδίκευσης, τότε η μέθοδος προκωδίκευσης αποκαλείται codebook-based. Είναι ένας από τους κύριους τρόπους μετάδοσης στο LTE και μπορεί να θεωρηθεί ως τρόπος κβάντωσης του καναλιού που με τη σειρά

του διευκολύνει την ανατροφοδότηση των χαμηλού ρυθμού πληροφοριών διαύλου από το δέκτη (UE). Το codebook προκωδικοποίησης έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- **Σταθερός διαιρέτης:** Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζει ότι, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση της αποδοτικότητας της ισχύος του ενισχυτή, όλες οι κεραιές εκπέμπουν με την ίδια ισχύ, ανεξάρτητα από τον πίνακα προκωδικοποίησης που χρησιμοποιείται.
- **Ένθετη ιδιότητα:** Κάθε πίνακας προκωδικοποίησης χαμηλότερης βαθμίδας, είναι ένας υποπίνακας τουλάχιστον ενός πίνακα προκωδικοποίησης ανώτερης βαθμίδας. Αυτό είναι χρήσιμο για την αντιμετώπιση της κατάστασης, όπου ο eNodeB αντικαθιστά την έκθεση αναφοράς του Rank Indication (RI) και αποφασίζει σχετικά με την κλίμακα της μετάδοσης η οποία είναι χαμηλότερη βαθμού από την κλίμακα του καναλιού που προσδιορίστηκε στην έκθεση αναφοράς του RI. Επίσης αυτή η ιδιότητα βοηθάει στη μείωση της πολυπλοκότητας υπολογισμού του CQI.
- **Προκαθορισμένο Αλφάβητο:**
Δύο κεραιές Tx: Στην περίπτωση των δύο κεραιών μετάδοσης, κατασκευάζοντας τους πίνακες προκωδικοποίησης χρησιμοποιώντας μόνο το αλφάβητο QPSK $\{\pm 1, \pm j\}$ (εκτός από το συντελεστή διαβάθμισης), αποφεύγεται η ανάγκη του πολλαπλασιασμού του πίνακα κατά την εφαρμογή του μηχανισμού προκωδικοποίησης στον πίνακα καναλιού (channel matrix) χωρίς σημαντική απώλεια στην απόδοση της προκωδικοποίησης.
Τέσσερις κεραιές Tx: Λαμβάνοντας υπόψη ότην περιορισμό αλφάβητου της QPSK επιβάλλει ένα παράγοντα περιορισμού για την επίτευξη επιπλέον κέρδους της φασματικής απόδοσης από πρόσθετες κεραιές, χρησιμοποιείται ένα αλφάβητο QPSK $\{\pm 1, \pm j, \pm(1+ j)/\sqrt{2}, \pm(-1+ j)/\sqrt{2}\}$. Αυτό χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση μεταξύ υπολογιστικής πολυπλοκότητας και της ψηφιακής απόδοσης του codebook που σχεδιάστηκε (για τέσσερις κεραιές εκπομπής) [37].

4.5.2 Το Codebook του μηχανισμού προκωδικοποίησης του LTE

Για τη περίπτωση της μετάδοσης όπου πραγματοποιείται με δύο κεραιές, ο πίνακας προκωδικοποίησης επιλέγεται από τον Πίνακα 6.

Πίνακας 6 Codebook προκωδικοποίησης για την περίπτωση δύο κεραιών εκπομπής [37]

CODEBOOK INDEX	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ	
0		
1		
2		

CODEBOOK INDEX	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ	
3		-

Παρόμοια, για την περίπτωση της μετάδοσης με τέσσερις κεραιές, ο πίνακας προκωδίκευσης W επιλέγεται από τον Πίνακα 7, όπου το $W_i = \{c_1 \dots c_M\}$, υποδηλώνει τον πίνακα που ορίζεται από τις στήλες c_1, \dots, c_M του πίνακα $W_i = I_{4 \times 4} - 2u_i u_i^H / u_i^H u_i$. Ο σχεδιασμός της προκωδίκευσης για τέσσερις κεραιές εκπομπής βασίζεται στον μετασχηματισμό Householder με σκοπό να μειωθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα στο κινητό τερματικό καθώς και η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού για την εύρεση κατάλληλων πινάκων προκωδίκευσης λόγω της δομής του.

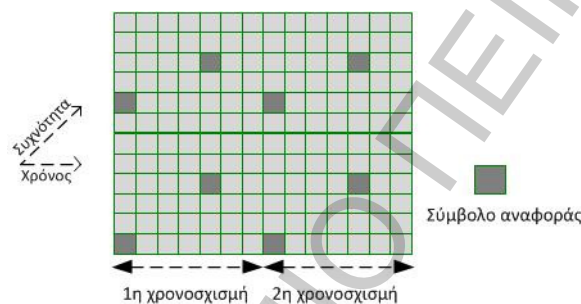
Πίνακας 7 Codebook προκωδίκευσης για την περίπτωση τεσσάρων κεραιών εκπομπής [37]

CODEBOOK INDEX	U_n	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ			
		1	2	3	4
0	$u_0 = [1 \ -1 \ -1 \ -1]^T$	$W_0^{\{1\}}$	$W_0^{\{14\}}/\sqrt{2}$	$W_0^{\{124\}}/\sqrt{3}$	$W_0^{\{1234\}}/2$
1	$u_1 = [1 \ -j \ 1 \ j]^T$	$W_1^{\{1\}}$	$W_1^{\{12\}}/\sqrt{2}$	$W_1^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_1^{\{1234\}}/2$
2	$u_2 = [1 \ 1-j \ 1]^T$	$W_2^{\{1\}}$	$W_2^{\{12\}}/\sqrt{2}$	$W_2^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_2^{\{3214\}}/2$
3	$u_3 = [1 \ j \ 1 \ -j]^T$	$W_3^{\{1\}}$	$W_3^{\{12\}}/\sqrt{2}$	$W_3^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_3^{\{3214\}}/2$
4	$u_4 = [1 \ (-1-j)/\sqrt{2} \ -j \ (1-j)/\sqrt{2}]^T$	$W_4^{\{1\}}$	$W_4^{\{14\}}/\sqrt{2}$	$W_4^{\{124\}}/\sqrt{3}$	$W_4^{\{1234\}}/2$
5	$u_5 = [1 \ (1-j)/\sqrt{2} \ j \ (-1-j)/\sqrt{2}]^T$	$W_5^{\{1\}}$	$W_5^{\{14\}}/\sqrt{2}$	$W_5^{\{124\}}/\sqrt{3}$	$W_5^{\{1234\}}/2$
6	$u_6 = [1 \ (1+j)/\sqrt{2} \ -j \ (-$	$W_6^{\{1\}}$	$W_6^{\{13\}}/\sqrt{2}$	$W_6^{\{134\}}/\sqrt{3}$	$W_6^{\{1324\}}/2$
7	$u_7 = [1 \ (-1+j)/\sqrt{2} \ j \ (1+j)/\sqrt{2}]^T$	$W_7^{\{1\}}$	$W_7^{\{13\}}/\sqrt{2}$	$W_7^{\{134\}}/\sqrt{3}$	$W_7^{\{1324\}}/2$
8	$u_8 = [1 \ -1 \ 1 \ 1]^T$	$W_8^{\{1\}}$	$W_8^{\{12\}}/\sqrt{2}$	$W_8^{\{124\}}/\sqrt{3}$	$W_8^{\{1234\}}/2$
9	$u_9 = [1 \ -j \ -1 \ -j]^T$	$W_9^{\{1\}}$	$W_9^{\{14\}}/\sqrt{2}$	$W_9^{\{134\}}/\sqrt{3}$	$W_9^{\{1234\}}/2$
10	$u_{10} = [1 \ 1 \ 1 \ -1]^T$	$W_{10}^{\{1\}}$	$W_{10}^{\{13\}}/\sqrt{2}$	$W_{10}^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_{10}^{\{1324\}}/2$
11	$u_{11} = [1 \ j \ -1 \ j]^T$	$W_{11}^{\{1\}}$	$W_{11}^{\{13\}}/\sqrt{2}$	$W_{11}^{\{134\}}/\sqrt{3}$	$W_{11}^{\{1324\}}/2$
12	$u_{12} = [1 \ -1 \ -1 \ 1]^T$	$W_{12}^{\{1\}}$	$W_{12}^{\{12\}}/\sqrt{2}$	$W_{12}^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_{12}^{\{1234\}}/2$
13	$u_{13} = [1 \ -1 \ 1 \ -1]^T$	$W_{13}^{\{1\}}$	$W_{13}^{\{13\}}/\sqrt{2}$	$W_{13}^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_{13}^{\{1324\}}/2$
14	$u_{14} = [1 \ 1-j \ -1]^T$	$W_{14}^{\{1\}}$	$W_{14}^{\{13\}}/\sqrt{2}$	$W_{14}^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_{14}^{\{3214\}}/2$
15	$u_{15} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$	$W_{15}^{\{1\}}$	$W_{15}^{\{12\}}/\sqrt{2}$	$W_{15}^{\{123\}}/\sqrt{3}$	$W_{15}^{\{1234\}}/2$

Η προκωδίκευση για την περίπτωση της χωρικής πολυπλεξίας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη χαρτογράφηση επιπέδων για τη διαφορική λήψη. Πρακτικά σε αυτό το στάδιο τα ρεύματα πληροφορίας πολλαπλασιάζονται με ένα πίνακα μιγαδικών αριθμών ο οποίος καθορίζεται από τον PMI που θα επιλέξει ο χρήστης. Αυτός ο πίνακας μιγαδικών αντιπροσωπεύει τα διαφορετικά βάρη που χρησιμοποιεί ο πομπός για να καθορίσει ποια σήματα θα αποσταλούν από ποια κεραία μετάδοσης [36]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.5).

4.6 Απεικόνιση των στοιχείων των πόρων

Στην περίπτωση της μετάδοσης OFDM, το τερματικό χρειάζεται μια εκτίμηση του σύνθετου καναλιού του κάθε subcarrier. Τα ειδικά σήματα αναφοράς κυψέλης (Cell-specific RSs) μεταδίδονται σε κάθε υποπλαίσιο του κατερχόμενου συνδέσμου, και καλύπτουν όλο το εύρος ζώνης της μετάδοσης. Αυτά τα σήματα αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του καναλιού για τη συνεκτική αποδιαμόρφωση σχεδόν για κάθε μετάδοση της κατερχόμενης ζεύξης. Η δομή των σημάτων αναφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 33 που ακολουθεί.



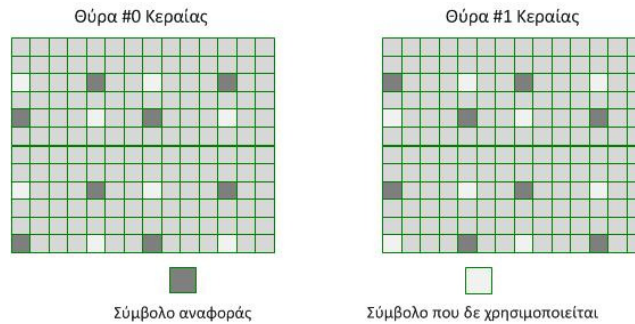
Σχήμα 33 Χαρακτηριστικό υπόδειγμα απεικόνισης συμβόλων, επανασχεδιασμένο από Error! Unknown switch argument.

Τα σήματα αναφοράς αποτελούνται από γνώστα σύμβολα αναφοράς και εισάγονται μεταξύ του πρώτου και του τρίτου προ του τέλους συμβόλου OFDM κάθε χρονοσχισμής και σε μια απόσταση έξι subcarrier στο πεδίο της συχνότητας. Επιπλέον, υπάρχει μία κλιμάκωση των τριών υποφορέων για τα σύμβολα αναφοράς μεταξύ του τρίτου προ του τέλους συμβόλου OFDM, στο πεδίο της συχνότητας. Άρα σε κάθε πλοκάδα πόρων, που αποτελείται από 12 υποφέροντα κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχισμής, υπάρχουν τέσσερα σύμβολα αναφοράς.

Η ακολουθία κάθε σήματος αναφοράς θα διαφέρει μεταξύ διαφορετικών θέσεων και κυψελών. Επιπλέον, ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης της κυψέλης, η ακολουθία των σημάτων αναφοράς ορίζεται, αν υποθεθεί ότι το μέγιστο δυνατό εύρος ζώνης της κυψέλης αντιστοιχεί σε 110 πλοκάδες πόρων στο πεδίο της συχνότητας. Για το LTE έχουν οριστεί 504 διαφορετικές ακολουθίες, όπου κάθε ακολουθία αντιστοιχεί σε μία από 504 διαφορετικές ταυτότητες κυψελών του φυσικού στρώματος.

Στην περίπτωση μετάδοσης πολλαπλών κεραιών στο downlink, το κινητό τερματικό θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει το κανάλι που αντιστοιχεί σε κάθε κεραία εκπομπής. Για να γίνει αυτό μεταδίδεται μόνο ένα σήμα αναφοράς από κάθε κεραία, ή ακριβέστερα από κάθε port της κεραίας. Στην περιγραφή της ραδιοτεχνολογίας LTE αναφερόμαστε σε ports και όχι σε κεραίες, ώστε να τονιστεί ότι όταν αναφερόμαστε σε αυτό δεν κάνουμε απαραίτητα λόγο για φυσικές κεραίες.

Η απεικόνιση των σημάτων αναφοράς για την περίπτωση των δύο port έχει ως εξής, τα σήματα αναφοράς του δεύτερου port της κεραίας μετάδοσης πολλαπλών κεραιών συχνοτικά με τα σήματα αναφοράς του πρώτου port της κεραίας με ένα offset τριών subcarrier στο πεδίο της συχνότητας.

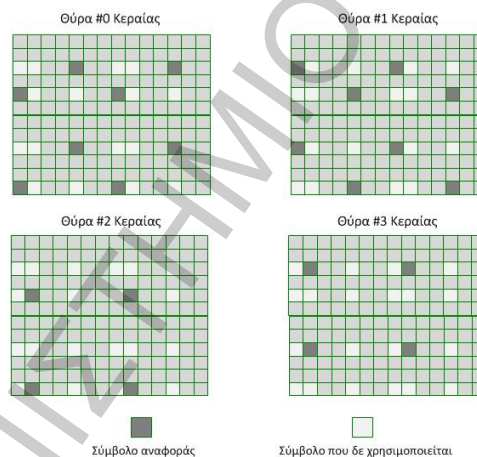


Σχήμα 34 Απεικόνιση των συμβόλων αναφοράς για την περίπτωση δύο κεραιών εκπομπής [36]

Για την περίπτωση των τεσσάρων κεραιών μετάδοσης, Σχήμα 35, τα σήματα αναφοράς του τρίτου και τέταρτου port της κεραιάς εκπομπής πολλαπλούνται συχνοτικά εντός του δεύτερου συμβόλου OFDM της κάθε χρονοσχισμής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ένα στοιχείο πόρου που περιέχει σήμα αναφοράς για ένα συγκεκριμένο port της κεραιάς, τότε από τα υπόλοιπα ports δε μεταδίδεται καμία ακολουθία. Αυτό γίνεται για να μην υπάρξει παρεμβολή μεταξύ αυτών των σημάτων αναφοράς με μεταδόσεις από άλλα port της κεραιάς της ίδιας κυψέλης.

Σχήματα μετάδοσης πολλαπλών κεραιών, όπως αυτό της χωρικής πολλαπλεξίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αποδοτική εκτίμηση του καναλιού για την καταστολή των παρεμβολών μεταξύ μεταδόσεων από διαφορετικά port της ίδιας κεραιάς εκπομπής [30].



Σχήμα 35 Απεικόνιση των συμβόλων αναφοράς για την περίπτωση τεσσάρων κεραιών εκπομπής [36]

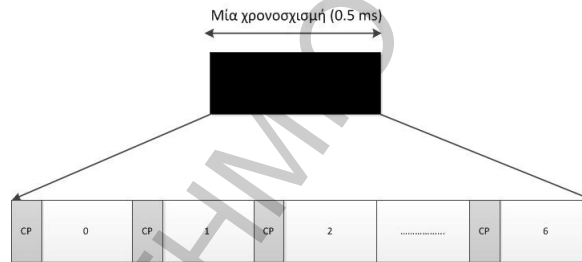
Πρακτικά τα σήματα αναφοράς που έχουν δημιουργηθεί στο αρχικό βήμα απεικονίζονται στο πλέγμα των πόρων (resourcegrid). Ανάλογα λοιπόν με τις θέσεις που κατέχουν στο πλέγμα της κατερχόμενης ζεύξης τοποθετείται η ανάλογη ακολουθία gold. Έχουμε δηλαδή το διαχωρισμό της ωφέλιμης από τη μη ωφέλιμη πληροφορία και ανάλογα με το ποιο Port της κεραιάς εκπέμπει υπάρχουν και οι νεκρές ακολουθίες για την αποφυγή παρεμβολών. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.6).

4.7 Διαμόρφωση OFDM και εισαγωγή κυκλικού προθέματος

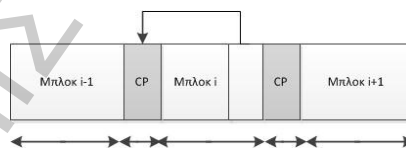
Η διαμόρφωση OFDM προσφέρει ανθεκτικότητα στη διασπορά καθυστέρησης (delay spread) και αυτό οφείλεται στη μετάδοση πολλαπλών διαδρομών. Πέρα όμως από το πρόβλημα της ανθεκτικότητας της διασποράς καθυστέρησης θα πρέπει να αντιμετωπιστεί η διασυμβολική παρεμβολή (ISI) που προκαλείται εξαιτίας της πολύοδης μετάδοσης. Σε περιοχές όπου αναμένεται να υπάρξει αυξημένη διασυμβολική παρεμβολή, όπως έχει προαναφερθεί, αυτή

μπορεί να αποφευχθεί με την εισαγωγή ενός χρόνου προστασίας (guard period) στην αρχή κάθε συμβόλου δεδομένων. Η διαδικασία έχει ως εξής, αρχικά γίνεται αντιγραφή ενός τμήματος από το τέλος της ακολουθίας (το μέγεθος του εξαρτάται από το μήκος του χρόνου προστασίας στο ανάλογο σύμβολο) και στη συνέχεια αυτό το τμήμα της ακολουθίας προσκολλάται στην αρχή της ίδιας ακολουθίας απ' όπου προήλθε. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι γνωστή ως τεχνική κυκλικού προθέματος. Ο δέκτης με τη σειρά του θα μπορεί να δειγματοληπτήσει το σήμα μετάδοσης σε βέλτιστο χρόνο και έτσι θα αποφευχθεί οποιαδήποτε διασυμβολική παρεμβολή που τυχόν να είχε προκληθεί από ανακλώμενες εκδοχές του σήματος που έχουν καθυστερήσει κατά χρόνο όσο αυτόν της διάρκειας του κυκλικού προθέματος [38].

Πρακτικά σημαίνει πως κατά τη διαδικασία της διαμόρφωσης OFDM έχουμε το πακέταρισμα την αναδιάταξη των δεδομένων και την προσθήκη του DC subcarrier. Κατόπιν η πληροφορία υπόκειται σε αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Ακολουθεί η προσθήκη του κυκλικού προθέματος όπου το μήκος του διαφέρει από σύμβολο σε σύμβολο. Για παράδειγμα (με CP μήκους [10 9 9 9 9 9 10 9 9 9 9 9]), συνεπάγεται ότι το εύρος ζώνης είναι 1.4 MHz και το μέγεθος FFT είναι 128 σύμβολα. Από την πληροφορία που περιέχεται στο πρώτο subcarrier (η πληροφορία είναι της μορφής $FFT \times 14$) επιλέγουμε τα τελευταία δέκα στοιχεία τα οποία τοποθετούνται πρώτα σε ένα άλλο πίνακα και στη συνέχεια ακολουθούν αυτούσια τα 128 (FFT) στοιχεία του ίδιου subcarrier. Από το δεύτερο subcarrier επιλέγονται τα τελευταία 9 στοιχεία τα οποία ακολουθούν τα πρώτα (128+10) που τοποθετούνται αμέσως μετά και στη συνέχεια ακολουθούν τα 128 (FFT) στοιχεία του ίδιου subcarrier και φυσικά όλες αυτές οι ακολουθίες αποθηκεύονται με την σειρά η μία μετά την άλλη στον αρχικό πίνακα που ήταν κενός έως ότου ολοκληρωθεί η διαδικασία για όλα τα 7 σύμβολα κάθε χρονοσχημής. Η διαδικασία που περιγράφηκε απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα, Σχήμα 36, Σχήμα 37. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.7).



Σχήμα 36 Ραδιοπλαίσιο κατερχόμενου συνδέσμου με κυκλικό πρόθεμα, επανασχεδιασμένο από [38]



Σχήμα 37 Τα τελευταία στοιχεία ίσα με τη διάρκεια του CP αντιγράφονται στην αρχή του συμβόλου OFDM, επανασχεδιασμένο από [38]

4.8 Δημιουργία καναλιού

Τα μοντέλα καναλιού για το LTE απαιτούν περισσότερο εύρος ζώνης, συγκρίνοντάς τα με αυτά του UMTS, για να επαληθεύσουν το γεγονός πως οι κρουστικές αποκρίσεις του καναλιού σχετίζονται με την ανάλυση καθυστέρησης του δέκτη. Τα μοντέλα καναλιού που έχουν αναπτυχθεί από το 3GPP για το LTE βασίζονται στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα καναλιού 3GPP και ITU. Στα επεκταμένα μοντέλα ITU για το LTE δόθηκαν οι ονομασίες Extended Pedestrian A (EPA), Extended Vehicular A (EVA), και Extended Typical Urban (ETU), τα οποία στην πραγματικότητα δεν αντιπροσωπεύουν αστικά περιβάλλοντα λόγω του μικρού μεγέθους κυψέλης με μεγάλη διασπορά καθυστέρησης έως 5 microseconds. Μια εναλλακτική πρόταση για την κατηγοριοποίηση αυτών των μοντέλων είναι σύμφωνα με τις διασπορές καθυστέρησης που υποστηρίζουν. Δηλαδή αυτά με τη χαμηλή διασπορά καθυστέρησης, με τη μεσαία διασπορά καθυστέρησης και την υψηλή διασπορά καθυστέρησης αντίστοιχα.

Τα μοντέλα της χαμηλής διασποράς καθυστέρησης χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύσουν εσωτερικά περιβάλλοντα και μικρά μεγέθη κυψέλης, καθώς τα μοντέλα μεσαίας και υψηλής διασποράς καθυστέρησης χρησιμοποιούνται για την αντιπροσωπευση αστικών περιβαλλόντων με μεγάλα μεγέθη κυψέλης.

Οι συχνότητες Doppler αυτών των μοντέλων καναλιού, έχουν οριστεί με παρόμοια φιλοσοφία με αυτές που χρησιμοποιούνται για το UTERA. Ακριβώς όπως έχουν ταξινομηθεί τα τρία μοντέλα καναλιού σύμφωνα με τη χαμηλή, μεσαία και υψηλή διασπορά καθυστέρησης, υιοθετείται μια παρόμοια προσέγγιση για τον καθορισμό των συχνοτήτων Doppler (χαμηλές, μεσαίες, υψηλές) για τα περιβάλλοντα Doppler. Οι συχνότητες Doppler για αυτά τα μοντέλα καναλιού, με χαμηλές, μεσαίες και υψηλές συνθήκες Doppler είναι 5 Hz, 70 Hz, and 900 Hz αντίστοιχα. Οι διασπορές καθυστέρησης και οι συχνότητες Doppler παρέχουν ένα πλαίσιο από το οποίο μπορεί να αντληθεί πληθώρα πιθανών σεναρίων για το περιβάλλον λειτουργίας.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται τα παρακάτω κανάλια που είναι επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα: extended pedestrian A 5 Hz, extended vehicular A 5 Hz, extended vehicular A 70 Hz, extended typical urban 70 Hz και extended typical urban 300 Hz.

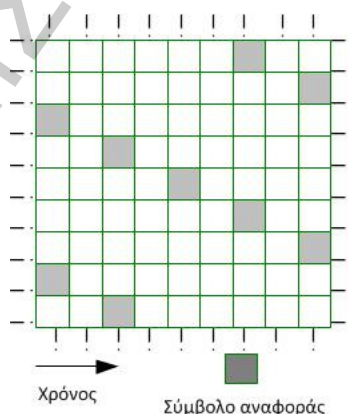
Το κανάλι που δημιουργείται είναι MIMO fading με ένα σύνδεσμο πολυδιάδοσης επιλεκτικής συχνότητας, το οποίο μοντελοποιεί κάθε διακριτό μονοπάτι, ως μια ανεξάρτητη διαδικασία διάλκισης τύπου Rayleigh με το ίδιο μέσο κέρδος [18]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.8).

4.9 Αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των στοιχείων των πόρων

Σε αυτό το βήμα αντλούμε την ωφέλιμη πληροφορία και τις ακολουθίες των σημάτων αναφοράς από το πλέγμα των πόρων, όπου στο επόμενο βήμα θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του καναλιού. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.10).

4.10 Εκτίμηση καναλιού

Μετά το πέρας της διαδικασίας διαμόρφωσης OFDM, δηλαδή για τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης της διαμορφωμένης ακολουθίας a_k και για να καταστεί δυνατή η κατάλληλη αποκωδικοποίηση των πληροφοριών που διαβιβάζονται στην πλευρά του δέκτη, πραγματοποιείται πολλαπλασιασμός γραμμών (scaling) με τον συζυγή μιγαδικό αριθμό της καθυστέρησης καναλιού H_k στο πεδίο της συχνότητας. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, ο δέκτης προφανώς χρειάζεται μια εκτίμηση των καθυστερήσεων H_0, \dots, H_{N_c-1} του καναλιού.



Σχήμα 38 Εκτίμηση καναλιού με βάση την κρουστική απόκριση και τα σύμβολα αναφοράς, επανασχεδιασμένο από [30]

Οι καθυστερήσεις του καναλιού, πάντα αναφερόμαστε για το πεδίο της συχνότητας, μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα, αρχικά από την κρουστική απόκριση του καναλιού και από αυτό να γίνει μια εκτίμηση ενός υπολογισμού για το H_k . Ωστόσο οι καθυστερήσεις του καναλιού μπορούν να υπολογιστούν άμεσα και με απλούστερο τρόπο. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσθήκη γνωστών συμβόλων αναφοράς σε τακτά χρονικά διαστήματα εντός του πλαισίου OFDM χρόνου-

συχνότητας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 38 παραπάνω. Χρησιμοποιώντας τις γνώσεις σχετικά με τα σύμβολα αναφοράς, ο δέκτης μπορεί να εκτιμήσει το κανάλι στο πεδίο της συχνότητας γύρω από τη θέση των συμβόλων αναφοράς. Τα σύμβολα αναφοράς θα πρέπει να έχουν μια επαρκώς υψηλή πυκνότητα τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, ώστε να είναι σε θέση να παρέχουν εκτιμήσεις για το σύνολο του πλαισίου χρόνου-συχνότητας και στην περίπτωση όπου οι ραδιοδίαυλοι υπόκεινται σε υψηλή συχνότητα ή/και σε επιλεκτικότητα του χρόνου.

Πρακτικά γίνεται μια διαίρεση μεταξύ των ακολουθιών των αρχικών σημάτων αναφοράς και των ακολουθιών των σημάτων αναφοράς που έχουν υποστεί διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση OFDM, ώστε να υπολογιστεί ο πίνακας της κρουστικής απόκρισης. Τα στοιχεία του πίνακα H είναι μιγαδικοί αριθμοί που αντιπροσωπεύουν την εξασθένιση και την ολίσθηση φάσης που εισάγονται στο σήμα εξαιτίας του καναλιού διάλειτουργίας [30]. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.11).

4.11 Αποδιαμόρφωση OFDM

Σε αυτό το βήμα, αφαιρείται το κυκλικό πρόθεμα από κάθε σύμβολο OFDM και μετέπειτα ακολουθεί ο μετασχηματισμός Fourier των στοιχείων, το αναπακετάρισμα, η αναδιάταξη των δεδομένων καθώς και η αφαίρεση του DC subcarrier. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.9).

4.12 Ισοσταθμιστής μηδενισμού της διασυμβολικής παρεμβολής

Ο ισοσταθμιστής zero-forcing μηδενίζει τη διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference – ISI) και είναι ιδανικός για την περίπτωση όπου το κανάλι είναι θορυβώδες. Ωστόσο, όταν το κανάλι είναι θορυβώδες, ο ισοσταθμιστής zero-forcing θα ενισχύσει κατά πολύ τον θόρυβο σε συχνότητες f , όταν η κρουστική απόκριση καναλιού $H(j2f)$ είναι μικρή, π.χ. (κοντά στις καταστάσεις μηδενισμού του καναλιού), στην προσπάθεια της πλήρους αντιστροφής του καναλιού. Οι ισοσταθμιστές zero-forcing αγνοούν τον προσθετικό θόρυβο και μπορεί να ενισχύσουν σημαντικά το θόρυβο για τα κανάλια με μηδενική φασματική συνιστώσα [39].

Πρακτικά το αποτέλεσμα στην έξοδο του ισοσταθμιστή είναι η συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης του καναλιού και του εκπεμπόμενου σήματος (σήμα εισόδου). (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.12).

4.13 Αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των επιπέδων

Στη φάση αυτή οι πληροφορίες που περιέχονται στα ρεύματα πληροφορίας θα μεταφερθούν (η διαδικασία εξαρτάται από τον αριθμό των επιπέδων) σε πλοκάδες μεταφοράς. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.13).

4.14 Αποδιαμόρφωση

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η αποδιαμόρφωση της πληροφορίας. Οι μιγαδικές ακολουθίες θα μετατραπούν σε διφύα. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.14).

4.15 Αποπερίπλεξη

Τέλος, ακολουθεί η αποπερίπλεξη της ακολουθίας, όπου πραγματοποιείται η επαναφορά της πληροφορίας. (Κώδικας, βλ. Παράρτημα 1.15).

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο πλαίσιο του κεφαλαίου αυτού αξιολογήθηκε η επίδοση ενός δικτύου LTE και ειδικότερα η περίπτωση της κατερχόμενης ζεύξης, όταν δηλαδή ο σταθμός βάσης εκπέμπει προς το κινητό τερματικό. Τα σχήματα διαμόρφωσης που εξετάστηκαν είναι τα: 4QAM, 16QAM και 64QAM. Όσον αφορά τις κατατομές καναλιού (channel profiles), εξετάστηκαν οι παρακάτω λειτουργίες: Static MIMO, Extended Pedestrian A (EPA) 5Hz, Extended Vehicular A (EVA) 5Hz και 70Hz, και Extended Typical Urban (ETU) 70Hz και 300Hz. Όσον αφορά τη μετάδοση, χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα MIMO 2x2 και MIMO 4x4 σε συνδυασμό με την τεχνική μετάδοσης της χωρικής πολυπλεξίας. Τέλος, ως διάυλος χρησιμοποιήθηκε ένα κανάλι που υπόκειται σε λευκό γκαουσιανό θόρυβο με διάλεια Rayleigh. Για την εκτίμηση του καναλιού χρησιμοποιήθηκε ένας ισοσταθμιστής μηδενισμού της διασυμβολικής παρεμβολής. Πιο αναλυτικά:

Σκοπός ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των παρακάτω μετρικών: του μέσου ρυθμού εμφάνισης σφαλμάτων για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του συστήματος, της ρυθμοαπόδοσης για τον υπολογισμό της κίνησης των δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν μέσω του διαύλου από το ένα άκρο στο άλλο και τέλος, της χωρητικότητας Shannon του καναλιού, η οποία προσδιορίζει το μέγιστο δυνατό ρυθμό αξιόπιστης μετάδοσης μέσα από το κανάλι.

Όσον αφορά τα προαπαιτούμενα της διαδικασίας αποστολής, αρχικά, έγιναν οι απαραίτητοι υπολογισμοί ώστε να οριστούν τα μεγέθη των στοιχείων των πόρων ανά τις διαθέσιμες πλοκάδες πόρων, οι οποίες καθορίζονται από το εύρος ζώνης που υποστηρίζεται κάθε φορά στην εκάστοτε προσομοίωση. Δηλαδή για παράδειγμα, στην περίπτωση που το εύρος ζώνης του συστήματος είναι 1.4MHz οι διαθέσιμες πλοκάδες φυσικών πόρων είναι 6. Συνεπώς, 6 πλοκάδες φυσικών πόρων x 2 χρονοσχισμές x 12 υποφέροντα / πλοκάδα φυσικών πόρων στο πεδίο της συχνότητας x 7 σύμβολα LTE στο πεδίο του χρόνου = 1008 στοιχεία πόρων. Από αυτά τα 1008 στοιχεία πόρων ένα μέρος τους προορίζεται για τα σήματα αναφοράς και ένα άλλο για τη μεταφορά των ωφέλιμων δεδομένων. Στην περίπτωση MIMO 2x2, ο υπολογισμός

για τα σήματα αναφοράς γίνεται όπως ακολουθεί: 6 πλοκάδες φυσικών πόρων \times 2 χρονοσχισμές \times 4 σύμβολα αναφοράς / χρονοσχισμή \times 2 θύρες κεραιών = 96 στοιχεία πόρων. Οπότε το σύνολο των στοιχείων που θα μεταφέρουν δεδομένα υπολογίζεται ως εξής: 1008 στοιχεία συνολικά $-$ 96 στοιχεία σημάτων αναφοράς, προκύπτουν 912 στοιχεία που θα μεταφέρουν δεδομένα. Στην περίπτωση MIMO 4x4, διαφοροποιούνται μόνο τα στοιχεία των πόρων που προορίζονται για τα σήματα αναφοράς άρα και τα στοιχεία των πόρων που προορίζονται για τα δεδομένα. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων των πόρων παραμένει αμετάβλητος. Συνεπώς, ο υπολογισμός για τα στοιχεία που θα περιέχουν σήματα αναφοράς έχει ως εξής: 6 πλοκάδες φυσικών πόρων \times 2 χρονοσχισμές \times 3 σύμβολα αναφοράς / χρονοσχισμή \times 4 θύρες κεραιών = 144 στοιχεία πόρων. Άρα, το σύνολο των στοιχείων που θα μεταφέρουν δεδομένα υπολογίζεται ως ακολούθως: 1008 στοιχεία συνολικά $-$ 144 στοιχεία σημάτων αναφοράς, προκύπτουν 864 στοιχεία που θα μεταφέρουν δεδομένα. Γενικά, ο υπολογισμός για τα στοιχεία των πόρων καθορίζεται από τον αριθμό των πλοκάδων των πόρων, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από το εύρος ζώνης που υποστηρίζεται από την εκάστοτε προσομοίωση. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό θα αναφερθεί με συντομία η περίπτωση κατά την οποία το εύρος ζώνης του συστήματος είναι 20 MHz τόσο για MIMO 2x2 όσο και για MIMO 4x4. Για εύρος ζώνης 20 MHz, οι αντίστοιχες πλοκάδες φυσικών πόρων είναι 100. Αυτό συνεπάγεται: 100 πλοκάδες φυσικών πόρων \times 2 χρονοσχισμές \times 12 υποφέροντα / πλοκάδα φυσικών πόρων στο πεδίο της συχνότητας \times 7 σύμβολα LTE στο πεδίο του χρόνου = 16800 στοιχεία πόρων, 100 πλοκάδες φυσικών πόρων \times 2 χρονοσχισμές \times 4 σύμβολα αναφοράς / χρονοσχισμή \times 2 θύρες κεραιών = 1600 στοιχεία πόρων για σήματα αναφοράς) άρα 16800 - 1600 = 15200 στοιχεία πόρων για δεδομένα. Για την περίπτωση MIMO 4x4, τα συνολικά στοιχεία παραμένουν ίδια σε αριθμό, 100 πλοκάδες φυσικών πόρων \times 2 χρονοσχισμές \times 3 σύμβολα αναφοράς / χρονοσχισμή \times 4 θύρες κεραιών = 2400 στοιχεία πόρων για σήματα αναφοράς, άρα 16800 - 2400 = 14400 στοιχεία πόρων για τη μεταφορά δεδομένων.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέγεθος των πλοκάδων μεταφοράς. Ο αριθμός των διφύων που θα απαρτίζουν κάθε πλοκάδα μεταφοράς υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των στοιχείων των πόρων που θα μεταφέρουν δεδομένα και το σχήμα διαμόρφωσης. Δηλαδή, στην περίπτωση MIMO 2x2 με εύρος ζώνης 1.4 MHz, σχήμα διαμόρφωσης 16QAM, που 96 στοιχεία πόρων μεταφέρουν σήματα αναφοράς, το μέγεθος κάθε πλοκάδας μεταφοράς θα είναι $96 \cdot \log_2(16) = 384$ διφύα. Στην αντίστοιχη περίπτωση για MIMO 4x4 το μέγεθος κάθε πλοκάδας μεταφοράς θα είναι $144 \cdot \log_2(16) = 576$ διφύα.

Εν συνεχεία, στην προσομοίωση εφαρμόζεται η μεθοδολογία της διαδικασίας της αποστολής και της λήψης που ακολουθήθηκε, η οποία βασίζεται στα στάδια που αναφέρθηκαν λεπτομερώς στο τέταρτο κεφάλαιο.

Αναπτύχθηκαν τέσσερα σενάρια προσομοίωσης. Στα δύο πρώτα σενάρια αξιολογούνται οι μεταβολές των μετρικών που επηρεάζονται από την αλλαγή που πραγματοποιείται στη μεταβλητή του εύρους ζώνης του συστήματος. Στα δύο τελευταία σενάρια αξιολογούνται οι μετρικές που επηρεάζονται από την αλλαγή που πραγματοποιείται στη μεταβλητή του σχήματος διαμόρφωσης.

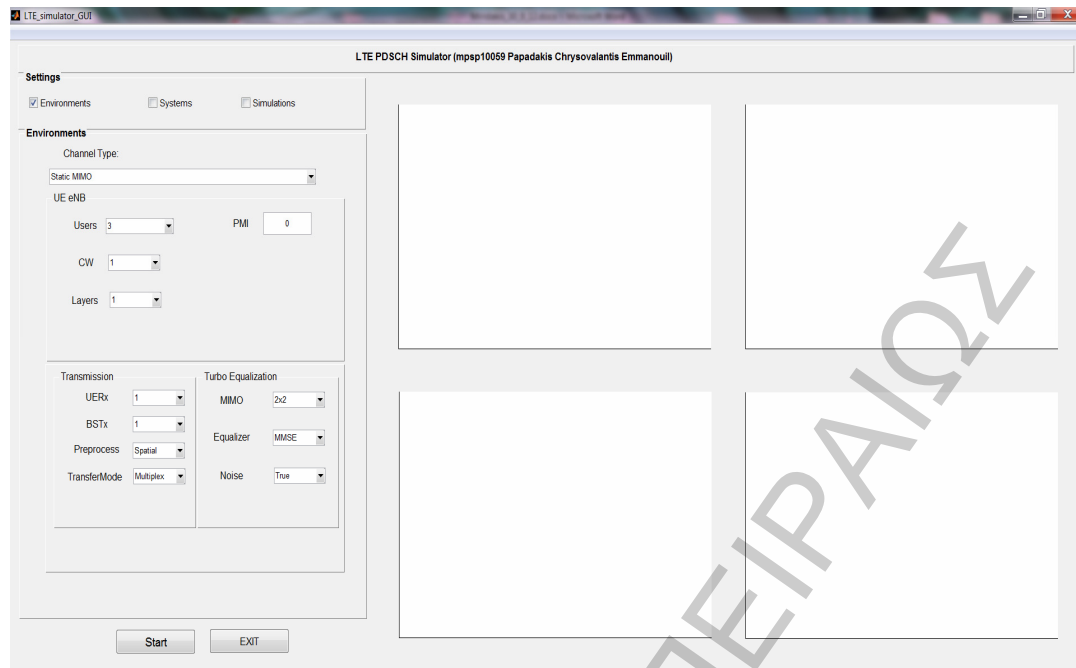
Στη συνέχεια αναφέρονται τα βήματα που ακολουθούνται στην προσομοίωση για την υλοποίηση των σεναρίων αυτών καθώς και στιγμιότυπα που απεικονίζουν τις μετρικές που υπολογίζονται κατά την εκτέλεσή τους. Στόχος είναι η μελέτη, η αξιολόγηση και η σύγκριση αυτών των γραφικών παραστάσεων που προκύπτουν από το εκάστοτε σενάριο.

Πρόκειται για τις γραφικές παραστάσεις Gauss BER-SNR, BER - SNR, Shannon Capacity-SNR και Throughput - Resource Blocks, υπό διαφορετικά εύρη ζώνης, διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης και τεχνικών μετάδοσης.

Το σημαντικό πλεονέκτημα της προσομοίωσης που υλοποιήθηκε είναι το γραφικό περιβάλλον πάνω στο οποίο στηρίζεται αφού με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να ελέγχει αλλά και να κατανοεί με μεγαλύτερη ευκολία τις αλλαγές που ορίζει στο εκάστοτε σενάριο. Αυτό το γραφικό περιβάλλον αναπτύχθηκε στο διαδραστικό περιβάλλον (GUI) του Matlab.

5.1 Διεξαγωγή 1ου σεναρίου

Ο χρήστης εκτελώντας την εφαρμογή αντικρύζει το παρακάτω παράθυρο, το οποίο αποτελεί το κεντρικό παράθυρο της εφαρμογής.

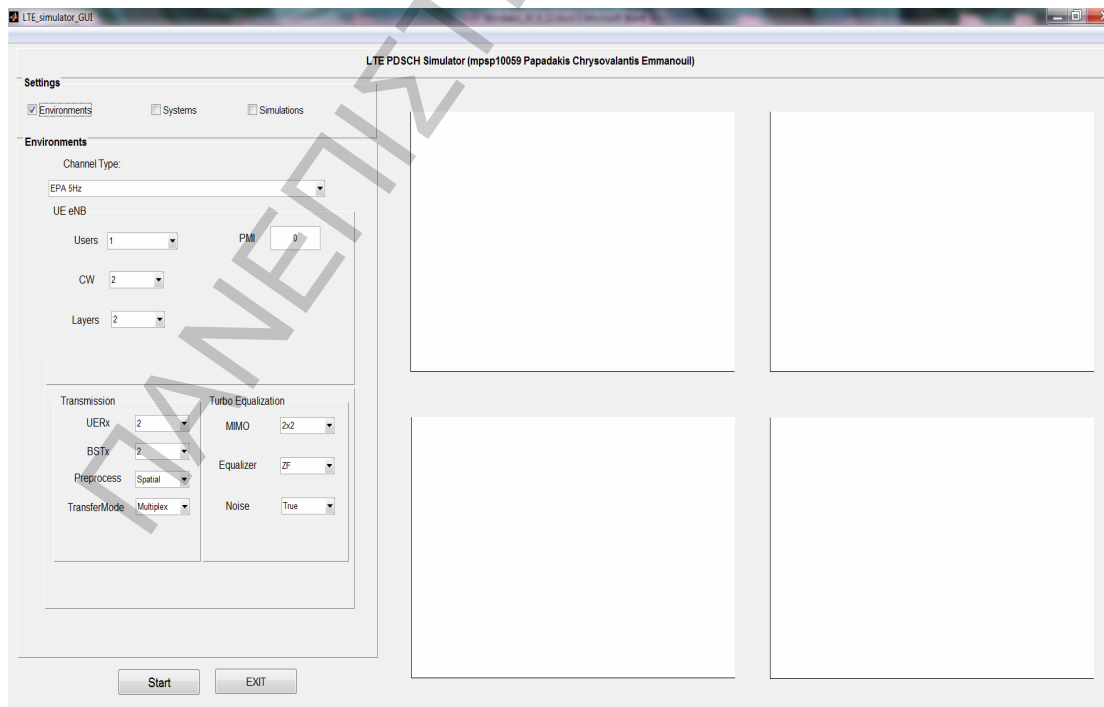


Εικόνα 1 Κεντρικό παράθυρο προσομοίωσης

5.1.1 Περίπτωση MIMO 2x2

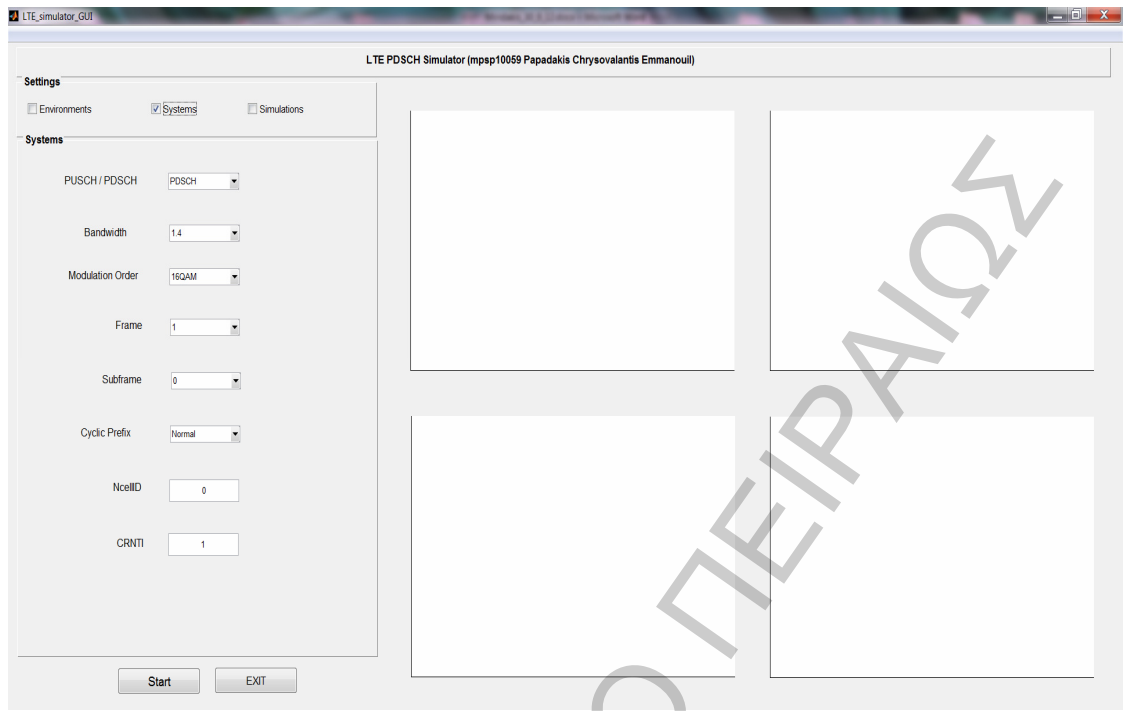
Ακολουθεί ένα επιτυχές σενάριο προσομοίωσης του συστήματος για την περίπτωση MIMO 2x2. Οι παράμετροι έχουν ρυθμιστεί με βάση τις οδηγίες που ακολουθούν και οι οποίες φιλτράρονται ώστε να αποκλειστεί η περίπτωση ύπαρξης παρεκκλίσεων. Στα γραφήματα τα οποία αρχικά είναι κενά φυσικά, θα απεικονιστούν οι μετρικές οι οποίες υπολογίστηκαν από την παρούσα εφαρμογή.

Στην εικόνα που ακολουθεί ορίζουμε τις παραμέτρους στην καρτέλα Environments:



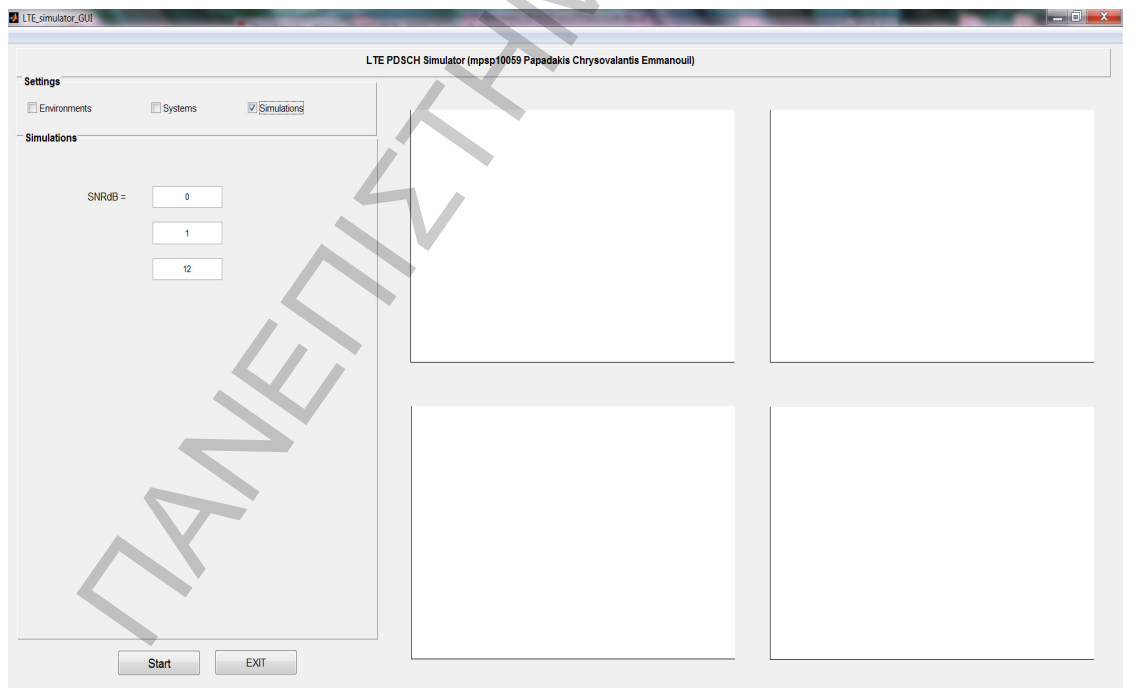
Εικόνα 2 Ρυθμίσεις παραμέτρων της καρτέλας Environments για MIMO 2x2

Ακολουθεί ο ορισμός των παραμέτρων στην καρτέλα Systems:



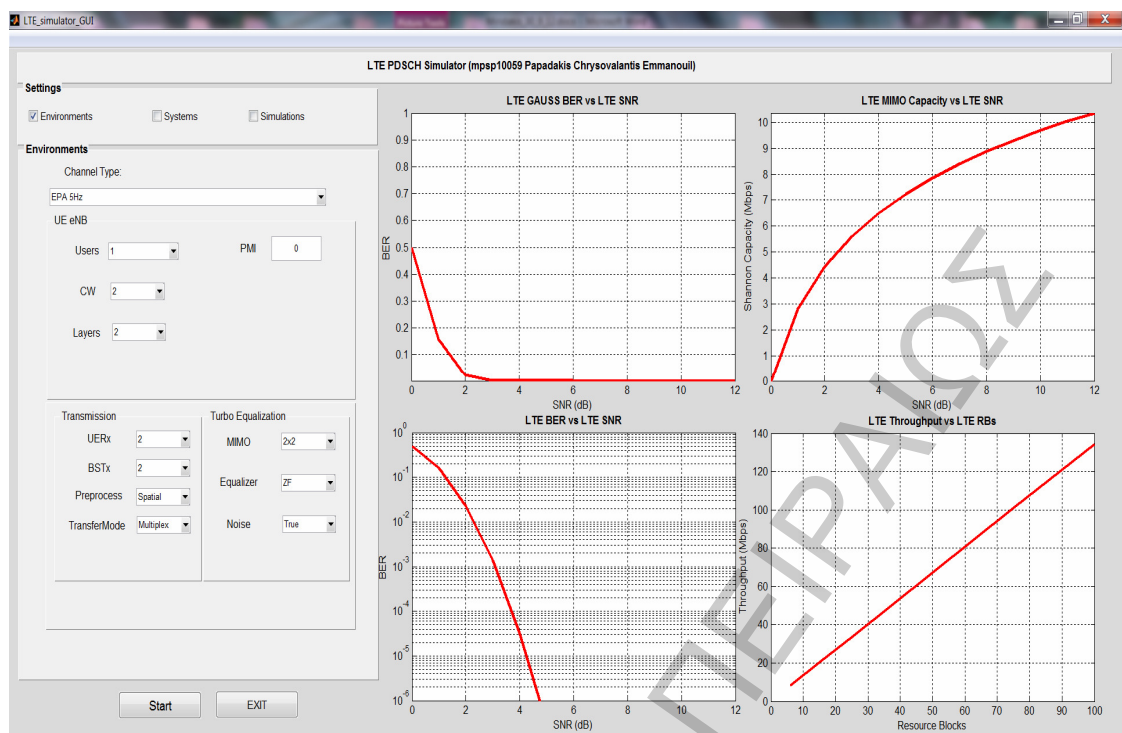
Εικόνα 3 Ρυθμίσεις παραμέτρων της καρτέλας Systems για MIMO 2x2

Τέλος παρουσιάζονται οι παράμετροι της καρτέλας Simulations:



Εικόνα 4 Ρυθμίσεις παραμέτρων την καρτέλας Simulations για MIMO 2x2

Διαλέγοντας την επιλογή Start ξεκινάει η εφαρμογή, και μετά το πέρας του χρόνου εκτέλεσης έχουμε τα αποτελέσματα για την περίπτωση MIMO2x2:



Εικόνα 5 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 1.4 MHz, 16QAM για σύστημα 2x2

Διαλέγοντας την επιλογή EXIT η εφαρμογή τερματίζεται.

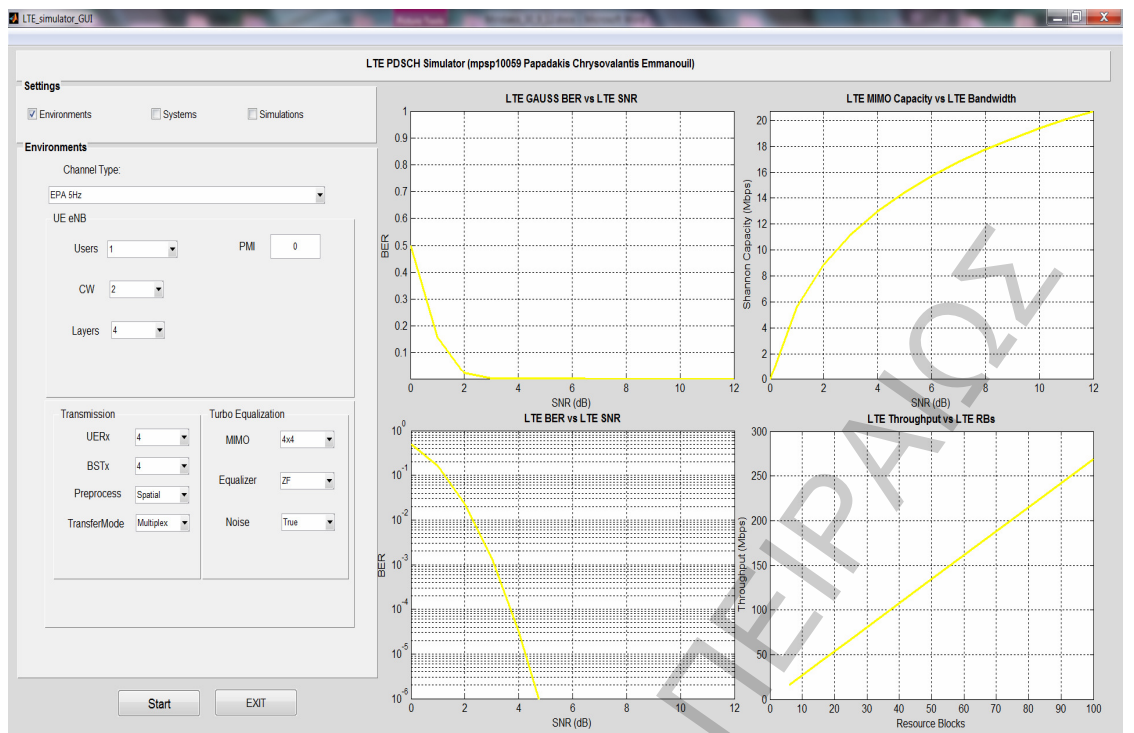
Αξιολόγηση 1^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 2x2)

Στην Εικόνα 5 παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η στάθμη του θορύβου (SNR) μειώνεται ο μέσος ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (BER). Επίσης παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η στάθμη του θορύβου (SNR) για μια δεδομένη τιμή εύρους ζώνης στην περίπτωση μας 1.4 MHz η χωρητικότητα Shannon αυξάνεται και μάλιστα λογαριθμικά. Τέλος όσο αφορά τη μέγιστη ρυθμοαπόδοση του συστήματος βλέπουμε πως αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι διαθέσιμες πλοκάδες πόρων προς μετάδοση.

5.1.2 Περίπτωση MIMO 4x4

Αλλάζοντας μόνο συγκεκριμένες παραμέτρους της καρτέλας Environments, θα εκτελέσουμε την εφαρμογή για την περίπτωση MIMO 4x4. Συγκεκριμένα η τιμή των Layers καθώς και των παραμέτρων U_{Er} και B_{St} θα μετατραπεί σε “4”. Η τελευταία παράμετρος που θα μετατραπεί είναι η MIMO που θα λάβει την τιμή “4x4”. Στις άλλες καρτέλες οι παράμετροι θα παραμείνουν ως έχουν.

Ακολουθούν οι αλλαγές των παραμέτρων της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 4x4:



Εικόνα 6 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 1.4 MHz, 16QAM για σύστημα 4x4

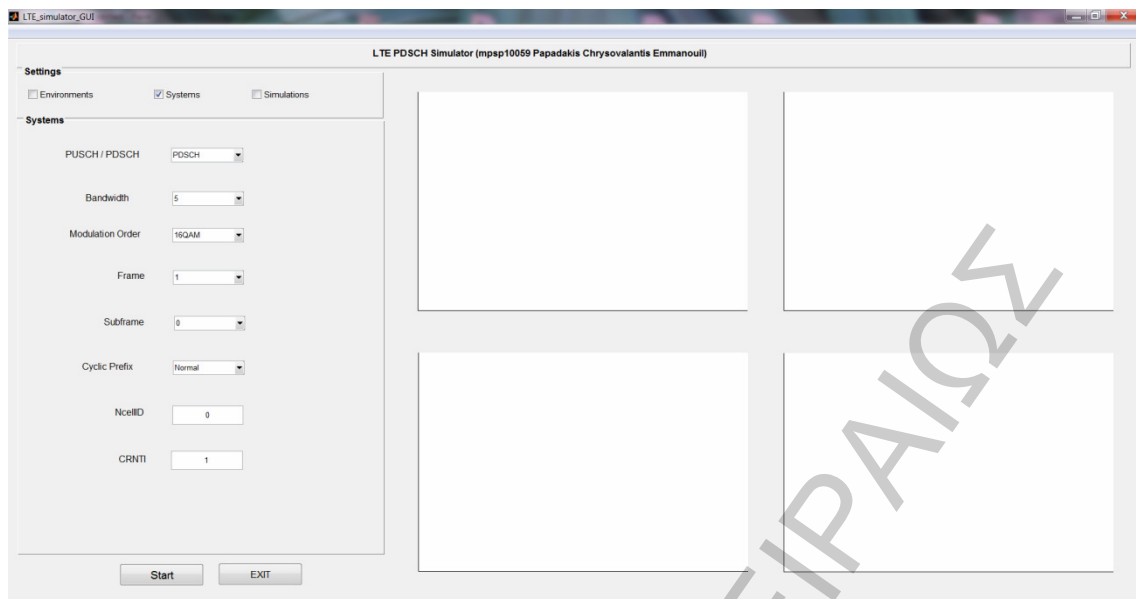
Διαλέγοντας την επιλογή EXIT η εφαρμογή τερματίζεται.

Αξιολόγηση 1^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 4x4)

Στην Εικόνα 6 δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στα γραφήματα του GAUSS BER και του BER εφόσον δεν παρήλθε κάποια αλλαγή στις τιμές της στάθμης του θορύβου. Όμως παρατηρούμε την αύξηση της χωρητικότητας Shannon και της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος. Αυτό οφείλεται στην αύξηση των κεραιών μετάδοσης.

5.2 Διεξαγωγή 2^{ου} σεναρίου

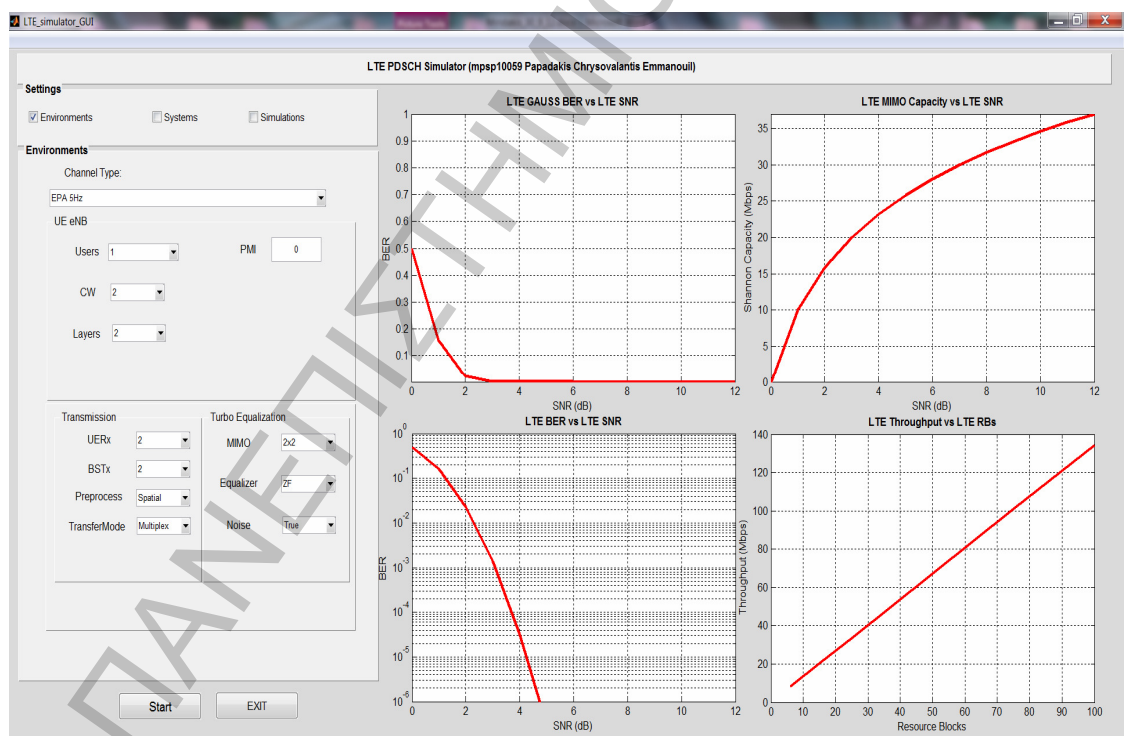
Για το δεύτερο σενάριο θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες παραδοχές του πρώτου σεναρίου για κάθε περίπτωση αντίστοιχα εκτός από το εύρος ζώνης του συστήματος όπου πλέον θα αυξηθεί όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 7 Αύξηση εύρους ζώνης σε 5 MHz για το 2^ο σενάριο

5.2.1 Περίπτωση MIMO 2x2

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 2x2:



Εικόνα 8 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 5 MHz, 16QAM για σύστημα 2x2

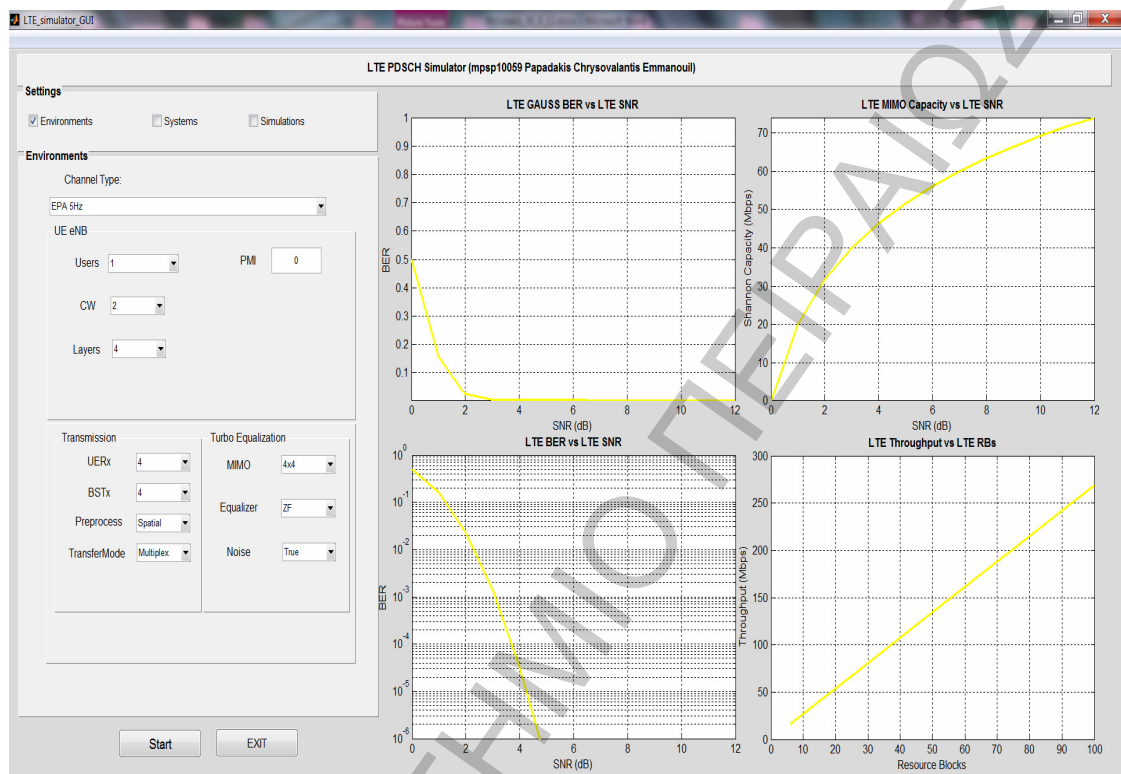
Αξιολόγηση 2^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 2x2)

Συγκριτικά με την ίδια περίπτωση του πρώτου σεναρίου προφανώς δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή όσο αφορά τις γραφικές παραστάσεις του GAUSSBER και BER καθώς οι παράμετροι της καρτέλας Simulations παρέμειναν αμετάβλητες. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται, καθώς

και η ρυθμοαπόδοση παραμένει στα ίδια επίπεδα, είναι η αύξηση της χωρητικότητας Shannon. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του συστήματος, Εικόνα 8.

5.2.2 Περίπτωση MIMO 4x4

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 4x4:



Εικόνα 9 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 5 MHz, 16QAM για σύστημα 4x4

Αξιολόγηση 2^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 4x4)

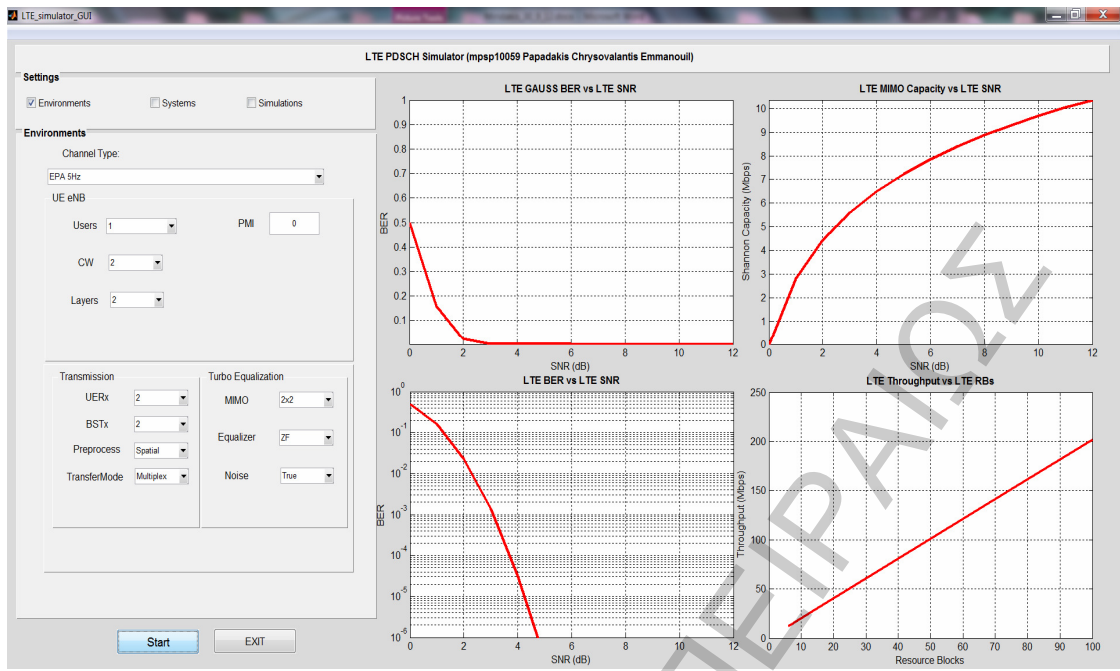
Συγκριτικά με την ίδια περίπτωση του πρώτου σεναρίου οι γραφικές παραστάσεις του GAUSSBER και BER παραμένουν αμετάβλητες. Όσο αφορά τη ρυθμοαπόδοση, παραμένει στα ίδια επίπεδα όμως η χωρητικότητα Shannon αυξάνεται σημαντικά επειδή αυξήθηκε το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος, Εικόνα 9.

5.3 Διεξαγωγή 3^{ου} σεναρίου

Για το τρίτο σενάριο θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες παραδοχές του πρώτου σεναρίου εκτός από το σχήμα διαμόρφωσης του συστήματος, το οποίο θα αυξηθεί. Δηλαδή η παράμετρος ModulationOrder στην καρτέλα Systems θα λάβει την τιμή 64QAM.

5.3.1 Περίπτωση MIMO 2x2

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 2x2:



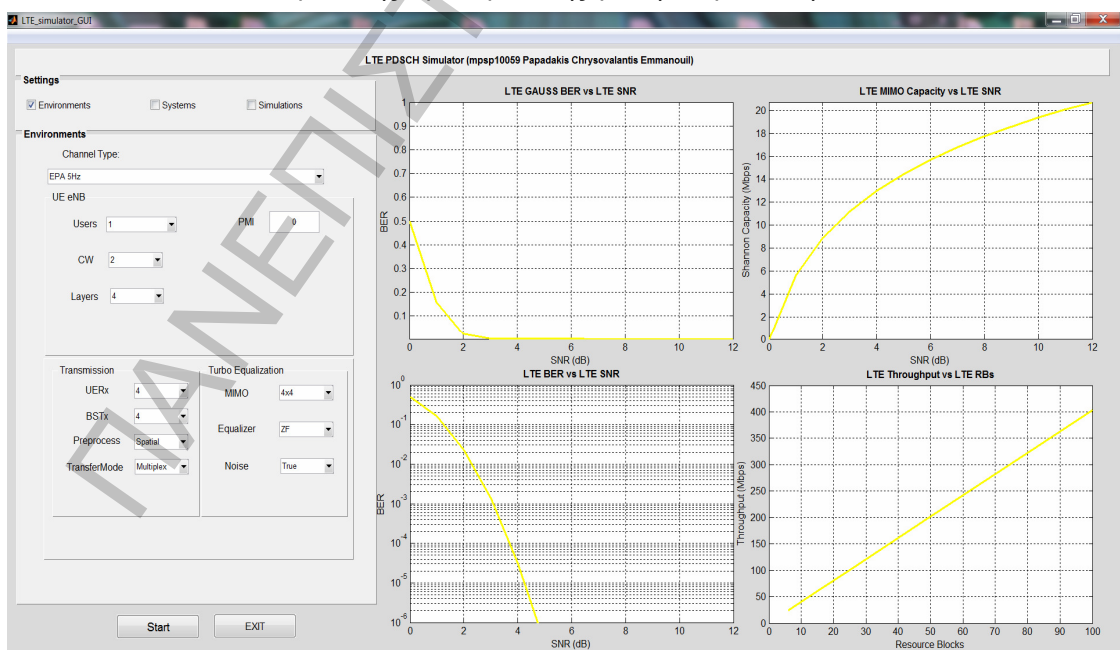
Εικόνα 10 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 1.4 MHz, 64QAM για σύστημα 2x2

Αξιολόγηση 3^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 2x2)

Σε σύγκριση με την ίδια περίπτωση του πρώτου σεναρίου, οι γραφικές παραστάσεις του GAUSSBER και BER εξακολουθούν να παραμένουν αμετάβλητες λόγω του ότι σε όλα τα σεναρία χρησιμοποιούνται οι ίδιες τιμές για τη στάθμη του θορύβου. Όσο αφορά τη χωρητικότητα Shannon, παραμένει στα ίδια επίπεδα. Αντίθετα όμως η ρυθμοαπόδοση αυξάνεται σημαντικά εξαιτίας της αύξησης του ρυθμού διαμόρφωσης του συστήματος, Εικόνα 10.

5.3.2 Περίπτωση MIMO 4x4

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 4x4:



Εικόνα 11 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 1.4 MHz, 64QAM για σύστημα 4x4

Αξιολόγηση 3^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 4x4)

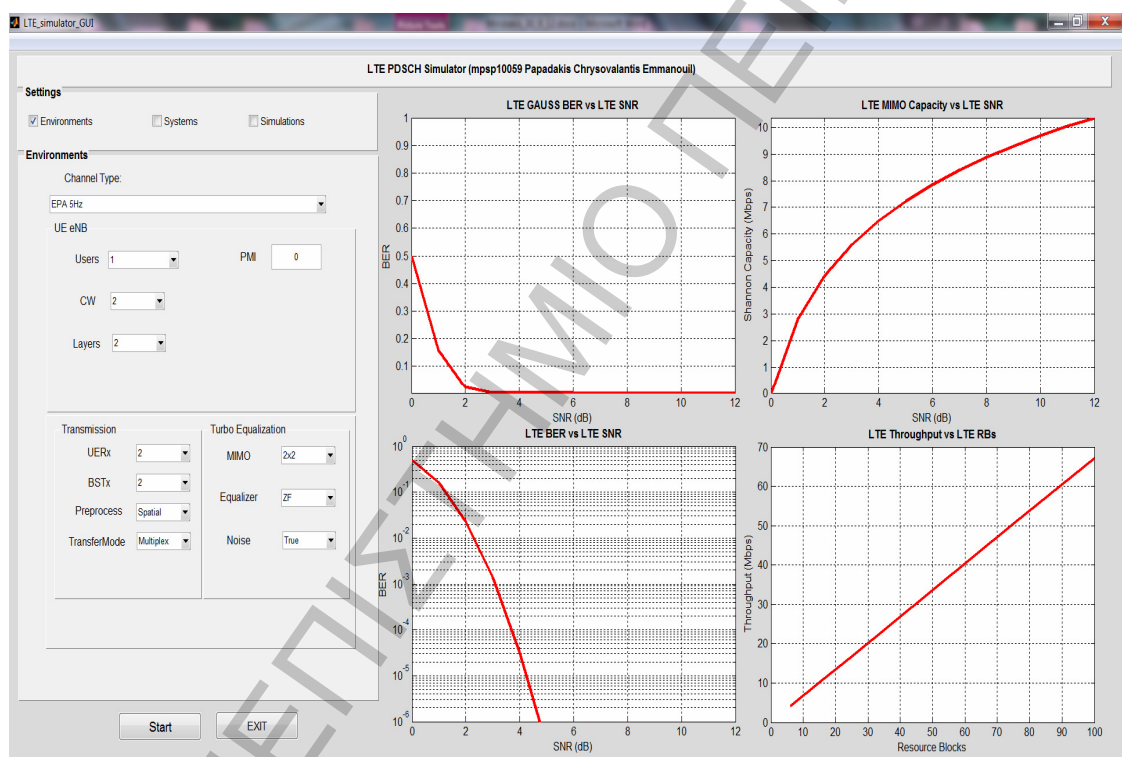
Συγκρίνοντας τα γραφήματα με τα αντίστοιχα του πρώτου σεναρίου, οι γραφικές παραστάσεις του GAUSSBER και BER παραμένουν σταθερές καθώς γίνεται χρήση των ιδιωντιμών της στάθμης του θορύβου του συστήματος. Η χωρητικότητα Shannon, δε διαφοροποιείται, αντίθετα ρυθμοαπόδοση του συστήματος αυξάνεται ραγδαία λόγω της αύξησης του ρυθμού διαμόρφωσης του συστήματος, Εικόνα 11.

5.4 Διεξαγωγή 4^{ου} σεναρίου

Για το τέταρτο σενάριο θα χρησιμοποιηθούν πάλι οι ίδιες παραδοχές του πρώτου σεναρίου εκτός από το σχήμα διαμόρφωσης του συστήματος, το οποίο θα μειωθεί. Συγκεκριμένα η παράμετρος ModulationOrder στην καρτέλα Systems θα λάβει την τιμή 4QAM.

5.4.1 Περίπτωση MIMO 2x2

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 2x2:



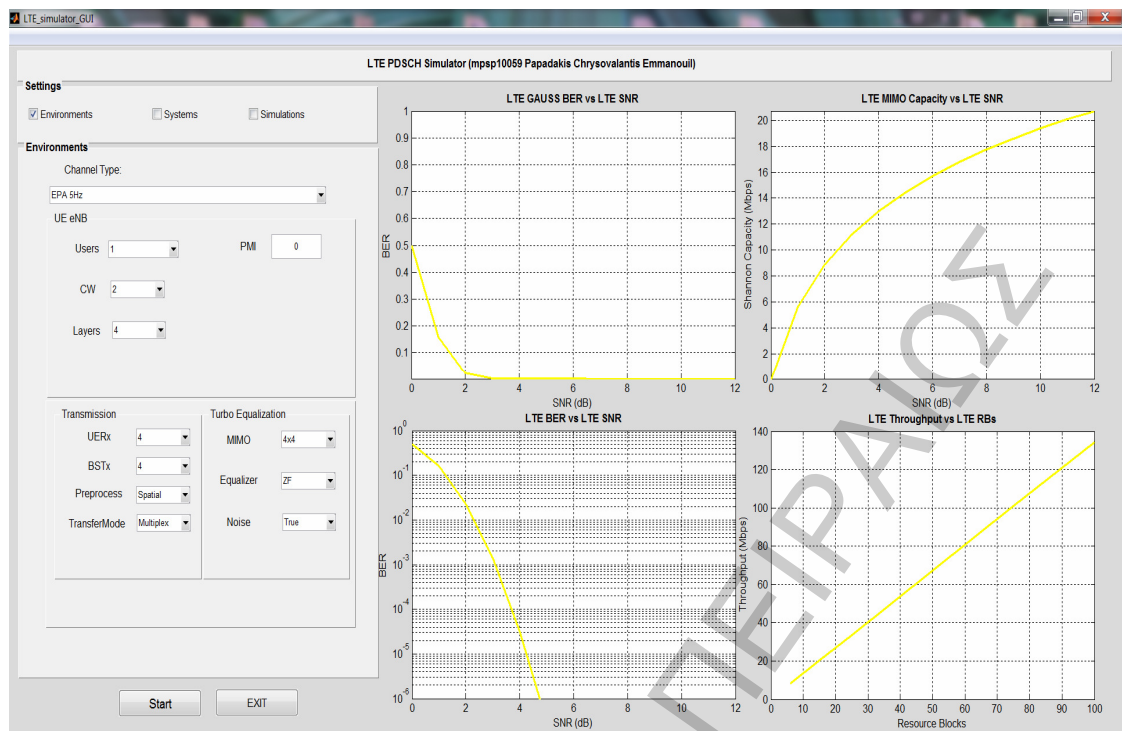
Εικόνα 12 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 1.4 MHz, 4QAM για σύστημα 2x2

Αξιολόγηση 4^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 2x2)

Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του πρώτου σεναρίου, οι τιμές της στάθμης του θορύβου του συστήματος παραμένουν ίδιες οπότε δε σημειώνεται κάποια αλλαγή στα γραφήματα GAUSSBER και BER. Η χωρητικότητα Shannon, παραμένει ίδια αφού δεν επηρεάζεται από το σχήμα διαμόρφωσης, αντίθετα με τη ρυθμοαπόδοση του συστήματος, όπου η τιμή της μειώνεται αισθητά εξαιτίας της μείωσης του ρυθμού διαμόρφωσης του συστήματος, Εικόνα 12.

5.4.2 Περίπτωση MIMO 4x4

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση MIMO 4x4:



Εικόνα 13 Αποτελέσματα προσομοίωσης με EPA 5Hz, 1.4MHz, 4QAM για σύστημα 4x4

Αξιολόγηση 4^{ου} σεναρίου (Περίπτωση MIMO 2x2)

Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του πρώτου σεναρίου, εξακολουθεί να μην παρατηρείται διαφορά στα γραφήματα GAUSSBER και BER. Η χωρητικότητα Shannon, παραμένει ίδια αφού δεν επηρεάζεται από το σχήμα διαμόρφωσης, αντίθετα με τη ρυθμοαπόδοση του συστήματος όπου η τιμή της μειώνεται αισθητά λόγω της μείωσης του ρυθμού διαμόρφωσης του συστήματος, Εικόνα 13.

5.5 Συγκριτικά αποτελέσματα

Ακολουθεί η αριθμητική αποτίμηση των αποτελεσμάτων του εκάστοτε σεναρίου.

5.5.1 1^ο σεναρίου EPA 5Hz, 1.4 MHz, 16QAM

Στο πρώτο σενάριο, προσομοιώνεται ένα σύστημα MIMO 2x2 και ένα MIMO 4x4 αντίστοιχα, με: τύπο διαύλου EPA 5 Hz, τύπος μετάδοσης / προκωδίκευσης Spatial Multiplexing, προσθήκη θορύβου AWGN, τύπο ισοσταθμιστή Zeroforce, εύρος ζώνης συστήματος 1.4 MHz και σχήμα διαμόρφωσης 16 QAM.

- Περίπτωση MIMO 2x2

Όσο αφορά τη χωρητικότητα Shannon, για μια δεδομένη τιμή εύρους ζώνης στην περίπτωση μας 1.4 MHz λαμβάνουμε την τιμή 10.36 Mbps για τη μέγιστη τιμή θορύβου που είναι 12dB. Όσο αφορά τη μέγιστη ρυθμοαπόδοση του συστήματος η τιμή που λαμβάνεται είναι 134.4 Mbps.

- Περίπτωση MIMO 4x4

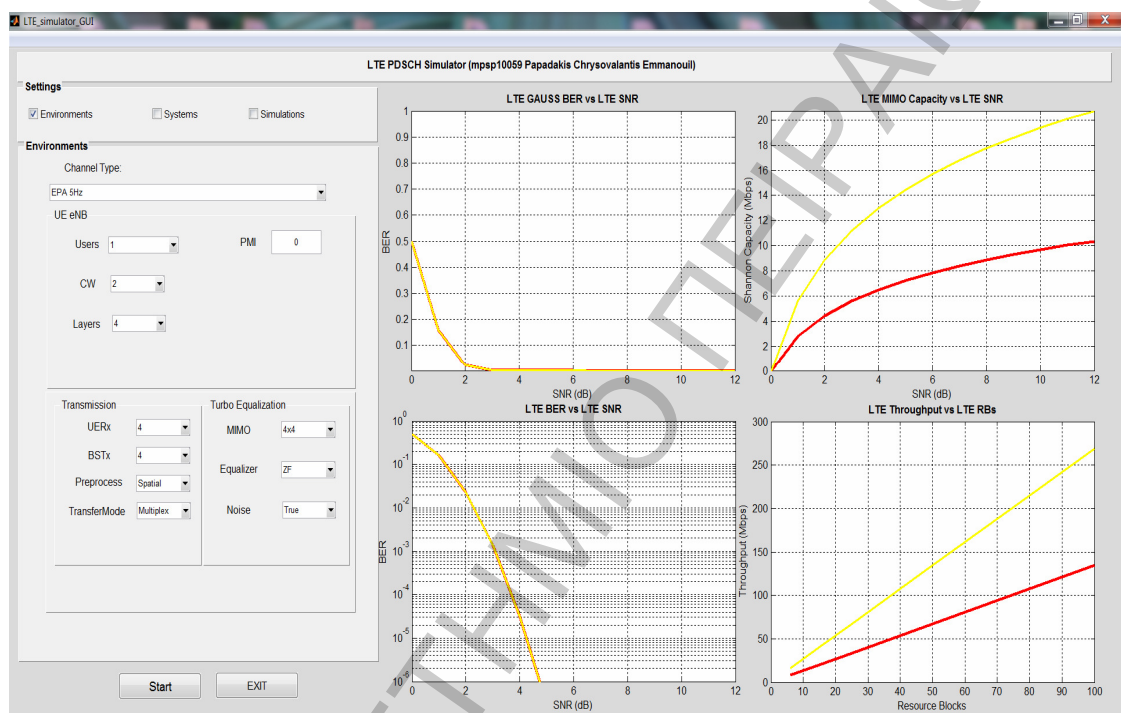
Με το διπλασιασμό των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα, συγκεκριμένα από δύο σε τέσσερις παρατηρούμε το διπλασιασμό τόσο της χωρητικότητας Shannon όσο και της συνολικής ρυθμοαπόδοσης του συστήματος. Συγκεκριμένα η χωρητικότητα του καναλιού λαμβάνει την τιμή 20.72 Mbps και η τιμή της ρυθμοαπόδοσης γίνεται 268.8 Mbps.

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα στατιστικά νούμερα του πρώτου σεναρίου.

Πίνακας 8 Στατιστικά αποτελέσματα 1ου σεναρίου

Σενάριο 1	Μετρικές	MIMO 2x2 (Mbps)	MIMO 4x4 (Mbps)
	Shannon Capacity	10.36	20.72
	System Throughput	134.4	268.8

Απεικόνιση συγκριτικών αποτελεσμάτων 1^{ου} σεναρίου:



Εικόνα 14 Συγκριτικά αποτελέσματα 1^{ου} σεναρίου MIMO 2x2 Vs MIMO 4x4

5.5.2 2^ο σεναρίου EPA 5Hz, 5MHz, 16QAM

Στο δεύτερο σεναρίου, προσομοιώνεται πάλι ένα σύστημα MIMO 2x2 και ένα MIMO 4x4 αντίστοιχα, με: τύπο διαύλου EPA 5 Hz, τύπος μετάδοσης / προκωδίκευσης Spatial Multiplexing, προσθήκη θορύβου AWGN, τύπο ισοσταθμιστή Zeroforce, εύρος ζώνης συστήματος 5MHz και σχήμα διαμόρφωσης 16 QAM.

- Περίπτωση MIMO 2x2**

Όσο αφορά τη χωρητικότητα Shannon, παρατηρούμε πως με την αύξηση του εύρους ζώνης του συστήματος, αυτή αυξάνεται. Συγκεκριμένα η τιμή που λαμβάνει είναι της τάξης των 37 Mbps. Όσο αφορά τη μέγιστη ρυθμοαπόδοση του συστήματος η τιμή παραμένει αμετάβλητη στα 134.4Mbps.
- Περίπτωση MIMO 4x4**

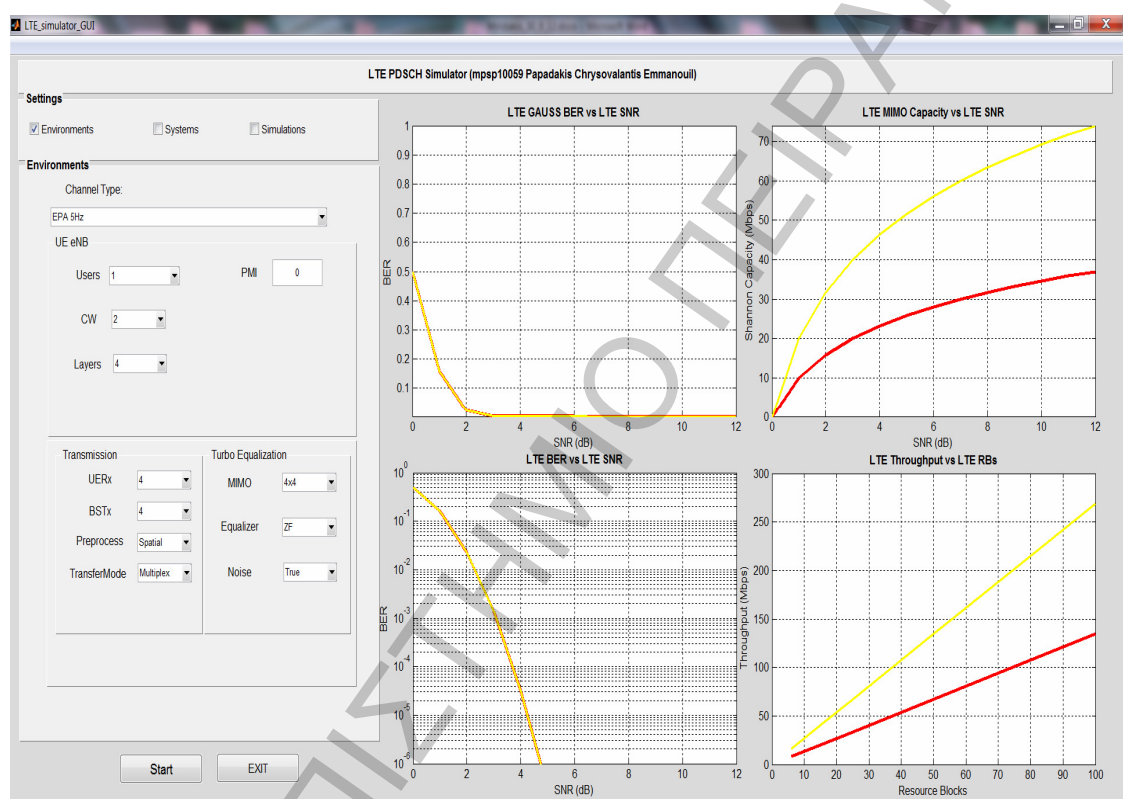
Το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση των τεσσάρων κεραιών εκπομπής και λήψης. Παρατηρούμε πως εξαιτίας της αύξησης του εύρους ζώνης του συστήματος αυξάνεται η χωρητικότητα Shannon ενώ η συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος παραμένει αμετάβλητη. Συγκεκριμένα οι μετρικές λαμβάνουν τις τιμές 74 Mbps και 268.8 Mbps αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα στατιστικά νούμερα του δεύτερου σεναρίου.

Πίνακας 9 Στατιστικά αποτελέσματα 2ου σεναρίου

Σενάριο 2	Μετρικές	MIMO2x2 (Mbps)	MIMO 4x4 (Mbps)
	Shannon Capacity	37	74
	System Throughput	134.4	268.8

Απεικόνιση συγκριτικών αποτελεσμάτων 2^{ου} σεναρίου:



Εικόνα 15 Συγκριτικά αποτελέσματα 2ου σεναρίου MIMO 2x2 Vs MIMO 4x4

5.5.3 3^ο σεναρίου EPA 5Hz, 1.4 MHz, 64QAM

Στο τρίτο σενάριο, το οποίο είναι πανομοιότυπο του πρώτου με τη μόνη διαφορά ότι το σχήμα διαμόρφωσης λαμβάνει την τιμή 64QAM. Η προσομοίωση γίνεται πάλι για συστήματα MIMO 2x2 και για συστήματα 4x4. Οι μεταβλητές ρυθμίζονται όπως παρακάτω: τύπος διαύλου EPA 5 Hz, τύπος μετάδοσης / προκωδίκευσης Spatial Multiplexing, προσθήκη θορύβου AWGN, τύπος ισοσταθμιστή Zeroforce, εύρος ζώνης συστήματος 1.4MHz και σχήμα διαμόρφωσης 64 QAM.

- Περίπτωση MIMO 2x2
 Όσο αφορά τη χωρητικότητα Shannon, παρατηρούμε πως με την αύξηση του σχήματος διαμόρφωσης στα 64QAM, παρατηρούμε πως παραμένει ίδια με αυτήν του 1^{ου} σεναρίου στα 10.36 Mbps, όταν δηλαδή το σχήμα διαμόρφωσης ήταν στα 16QAM, ενώ η συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος αυξάνεται στα 201.6 Mbps.
- Περίπτωση MIMO 4x4

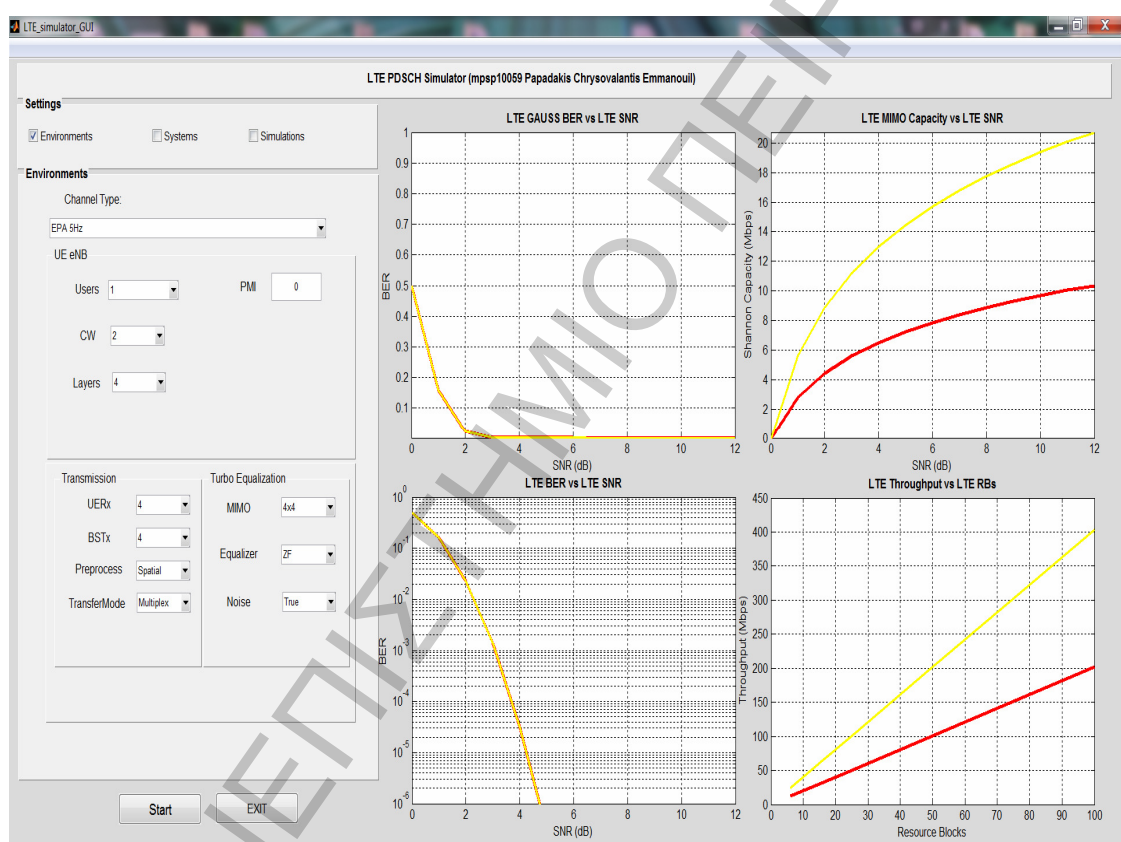
Αντίστοιχα συμβαίνουν και στην περίπτωση της τεχνικής MIMO 4x4 όσο αφορά την τιμή χωρητικότητας Shannon να παραμένει στα 20.72 Mbps και η συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος να εκτινάσσεται στα 403.2 Mbps.

Τα στατιστικά νούμερα του τρίτου σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10 Στατιστικά αποτελέσματα 3ου σεναρίου

Σενάριο 3	Μετρικές	MIMO 2x2 (Mbps)	MIMO 4x4 (Mbps)
	Shannon Capacity	10.36	20.72
	System Throughput	201.6	403.2

Απεικόνιση συγκριτικών αποτελεσμάτων 3ου σεναρίου:



Εικόνα 16 Συγκριτικά αποτελέσματα 3ου σεναρίου MIMO 2x2 Vs MIMO 4x4

5.5.4 4ο σενάριο EPA 5Hz, 1.4 MHz, 4QAM

Στο τέταρτο σενάριο, όπου είναι πάλι παραλλαγή του πρώτου το σχήμα διαμόρφωσης λαμβάνει την τιμή 4QAM. Η προσομοίωση γίνεται πάλι για συστήματα MIMO 2x2 και για συστήματα 4x4. Οι μεταβλητές ρυθμίζονται όπως ακολουθεί: τύπος διαύλου EPA 5 Hz, τύπος μετάδοσης / προκωδίκευσης Spatial Multiplexing, προσθήκη θορύβου AWGN, τύπος ισοσταθμιστή Zeroforce, εύρος ζώνης συστήματος 1.4MHz και σχήμα διαμόρφωσης 4 QAM.

- Περίπτωση MIMO 2x2

Όσο αφορά τη χωρητικότητα Shannon, παρατηρούμε πως με τη μείωση του σχήματος διαμόρφωσης στα 4QAM, και πάλι η τιμή της παραμένει ίδια με αυτήν του 1^{ου} σεναρίου στα 10.36 Mbps, όταν δηλαδή το σχήμα διαμόρφωσης ήταν στα 16QAM, όμως η συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος μειώνεται στα 67.2Mbps.

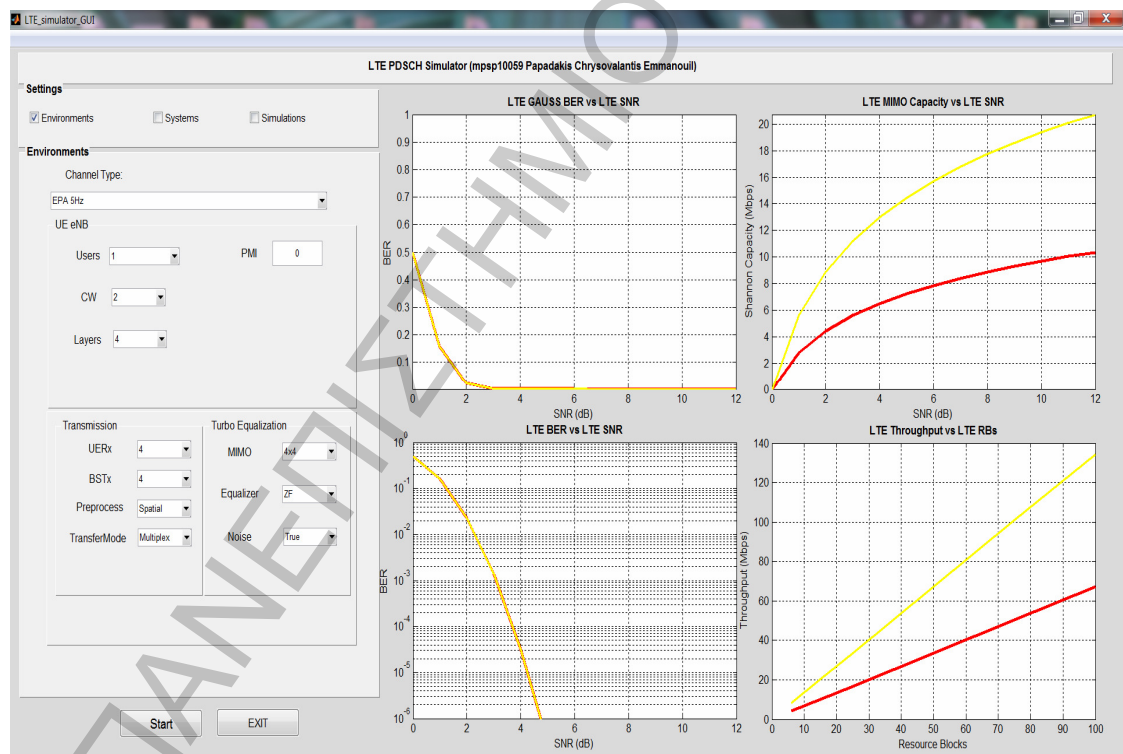
- Περίπτωση MIMO 4x4
Ανάλογα ισχύουν και στην περίπτωση των τεσσάρων κεραιών λήψης και εκπομπής όσο αφορά την τιμή χωρητικότητας Shannon να παραμένει στα 20.72 Mbps και η συνολική ρυθμοαπόδοση του συστήματος να μειώνεται στα 134.4 Mbps.

Ακολουθούν τα στατιστικά νούμερα του τέταρτου σεναρίου στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11 Στατιστικά αποτελέσματα 4ου σεναρίου

Σενάριο 4	Μετρικές	MIMO2x2 (Mbps)	MIMO 4x4 (Mbps)
	ShannonCapacity	10.36	20.72
	System Throughput	67.2	134.4

Απεικόνιση συγκριτικών αποτελεσμάτων 4^{ου} σεναρίου:



Εικόνα 17 Συγκριτικά αποτελέσματα 4^{ου} σεναρίου MIMO 2x2 Vs MIMO 4x4

Στον Πίνακα 12 παρατίθενται τα συγκεντρικά αποτελέσματα για όλες τις προσομοιώσεις:

Bandwidth	Modulation	MIMO	Shannon Capacity	System Throughput	BER	BER
-----------	------------	------	------------------	-------------------	-----	-----

(Mbps)	(QAM)		(Mbps)	(Mbps)	MIN	MAX
1.4	4	2x2	10.36	67.2	1.7*10 ⁻³³	0.5
		4x4	20.72	134.4		
	16	2x2	10.36	134.4		
		4x4	20.72	268.8		
	64	2x2	10.36	201.6		
		4x4	20.72	403.2		
5	16	2x2	37	134.4		
		4x4	74	268.8		

Πίνακας 12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων

6. Συμπεράσματα

6.1 Αποτίμηση

Το LTE είναι σε θέση να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των κινητών δικτύων της επόμενης γενιάς τόσο όσο αφορά το θέμα των ήδη υπάρχοντων φορέων εκμετάλλευσης 3GPP/3GPP2 όσο και στο θέμα των συνδρομητών. Επιτρέπει στους παρόχους να προσφέρουν υψηλές επιδόσεις, τη

διεύρυνση της αγοράς των κινητών επικοινωνιών με ευρυζωνικές υπηρεσίες μέσω ενός συνδυασμού υψηλού ρυθμού δεδομένων και ρυθμοαπόδοσης του συστήματος, τόσο στο downlink όσο και στο uplink και με χαμηλή καθυστέρηση.

Η υποδομή του LTE σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι απλή στην εγκατάσταση και στη λειτουργία της, χάρη στην ευέλικτη τεχνολογία αυτό μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών συχνοτήτων. Το LTE προσφέρει:

- Μέγιστες ρυθμοαποδόσεις, για την περίπτωση υψηλής φασματικής απόδοσης, όσο αφορά την κάτω ζεύξη, ταχύτητες της τάξης των 100 Mb/s για SISO, 173 Mb/s 2x2 MIMO, 326 Mb/s 4x4 MIMO με εύρος ζώνης 20 MHz και όσο αφορά την άνω ζεύξη ταχύτητες 58 Mb/s με σχήμα διαμόρφωσης 16 QAM και 86 Mb/s με σχήμα διαμόρφωσης 64 QAM (με 1 TxUE).
- Αυξημένη αποδοτικότητα φάσματος έως και 3-4 φορές μεγαλύτερη από αυτή του HSDPA για την περίπτωση MIMO 2x2 για το downlink και 2-3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του E-DCH για MIMO 1x2 όσο αφορά το uplink.
- Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση της τάξης των 10ms για round-trip delay (RTD) από το κινητό τερματικό προς τον εξυπηρετητή και μειωμένους χρόνους ανταπόκρισης κλήσεων μεγέθους (50-100ms)
- Εξυπηρέτηση 200 χρηστών για εύρος ζώνης 5MHz και 400 για μεγαλύτερες κατανομές φάσματος.
- Κλιμακούμενο εύρος ζώνης (1.4, 3/3.2, 5, 10, 15, 20 MHz), σε συνδυασμό με την υποστήριξη συζευγμένου FDD και ασύζευκτου φάσματος TDD. Επίσης χρησιμοποιεί όλες τις συχνότητες του IMT-2000: 450 MHz έως 2.6 GHz

Η αρχιτεκτονική LTE-SAE μειώνει τον αριθμό των κόμβων, υποστηρίζει ευελιξία στις ρυθμίσεις του δικτύου και παρέχει ένα υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας της υπηρεσίας. Επίσης το LTE-SAE συνλειτουργεί με τα: GSM, WCDMA / HSPA, TD-SCDMA και CDMA.

Για να επιτευχθεί αυτή η απόδοση, το LTE κάνει την καλύτερη δυνατή χρησιμοποίηση των τελευταίων τεχνολογιών της αγοράς. Χρησιμοποιεί ένα νέο σχήμα διαμόρφωσης που βασίζεται στο OFDM, και την τελευταία τεχνολογία κεραιών, όπως αυτή της MIMO. Στο δίκτυο κορμού, εισάγεται μια τοπολογία του δικτύου IP based η οποία μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του δικτύου. Το LTE δε θα είναι διαθέσιμο μόνο σε κινητά επόμενης γενιάς, αλλά σε φορητούς υπολογιστές, σε ultra-portables, φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες, σε MBRs (Mobile Broadband Router) και σε άλλες συσκευές που επωφελούνται από κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες.

Η παρούσα διπλωματική, στο θεωρητικό της μέρος είχε ως στόχο την ανάπτυξη μιας όσο το δυνατό γίνεται κατατοπιστικής βιβλιογραφικής έρευνας στα πλαίσια του έργου μιας μεταπτυχιακής εργασίας.

Στο πρακτικό της μέρος, πραγματοποιήθηκε η μελέτη της μετάδοσης όσο αφορά το Downlink. Αναπτύχθηκαν τέσσερα σενάρια προσομοίωσης και ακολούθησε ξεχωριστά η ερμηνεία τους για το κάθε ένα καθώς και η συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή αναλύονται παρακάτω:

- Οι τιμές του Gauss-Ber και του Ber μειώνονται γραμμικά όσο αυξάνεται το SNR.
- Η χωρητικότητα Shannon αυξάνεται λογαριθμικά όσο αυξάνεται το SNR και είναι πάντα διπλάσια της περίπτωσης MIMO 2x2, στην περίπτωση MIMO 4x4, ανεξάρτητα από το σχήμα διαμόρφωσης.
- Όσο αυξάνεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος τόσο αυξάνεται η χωρητικότητα Shannon, ανεξάρτητα από το σχήμα διαμόρφωσης.
- Όσο αυξάνεται το σχήμα διαμόρφωσης δηλαδή από 4QAM έως 64QAM τόσο αυξάνεται η ρυθμοαπόδοση του συστήματος, ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης.
- Όσο αυξάνονται οι διαθέσιμες πλοκάδες πόρων του συστήματος, τόσο αυξάνεται η ρυθμοαπόδοσή του, η οποία είναι πάντα διπλάσια της περίπτωσης MIMO 2x2, στην περίπτωση MIMO 4x4.

6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην παρουσία μεταπτυχιακή εργασία υλοποιήθηκε μια προσομοίωση του φυσικού επιπέδου συγκεκριμένα για την κάτω ζεύξη σύμφωνα με το πρότυπο LTE για την περίπτωση της τεχνικής μετάδοσης χωρικής πολυπλεξίας MIMO 2x2 και MIMO 4x4.

Μια πρώτη πρώτη πιθανή προέκταση θα μπορούσε να είναι η υλοποίηση της εφαρμογής όσο αφορά την περίπτωση της αμφιδρόμησης διαίρεση συχνότητας(FDD), με αποτέλεσμα να είχαμε μια ολοκληρωμένη εικόνα και για τα δύο σχήματα αμφιδρόμησης που υποστηρίζονται από το τεχνολογικό πρότυπο LTE.

Επίσης μια άλλη πιθανή προέκταση που προκύπτει θα μπορούσε να είναι η μελέτη της περίπτωσης στο κομμάτι της ανερχόμενης ζεύξης. Δηλαδή τι γίνεται στην περίπτωση όπου το κινητό τερματικό μεταδίδει προς το σταθμό βάσης.

Μια άλλη περίπτωση μελέτης θα μπορούσε να είναι, αναφέρονται ενδεικτικά, η υλοποίηση της εκπομπής διαφορισμού ή της μονής κεραίας εκπομπής ως τεχνική μετάδοσης, ώστε να γίνει μια ολοκληρωμένη σύγκριση των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζονται από το συγκεκριμένο τεχνολογικό πρότυπο.

Επίσης, μια άλλη εναλλακτική περίπτωση έρευνας θα μπορούσε να είναι η χρήση του TurboEncoding στο κανάλι διάλειτουργίας Rayleigh, ώστε να γίνει μια ολοκληρωμένη μελέτη των μεθοδολογιών του συγκεκριμένου τεχνολογικού προτύπου.

Μια τελευταία πρόταση θα μπορούσε να είναι η επέκταση της εφαρμογής, ώστε να υποστηρίζει MU-MIMO, ώστε να παρουσιαστεί ο τρόπος κατανομής των πόρων στο σύστημα και να αναδειχθούν οι διαφορές σε σχέση με την περίπτωση SU-MIMO που υλοποιήθηκε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ericsson, *LTE: AN INTRODUCTION*, Stocholm: Ericsson AB, 2011.
- [2] Alcatel-Lucent, *Long Term Evolution (LTE)*, Paris: Alcatel-Lucent, 2008.
- [3] Amit Kumar, Dr. Yunfei Liu and Amit Wason. "The Roadmap to 4G Mobile Wireless Networks." *Global Journal of Computer Science and Technology (GJCST)* 10,

- no. 4 (June 2010): 50-53.
- [4] Mishra A., *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G...Evolution to 4G*, Wiley and Sons, 2004.
- [5] International Telecommunication Union, *Measuring the Information Society*, ITU, 2012
- [6] Rhee M., *Mobile Communication Systems and Security*, Wiley and Sons, 2009.
- [7] “Transition to 4G: 3GPP broadband evolution to IMT-advanced 4G”, Rysavy Research/3G Americas, Sep. 2010.
- [8] Salman T., *Backhaul Bottleneck?* Ανάκτηση Νοέμβριος 2012, από OSP Magazine: <http://www.ospmag.com/issue/article/backhaul-bottleneck>.
- [9] Khan A., Qadeer M., Ansari J., Waheed S., “4G as a Next Generation Wireless Network”, *International Conference on Future Computer and Communication*, IC FCC 2009.
- [10] Brydor A., *Cellular network improvements will drive 3G traffic*, 2009, Ανάκτηση Δεκέμβριος 2012, από <http://www.unwiredinsight.com/2009/3g-enhancements-drive-traffic>.
- [11] Santhi K., Prof. Srivastava V., Qadeer, Senthil K., Butere E., “Goals of True Broadband’s Wireless Next Wave (4G-5G)”, *International Conference on Future Computer and Communication*, 0-7803-7954-3/03 2003 IEEE.
- [12] Frattasi S., Fathi H., Fitzek F., Prasad R., Aalborg University; Marcos D. Katz, Samsung Electronics, “Defining 4G Technology from the User’s Perspective”, *IEEE Network January/February 2006*.
- [13] Parkvall S., Englund E., Furuskär A, Dahlman E, Jönsson T, Paravati A., “ LTE evolution towards IMT-advanced and commercial network performance”, *IEEE Communication Systems Conference*, pp. 151-155, November 17-19, Singapore, 2010.
- [14] Parkvall S., Englund E., Furuskär A, Dahlman E, “Evolution of LTE toward IMT-Advanced”, *IEEE Magazine*, pp. 84-91, February 2011.
- [15] Mercoledi, *Misure su segnali DVB - Parte 3*. Ανάκτηση Δεκέμβριος 2012, από <http://www.strumentazioneelettronica.it/tecnologie/wireless/misure-su-segnali-dvb-parte-3-20091230372/>, December 2009.

- [16] Yarali A., Rajai M., Parsaee G., “An Introduction to OFDM for Next-Generation Wireless Networks”, *The International Journal of Applied Management and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 264-279, November 2008.
- [17] Berardinelli G., Temiño L., Rahmad M., Mogensen P., Aalborg University; “OFDMA VS. SC-FDMA: PERFORMANCE COMPARISON IN LOCAL AREA IMT-A SCENARIOS”, *IEEE Magazine*, pp. 64-72, October 2008.
- [18] Dahlman E., Parkvall S., Sköld J., *4G: LTE / LTE – Advanced for Mobile Broadband*, Elsevier Publishers, 2011.
- [19] Holma H., Toskala A., *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, John Wiley & Sons, 2009.
- [20] Yonis A., Abdullah F., Ansari J., Ghanim M., “LTE-FDD and LTE-TDD for Cellular Communications”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, (KL), Malaysia, pp. 1467-1471, March 2012.
- [21] Tröster C., *Guidelines for MIMO Test Setups – Part 2*, Rohde & Schwarz, München, 2010.
- [22] Li Y., Prikhodko D., Tkachenko Y., Zhu R., *Compact Power Amplifier for LTE Mobile Terminals Using Coupling Variation Reduction Technique*. Ανάκτηση Δεκέμβριος 2012, από <http://www.mpdigest.com/issue/Articles/2011/apr/skyworks/Default.asp>, April 2011.
- [23] Parkvall S., Dahlman E., Furuskar A., Jading Y., Olsson M., Wanstedt S., Zangi K., “LTE-Advanced - Evolving LTE towards IMT-Advanced”, *Vehicular Technology Conference*, pp. 1-5, 2008
- [24] 3GPP, Overview of 3GPP Release 10 V0.1.7, 3GPP, January 2013.
- [25] 3GPP, Overview of 3GPP Release 11 V0.1.3, 3GPP, January 2013.
- [26] 3GPP, Overview of 3GPP Release 12 V0.0.6, 3GPP, January 2013.
- [27] Lescuyer P., Lucidarme T., *EVOLVED PACKET SYSTEM (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*, John Wiley & Sons, 2008.
- [28] OSS Nokalva, Inc., *LTE UE Protocol Stack*, Ανάκτηση Δεκέμβριος 2012, από

- <http://www.oss.com/4G/products/lte-ue/lte-ue.html>, USA.
- [29] Ghosh A., Zhanq J., Andrews J., *Fundamentals of LTE*, Pearson Education (US), 2010.
- [30] Dahlman E., Parkvall S., Sköld J., Beming P., *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Elsevier Publishers, 2007.
- [31] Zyren J., “Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer”, Whitepaper, July 2007.
- [32] Sesia S., Parkvall S., Toufik I., Baker M., *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practise 2nd ed.*, John Wiley & Sons, 2011.
- [33] Sesia S., Parkvall S., Toufik I., Baker M., *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practise*, John Wiley & Sons, 2009.
- [34] Fodor G., Koutsimanis C., Parsaee, Racza A., Reider N., “Intercell Interference Coordination in OFDM Networks and in the 3GPP Long Term Evolution System”, *Journal of Communications*, vol. 4, No. 7, pp. 445-453, August 2009.
- [35] Al Shalash M., Khafizov F., Chao Z., “Interference Constrained Soft Frequency Reuse for Uplink ICIC in LTE Networks”, in *21st Annual IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 1-4244-8016-6/10 2010 IEEEES*.
- [36] Dahlman E., Parkvall S., Sköld J., Beming P., *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband 2nd ed.*, Elsevier Publishers, 2008.
- [37] Lee J., Han J., Zhang J., “MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2009, Article ID: 302092. Ανάκτηση Δεκέμβριος 2012, από <http://www.hindawi.com/journals/wcn/2009/302092.html> on 18.08.2010
- [38] Khlifi A., Bouallegue R., Ansari J., “Comparison between Performances of Channel Estimation Techniques for CP-LTE and ZP-LTE Downlink Systems”, in *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*, vol. 4, No. 4, pp. 223-233, July 2012.
- [39] Bhagya R., Ananth G., “Study Of Transmission Characteristics Of 2x2 MIMO System for OFDM Multiplexing and Bpsk Modulation With ZF Equalizer And MMSE Receivers”, in *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, vol. 2, iss. 3, pp. 37-40, July 2012.

- [40] *Smartphone Reviews and News, App Reviews for Smartphones*. Ανάκτηση Νοέμβριος 2012, από <http://www.brightand.com/>.
- [41] *Matlab – The Language of Technical Computing Smartphone Reviews and News*, Ανάκτηση Δεκέμβριος 2012, από <http://www.mathworks.com/>.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Παράρτημα 1.1: Δημιουργία ακολουθιών δυαδικής πληροφορίας

```
function StartBits = BitGenerator(nTB,sizeTB)

    warning('off','comm:obsolete:randint')

    a = cell(nTB,1);
    for iTB = 1:nTB
        a{iTB} = randint(1,sizeTB); %Γεννήτορας τυχαίας ακολουθίας
    end

    StartBits=cell2mat(a);

end
```

Παράρτημα 1.2: Διαδικασία περίπλεξης των δυαδικών ακολουθιών πληροφορίας

```
Function ScrambleBits = Scrambling (codeBit,iCW,RNTI,iSubFrame,cellID)

    ns = iSubFrame*2;
    Nc = 1600; %Παράμετρος fast forwarding ακολουθίας gold για την εξασφάλιση low cross
correlation

    nBit = size(codeBit,2);
    nPN = nBit; %Το μήκος της ακολουθίας είναι ίσο με τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων ανά
codeword

    x1 = zeros(1,nPN+Nc);
    x2 = zeros(1,nPN+Nc);

    x1(1,1:31) = bitget(1,1:31);
```



```

if mod(ns,2) == 0
    c_init = RNTI*2^14+(iCW-1)*2^13+floor(ns/2)*2^9+cellID; %Γεννήτορας ακολουθίας
gold
    x2(1:31) = bitget(c_init,1:31);
end

for n = 1:nPN+Nc-31
    x1(1,n+31) = mod((x1(n+3)+x1(n)),2); %Δημιουργία ακολουθίας x1
    x2(n+31) = mod((x2(n+3)+x2(n+2)+x2(n+1)+x2(n)),2); %Δημιουργία ακολουθίας x2
end

c = mod((x1(1+Nc:end)+x2(1+Nc:end)),2); % Scrambler

ScrambleBits = mod(codeBit+c,2);

```

Παράρτημα 1.3: Διαδικασία διαμόρφωσης των δυαδικών ακολουθιών πληροφορίας σε μιγαδικές ακολουθίες

```

function ModSignal = Modulation(ScrambleBits,Qm)

switch Qm
case 2
    numbits=length(ScrambleBits);
    for n = 1:2:numbits
        switch ScrambleBits(n)
        case 0
            Re(n) = 1/sqrt(2);
        case 1
            Re(n) = -1/sqrt(2);
        end
        switch ScrambleBits(n + 1)
        case 0
            Im(n) = 1/sqrt(2);
        case 1
            Im(n) = -1/sqrt(2);
        end

        ModSignal(floor(n / 2) + 1) = Re(n) + j * Im(n);
    end

case 4
    numbits=length(ScrambleBits);
    %16QAM
    for n=1:4:numbits
        % Real
        switch ScrambleBits(n)
        case 0
            switch ScrambleBits(n + 2)
            case 0
                Re(n) = 1/sqrt(10);
            case 1
                Re(n) = 3/sqrt(10);
            end
        end
    end

```

```

case 1
switch ScrambleBits(n + 2)
case 0
    Re(n) = -1/sqrt(10);
case 1
    Re(n) = -3/sqrt(10);
end
end
%Im
switch ScrambleBits(n + 1)
case 0
switch ScrambleBits(n + 3)
case 0
    Im(n) = 1/sqrt(10);
case 1
    Im(n) = 3/sqrt(10);
end
case 1
switch ScrambleBits(n+3)
case 0
    Im(n) = -1/sqrt(10);
case 1
    Im(n) = -3/sqrt(10);
end
end

    ModSignal(floor(n / 4) + 1) = Re(n) + j * Im(n);
end

case 6
    numbits=length(ScrambleBits);
    for n=1:6:numbits
    % Real
    switch ScrambleBits(n)
    case 0
    switch ScrambleBits(n + 2)
    case 0
    switch ScrambleBits(n+4)
    case 1
        Re(n)= 1/sqrt(42);
    case 0
        Re(n)= 3/sqrt(42);
    end
    case 1
    switch ScrambleBits(n+4)
    case 1
        Re(n)= 7/sqrt(42);
    case 0
        Re(n)= 5/sqrt(42);
    end
    end
    case 1
    switch ScrambleBits(n + 2)
    case 0
    switch ScrambleBits(n+4)
    case 1
        Re(n) = -1/sqrt(42);

```

```

case 0
    Re(n) = -3/sqrt(42);
end
case 1
switch ScrambleBits(n+4)
case 1
    Re(n) = -7/sqrt(42);
case 0
    Re(n) = -5/sqrt(42);
end
end
end
% Im
switch ScrambleBits(n+1)
case 0
switch ScrambleBits(n + 3)
case 0
switch ScrambleBits(n+5)
case 1
    Im(n)= 1/sqrt(42);
case 0
    Im(n)= 3/sqrt(42);
end
case 1
switch ScrambleBits(n+5)
case 1
    Im(n)= 7/sqrt(42);
case 0
    Im(n)= 5/sqrt(42);
end
end
case 1
switch ScrambleBits(n + 3)
case 0
switch ScrambleBits(n+5)
case 1
    Im(n) = -1/sqrt(42);
case 0
    Im(n) = -3/sqrt(42);
end
case 1
switch ScrambleBits(n+5)
case 1
    Im(n) = -7/sqrt(42);
case 0
    Im(n) = -5/sqrt(42);
end
end
end
ModSignal(floor(n / 6) + 1) = Re(n) + j * Im(n);

end
end

```

Παράρτημα 1.4: Διαδικασία απεικόνισης των ακολουθιών πληροφορίας σε ρεύματα δεδομένων

```

function LayerSymbols = LayerMapping(input, nCW, nLayers)

switch nCW
case 2
switch nLayers
case 2
    len = length(input{1});
    LayerSymbols = zeros(nLayers,len);
    LayerSymbols(1,:) = input{1};    %1o Stream(port 0)
    LayerSymbols(2,:) = input{2};    %2o Stream(port 1)

case 4
    len = length(input{1});
    LayerSymbols = zeros(nLayers,len/2);
    LayerSymbols(1,:) = input{1}(1,1:2:len-1); %1o Stream(Μονά 1ου - port 0)
    LayerSymbols(2,:) = input{1}(1,2:2:len-0); %2o Stream(Ζυγά 1ου - port 1)
    LayerSymbols(3,:) = input{2}(1,1:2:len-1); %3o Stream(Μονά 2ου - port 2)
    LayerSymbols(4,:) = input{2}(1,2:2:len-0); %4o Stream(Ζυγά 2ου - port 3)

end
end

LayerSymbols = LayerSymbols'; %Αναστροφή του πίνακα.

end

```

Παράρτημα 1.5: Διαδικασία εφαρμογής του μηχανισμού προκωδίκευσης

```

function [PrecodedSymbols, Wn] = Precoding(LayerSymbols, nLayers, nTx, PMI)

length = size(LayerSymbols, 1);
j = complex(0,1);

%Εύρεση διανυσμάτων Wn ανάλογα με τον Precoding Matrix Indicator
switch nTx
case 2
    Wn = complex(ones(nTx, nLayers));
switch PMI
case 0
switch nLayers
case 1
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 1].';
case 2
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 0; 0 1].';
end
case 1
switch nLayers
case 1
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 -1].';
case 2
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 1; 1 -1].';
end
case 2

```

```

switch nLayers
case 1
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 j].';
case 2
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 1; j -j].';
end
case 3
switch nLayers
case 1
    Wn = (1/sqrt(2))*[1 -j].';
case 2
    assert(false, 'Den exei kathoristei');
end
end
case 4
    un = complex(ones(nTx, 1));
    Wn = complex(zeros(nTx, 4));
switch PMI
case 0
    un = [1 -1 -1 -1].';
case 1
    un = [1 -j 1 j].';
case 2
    un = [1 1 -1 1].';
case 3
    un = [1 j 1 -j].';
case 4
    un = [1 (-1-j)/sqrt(2) -j (1-j)/sqrt(2)].';
case 5
    un = [1 (1-j)/sqrt(2) j (-1-j)/sqrt(2)].';
case 6
    un = [1 (1+j)/sqrt(2) -j (-1+j)/sqrt(2)].';
case 7
    un = [1 (-1+j)/sqrt(2) j (1+j)/sqrt(2)].';
case 8
    un = [1 -1 1 1].';
case 9
    un = [1 -j -1 -j].';
case 10
    un = [1 1 1 -1].';
case 11
    un = [1 j -1 j].';
case 12
    un = [1 -1 -1 1].';
case 13
    un = [1 -1 1 -1].';
case 14
    un = [1 1 -1 -1].';
case 15
    un = [1 1 1 1].';
end
    Wn = eye(4) - 2*(un*un')./(un'*un);
    Wn = Wn./sqrt(nLayers);

end

PrecodedSymbols = zeros(size(LayerSymbols));

```

```

%Πολ/ασμός κάθε συμβόλου με Wn
for i = 1:length

    temp = Wn * (LayerSymbols(i, :).');
    PrecodedSymbols(i, :) = temp.';

end

```

Παράρτημα 1.6: Διαδικασία απεικόνισης των στοιχείων των πόρων

```

function [MappingSymbols, GoldSequences] = ResourceMapping(PrecodedSymbols,
GoldSequence, nTx, CellID, nRB, SubCarriers, Slotsymbols, maxDLRB, sub_index)

Totalsubc=nRB*SubCarriers;
nOfdmSymb=2*Slotsymbols;
maxDLRB = 110;
v_shift = mod(CellID,6);
RadioFrame = cell(nTx,1);

for iTx=1:nTx
    RadioFrame{iTx}=zeros(nOfdmSymb,nRB*SubCarriers).';
end

for port=1:nTx

    switch port
    case 1 %Ραδιοπλάισιοτης θύρας0
        for ns= 2*sub_index:2*sub_index+1
            kk=mod(ns,2);
            l=0;
            v=0;

            for m0 = 0:2*nRB-1
                m1 = m0+maxDLRB-nRB+1;
                k = (6*m0+mod((v+v_shift),6))+1;
                RadioFrame{1}(k,l+Slotsymbols*kk+1) = GoldSequence((m1),port);
            %Απεικόνισησήματοςαναφοράςστοραδιοπλάισιο
            end

            l=Slotsymbols-3;
            v=3;
            for m0 = 0:2*nRB-1
                m1 = m0+maxDLRB-nRB+1;
                k = 6*m0+mod((v+v_shift),6)+1;
                RadioFrame{1}(k,l+Slotsymbols*kk+1) = GoldSequence((m1),port);
            %Απεικόνισησήματοςαναφοράςστοραδιοπλάισιο
            end
        end
    case 2 % Ραδιοπλάισιοτης θύρας 1
        for ns= 2*sub_index:2*sub_index+1
            kk=mod(ns,2);
            l=0;
            v=3;
            for m0 = 0:2*nRB-1
                m1 = m0+maxDLRB-nRB + 1;

```

```

        k = 6*m0+mod((v + v_shift),6)+1;
        RadioFrame{2}(k,l+Slotsymbols*kk+1) = GoldSequence((m1),port);
    %Απεικόνισησήματοςαναφοράςστοραδιοπλάσιο
    end

    l=Slotsymbols - 3;
    v=0;
    for m0 = 0:2 *nRB-1
        m1 = m0+maxDLRB-nRB+1;
        k = 6*m0+mod((v + v_shift),6)+1;
        RadioFrame{2}(k,l+Slotsymbols*kk+1) = GoldSequence((m1),port);
    end
    end
    case 3 % Ραδιοπλάσιοτης θύρας 2
    for ns= 2 * sub_index : 2 * sub_index + 1
        kk=mod(ns,2);
        l=1;
        v=3*mod(ns,2);
    for m0 = 0:2*nRB-1
        m1 = m0+maxDLRB-nRB+1;
        k = 6*m0+mod((v + v_shift),6)+1;
        RadioFrame{3}(k,l +Slotsymbols*kk+1) = GoldSequence((m1),port);
    end
    end
    case 4 % Ραδιοπλάσιοτης θύρας 3
    for ns= 2*sub_index:2*sub_index+1
        kk=mod(ns,2);
        l=1;
        v=3+3*mod(ns,2);
    for m0 = 0:2*nRB-1
        m1 = m0 + maxDLRB - nRB + 1;
        k = 6*m0+mod((v + v_shift),6)+1;
        RadioFrame{4}(k,l+Slotsymbols*kk+1) = GoldSequence((m1),port);
    end
    end
    end
    end

    GoldSequences = RadioFrame;

    switch nTx
    case 2
    %Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την πρώτη κεραία
        indzero1 = find(RadioFrame{nTx-1} == 0);

    %Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την δεύτερη κεραία
        indzero2 = find(RadioFrame{nTx} == 0);

    %Θέσεις σημάτων αναφοράς και για τις δύο κεραίες
        intersection=intersect(indzero1,indzero2);

    for i=1:size(PrecodedSymbols,2)
        information(intersection,i)= PrecodedSymbols(:,i);
    end

    for count=1:size(information,2)

```

```

for s=1:length(information)

if RadioFrame{count}(s)==0

    RadioFrame{count}(s)=information(s,1);

end

end

end

MappingSymbols(:,1)=reshape(RadioFrame{1},Totalsubc,nOfdmSymb);
MappingSymbols(:,2)=reshape(RadioFrame{2},Totalsubc,nOfdmSymb);

case 4
%Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την πρώτη κεραία
indzero1 = find(RadioFrame{nTx-3} == 0);

%Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την δεύτερη κεραία
indzero2 = find(RadioFrame{nTx-2} == 0);

%Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την πρώτη κεραία
indzero3 = find(RadioFrame{nTx-1} == 0);

%Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την δεύτερη κεραία
indzero4 = find(RadioFrame{nTx} == 0);

%Θέσεις σημάτων αναφοράς και για τις δύο κεραίες
intersection1=intersect(indzero1,indzero2);

intersection2=intersect(indzero3,indzero4);

intersection=intersect(intersection1,intersection2);

for i=1:size(PrecodedSymbols,2)
    information(intersection,i)= PrecodedSymbols(:,i);
end

for count=1:size(information,2)

for s=1:length(information)

if RadioFrame{count}(s)==0

    RadioFrame{count}(s)=information(s,1);

end

end

end

MappingSymbols(:,1)=reshape(RadioFrame{1},Totalsubc,nOfdmSymb);
MappingSymbols(:,2)=reshape(RadioFrame{2},Totalsubc,nOfdmSymb);
MappingSymbols(:,3)=reshape(RadioFrame{3},Totalsubc,nOfdmSymb);
MappingSymbols(:,4)=reshape(RadioFrame{4},Totalsubc,nOfdmSymb);

```


end

end

Παράρτημα 1.7: Διαδικασία εφαρμογής της διαμόρφωσης OFDM

```

function OfdmSymbols = OfdmGeneration(MappingSymbols, FFT_SIZE, CP)

[Totalsubc, nOfdmSymb, nLayers] = size(MappingSymbols);
x = zeros(FFT_SIZE, nOfdmSymb, nLayers);

% Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier
ofdmSignal = ifft(x, FFT_SIZE, 1);
ofdmSignal = ofdmSignal.*(sqrt(FFT_SIZE)*sqrt(FFT_SIZE/Totalsubc));

L = nOfdmSymb/2;

SymbolLen = FFT_SIZE + CP;
FrameLen = sum(SymbolLen);

% Προσθήκη κυκλικού προθέματος
OfdmSymbols=zeros(FrameLen,nLayers);
switch nLayers
case 2
for j=1:nLayers
for n = 1:nOfdmSymb
if mod(n,L) == 1
if n==1
OfdmSymbols(1:CP(1),j) = ofdmSignal((FFT_SIZE-CP(1)+1:FFT_SIZE),n,j);
OfdmSymbols(CP(1)+1:FFT_SIZE+CP(1),j) = ofdmSignal((1:FFT_SIZE),n,j);
idx1 = find(OfdmSymbols(:,j)==0, 1, 'first');

elseif n==8
OfdmSymbols(idx3:idx3-1+CP(1),j) = ofdmSignal((FFT_SIZE-
CP(1)+1:FFT_SIZE),n,j);
OfdmSymbols(idx3+CP(1):idx3-1+FFT_SIZE+CP(1),j) =
ofdmSignal((1:FFT_SIZE),n,j);
idx4 = find(OfdmSymbols(:,j)==0, 1, 'first');
end

else
if n==2
OfdmSymbols(idx1:idx1-1+CP(2),j) = ofdmSignal((FFT_SIZE-
CP(2)+1:FFT_SIZE),n,j);
OfdmSymbols(idx1+CP(2):idx1-1+FFT_SIZE+CP(2),j) =
ofdmSignal((1:FFT_SIZE),n,j);
idx3 = find(OfdmSymbols(:,j)==0, 1, 'first');

elseif n~=2&&n<8
OfdmSymbols(idx3:idx3-1+CP(2),j)=ofdmSignal((FFT_SIZE-
CP(2)+1:FFT_SIZE),n,j);
OfdmSymbols(idx3+CP(2):idx3-1+FFT_SIZE+CP(2),j) =
ofdmSignal((1:FFT_SIZE),n,j);
idx3 = find(OfdmSymbols(:,j)==0, 1, 'first');

```

```

elseif n==9
    OfdmSymbols(idx4:idx4-1+CP(2),j) = ofdmSignal((FFT_SIZE-
CP(2)+1:FFT_SIZE),n,j);
    OfdmSymbols(idx4+CP(2):idx4-1+FFT_SIZE+CP(2),j) =
ofdmSignal((1:FFT_SIZE),n,j);
    idx6 = find(OfdmSymbols(:,j)==0, 1, 'first');

elseif n~=9&&n>7&&n<=14
    OfdmSymbols(idx6:idx6-1+CP(2),j) = ofdmSignal((FFT_SIZE-
CP(2)+1:FFT_SIZE),n,j);
    OfdmSymbols(idx6+CP(2):idx6-1+FFT_SIZE+CP(2),j) =
ofdmSignal((1:FFT_SIZE),n,j);
    idx6 = find(OfdmSymbols(:,j)==0, 1, 'first');

end
end
end
end
end
end
end

```

Παράρτημα 1.8: Διαδικασία δημιουργίας του διαύλου

```

function Output = ChannelProfile(input, nTx, nRx, SampleTime, ChannelModel)

switch ChannelModel
case 'Static MIMO'
    PathDelays = 0;
    AveragePathGains = 0;
    MaximumDopplerShift = 0;
case 'EPA 5Hz'
    PathDelays = [0 30 70 90 110 190 410]*1e-9;
    AveragePathGains = [0 -1 -2 -3 -8 -17.2 -20.8];
    MaximumDopplerShift = 5;
case 'EVA 5Hz'
    PathDelays = [0 30 150 310 370 710 1090 1730 2510]*1e-9;
    AveragePathGains = [0 -1.5 -1.4 -3.6 -0.6 -9.1 -7 -12 -16.9];
    MaximumDopplerShift = 5;
case 'EVA 70Hz'
    PathDelays = [0 30 150 310 370 710 1090 1730 2510]*1e-9;
    AveragePathGains = [0 -1.5 -1.4 -3.6 -0.6 -9.1 -7 -12 -16.9];
    MaximumDopplerShift = 70;
case 'ETU 70Hz'
    PathDelays = [0 50 120 200 230 500 1600 2300 5000]*1e-9;
    AveragePathGains = [-1 -1 -1 0 0 0 -3 -5 -7];
    MaximumDopplerShift = 70;
case 'ETU 300Hz'
    PathDelays = [0 50 120 200 230 500 1600 2300 5000]*1e-9;
    AveragePathGains = [-1 -1 -1 0 0 0 -3 -5 -7];
    MaximumDopplerShift = 300;
end

```

Παράρτημα 1.9: Διαδικασία εφαρμογής της αποδιαμόρφωσης OFDM

```

function deOfdmSymbols = deOfdmGeneration(recSymbols, nRB, FFT_SIZE, CP,

```

```

SubCarriers, Slotsymbols)

Totalsubc=nRB*SubCarriers;

nOfdmSymb=2*Slotsymbols;
L = nOfdmSymb/2;
[~, nLayers] = size(recSymbols);
deOfdmSymb=complex(zeros(FFT_SIZE, nOfdmSymb, nLayers));

for j=1:nLayers
    k=0;
    for n=1:nOfdmSymb
        if n==1;
            deOfdmSymb(:,n,j)=[recSymbols(((CP(1)+1):FFT_SIZE+CP(1)),j)];
            k=k+1;
        elseif mod(n,L)==1&&n~=1
            deOfdmSymb(:,n,j)=[recSymbols(((CP(1)+1)+(FFT_SIZE+CP(1))*k+(FFT_SIZE+CP(2))*(n-2):FFT_SIZE+CP(1)+(FFT_SIZE+CP(1))*k+(FFT_SIZE+CP(2))*(n-2)),j)];
            k=k+1;
        elseif n>=2&&n<=7
            deOfdmSymb(:,n,j)=[recSymbols(((CP(2)+1)+(FFT_SIZE+CP(1))*k+(FFT_SIZE+CP(2))*(n-2):FFT_SIZE+CP(2)+(FFT_SIZE+CP(1))*k+(FFT_SIZE+CP(2))*(n-2)),j)];
        elseif n>=9&&n<=14
            deOfdmSymb(:,n,j)=[recSymbols(((CP(2)+1)+(FFT_SIZE+CP(1))*k+(FFT_SIZE+CP(2))*(n-3):FFT_SIZE+CP(2)+(FFT_SIZE+CP(1))*k+(FFT_SIZE+CP(2))*(n-3)),j)];
        end
    end
end

% Μετασχηματισμός Fourier
x = fft(deOfdmSymb, FFT_SIZE, 1);
x = x./(sqrt(FFT_SIZE)*sqrt(FFT_SIZE/Totalsubc));

% Αρχικοποίηση πίνακα
deOfdmSymbols = complex(zeros(Totalsubc, nOfdmSymb, nLayers));

```

Παράρτημα 1.10: Αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των στοιχείων των πόρων

```

function [deLayerSymbols, InfoPilot] = deResourceMapping(MapSymbols, RadioFrame, Slotsymbols, SubCarriers, nRB)

[~,~,nLayers]=size(MapSymbols);

switch nLayers
case 2
nOfdmSymb=2*Slotsymbols;

%Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την πρώτη κεραία
indzero1 = find(RadioFrame{1}== 0);

%Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την δεύτερη κεραία

```

```

indzero2 = find(RadioFrame{2}== 0);

%Θέσεις σημάτων αναφοράς και για τις δύο κεραίες
intersection=intersect(indzero1,indzero2);

%Εντοπισμός θέσεων σημάτων αναφοράς για την πρώτη κεραία(πρώτη προσέγγιση)
rf1 = find(RadioFrame{1});

%Εντοπισμός θέσεων σημάτων αναφοράς για την δεύτερη κεραία(πρώτη προσέγγιση)
rf2 = find(RadioFrame{2});

RFtotal=union(rf1,rf2);

for i = 1:nLayers
    pliroforia = reshape(MapSymbols(:,i), nRB*SubCarriers*nOfdmSymb, 1);
    % Η πληροφορία τοποθετείται στα ανάλογα subcarriers
    deLayerSymbols(:, i) = pliroforia(intersection);
    %Ηπληροφορίαπουέχειμεταδοθείστα resource element όπου
    %εκπέμπονται reference signals
    InfoPilot(:, i) = pliroforia(RFtotal);
end

case 4
    nOfdmSymb=2*Slotsymbols;

    %Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την πρώτη κεραία
    indzero1 = find(RadioFrame{1} == 0);

    %Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την δεύτερη κεραία
    indzero2 = find(RadioFrame{2} == 0);

    %Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την πρώτη κεραία
    indzero3 = find(RadioFrame{3} == 0);

    %Εντοπισμός θέσεων ωφέλιμης πληροφορίας για την δεύτερη κεραία
    indzero4 = find(RadioFrame{4} == 0);

    %Θέσεις σημάτων αναφοράς και για τις δύο κεραίες
    intersection1=intersect(indzero1,indzero2);
    intersection2=intersect(indzero3,indzero4);

    intersection=intersect(intersection1,intersection2);

    %Εντοπισμός θέσεων σημάτων αναφοράς για την πρώτη κεραία(πρώτη προσέγγιση)
    rf1 = find(RadioFrame{1});

    %Εντοπισμός θέσεων σημάτων αναφοράς για την δεύτερη κεραία(πρώτη προσέγγιση)
    rf2 = find(RadioFrame{2});

    %Εντοπισμός θέσεων σημάτων αναφοράς για την πρώτη κεραία(πρώτη προσέγγιση)
    rf3 = find(RadioFrame{3});

    %Εντοπισμός θέσεων σημάτων αναφοράς για την δεύτερη κεραία(πρώτη προσέγγιση)
    rf4 = find(RadioFrame{4});

```

```

RF1=union(rf1,rf2);
RF2=union(rf3,rf4);

RFtotal=union(RF1,RF2);

for i = 1:nLayers
    pliroforia = reshape(MapSymbols(:,i), nRB*SubCarriers*nOfdmSymb, 1);
    % Η πληροφορία τοποθετείται στα ανάλογα subcarriers
    deLayerSymbols(:, i) = pliroforia(intersection);
    % Η πληροφορία που έχουμε μεταδοθεί στα resource element όπου
    % εκπέμπονται reference signals
    InfoPilot(:, i) = pliroforia(RFtotal);
end

end

end

```

Παράρτημα 1.11: Διαδικασία εκτίμησης του καναλιού

```

function Channel_Impulse = ChannelEstimation(InfoPilot, PilotSignals, nLayers, nTx, nRx,
nRB, DataResources, maxDLRB)

Channel_Impulse = zeros(DataResources, nTx, nRx);
length = size(InfoPilot, 1);

switch nLayers
case 2

for j = 1:nRx

    REFSIG = reshape(InfoPilot(:, j), length/4, 4);

for i = 1:nRB
    GoldPilot = PilotSignals((2*(i-1)+1:2*i)+maxDLRB-nRB,1:2);
    UsefullInfoPilot = REFSIG(4*(i-1)+1:4*i, :);

% Πρώτο slot
    Matrix1_1 = UsefullInfoPilot(1, 1)/GoldPilot(1, 1);
    Matrix2_1 = UsefullInfoPilot(2, 1)/GoldPilot(1, 1);
    hpin = Hptr(1, i, nRB, nLayers);
    Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_1;
    Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_1;

    Matrix1_2 = UsefullInfoPilot(3, 1)/GoldPilot(2, 1);
    Matrix2_2 = UsefullInfoPilot(4, 1)/GoldPilot(2, 1);
    hpin = Hptr(2, i, nRB, nLayers);
    Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_2;
    Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_2;

    Matrix1_3 = UsefullInfoPilot(2, 2)/GoldPilot(1, 2);
    Matrix2_3 = UsefullInfoPilot(1, 2)/GoldPilot(1, 2);
    hpin = Hptr(3, i, nRB, nLayers);
    Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_3;

```

```

Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_3;

Matrix1_4 = UsefullInfoPilot(4, 2)/GoldPilot(2, 2);
Matrix2_4 = UsefullInfoPilot(3, 2)/GoldPilot(2, 2);
hpin = Hptr(4, i, nRB, nLayers);
Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_4;
Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_4;

% Δεύτερο slot
Matrix1_5 = UsefullInfoPilot(1, 3)/GoldPilot(2, 1);
Matrix2_5 = UsefullInfoPilot(2, 3)/GoldPilot(2, 1);
hpin = Hptr(5, i, nRB, nLayers);
Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_5;
Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_5;

Matrix1_6 = UsefullInfoPilot(3, 3)/GoldPilot(2, 2);
Matrix2_6 = UsefullInfoPilot(4, 3)/GoldPilot(2, 2);
hpin = Hptr(6, i, nRB, nLayers);
Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_6;
Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_6;

Matrix1_7 = UsefullInfoPilot(2, 4)/GoldPilot(1, 2);
Matrix2_7 = UsefullInfoPilot(1, 4)/GoldPilot(1, 2);
hpin = Hptr(7, i, nRB, nLayers);
Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_7;
Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_7;

Matrix1_8 = UsefullInfoPilot(4, 4)/GoldPilot(2, 2);
Matrix2_8 = UsefullInfoPilot(3, 4)/GoldPilot(2, 2);
hpin = Hptr(8, i, nRB, nLayers);
Channel_Impulse(hpin, 1, j) = Matrix1_8;
Channel_Impulse(hpin, 2, j) = Matrix2_8;

end

end

```

Παράρτημα 1.12: Διαδικασία εφαρμογής του ισοσταθμιστή

```

function recEqualizedSymbols = Equalizer(recLayerSymbols, H, Wn, SNRdB)

numData = size(recLayerSymbols, 1);
recEqualizedSymbols = zeros(size(recLayerSymbols));
Wn = inv(Wn);

for i = 1:numData
    h = squeeze(H(i, :, :));
    h = h.';

    Inversion = inv(h);
    x = Inversion * recLayerSymbols(i, :).';

    recEqualizedSymbols(i, :) = (Wn * x).';
end

```

Παράρτημα 1.13: Αντίστροφη διαδικασία απεικόνισης των ρευμάτων δεδομένων σε ακολουθίες πληροφορίας

```
function recModSymbCell = deLayerMapping(recLayerSymb,nLayers)

switch nLayers
case 2
    recModSymbCell(:,1) = recLayerSymb(:,1);
    recModSymbCell(:,2) = recLayerSymb(:,2);
case 4
    length = size(recLayerSymb, 1);
    recModSymbCell1 = zeros(length*nLayers/2, 1);
    recModSymbCell2 = recModSymbCell1;
    temp = recLayerSymb(:,1:2).';
    recModSymbCell1 = temp(:);
    temp = recLayerSymb(:,3:4).';
    recModSymbCell2 = temp(:);

    recModSymbCell=[recModSymbCell1 recModSymbCell2];
end

end
```

Παράρτημα 1.14: Διαδικασία διαμόρφωσης των μιγαδικών ακολουθιών σε δυαδικές ακολουθίες

```
function recScrambleBits = Demodulation(recModulationSymbols,Qm)

L=length(recModulationSymbols);

I_data=real(recModulationSymbols);
Q_data=imag(recModulationSymbols);

switch Qm
case 2 %Αποδιαμόρφωση QPSK
    recScrambleBits=zeros(1,2*L);
    t=1;
    for i=1:L
        % the first data.
        if(I_data(i)>=0)
            recScrambleBits(t)=0;
        else
            recScrambleBits(t)=1;
        end
        % the second data.
        if(Q_data(i)>=0)
            recScrambleBits(t+1)=0;
        else
            recScrambleBits(t+1)=1;
        end
        t=t+2;
    end

case 4 %Αποδιαμόρφωση 16QAM
    recScrambleBits=zeros(1,4*L);
    % determine three thresholds.
```

```

a1=-((1/sqrt(10))+3/sqrt(10))/2;
a2=0;
a3=((1/sqrt(10))+3/sqrt(10))/2;
t=1;
for i=1:L
% the first data.
if(I_data(i)>=a2)
    recScrambleBits(t)=0;
else
    recScrambleBits(t)=1;
end
% the second data.
if(Q_data(i)>=a2)
    recScrambleBits(t+1)=0;
else
    recScrambleBits(t+1)=1;
end
% the third data.
if((I_data(i)>=a1)&&(I_data(i)<a3))
    recScrambleBits(t+2)=0;
else
    recScrambleBits(t+2)=1;
end
% the fourth data.
if((Q_data(i)>=a1)&&(Q_data(i)<a3))
    recScrambleBits(t+3)=0;
else
    recScrambleBits(t+3)=1;
end
    t=t+4;
end

case 6 %Αποδιαμόρφωση 64QAM
    recScrambleBits=zeros(1,6*L);
% determine seven thresholds.
b1=-((7/sqrt(42))+5/sqrt(42))/2;
b2=-((5/sqrt(42))+3/sqrt(42))/2;
b3=-((3/sqrt(42))+1/sqrt(42))/2;
b4=0;
b5=((1/sqrt(42))+3/sqrt(42))/2;
b6=((3/sqrt(42))+5/sqrt(42))/2;
b7=((5/sqrt(42))+7/sqrt(42))/2;
t=1;
for i=1:L
% the first data.
if(I_data(i)>=b4)
    recScrambleBits(t)=0;
else
    recScrambleBits(t)=1;
end
% the second data.
if(Q_data(i)>=b4)
    recScrambleBits(t+1)=0;
else
    recScrambleBits(t+1)=1;
end
% the third data.
if((I_data(i)>=b2)&&(I_data(i)<b6))

```



```

        recScrambleBits(t+2)=0;
    else
        recScrambleBits(t+2)=1;
    end
    % the fourth data.
    if((Q_data(i)>=b2)&&(Q_data(i)<b6))
        recScrambleBits(t+3)=0;
    else
        recScrambleBits(t+3)=1;
    end
    % the fifth data.
    if(((I_data(i)>=b1)&&(I_data(i)<b3))||((I_data(i)>=b5)&&(I_data(i)<b7)))
        recScrambleBits(t+4)=0;
    else
        recScrambleBits(t+4)=1;
    end
    % the sixth data.
    if(((Q_data(i)>=b1)&&(Q_data(i)<b3))||((Q_data(i)>=b5)&&(Q_data(i)<b7)))
        recScrambleBits(t+5)=0;
    else
        recScrambleBits(t+5)=1;
    end
        t=t+6;
    end
end

```

Παράρτημα 1.15: Διαδικασία αποπερίπλεξης των δυαδικών ακολουθιών για την ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας

```

function recScrambleBits = deScrambling(recScrambleBit,RNTI,iSubFrame,cellID)

ns = iSubFrame*2;
Nc = 1600;
len= size(recScrambleBit,1);

nBit = size(recScrambleBit,2);
nPN = nBit;

x1 = zeros(1,nPN+Nc);
x2 = zeros(1,nPN+Nc);

x1(1,1:31) = bitget(1,1:31);

if mod(ns,2) == 0
    c_init = RNTI*2^14+(len-1)*2^13+floor(ns/2)*2^9+cellID;
    x2(1:31) = bitget(c_init,1:31);
end

for n = 1:nPN+Nc-31
    x1(1,n+31) = mod((x1(n+3)+x1(n)),2);
    x2(n+31) = mod((x2(n+3)+x2(n+2)+x2(n+1)+x2(n)),2);
end

```

```
c = mod((x1(1+Nc:end)+x2(1+Nc:end)),2);  
c = -1*(c*2-ones(size(c)));  
recScrambleBits = c.*recScrambleBit;
```

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ