



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ LTE LINK LEVEL
SIMULATOR ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ
ΒΑΣΗΣ»**

ΧΑΝΤΖΗ Β. ΒΑΣΙΛΙΚΗ
A.M 4033

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΜΠΟΥΡΑΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Σύστημα Long Term Evolution (LTE) του Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) γνωστό και ως Evolved Packet System (EPS) είναι μια καινοτόμα κίνηση στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Μια τέτοια επαναστατική κίνηση υποκινείται από την ακατάπαυτη αύξηση της ζήτησης συνδέσεων γρήγορων ταχυτήτων στα δίκτυα, χαμηλών χρόνων καθυστέρησης, χαμηλών ρυθμών σφαλμάτων και ελαστικότητας διότι οι νέοι χρήστες και οι εφαρμογές δικτύων εξαρτώνται πολύ από αυτές τις απαιτήσεις για να απολαμβάνουν επαρκή λειτουργικότητα και απόδοση.

Το Third Generation Partnership Project Long Term Evolution (3GPP LTE) υπόσχεται υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη, φασματική επάρκεια, χαμηλούς χρόνους καθυστέρησης και χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων. Αυτοί οι στόχοι λειτουργίας και επίδοσης του 3GPP LTE είναι αξιόπαινοι και μπορούν να επιτευχθούν με αρκετή σιγουριά. Το LTE αξιοποιεί μια πληθώρα τεχνολογιών. Ονομαστικά τις Τεχνικές Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων κεραιών (Multiple Input Multiple Output - MIMO), της Πολυπλεξίας Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), της Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) στην κατερχόμενη ζεύξη και της τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας Μονού Φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA) στην ανερχόμενη ζεύξη. Επίσης υποστηρίζει τις τεχνικές διαμόρφωσης Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM), και 64QAM.

Το πρότυπο του LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (downlink) της τάξης των 300 Mbps και στην ανοδική (uplink) μέχρι και 75 Mbps. Επίσης παρέχει Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) η οποία ορίζει καθυστέρηση διάδοσης μικρότερη από 5ms στο δίκτυο ραδιο-πρόσβασης.

Από την στιγμή που η αξιολόγηση της απόδοσης του LTE χρειάζεται προσομοιώσεις σε επίπεδο συνδέσμου και συστήματος, έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα - εργαλείο βασισμένο στην τεχνική OFDMA που προσομοιώνει το LTE, ο ούτος αποκαλούμενος LTE Προσομοιωτής Επιπέδου Συνδέσμου (LTE Link Level Simulator) LTE_Link_Level_1.3_r620. Αυτός ο προσομοιωτής περιέχει τα χωρικά μοντέλα καναλιών και τα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για το LTE. Τα αποτελέσματα αυτού του προσομοιωτή χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση της επίδοσης του επιπέδου συνδέσμου του OFDMA LTE σε διαφορετικά περιβάλλοντα και δημιουργεί πίνακες αναφοράς που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδο σε μελλοντικούς προσομοιωτές επιπέδου συνδέσμου.

Κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του Προσομοιωτή Επιπέδου Συνδέσμου LTE_Link_Level_1.3_r620, όπως επίσης η εξήγηση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προσφέρει υπό ποικίλες συνθήκες μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, μελετούμε την συμπεριφορά των μετρικών εκτίμησης BLER και ρυθμαπόδοση μέσα σε ένα συγκεκριμένο φάσμα SNR υπό τις τεχνικές SISO, Χωρική Πολυπλεξία (Spatial Multiplexing), Χωρική Πολυπλεξία Ανοιχτού Βρόγχου (Open Loop Spatial Multiplexing - OLSM) και Transmit Diversity. Επιπλέον παρατηρούμε την συμπεριφορά αυτών των μετρικών για διαφορετικού είδους σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης όπως είναι τα QPSK, 16QAM και 64QAM. Εν κατακλείδι όλα αυτά τα πειράματα έχουν λάβει χώρα πάνω σε διάφορα μοντέλα καναλιών συμπεριλαμβανομένων των καναλιών ITU Pedestrian B, Flat Rayleigh Fading και Additive White Gaussian Noise (AWGN).

EXECUTIVE SUMMARY

Long Term Evolution (LTE) of the Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) also known as the Evolved Packet System (EPS) is an innovative move in the field of mobile communications. Such a revolution is necessitated by the unceasing increase in demand for high speed connections on networks, low latency and delay, low error rates and resilience because modern users and network applications have become increasingly dependent on these requirements for efficient functionality and performance.

Third Generation Partnership Project Long Term Evolution (3GPP LTE) promises high peak data rates for both uplink and downlink transmission, spectral efficiency, low delay and latency, low bit error rates, to mention but a few. These functional and performance targets of 3GPP LTE are laudable and can be met with a great measure of certainty. LTE leverages on a number of technologies namely Multi Input Multiple Output (MIMO) antennas, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) at the downlink, Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) at the uplink, support for Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM), and 64QAM.

The LTE specification provides downlink peak rates of 300 Mbit/s, uplink peak rates of 75 Mbit/s and QoS provisions permitting a transfer latency of less than 5 ms in the radio access network.

Since the LTE performance evaluation needs link and system level simulations, a software tool to simulate the LTE based on OFDMA technology has been developed, the so called Link Level Simulator LTE_Link_Level_1.3_r620. This simulator contains the spatial channel models and modulation and coding schemes for LTE. The result of this simulator serves to evaluate the OFDMA LTE Link Level performance in different environments and create link level look-up tables to be used as an input for a future LTE system level simulator.

The main target of this thesis is the study of the LTE Link Level Simulator and the explanation of the results it offers under various transmission conditions. More specifically, we study the behaviour of BLER and throughput measures within a specific range of SNR, under SISO, Spatial Multiplexing, Open Loop Spatial Multiplexing and Transmit Diversity techniques. Furthermore we observe the behaviour of these measures for different types of modulation and coding schemes such as QPSK, 16QAM and 64QAM. To conclude all these experiments have taken place on various types of channel models including ITU Pedestrian B channel, Flat Rayleigh Fading channel and Additive White Gaussian Noise channel.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ένας σημαντικός κύκλος της ζωής μου , αυτός των προπτυχιακών μου σπουδών στο Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των πολύτιμων γνώσεων που είχα την τύχη και τη χαρά να αποκτήσω όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με στήριξαν και μου συμπαραστάθηκαν σε όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου, κ. Χρήστο Μπούρα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής και Επιστημονικό Υπεύθυνο της Ερευνητικής Μονάδας 6 του ΙΤΥΕ "Διόφαντος", ο οποίος ήταν και ο υπεύθυνος καθηγητής της διπλωματικής μου εργασίας. Θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για τις συμβουλές, την καθοδήγηση του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ εκτενώς με τον ερευνητικό αυτό τομέα.

Επιπλέον, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους Δρ. Βασίλειο Κόκκινο και Δρ. Ανδρέα Παπαζώη που υπήρξαν επιβλέποντες της διπλωματικής μου εργασίας και με την αγαστή συνεργασία που είχαμε, τις πολύτιμες γνώσεις και τις συμβουλές τους με βοήθησαν σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Βασίλειο και Αικατερίνη, στον αδερφό μου, Ανδρέα, για τη ψυχική και υλική στήριξη τους στην προσπάθεια των προπτυχιακών μου σπουδών. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ και στους υπόλοιπους συγγενείς και φίλους μου που με ενίσχυναν και με βοηθούσαν όλα αυτά τα χρόνια.

Πάτρα, Αύγουστος 2012

Χαντζή Β. Βασιλική

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	3
Executive Summary	5
Πρόλογος	7
Περιεχόμενα.....	9
Λίστα Εικόνων.....	13
Λίστα Πινάκων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Το Σύστημα Long Term Evolution (LTE)	21
2.1. Εισαγωγικά Στοιχεία	23
2.2. Χαρακτηριστικά του LTE	24
2.3. Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας στο LTE.....	25
2.3.1. Τεχνική OFDMA	25
2.3.2. Τεχνική Κεραιών Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων	28
2.3.3. Χωρική Πολυπλεξία	29
2.3.3.1. Χωρική Πολυπλεξία Ανοιχτού Βρόγχου.....	30
2.3.4. Transmit Diversity	30
2.4. Βασική Αρχιτεκτονική LTE.....	32
2.4.1. Evolved Packet Core.....	32
2.4.2. Πύλη PDN.....	33
2.4.3. Πύλη εξυπηρέτησης.....	33
2.4.4. Οντότητα Διαχείρισης της Κινητικότητας.....	34
2.4.5. Εξοπλισμός Χρήστη.....	34
2.4.6. Εξυπηρετής Οικιακών Συνδρομητών	35
2.4.7. Εξυπηρετής Λειτουργίας Ελέγχου Πολιτικής και Ανάθεσης Κανόνων	35
2.4.8. E-UTRAN Node B.....	36
2.5. Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων.....	36
2.5.1. Επίπεδο Radio Resource Control.....	37
2.5.2. Επίπεδο Packet Data Convergence Protocol.....	38
2.5.3. Επίπεδο Radio Link Control	38

2.5.4.	Επίπεδο Medium Access Control	39
2.5.5.	Φυσικό Επίπεδο	39
2.6.	Οι Διεπαφές του δικτύου E-UTRAN	39
2.6.1.	Διεπαφή S1	39
2.6.2.	Διεπαφή X2	40
2.6.3.	Διεπαφή Uu	40
2.6.4.	Διεπαφή S11	40
2.6.5.	Διεπαφή S5	40
2.7.	Επίπεδα Ραδιο-Καναλιών LTE	40
2.7.1.	Φυσικά Κανάλια	41
2.7.2.	Κανάλια Μεταφοράς	42
2.7.3.	Λογικά Κανάλια	43
2.8.	Φορείς Σύνδεσης και Ποιότητα Υπηρεσιών	45
2.8.1.	Η Ποιότητα Υπηρεσιών του επιπέδου Φορέα	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο Προσομοιώσεων στον LTE Link Level Simulator		
		47
3.1.	Μοντέλα Καναλιών Μετάδοσης	49
3.1.1.	Μοντέλο Καναλιού Προσθετικού Λευκού Gaussian Θορύβου	49
3.1.2.	Μοντέλο Καναλιού Flat Rayleigh Fading	50
3.1.3.	Μοντέλο Καναλιού ITU	51
3.2.	Μέθοδοι Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (Modulation and Coding Schemes - MCS)	52
3.2.1.	Quadrature Phase Shift Keying	52
3.2.2.	Quadrature Amplitude Modulation	53
3.2.2.1.	16-QAM	54
3.2.2.2.	64-QAM	54
3.3.	Μετρικές Εκτίμησης	55
3.3.1.	Ρυθμαπόδοση	55
3.3.2.	Λόγος σήματος προς θόρυβο	55
3.3.3.	Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο	56
3.3.4.	Ρυθμός εσφαλμένων μπλόκ	56
3.3.5.	Δείκτης Ποιότητας Καναλιού	56
3.3.6.	Effective Code Rate (ERC)	57
3.4.	Τεχνική Hybrid Automatic Repeat reQuest	57
3.4.1.	Η Τεχνική HARQ στο LTE	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αποτελέσματα Εξομοίωσης		
		61
4.1.	Ανάλυση Γραφικών Παραστάσεων Αρχείου plot_quick_test_results_r553.m	
		63

4.1.1. Κανάλι Τύπου flat rayleigh.....	64
4.1.2. Κανάλι Τύπου RedB.....	69
4.2. Ανάλυση Γραφικών Παραστάσεων Αρχείου plot_R1071967_BLER_curves_r553.m.....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα - Μελλοντική εργασία.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	85
Αρχείο plot_quick_test_results_r553.m.....	87
Αρχείο plot_R1071967_BLER_curves_r553.m.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΚΡΩΝΥΜΑ.....	99

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Τεχνική OFDMA [23]	26
Εικόνα 2 Αρχιτεκτονική του ραδιο-πλαισίου στο LTE [1]	26
Εικόνα 3 Δομή των πόρων χρόνου-συχνότητας [1].....	27
Εικόνα 4 Φυσικές παράμετροι της καθοδικής ζεύξης στο LTE	27
Εικόνα 5 Η εξέλιξη της τεχνολογίας MIMO από την παραδοσιακή επικοινωνία μονής κεραίας, έως την MU-MIMO και τα πιθανά μελλοντικά δίκτυα MIMO πολλαπλών κυψελών . [1]	28
Εικόνα 6 Χωρική πολυπλεξία.....	29
Εικόνα 7 Απλοποιημένο σχήμα Transmit Diversity	31
Εικόνα 8 RX Diversity SIMO 1x2 [9]	31
Εικόνα 9 TX Diveristy MISO 2x1 [9]	31
Εικόνα 10 Αρχιτεκτονική Συστήματος LTE [8].....	33
Εικόνα 11 Σταθμοί Βάσης eNodeB	36
Εικόνα 12 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου ραδιο-πρόσβασης.....	37
Εικόνα 13 Σύνοψη επιπέδων ραδιο-καναλιών στο LTE [23].....	41
Εικόνα 14 Αντιστοίχιση Φυσικών Καναλιών με Κανάλια μεταφοράς στην κατερχόμενη ζεύξη	43
Εικόνα 15 Αντιστοίχιση Φυσικών Καναλιών με Κανάλια μεταφοράς στην ανερχόμενη ζεύξη	43
Εικόνα 16 Αντιστοίχιση Λογικών Καναλιών με Κανάλια Μετάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη	44
Εικόνα 17 Αντιστοίχιση Λογικών Καναλιών με Κανάλια Μετάδοσης στην κατερχόμενη ζεύξη	44
Εικόνα 18 Μοντέλο Καναλιού AWGN[15]	49
Εικόνα 19 Αλλαγή φάσης φέροντος στο QPSK[14].....	52
Εικόνα 20 Αναπαράσταση Κωδικοποίησης QPSK στο χώρο[25]	53
Εικόνα 21 Οι μεγαλύτερης τάξης διαμόρφωσης τεχνικές λειτουργούν καλύτερα κοντά στο σταθμό βάσης	54
Εικόνα 22 Αστερισμός Τετράγωνου 16- QAM [14]	54
Εικόνα 23 Αστερισμός Τετράγωνου 64- QAM [14]	55
Εικόνα 24 Χρονικό Διάγραμμα του πρωτοκόλλου SAW καθοδικής ζεύξης. [1].....	58
Εικόνα 25 Χρονικό Διάγραμμα του πρωτοκόλλου SAW ανοδικής ζεύξης.[1].....	59
Εικόνα 26 Καμπύλη BLER-SNR Κανάλι flat-rayleigh με μηδέν επαναποστολές.....	64

Εικόνα 27 Καμπύλη BLER-SNR κανάλι flat rayleigh με τρεις επαναποστολές.....	64
Εικόνα 28 Καμπύλη throughput-SNR σε κανάλι flat rayleigh με μηδέν επαναποστολές.....	66
Εικόνα 29 Καμπύλη throughput-SNR σε κανάλι flat rayghleigh με τρεις επαναποστολές.....	67
Εικόνα 30 Καμπύλη BLER-SNR για κανάλι PedB με μηδέν επαναποστολές.....	69
Εικόνα 31 Καμπύλη BLER-SNR για κανάλι PedB με τρεις επαναποστολές.....	69
Εικόνα 32 Καμπύλη throughpu-SNR για κανάλι PedB με μηδέν επαναποστολές....	71
Εικόνα 33 Καμπύλη throughput-SNR για κανάλι PedB με 3 επαναποστολές.....	72
Εικόνα 34 Καμπύλη BLER-SNR για 27 διαφορετικά MCS σε κανάλι AWGN με τεχνική SISO [11]	75
Εικόνα 35 Καμπύλη throughput-SNR για 27 διαφορετικά MCS σε κανάλι AWGN με τεχνική SISO [11]	76

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Space-Time Block Code για την περίπτωση TxD 2x1 [16]	31
Πίνακας 2 Space-Time Block Code για την περίπτωση TxD 4x2 [16]	32
Πίνακας 3 Φυσικά Κανάλια στην Κατερχόμενη Ζεύξη	41
Πίνακας 4 Φυσικά Κανάλια στην Ανερχόμενη Ζεύξη	42
Πίνακας 5 Κανάλια Μεταφοράς στην Κατερχόμενη Ζεύξη.....	42
Πίνακας 6 Κανάλια Μεταφοράς στην Ανερχόμενη Ζεύξη.....	43
Πίνακας 7 Λογικά Κανάλια Ελέγχου.....	44
Πίνακας 8 Λογικά Κανάλια Δοσοληψίας	44
Πίνακας 9 Συνθήκες Διάδοσης για Πολύδρομη εξασθένηση στα μοντέλα καναλιών ITU	52
Πίνακας 10 Σειρά MCS-ERC για το αρχείο plot_R1071967_BLER_curves_r553.m....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Σύστημα Long Term Evolution του Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) γνωστό και ως Evolved Packet System (EPS) είναι μια καινοτόμα κίνηση στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Μια τέτοια επαναστατική κίνηση υποκινείται από την ακατάπαυστη αύξηση της ζήτησης συνδέσεων γρήγορων ταχυτήτων στα δίκτυα, χαμηλών χρόνων καθυστέρησης, χαμηλών ρυθμών σφαλμάτων και ελαστικότητας διότι οι νέοι χρήστες και οι εφαρμογές δικτύων εξαρτώνται πολύ από αυτές τις απαιτήσεις για να απολαμβάνουν επαρκή λειτουργικότητα και απόδοση.

Το Third Generation Partnership Project Long Term Evolution (3GPP LTE) υπόσχεται υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη, φασματική επάρκεια, χαμηλούς χρόνους καθυστέρησης και χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων. Αυτοί οι στόχοι λειτουργίας και επίδοσης του 3GPP LTE είναι αξιόπαινοι και μπορούν να επιτευχθούν με αρκετή σιγουριά. Το LTE αξιοποιεί μια πληθώρα τεχνολογιών. Ονομαστικά τις Τεχνικές Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων κεραιών (Multiple Input Multiple Output - MIMO), της Πολυπλεξίας Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), της Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) στην κατερχόμενη ζεύξη και της τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας Μονού Φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA) στην ανερχόμενη ζεύξη. Επίσης υποστηρίζει τις τεχνικές διαμόρφωσης Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM), και 64QAM.

Το πρότυπο του LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη (downlink) της τάξης των 300 Mbps και στην ανοδική (uplink) μέχρι και 75 Mbps. Επίσης παρέχει Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) η οποία ορίζει καθυστέρηση διάδοσης μικρότερη από 5ms στο δίκτυο ραδιο-πρόσβασης.

Από την στιγμή που η αξιολόγηση της απόδοσης του LTE χρειάζεται προσομοιώσεις σε επίπεδο συνδέσμου και συστήματος, έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα - εργαλείο βασισμένο στην τεχνική OFDMA που προσομοιώνει το LTE, ο ούτος αποκαλούμενος LTE Προσομοιωτής Επιπέδου Συνδέσμου (LTE Link Level Simulator) LTE_Link_Level_1.3_r620. Αυτός ο προσομοιωτής περιέχει τα χωρικά μοντέλα καναλιών και τα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για το LTE. Τα αποτελέσματα αυτού του προσομοιωτή χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση της επίδοσης του επιπέδου συνδέσμου του OFDMA LTE σε διαφορετικά περιβάλλοντα και δημιουργεί πίνακες αναφοράς που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδο σε μελλοντικούς προσομοιωτές επιπέδου συνδέσμου.

Κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του Προσομοιωτή Επιπέδου Συνδέσμου LTE_Link_Level_1.3_r620, όπως επίσης η εξήγηση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προσφέρει υπό ποικίλες συνθήκες μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, μελετούμε την συμπεριφορά των μετρικών εκτίμησης BLER και ρυθμαπόδοση μέσα σε ένα συγκεκριμένο φάσμα SNR υπό τις τεχνικές SISO,

Χωρική Πολυπλεξία (Spatial Multiplexing), Χωρική Πολυπλεξία Ανοιχτού Βρόγχου (Open Loop Spatial Multiplexing - OLSM) και Transmit Diversity. Επιπλέον παρατηρούμε την συμπεριφορά αυτών των μετρικών για διαφορετικού είδους σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης όπως είναι τα QPSK, 16QAM και 64QAM. Εν κατακλείδι όλα αυτά τα πειράματα έχουν λάβει χώρα πάνω σε διάφορα μοντέλα καναλιών συμπεριλαμβανομένων των καναλιών ITU Pedestrian B , Flat Rayleigh Fading και Additive White Gaussian Noise (AWGN).

Το Κεφάλαιο 2 κάνει μια εισαγωγή στο σύστημα LTE. Περιγράφει τα χαρακτηριστικά του, την αρχιτεκτονική του και τις τεχνικές διάδοσης που χρησιμοποιεί. Επίσης γίνεται αναφορά στα επίπεδα των πρωτοκόλλων που διέπουν την μετάδοση, στις διεπαφές και στα διάφορων ειδών κανάλια που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται στο LTE. Τέλος γίνεται μια μικρή ανάλυση για την τόσο σημαντική για το LTE έννοια της ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service - QoS).

Το Κεφάλαιο 3 περιέχει όλες εκείνες τις έννοιες που πρέπει να γνωρίζει κανείς για να καταλάβει τα πειράματα και τα αποτελέσματα που παράγει ο προσομοιωτής. Γίνεται περιγραφή των διαφόρων ειδών καναλιών που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις, όλων των μετρικών εκτίμησης της απόδοσης που αναφέρονται στον προσομοιωτή καθώς και όλα τα είδη διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που συναντούμε στα πειράματα που μελετάμε. Τέλος κάνει μια εισαγωγή στην τεχνική Hybrid automatic Repeat reQuest (HARQ) που συναντάται στα πειράματα.

Το Κεφάλαιο 4 περιέχει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διάφορες συνθήκες μετάδοσης όπως αυτά προέκυψαν από τα αρχεία `plot_quick_test_results_r553.m` και `plot_R1071967_BLER_curves_r553.m` του προσομοιωτή. Επίσης περιέχει την περιγραφή και το σχολιασμό του κάθε αποτελέσματος.

Το Κεφάλαιο 5 περιέχει τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας καθώς και ορισμένα ανοιχτά θέματα που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας στο συγκεκριμένο τομέα.

Το Παράρτημα Α παρουσιάζει τη βιβλιογραφία και τούς δικτυακούς τόπους που αναφέρονται στη διπλωματική αυτή εργασία. Οι αναφορές στη βιβλιογραφία και τους δικτυακούς τόπους ενσωματώνονται στο κείμενο μέσα σε αγκύλες ([]).

Το Παράρτημα Β παραθέτει τον κώδικα του προσομοιωτή που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των αποτελεσμάτων όπως αυτός έτρεξε στο εργαλείο προσομοίωσης MatLab.

Τέλος το Παράρτημα Γ περιέχει όλες τις συντομογραφίες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία για να μπορεί ο αναγνώστης να ανατρέχει γρήγορα σε αυτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Το ΣΥΣΤΗΜΑ LONG TERM EVOLUTION (LTE)

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ LONG TERM EVOLUTION

2.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

3GPP Long Term Evolution, ή απλώς LTE ονομάζεται η τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και δικτύωση των κινητών συσκευών, με υψηλές ταχύτητες. Βασίζεται στα προϋπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές διαμόρφωσης. Το πρότυπο αυτό αναπτύσσεται από τον οργανισμό 3GPP.

Το πρώτο δημόσιο δίκτυο LTE που εγκαταστάθηκε στο κόσμο, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία TeliaSonera στις 14 Δεκεμβρίου 2009. Το LTE αποτελεί τη φυσική εξέλιξη των δικτύων GSM/UMTS, αλλά ακόμα και πάροχοι δικτύων CDMA (όπως η Verizon στη Β. Αμερική και η au by KDDI στην Ιαπωνία) έχουν υιοθετήσει το LTE. Έτσι, οι δημιουργοί του LTE φιλοδοξούν να αποτελέσει το πρώτο πραγματικά παγκόσμιο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας.

Το LTE αποτελεί πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία και εξέλιξη του GSM/UMTS. Ο στόχος του LTE είναι να αυξήσει τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα των υφιστάμενων δικτύων με τη χρησιμοποίηση καινοτόμων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας και διαμόρφωσης σήματος. Λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος ζώνης συχνοτήτων καθώς η διεπαφή του δεν είναι συμβατή με τα υφιστάμενα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς.

Το LTE προτάθηκε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία το 2004. Το πρότυπο οριστικοποιήθηκε το 2008 και τα πρώτα δίκτυα στο κόσμο που εγκαταστάθηκαν για δημόσια χρήση, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη από την εταιρεία TeliaSonera, τον Δεκέμβρη του 2009. Τα πρώτα εμπορικά διαθέσιμα LTE smartphone που κυκλοφόρησαν ήταν τα Samsung Galaxy Indulge (από τη MetroPCS) και HTC Thunderbolt για την αγορά της Β. Αμερικής. Αρχικώς, οι διαχειριστές των δικτύων CDMA είχαν σχεδιάσει να αναβαθμίσουν τα συστήματά τους σε μια ανταγωνιστική τεχνολογία ονόματι UMB, ωστόσο όλες οι μεγάλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας αποφάσισαν να συνεχίσουν με το LTE. Η εξέλιξη του LTE είναι το LTE Advanced, το οποίο προτυποποιήθηκε το Μάρτιο του 2011. Οι αναβαθμισμένες υπηρεσίες του LTE Advanced αναμένεται να διατεθούν το 2013.

Το πρότυπο του LTE είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων στη καθοδική ζεύξη της τάξης των 300 Mbps και στην ανοδική μέχρι και 75 Mbps. Το εύρος ζώνης του φέροντος σήματος είναι μεταβλητό, κυμαινόμενο από τα 1.4 έως τα 20 MHz και υποστηρίζονται τόσο η διπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplexing - FDD) όσο και η διπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing - TDD). Η αρχιτεκτονική του δικτύου βασίζεται σε μια απλοποιημένη μορφή αρχιτεκτονικής IP, το Evolved Packet Core (EPC), το οποίο σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει το GPRS Core Network και υποστηρίζει την απρόσκοπτη μετάδοση τόσο δεδομένων όσο και φωνής ακόμα και σε δίκτυα με

παλαιότερη τεχνολογία δικτύου (GSM, UMTS, CDMA2000). Η απλούστερη αρχιτεκτονική αποσκοπεί σε χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα.

Παρ' όλο που αναφέρεται ως σύστημα 4ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (4G) αυτό δεν ισχύει καθώς δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που έχει ορίσει ο διεθνής οργανισμός ITU-R. Γι' αυτό το λόγο, το LTE αναβαθμίστηκε σε LTE Advanced για να πληροί τις προϋποθέσεις έτσι ώστε να θεωρείται σύστημα 4G.[20][21]

2.2. Χαρακτηριστικά του LTE

Το κύριο έργο είναι η μετάβαση από τα ενοποιημένα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων (3G UMTS), που χρησιμοποιούνται σήμερα, και η απλοποίησή τους σε ένα ολοκληρωμένο δίκτυο αρχιτεκτονικής IP. Η διεπαφή αυτού του δικτύου ονομάζεται Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) και τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων στη καθοδική ζεύξη έως και 299.6 Mbps και στην ανοδική έως και 75.4 Mbps, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει ο εξοπλισμός του χρήστη. Έχουν οριστεί πέντε κατηγορίες ή κλάσεις τερματικών συσκευών. Η πιο χαμηλή υποστηρίζει μόνο απλή τηλεφωνία ενώ η μεγαλύτερη (η οποία απευθύνεται σε τερματικές συσκευές υψηλών προδιαγραφών) υποστηρίζει τις μέγιστες δυνατές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Όλες οι τερματικές συσκευές είναι ικανές να επεξεργαστούν σήμα εύρους ζώνης 20 MHz.
- Χαμηλές καθυστερήσεις κατά τη μεταφορά δεδομένων (καθυστερήση IP πακέτων κάτω από 5 ms).
- Βελτιωμένη υποστήριξη για κινητές συσκευές ακόμη και αν αυτές κινούνται με ταχύτητες μέχρι και 500 χλμ/ώρα ανάλογα και με τη συχνότητα που χρησιμοποιείται.
- Χρησιμοποίηση διαμόρφωσης OFDMA για τη καθοδική ζεύξη και SC-FDMA για την ανοδική.
- Υποστήριξη διπλεξίας τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα όπως επίσης και ημιαμφίδρομη FDD με την ίδια τεχνολογία πρόσβασης.
- Βελτιωμένη φασματική ευελιξία: προτυποποίηση καναλιών στα 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz.
- Υποστήριξη κυψελών μεταβλητού μεγέθους από μερικές δεκάδες μέτρα έως και 100 χλμ. Το ιδανικό μέγεθος κυψέλης στις αγροτικές περιοχές (στις οποίες χρησιμοποιούνται χαμηλότερες συχνότητες) είναι στα 5 χλμ, με μέγεθος 30 χλμ. η απόδοση είναι αρκετά καλή ενώ με μέγεθος 100 χλμ η απόδοση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Σε αστικά περιβάλλοντα και γενικότερα σε περιβάλλοντα πόλεων χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες έτσι ώστε να

υποστηρίζονται υψηλές ευρυζωνικές ταχύτητες πρόσβασης. Σε αυτή τη περίπτωση κάθε κυψέλη του δικτύου έχει μέγεθος το πολύ 1 χλμ.

- Απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου.
- Υποστήριξη τουλάχιστον 200 ενεργών συνδέσεων δεδομένων σε κάθε κανάλι, συχνότητας 5 MHz.
- Υποστήριξη διαλειτουργικότητας και συνύπαρξη με παλαιότερα πρότυπα (πχ GSM/EDGE, UMTS, CDMA2000). Οι χρήστες θα μπορούν να πραγματοποιούν μια τηλεφωνική συνομιλία ή σύνδεση δεδομένων σε μια περιοχή με κάλυψη LTE και θα μπορούν να συνεχίσουν τη σύνδεσή τους χωρίς πρόβλημα ακόμα και σε περιοχές χωρίς κάλυψη LTE, χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο δίκτυο GSM/GPRS ή W-CDMA ή CDMA2000.
- Ραδιο-επικοινωνιακό δίκτυο μεταγωγής πακέτων.
- Υποστήριξη υπηρεσιών όπως μετάδοση τηλεοπτικού προγράμματος στις κινητές συσκευές με τη χρήση των υποδομών του δικτύου LTE, αποτελώντας επίσης και άμεσο ανταγωνιστή του προτύπου Digital Video Broadcasting - Handheld (DVB-H). [20]

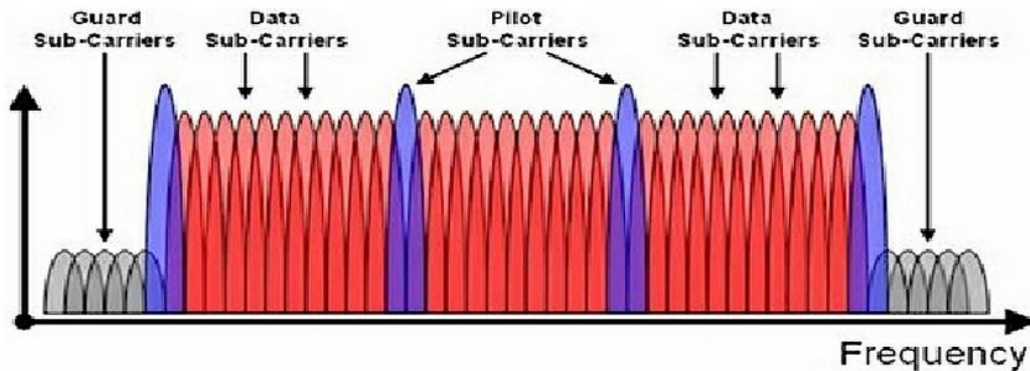
2.3. Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας στο LTE

Για την επίτευξη των απαιτήσεων που αναφέραμε παραπάνω είναι προφανές ότι το LTE βασίζεται σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Τέσσερις από τις σημαντικότερες αυτές τεχνολογίες αναλύονται παρακάτω.

2.3.1. Τεχνική OFDMA

Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνική OFDM για την κατερχόμενη ζεύξη [7] η οποία εκτείνεται, από τον σταθμό βάσης μέχρι τον τερματικό σταθμό. Κύριος λόγος υιοθέτησης του OFDM ως μοντέλου διαμόρφωσης για το LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών. Αποτελεί μία ψηφιακή προσέγγιση πολυπλεξίας πληροφορίας, η οποία κάνει χρήση του Fast Fourier Transformation (FFT) για να διαχωρίσει το σήμα σε μικρού εύρου ζώνης επικαλυπτόμενα κανάλια (υπό-φορείς) όπως δείχνει η Εικόνα 1. Οι βασικοί φυσικοί πόροι της κατερχόμενης ζεύξης μπορούν να θεωρηθούν ως ένα πλέγμα χρόνου-συχνοτήτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Στο πεδίο της συχνότητας, η απόσταση μεταξύ των υπό-φορέων, Δf , είναι 15kHz. Επιπλέον, ο χρόνος διάρκειας ενός OFDM συμβόλου είναι $1/\Delta f +$ κυκλικό πρόθεμα. Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της ορθογωνιότητας μεταξύ των υπό-φορέων ακόμη και για ένα ραδιο-κανάλι χρονικής διασποράς. Ένα στοιχείο των πόρων φέρει διαμόρφωση QPSK, 16QAM ή 64QAM. Τα σύμβολα OFDM ομαδοποιούνται σε μπλοκ πόρων. Τα μπλοκ

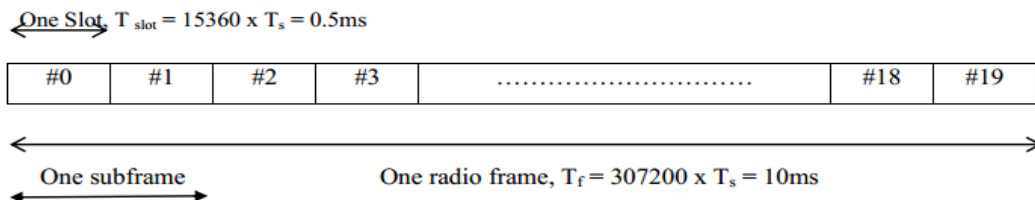
πόρων έχουν συνολικό μέγεθος 180kHz στο πεδίο της συχνότητας και 0.5ms στο πεδίο του χρόνου.



Εικόνα 1 Τεχνική OFDMA [23]

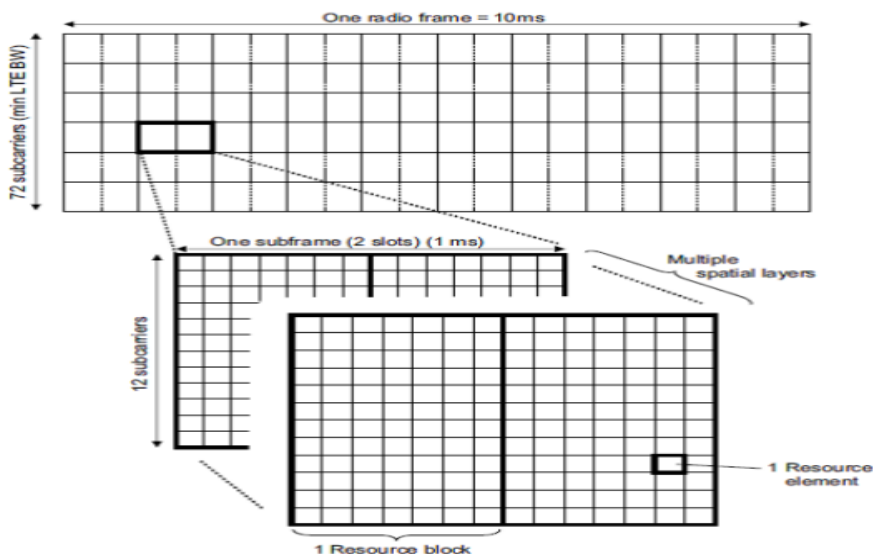
Η μεγαλύτερη μονάδα χρόνου είναι το ράδιο-πλαίσιο (radio frame) των 10ms. Αυτό υποδιαιρείται σε 10 υπό-πλαίσια (subframes) με διάρκεια 1ms και κάθε υπό-πλαίσιο διαιρείται σε 2 υποδοχές (slots) των 0.5ms η κάθε μία όπως δείχνει η Εικόνα 2.

Κάθε υποδοχή περιέχει 7 **σύμβολα OFDM** (Εικόνα 3) στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος ή 6 σύμβολα OFDM στην περίπτωση εκτεταμένου κυκλικού προθέματος. Στο πεδίο συχνότητας, κάθε φυσικό μπλοκ πόρων (Physical Resource Block - PRB) είναι μια ενότητα 12 υπό-φορέων που διαρκεί όσο μια υποδοχή (0.5ms). Ένα στοιχείο πόρου (Resource Element - RE) είναι η μικρότερη μονάδα πόρου η οποία αποτελείται από ένα υπό-φορέα (subcarrier) για διάρκεια ίση με αυτήν ενός συμβόλου OFDM. Γι' αυτό ένα μπλοκ πόρων αποτελείται από 84 στοιχεία πόρου στην περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος και από 72 στην περίπτωση εκτεταμένου κυκλικού προθέματος.



Εικόνα 2 Αρχιτεκτονική του ραδιο-πλαισίου στο LTE [1]

Σε κάθε χρήστη έχει κατανεμηθεί ένας αριθμός των λεγόμενων μπλοκ πόρων στο πλέγμα χρόνου-συχνότητας. Όσο περισσότερα μπλοκ πόρων παίρνει ένας χρήστης και όσο υψηλότερη είναι η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται σε αυτά, τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός των bit που μεταφέρονται. Το πόσα μπλοκ πόρων και ποια παίρνει ο χρήστης σε μια δεδομένη χρονική στιγμή εξαρτάται από προηγμένους μηχανισμούς προγραμματισμού στις διαστάσεις της συχνότητας και του χρόνου. Οι μηχανισμοί προγραμματισμού του LTE είναι παρόμοιοι με εκείνους που χρησιμοποιούνται στο HSPA, και δίνουν την δυνατότητα για βέλτιστη απόδοση σε διαφορετικές υπηρεσίες που βρίσκονται σε διαφορετικά ραδιο-περιβάλλοντα.



Εικόνα 3 Δομή των πόρων χρόνου-συχνότητας [1]

Στην ανερχόμενη ζεύξη, το LTE χρησιμοποιεί μία προ- κωδικοποιημένη έκδοση της OFDMA που ονομάζεται **SC-FDMA**. Και αυτό για να αντισταθμίσει ένα μειονέκτημα της κανονικής OFDM, η οποία έχει πολύ υψηλό Peak to Average Power Ratio (PAPR). Το υψηλό PAPR απαιτεί δαπανηρούς και αναποτελεσματικούς ενισχυτές ισχύος με υψηλές απαιτήσεις γραμμικότητας, που αυξάνουν το κόστος του τερματικού σταθμού και εξαντλούν την μπαταρία γρηγορότερα. Η SC-FDMA λύνει αυτό το πρόβλημα συνενώνοντας τα μπλοκ πόρων με τέτοιο τρόπο που μειώνεται η ανάγκη για γραμμικότητα, και έτσι και η κατανάλωση ενέργειας στον ενισχυτή. Το χαμηλό PAPR βελτιώνει επίσης την κάλυψη και την απόδοση στην άκρη του κελιού.

Transmission bandwidth	1.25MHz	2.5 MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Sub-frame duration	0.5ms					
Sub-carrier spacing	15KHz					
Sampling Frequency	192MHz (1/2 x 3.84 MHz)	3.84MHz	7.68 MHz (2 x 3.84MHz)	15.36 MHz (4 x 3.84 MHz)	23.04 MHz (6 x 3.84 MHz)	30.72 MHz (8 x 3.84 MHz)
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
OFDM symbol per slot (short/long CP)	7/6					
CP length (μsec/samples)	(4.69/9) X 6 (5.21/10) X 1	(4.69/18) x 6 (5.21/20) x 1	(4.69/36) x 6 (5.21/40) x 1	(4.69/72) x 6 (5.21/80) x 1	(4.69/108) x 6 (5.21/120) x 1	(4.69/144) x 6 (5.21/160) x 1
SHORT						
LONG	(16.67/32)	(16.67/64)	(16.67/128)	(16.67/256)	(16.67/384)	(16.67/512)

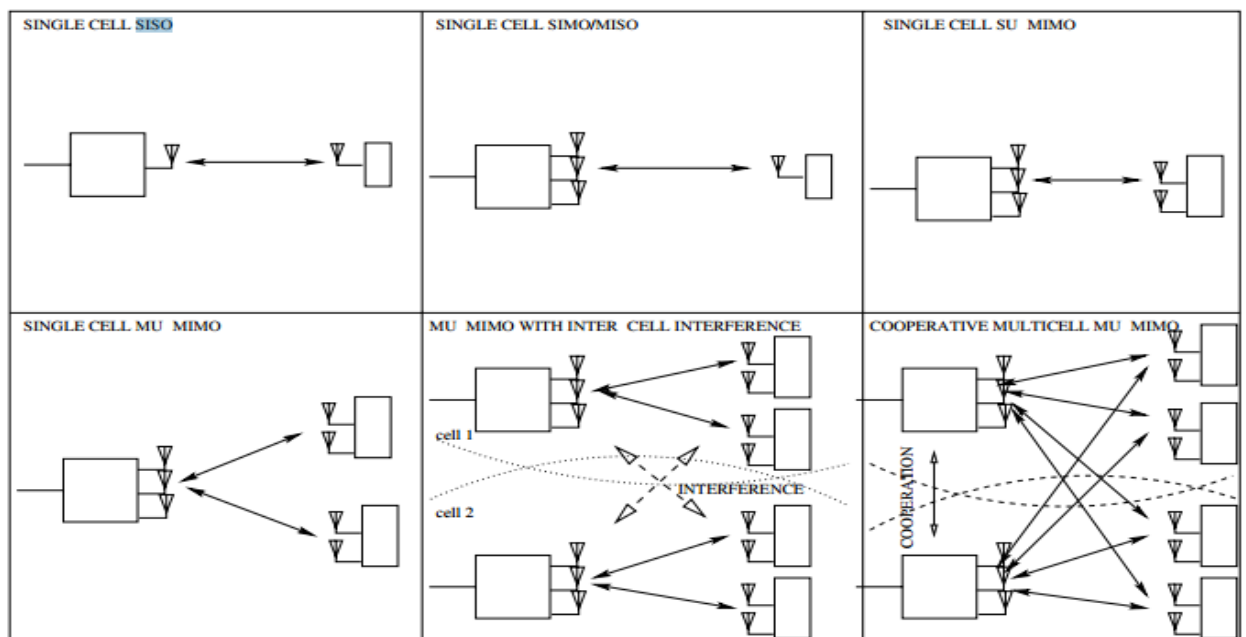
Εικόνα 4 Φυσικές παράμετροι της καθοδικής ζεύξης στο LTE

2.3.2. Τεχνική Κεραιών Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων

Η τεχνολογία κεραιών MIMO είναι μια σημαντική τεχνική στο LTE. Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές και στον δεκτή και στον πομπό για βελτίωση της επικοινωνίας. Η χρήση επιπλέον κεραιών είτε στο σταθμό βάσης E-UTRAN Node B είτε στον εξοπλισμό χρήστη ανοίγει μια επιπλέον χωρική διάσταση στην προ-κωδικοποίηση και στην ανίχνευση του σήματος. Ανάλογα την διαθεσιμότητα των κεραιών στον πομπό και στον δέκτη διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- **Single-Input Multiple-Output (SIMO):** είναι μια απλή μετάδοση *ανοδικής ζεύξης* κατά την οποία πολλαπλές κεραιές στο σταθμό βάσης επικοινωνούν με μια μόνο κεραία στον εξοπλισμό χρήστη.
- **Multiple-Input Single-Output (MISO):** είναι μια μετάδοση *καθοδικής ζεύξης* κατά την οποία πολλαπλές κεραιές στον σταθμό βάσης επικοινωνούν με μια μόνο κεραία στον εξοπλισμό χρήστη.
- **Single-User Multiple Input Multiple Output (SU-MIMO):** είναι μια από σημείο σε σημείο ζεύξη πολλαπλών κεραιών μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός εξοπλισμού χρήστη.
- **Multi-User Multiple Input Multiple Output (MU-MIMO):** χαρακτηρίζει την επικοινωνία αρκετών εξοπλισμών χρήστη ταυτόχρονα με ένα κοινό σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας τους ίδιους συχνοτικούς και χρονικούς πόρους.

Σαν αποτέλεσμα των απαιτήσεων για κάλυψη, χωρητικότητα και ρυθμούς μετάδοσης, η ολοκλήρωση του MIMO σαν μέρος του φυσικού επιπέδου του LTE είναι αναγκαία αφού απαιτεί την ενσωμάτωση μορφών μετάδοσης όπως η transmit diversity, η χωρική πολυπλεξία και το beam-forming.[3]



Εικόνα 5 Η εξέλιξη της τεχνολογίας MIMO από την παραδοσιακή επικοινωνία μονής κεραιάς, έως την MU-MIMO και τα πιθανά μελλοντικά δίκτυα MIMO πολλαπλών κυψελών . [1]

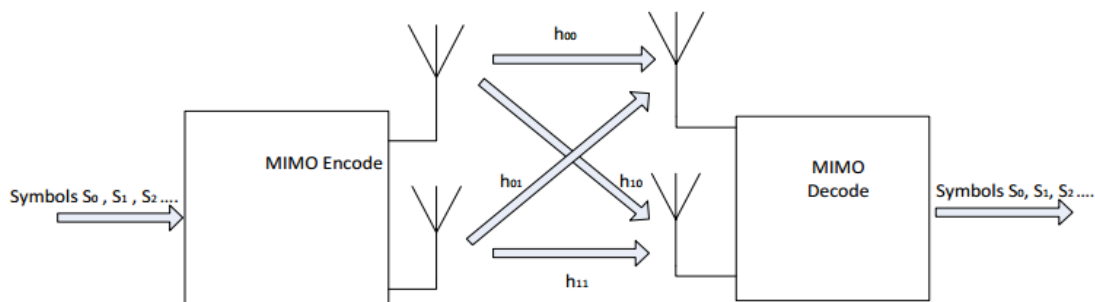
Εδώ να αναφέρουμε ότι η τεχνική **SISO (Single Input Single Output)** αναφέρεται στην χρήση μιας μόνο κεραίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη.

2.3.3. Χωρική Πολυπλεξία

Η τεχνική της χωρικής πολυπλεξίας μπορεί να παρέχει μια γραμμική αύξηση στον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων με το ίδιο εύρος ζώνης και την ίδια ισχύ, μεταδίδοντας πολλαπλά ανεξάρτητα σύνολα δεδομένων, σε αντίθεση με την τεχνική transmit diversity όπου ένα μοναδικό σύνολο δεδομένων μεταδίδεται πάντα ανεξάρτητα. Υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ του αριθμού των ζευγών κεραιών μετάδοσης/λήψης σε ένα σύστημα MIMO και της θεωρητικής αύξησης στην χωρητικότητα. Η έννοια της λειτουργίας του συστήματος χωρικής πολυπλεξίας εξηγείται με την βοήθεια της Εικόνα 6.

Κατά την διάρκεια του πρώτου συμβόλου, το πρώτο σύμβολο δεδομένων S_0 μεταδίδεται από την πάνω κεραία T_{x0} και το δεύτερο σύμβολο S_1 από την κάτω κεραία T_{x1} . Αυτό γίνεται ταυτόχρονα. Γι' αυτό ο ρυθμός δεδομένων διπλασιάζεται καθώς διαφορετικά σύμβολα μεταδίδονται από κάθε κεραία και κάθε σύμβολο μεταδίδεται μόνο μια φορά. Έτσι δεν μεταδίδεται πλεονασμός ώστε να μπορεί ο δέκτης να ανακτήσει τα δεδομένα όπως στην transmit diversity.

Η μετάδοση του σήματος από την κεραία μετάδοσης T_{x0} στις κεραιές λήψης R_{x0} και R_{x1} γίνεται πάνω από ασύρματα κανάλια με σύνθετο συντελεστή h_{00} και h_{10} . Παρομοίως υπάρχουν ασύρματα κανάλια με σύνθετους συντελεστές h_{01} και h_{11} μεταξύ της κεραίας μετάδοσης T_{x1} προς τις δύο κεραιές λήψης R_{x0} και R_{x1} . Με την κατάλληλη τοποθέτηση αυτών των κεραιών μπορεί να υποθεθεί ότι οι συντελεστές είναι πιθανώς μοναδικοί.



Εικόνα 6 Χωρική πολυπλεξία

Στο τέλος της μετάδοσης στην μεριά του δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα στην πάνω κεραία R_{x0} που δηλώνεται ως r_0 , υπολογίζεται από τον δέκτη να είναι ένας συνδυασμός των S_0 και S_1 συμπεριλαμβανομένων των συντελεστών καναλιού h_{00} και h_{10} . Παρομοίως και για την κάτω κεραία και το λαμβανόμενο σήμα r_1 .

Έτσι μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα σήματα ως εξής:

$$r_0 = h_{00}s_0 + h_{01}s_1$$

$$r_1 = h_{10}s_0 + h_{11}s_1$$

Η χωρική πολυπλεξία μετατρέπει το μειονέκτημα των επιπτώσεων της πολύδρομης μετάδοσης σε πλεονέκτημα. Για την ακρίβεια μόνο αυτή η τεχνική μπορεί να αυξήσει τους ρυθμούς μετάδοσης όταν το ασύρματο περιβάλλον είναι γεμάτο πολύδρομες μεταδόσεις αφού αυτή η κατάσταση έχει σαν αποτέλεσμα την χαμηλή συσχέτιση μεταξύ των καναλιών καθιστώντας δυνατή την επαρκή ανάκτηση των μεταδιδόμενων δεδομένων στο δέκτη. Από την άλλη μεριά όταν η συσχέτιση μεταξύ των καναλιών είναι μεγάλη συμβαίνει μια ραγδαία υποβάθμιση της απόδοσης της τεχνικής αυτής.[3]

2.3.3.1. Χωρική Πολυπλεξία Ανοιχτού Βρόγχου

Για ένα SIMO σύστημα, ο δέκτης συνδυάζει τα σύνολα των δεδομένων από τις πολλαπλές κεραιές χρησιμοποιώντας συνδυαστικές μεθόδους μεγιστοποίησης του ρυθμού για να έχει diversity gain. Για πολλαπλές κεραιές μετάδοσης, το κανάλι γίνεται πιο περίπλοκο και υπάρχει παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών δεδομένων. Αν ο πομπός δεν έχει καμία πληροφορία για το κανάλι, ο δέκτης πρέπει μόνος του να εκμεταλλευτεί την MIMO χωρητικότητα, που συνήθως σημαίνει ότι απαιτούνται σύνθετοι αλγόριθμοι [27] [4].

Η **Closed Loop Χωρική Πολυπλεξία** αντίθετα συμβαίνει όταν ο πομπός χρησιμοποιεί πληροφορίες για το κανάλι για να μεγιστοποιήσει την απόδοση SNR. Ωστόσο περαιτέρω ανάλυση ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

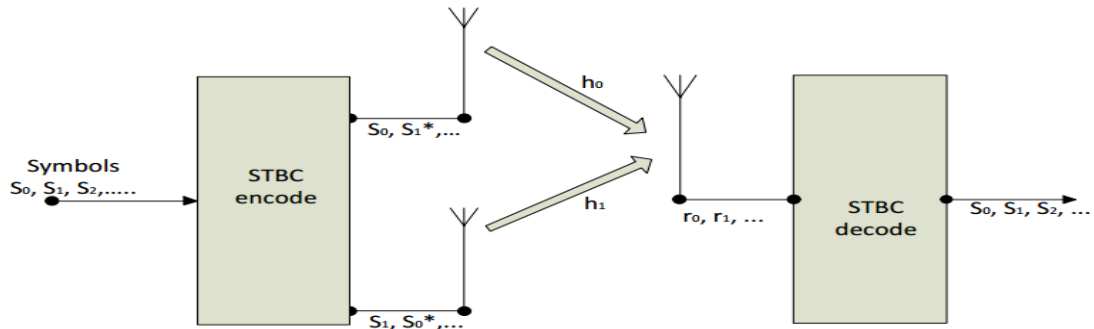
2.3.4. Transmit Diversity

Το Transmit Diversity είναι μια μορφή τεχνικής MIMO που παρέχει ένα μέσο για την μετρίαση της ποικιλομορφίας του καναλιού όταν οι ταχύτητες του UE είναι υψηλές ή για υπηρεσίες ανεκτικές στην καθυστέρηση και σε υψηλές και σε χαμηλές ταχύτητες του UE. Ένας απλό παράδειγμα είναι ένα σύστημα 2 Tx- κεραιάς στο οποίο τα δεδομένα του χρήστη στέλνονται και στα δυο κανάλια μετάδοσης με μια μικρή τροποποίηση στην ομάδα των δεδομένων, για την βελτίωση της πιθανότητας επιτυχημένης ανάκτησης των επιθυμητών δεδομένων. Ένα παράδειγμα φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 7). Κατά την διάρκεια της περιόδου του πρώτου συμβόλου, το πρώτο σύμβολο μια ακολουθίας, S_0 μεταδίδεται από την πάνω κεραία ενώ το δεύτερο σύμβολο, S_1 μεταδίδεται ταυτόχρονα από την κάτω κεραία. Κατά την διάρκεια της περιόδου του δεύτερου συμβόλου ο συζυγής μιγαδικός των δύο ίδιων συμβόλων - S_1^* και S_0^* μεταδίδεται και από τις δυο κεραιές. Αυτή η επανάληψη συμβόλων και η μετάδοση βελτιώνουν την συνολική επίδοση του συστήματος δίνοντας στον δέκτη δύο ευκαιρίες για να ανακτήσει κάθε σύμβολο.

Η σύνθετη τιμή του Space-Time Block Code περιγράφεται από τον πίνακα:

$$\begin{pmatrix} b_{0,0} & \cdots & b_{0,s-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n-1,0} & \cdots & b_{n-1,s-1} \end{pmatrix}$$

όπου n είναι το μήκος του Space-Time Block Code και s ο αριθμός των κεραιών μετάδοσης.[3]



Εικόνα 7 Απλοποιημένο σχήμα Transmit Diversity

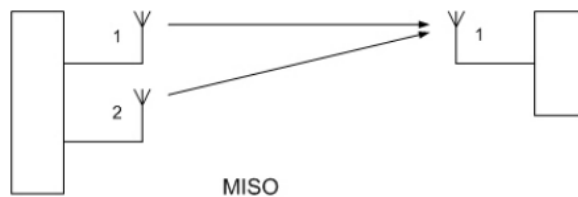
Υπάρχουν δύο είδη Transmit Diversity: η Rx Diversity και η Tx Diversity.

Στην **Rx Diversity** χρησιμοποιούνται περισσότερες κεραιές στην μεριά του δέκτη. Η πιο απλή περίπτωση είναι όταν έχουμε δυο RX κεραιές (στον δέκτη) και μια TX κεραιά (στον πομπό) (SIMO 1x2) (Εικόνα 8).



Εικόνα 8 RX Diversity SIMO 1x2 [9]

Στην **Tx Diversity** χρησιμοποιούνται περισσότερες κεραιές στην μεριά του πομπού. Η πιο απλή περίπτωση είναι όταν έχουμε δυο TX (πομπός) κεραιές και μια RX (δέκτης) κεραιά (MISO 2x1) (Εικόνα 9).



Εικόνα 9 TX Diversity MISO 2x1 [9]

Το παράδειγμα που αναφέραμε πιο πριν που είναι μια περίπτωση **TxD 2x1** (η οποία θα αξιολογηθεί κιόλας στον LTE link level Simulator) μπορεί να αναπαρασταθεί με τον πίνακα:

	t_1	t_2
Tx1	S_0	S_1
Tx2	$-S_1^*$	S_0^*

Πίνακας 1 Space-Time Block Code για την περίπτωση TxD 2x1 [16]

Άλλη μια περίπτωση που θα μας απασχολήσει είναι η **TxD 4x2** και η οποία σύμφωνα με τα παραπάνω αναπαρίσταται ως εξής:

	t_1	t_2
Tx1	S_0	S_1
Tx2	$-S_1^*$	S_0^*
Tx3	S_2	S_3
Tx4	$-S_3^*$	S_2^*

Πίνακας 2 Space-Time Block Code για την περίπτωση TxD 4x2 [16]

2.4. Βασική Αρχιτεκτονική LTE

Το LTE περιλαμβάνει την εξέλιξη της ραδιο-πρόσβασης μέσω του E-UTRAN και τους παράγοντες που δεν σχετίζονται με αυτήν υπό τον όρο System Architecture Evolution (SAE). Ολόκληρο το σύστημα απαρτίζεται και από το LTE και από το SAE. Σε ένα υψηλότερο επίπεδο ανάλυσης το δίκτυο αποτελείται από τα εξής:

- Το Core Network (CN), που ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC) στο SAE
- Το δίκτυο ράδιο - πρόσβασης (E-UTRAN) [8]

2.4.1. Evolved Packet Core

Το EPC είναι υπεύθυνο για τον συνολικό έλεγχο του Εξοπλισμού Χρήστη (User Equipment - UE) και την εγκαθίδρυση των φορέων σύνδεσης (bearers). Ένας φορέας σύνδεσης είναι ροή IP πακέτων με μια ορισμένη ποιότητα υπηρεσιών μεταξύ της πύλης και του UE.

Οι βασικοί λογικοί κόμβοι στο EPC είναι οι εξής (Εικόνα 10):

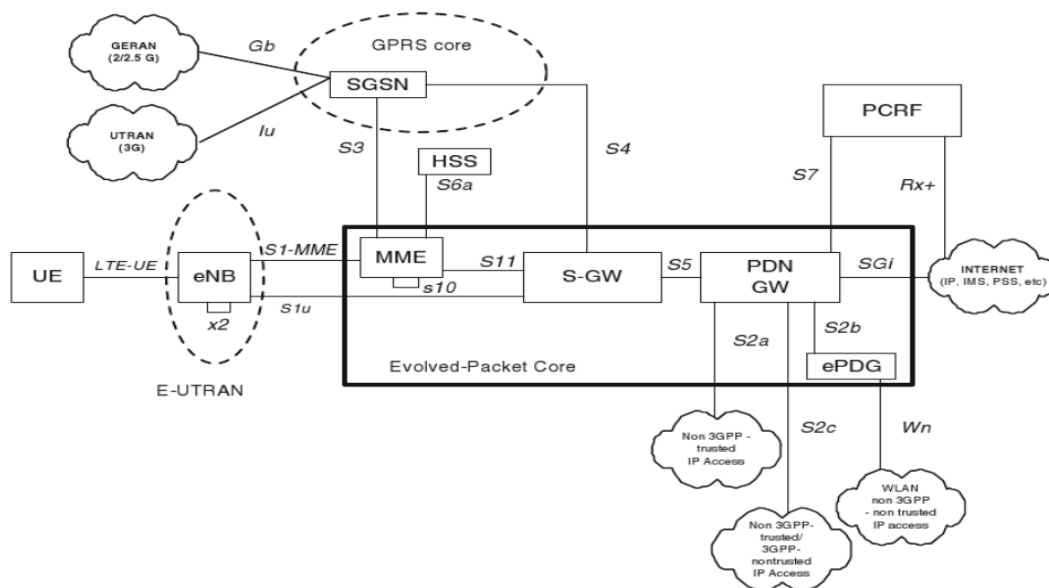
- Η πύλη Packet Data Network (PDN Gateway ή P-GW ή PDN GW)
- Η πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway - S-GW)
- Η Οντότητα Διαχείρισης της Κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME)

Το EPC περιλαμβάνει επίσης και άλλους κόμβους και λειτουργίες όπως:

- Ο Εξυπηρετής Οικιακών Συνδρομητών (Home Subscriber Server - HSS)
- Λειτουργία Ελέγχου Πολιτικής και Ανάθεσης Κανόνων (Policy Control and charging Rules Function - PCRF)

Το EPS παρέχει μόνο ένα μονοπάτι φορέα σύνδεσης μιας συγκεκριμένης QoS. Ο έλεγχος των πολυμεσικών εφαρμογών παρέχεται από το Υποσύστημα IP Πολυμέσων (IP Multimedia Subsystem - IMS), το οποίο θεωρείται εκτός EPS.

Το E-UTRAN περιέχει μόνο τους σταθμούς βάσης, που ονομάζονται eNodeBs ή eNBs. [8]



Εικόνα 10 Αρχιτεκτονική Συστήματος LTE [8]

2.4.2. Πύλη PDN

Η πύλη PDN είναι υπεύθυνη για την ανάθεση IP διευθύνσεων στους εξοπλισμούς χρήστη, για την επιβολή της ποιότητας υπηρεσιών, και για την διαμόρφωση της ροής σύμφωνα με τους κανόνες του PCRF. Η πύλη αυτή είναι επίσης υπεύθυνη για το φιλτράρισμα των IP πακέτων της καθοδικής ζεύξης προς τους διαφορετικής ποιότητας υπηρεσιών φορείς σύνδεσης. Αυτό επιτυγχάνεται βάσει των πρότυπων ροής κίνησης. Γενικά είναι υπεύθυνη για όλες τις λειτουργίες που έχουν να κάνουν με IP πακέτα όπως η βαθιά επιθεώρηση των πακέτων, ο στιγματισμός των πακέτων σε επίπεδο μεταφοράς και η καταμέτρηση. Η PDN GW επιβάλλει την ποιότητα υπηρεσιών σε GBR φορείς σύνδεσης. Επίσης χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς για δια-λειτουργικά δίκτυα που δεν διαθέτουν 3GPP τεχνολογίες όπως τα CDMA2000 και WiMAX. Όταν ένας εξοπλισμός μετακινείται από μια S-GW σε άλλη, οι φορείς και τα κανάλια πρέπει να αλλάξουν στην P-GW. Η P-GW θα λάβει ένδειξη για να αλλάξει τις ροές από το νέο S-GW. Κάθε P-GW μπορεί να συνδεθεί με ένα ή περισσότερα PCRF, S-GW και εξωτερικά δίκτυα. Για ένα συγκεκριμένο εξοπλισμό χρήστη που σχετίζεται με την P-GW, υπάρχει μόνο μία S-GW, αλλά μπορεί να χρειαστεί να υποστηρίζονται συνδέσεις σε πολλά εξωτερικά δίκτυα και σε πολλές PCRFs, αν η συνδεσιμότητα σε πολλαπλές PDNs υποστηρίζεται από ένα P-GW. [23][6][7][1]

2.4.3. Πύλη εξυπηρέτησης

Τα πακέτα IP όλων των χρηστών μεταφέρονται μέσω της S-GW, η οποία λειτουργεί ως το τοπικό σημείο κινητικότητας για τους φορείς σύνδεσης όταν οι εξοπλισμοί χρήστη κινούνται μεταξύ των eNodeB. Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε ένα UE το οποίο βρίσκεται σε λειτουργία, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ του eNodeB και του P-GW. Η S-GW θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, διότι η P-GW δεν θα αλλάξει κατά τη διάρκεια

της μετακίνησης, ενώ το S-GW μπορεί να μεταφερθεί όταν το UE κινείται. Επίσης διατηρεί τις πληροφορίες για τους φορείς όταν ο εξοπλισμός χρήστη είναι σε κατάσταση IDLE (γνωστή ως ECM-IDLE) και κρατάει προσωρινά τα δεδομένα σε buffers ενώσω η MME αρχίζει την ανίχνευση για να βρει το στίγμα του εξοπλισμού χρήστη ώστε να καθιερώσει ξανά τους φορείς σύνδεσης. Επιπλέον εκτελεί μερικές διαχειριστικές λειτουργίες στο δίκτυο στο οποίο έγινε επίσκεψη όπως το να συλλέγει πληροφορίες για τον φόρτο (πχ τον όγκο των δεδομένων που στέλνονται και λαμβάνονται από το χρήστη) και την νόμιμη διακοπή. Επίσης τερματίζει την διαπαφή μεταξύ χρήστη και E-UTRAN. Επίσης λειτουργεί ως σημείο δια-κινητικότητας μεταξύ άλλων 3GPP δικτύων όπως τα GPRS και UMTS. [23][6][1]

2.4.4. Οντότητα Διαχείρισης της Κινητικότητας

Η MME είναι ο κόμβος ελέγχου που διαχειρίζεται τα σήματα μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και του CN. Τα πρωτόκολλα που βρίσκονται μεταξύ τους είναι γνωστά ως πρωτόκολλα Non-Access Stratum (NAS).

Οι κυριότερες λειτουργίες της MME κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Λειτουργίες που σχετίζονται με την διαχείριση των φορέων σύνδεσης: Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν την διατήρηση και απελευθέρωση των φορέων και τις χειρίζεται το επίπεδο διαχείρισης συνεδρίας στο πρωτόκολλο NAS.
- Λειτουργίες που έχουν σχέση με την διαχείριση της σύνδεσης: Εδώ περιλαμβάνονται η εγκαθίδρυση της σύνδεσης και η ασφάλεια μεταξύ του δικτύου και του UE, και τις χειρίζεται το επίπεδο διαχείρισης σύνδεσης ή κινητικότητας στο πρωτόκολλο NAS.

Επίσης μαζί με αυτές τις λειτουργίες περιλαμβάνονται και η διαχείριση της λίστας ανίχνευσης περιοχής, η επιλογή των P-GW και S-GW και επίσης η επιλογή άλλης MME κατά την διάρκεια μιας μεταπομπής (handover).

Τέλος είναι το πρώτο σημείο επαφής για τα 2G και 3G δίκτυα. Είναι επίσης υπεύθυνη για την επιλογή του Serving GPRS Support Node (SGSN) κατά την διάρκεια μιας μεταπομπής από 2G σε 3G δίκτυο. [6][28]

2.4.5. Εξοπλισμός Χρήστη

Στο UMTS και στο LTE, ο εξοπλισμός χρήστη είναι οποιαδήποτε συσκευή χρησιμοποιείται απευθείας από έναν τελικό χρήστη για να επικοινωνήσει. Αυτή μπορεί να είναι ένα κινητό τηλέφωνο, ένας laptop υπολογιστής που είναι εξοπλισμένος με έναν ασύρματο προσαρμογέα πολυεκπομπής, ή οποιαδήποτε άλλη συσκευή. Συνδέεται με τον σταθμό βάσης eNodeB. [30]

2.4.6. Εξυπηρέτης Οικιακών Συνδρομητών

Ο εξυπηρέτης οικιακών συνδρομητών είναι η συνένωση του Home Location Register (HLR) και του Authentication Center (AuC). Το τμήμα HLR του HSS είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση και την ανανέωση όταν χρειαστεί της βάσης δεδομένων που περιέχει τις πληροφορίες συνδρομής όλων των χρηστών, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Ταυτότητα και Διεύθυνση Χρήστη: αυτό απευθύνεται στα IMSI (International Mobile Subscriber Identity) και MSISDN (Mobile ISDN Number) ή στο νούμερο του κινητού τηλεφώνου,
- Πληροφορίες για το Προφίλ του Χρήστη: αυτό περιλαμβάνει δηλώσεις συνδρομής υπηρεσίας και πληροφορίες της ποιότητας υπηρεσιών του χρήστη που έχει συνδρομή.

Το τμήμα AuC του HSS είναι υπεύθυνο για την παραγωγή πληροφοριών ασφαλείας από τα κλειδιά αναγνώρισης των χρηστών. Αυτές οι πληροφορίες παρέχονται στο τμήμα HLR και επιπλέον διαχέονται σε διάφορες οντότητες μέσα στο δίκτυο. Οι πληροφορίες ασφαλείας χρησιμοποιούνται κυρίως για:

- Αμοιβαία επικύρωση τερματικού - δικτύου,
- Κρυπτογράφηση του ραδιο-μονοπατιού και ασφάλεια της ακεραιότητας, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα και τα σήματα που μεταδίδονται μεταξύ του δικτύου και των τερματικών δεν υποκλέπτονται ούτε αλλάζουν. [6][28]

2.4.7. Εξυπηρέτης Λειτουργίας Ελέγχου Πολιτικής και Ανάθεσης Κανόνων

Ο PCRF Server διαχειρίζεται την πολιτική υπηρεσίας και στέλνει ρυθμίσεις QoS για κάθε συνεδρία χρήστη και πληροφορία ανάθεσης κανόνα. Συνδυάζει λειτουργίες για τους εξής δύο UMTS κόμβους:

- Την Λειτουργία Επιλογής Πολιτικής (Policy Decision Function - PDF),
- Την Λειτουργία Ανάθεσης Κανόνων (Charging Rules Function - CRF).

Η PDF είναι η οντότητα του δικτύου όπου λαμβάνονται οι αποφάσεις για την πολιτική. Καθώς η συνεδρία IMS ξεκινά, σήματα Session Initial Protocol (SIP) που περιέχουν απαιτήσεις των μέσων ανταλλάσσονται μεταξύ του τερματικού και του Proxy-Call Session Control Function (P-CSCF). Κάποια στιγμή στην διαδικασία εγκαθίδρυσης της συνεδρίας, η PDF λαμβάνει αυτές τις αιτήσεις από το P-CSCF και αποφασίζει βασισμένη σε λειτουργικούς κανόνες του δικτύου για τα εξής:

- Αποδοχή ή Απόρριψη της αίτησης μέσων,
- Χρήση νέου ή υπάρχοντος PDP περιεχομένου για την εισερχόμενη αίτηση μέσων,
- Έλεγχος της ανάθεσης νέων πόρων κόντρα στους μέγιστους επιτρεπόμενους.

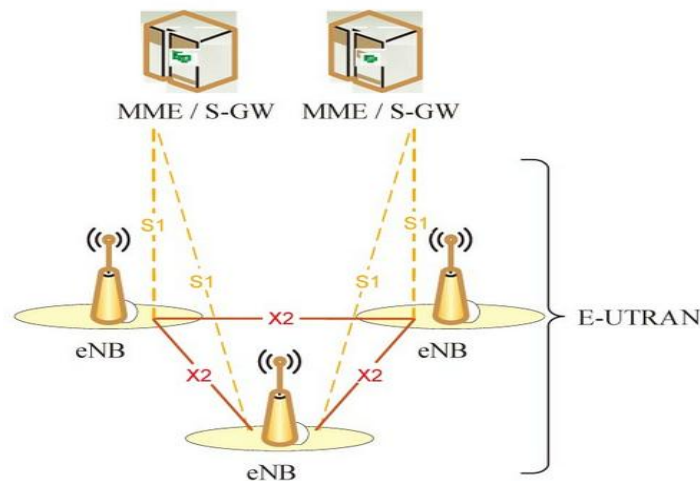
Ο ρόλος της CRF είναι να παρέχει κανόνες ανάθεσης λειτουργιών που εφαρμόζονται στην ροή δεδομένων κάθε υπηρεσίας. Η CRF επιλέγει τους σχετικούς κανόνες βασισμένη σε πληροφορίες που παρέχονται από το P-CSCF, όπως ταυτότητα

εφαρμογής, τύπος stream (φωνή, βίντεο κλπ), ρυθμός των δεδομένων εφαρμογής κλπ. [6][7][28]

2.4.8. E-UTRAN Node B

Το E-UTRAN αποτελείται από eNodeBs. Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για την συνολική διαχείριση του ραδιο-μέσου στο LTE. Όταν εμφανίζεται ο UE, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των ραδιο-πόρων, δηλαδή θα κάνει τον έλεγχο των ραδι-φορέων σύνδεσης, τον έλεγχο της ραδιο-υποδοχής, την διάθεση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης στον UE κλπ. Όταν ένα πακέτο από τον UE φτάσει στον eNodeB, ο δεύτερος θα συμπιέσει την κεφαλίδα IP και θα κρυπτογραφήσει την ακολουθία δεδομένων. Επίσης είναι υπεύθυνος για την προσθήκη GPRS Tunneling Protocol (GTP-U) κεφαλίδας στο φορτίο και για την αποστολή του στην S-GW. Πριν τα δεδομένα μεταδοθούν πραγματικά πρέπει να εγκαθιδρυθεί το επίπεδο ελέγχου. Ο eNodeB είναι υπεύθυνος για την επιλογή της MME χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση επιλογής MME.

Επειδή ο eNodeB είναι η μόνη οντότητα στην μεριά του ραδιο-μέσου, φροντίζει όλη την ποιότητα υπηρεσιών. Στιγματίζει τα πακέτα στην ανοδική ζεύξη και δρομολογεί τα δεδομένα. Άλλες λειτουργίες του αφορούν στην δρομολόγηση και μετάδοση μηνυμάτων ανίχνευσης, μηνυμάτων πολύ-εκπομπής και στην επιβολή ρυθμού του επιπέδου φορέα σύνδεσης βασισμένο στο μέγιστο συνολικό ρυθμό bit ανά χρήστη (Per UE Aggregate Maximum Bit Rate - UE-AMBR) και στο Μέγιστο Ρυθμό Bit (Maximum Bit Rate - MBR). [23][6]

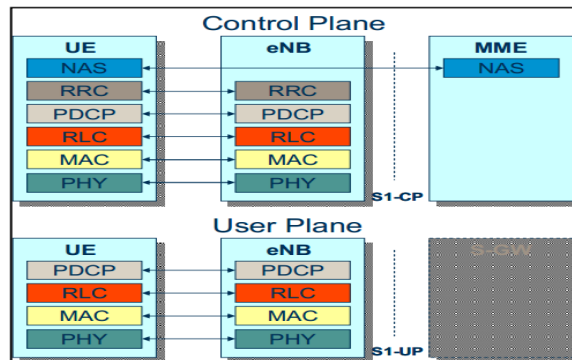


Εικόνα 11 Σταθμοί Βάσης eNodeB

2.5. Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

Τα πρωτόκολλα που εκτελούν τις λειτουργίες στη ραδιο- διεπαφή είναι: το Packet Data Convergence Protocol (PDCP), το Radio Link Protocol (RLC), το Medium Access Control (MAC) και το φυσικό επίπεδο. Για τον έλεγχο της σηματοδοσίας χρησιμοποιείται το Radio Resource Control (RRC) πρωτόκολλο για να μεταφέρει την πληροφορία NAS πάνω στη ραδιο- διεπαφή. Το PDCP πρωτόκολλο

χαρτογραφεί τον κομιστή EPS πάνω στον ασύρματο E-UTRAN κομιστή και εκτελεί συμπίεση κεφαλίδας (Robust Header Compression - ROHC). Το RLC πρωτόκολλο χαρτογραφεί τον ραδιο-κομιστή E-UTRA σε ένα λογικό κανάλι και εκτελεί κατάτμηση (segmentation), μεταφορά αλληλουχίας και επαναμετάδοση. Το MAC πρωτόκολλο χαρτογραφεί το λογικό κανάλι σε ένα κανάλι μεταφοράς και είναι υπεύθυνο για την (HARQ) και τον προγραμματισμό. Το φυσικό επίπεδο χαρτογραφεί το κανάλι μεταφοράς πάνω σε ένα φυσικό κανάλι και εκτελεί κωδικοποίηση καναλιού, διαμόρφωση κτλ. Το πρωτόκολλο αρχιτεκτονικής της ραδιο- διεπαφής φαίνεται στην Εικόνα 12 σε επίπεδο ελέγχου και σε επίπεδο χρήστη. Τα πρωτόκολλα περιγράφονται παρακάτω πιο λεπτομερώς.



Εικόνα 12 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου ραδιο-πρόσβασης

2.5.1. Επίπεδο Radio Resource Control

Το υπό-επίπεδο ελέγχου ραδιο πόρων, χειρίζεται την σηματοδότηση ελέγχου του τρίτου επιπέδου μεταξύ του UE και του eNB. Αυτό παίρνει τις αποφάσεις μεταπομπής, που βασίζονται στις μετρήσεις αναφορών από τον UE και χειρίζεται τη μετάδοση περιεχομένου του UE από την πηγή (eNB) στο στόχο (eNB) κατά τη διάρκεια της μεταπομπής. Το RRC είναι επίσης υπεύθυνο για την εκκίνηση και τη διατήρηση των ραδιο-φορέων σύνδεσης. Κύριες υπηρεσίες και συναρτήσεις που παρέχονται από το υπό-επίπεδο του RRC[1][2][22]:

- Εκπομπή της πληροφορίας συστήματος
- Σελιδοποίηση
- Συναρτήσεις ασφαλείας συμπεριλαμβανομένου ολοκληρωμένης προστασίας για τα μηνύματα
- Εγκαθίδρυση, διαμόρφωση, διατήρηση και απελευθέρωση από σημείο σε σημείο των φορέων σύνδεσης
- Διακυβελωτή μεταπομπή
- Επιλογή κυψέλης και επανεπιλογή UE καθώς και έλεγχο της επιλογής κυψέλης και της επανεπιλογής UE
- Μεταφορά κειμένου μεταξύ eNBs
- Συναρτήσεις διαχείρισης ποιότητας υπηρεσιών
- Μετρήσεις UE κάνοντας αναφορά και έλεγχο αναφοράς

2.5.2. Επίπεδο Packet Data Convergence Protocol

Το PDCP υπό-επίπεδο προσφέρει εύρωστη συμπίεση επικεφαλίδας για βελτίωση της μετάδοσης για τα δεδομένα που είναι ευαίσθητα στο θόρυβο όπως στην περίπτωση του Voice over IP (VoIP) και της βίντεο κλήσης. Επίσης, έχει τη δυνατότητα για κρυπτογράφηση για λόγους ασφαλείας. Κύριες υπηρεσίες και συναρτήσεις που παρέχονται από το υπό-επίπεδο του PDCP [1][2]:

- Μεταφέρει τα δεδομένα του παραπάνω επιπέδου από το NAS στο RLC υπό-επίπεδο και αντίστροφα
- Συμπίεση/ αποσυμπίεση επικεφαλίδας
- Κρυπτογράφηση
- Διπλασιασμός της ανίχνευσης των κατώτερων επιπέδων μονάδων δεδομένων υπηρεσίας (Service Data Units -SDUs)

2.5.3. Επίπεδο Radio Link Control

Το RLC υπό-επίπεδο υποστηρίζει τρεις τύπους καταστάσεων μετάδοσης δεδομένων: κατάσταση αναγνώρισης (Acknowledgement Mode - AM), κατάσταση μη αναγνώρισης (Unacknowledged Mode - UM) και διαφανή κατάσταση (Transparent Mode - TM). Η κατάσταση AM χρησιμοποιεί για επαναμεταδόσεις την Automatic Repeat Request (ARQ). Η ARQ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για σηματοδότηση αναφοράς κατάστασης και για επανατοποθετήσεις των μεταδιδόμενων και των λαμβανόμενων RLC οντοτήτων. Το υπό-επίπεδο RLC υποστηρίζει επίσης την κατάτμηση και τη σύνδεση των SDUs. Όταν μια μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου (Protocol Data Union - PDU) δεν ταιριάζει απόλυτα στο MAC SDU τα RLC SDUs θα κατατμηθούν σε μικρότερα κομμάτια. Η επανακατάτμηση μπορεί να γίνει όταν ένα επαναμεταδιδόμενο PDU δεν ταιριάζει σε ένα MAC SDU. Ο αριθμός των επανακατατμήσεων είναι απεριόριστος. SDUs και τμήματα SDUs συγκεντρώνονται στα PDUs. Κύριες υπηρεσίες και συναρτήσεις που παρέχονται από το υπό-επίπεδο του RLC [1][2] [22]:

- Μεταφορά από το παραπάνω επίπεδο PDUs υποστηρίζοντας AM, UM, και TM καταστάσεις .
- Μεταφορά με τη σειρά των PDUs του παραπάνω επιπέδου εκτός από τη μεταπομπή της ανερχόμενης ζεύξης
- Διπλασιασμός ανίχνευσης
- Κατάτμηση για δυναμικό μέγεθος PDU, δεν χρειάζεται παραγέμισμα
- Επανακατάτμηση των PDUs που χρειάζεται να επαναμεταδοθούν
- Συγκέντρωση των SDUs για τον ίδιο ραδιο-φορέα σύνδεσης
- Διόρθωση σφαλμάτων με επαναμετάδοση μέσω ARQ
- Ανίχνευση λάθους πρωτοκόλλου και ανάκτηση
- Απόρριψη SDU
- Επανατοποθέτηση

2.5.4. Επίπεδο Medium Access Control

Οι κύριες λειτουργίες του επιπέδου MAC είναι η δρομολόγηση, ο χειρισμός της προτεραιότητας, η πολυπλεξία και η τεχνική HARQ. Η τεχνική HARQ σε αυτό το υπό-επίπεδο διασφαλίζει την μεταφορά μεταξύ ζευγών οντοτήτων στο φυσικό επίπεδο. Επίσης υποστηρίζει τεχνική διόρθωσης λαθών όταν η παράδοση αποτυγχάνει. Όταν αποτυγχάνει και η διόρθωση λαθών τότε και η ανοδική και η καθοδική ζεύξη υπόκεινται σε επαναποστολή.

Η κύριες λειτουργίες και συναρτήσεις του MAC επιπέδου είναι οι εξής [1][2][22]:

- Αντιστοίχιση μεταξύ λογικών καναλιών και καναλιών μετάδοσης.
- Αναφορά μέτρησης του όγκου της κίνησης.
- Διόρθωση σφαλμάτων μέσω HARQ.
- Χειρισμός προτεραιότητας μεταξύ των λογικών καναλιών ενός UE.
- Χειρισμός προτεραιότητας μεταξύ των UE μέσω δυναμικού προγραμματισμού
- Επιλογή μορφής διάδοσης

2.5.5. Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο προσφέρει πληροφορία μεταφοράς υπηρεσιών στα υψηλότερα στρώματα μέσω των καναλιών μεταφοράς. Τα κανάλια περιγράφουν πως και με ποια χαρακτηριστικά τα δεδομένα μεταφέρονται πάνω στη ραδιο -διεπαφή. [1][2]

2.6. Οι Διεπαφές του δικτύου E-UTRAN

Η παροχή αυτο-βελτιούμενων δικτύων (Self Organizing Networks - SONs) είναι ένας σημαντικός στόχος για το LTE και αυτό διότι έτσι θα απορρέει η μέγιστη επίδοση από το δίκτυο με ένα ανεκτό κόστος, ειδικά σε περιβάλλοντα αλλαγής της ραδιο-διάδοσης. Γι' αυτό τα SON δίκτυα αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο με βάση τον οποίο σχεδιάστηκαν όλες οι S1 και X2 διεργασίες. [23]

2.6.1. Διεπαφή S1

Η διεπαφή S1-U παρέχει μια μη εγγυημένη μεταφορά δεδομένων στο επίπεδο χρήστη μεταξύ του eNodeB και της πύλης πρόσβασης (Access Gateway - AGW). Στο επίπεδο δικτύου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο UDP/IP και πάνω από αυτό χρησιμοποιείται το GTP-U για την μεταφορά των δεδομένων επιπέδου χρήστη μεταξύ του eNodeB και του AGW.

Η διεπαφή S1 επιπέδου ελέγχου (S1-MME) ορίζεται μεταξύ του eNodeB και της MME. Η στοίβα πρωτοκόλλων για αυτή την περίπτωση είναι χτισμένη με βάση την IP μετάδοση. Παρομοίως για το επίπεδο χρήστη μόνο που εδώ για την αξιόπιστη μετάδοση των σημάτων έχει προστεθεί το Stream Control Transmission Protocol (SCTP) πάνω από το IP.

2.6.2. Διεπαφή X2

Η διεπαφή X2 χρησιμοποιείται από ένα e-NodeB για να επικοινωνεί με άλλα eNodeBs. Πρόκειται επίσης για μια διεπαφή που βασίζεται στο πρωτόκολλο μεταφοράς SCTP.

2.6.3. Διεπαφή Uu

Πρόκειται για την εναέρια διεπαφή μεταξύ ενός UE και ενός eNodeB. Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο μεταφοράς RRC. Πάνω από το RRC υπάρχει ένα επίπεδο NAS στον UE. Αυτό το επίπεδο τερματίζει στην MME και ο eNodeB μεταφέρει το μήνυμα σε άλλες MME.

2.6.4. Διεπαφή S11

Είναι η διεπαφή μεταξύ MME και SGW. Χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα GTPv2 στο επίπεδο εφαρμογής. Στο επίπεδο μεταφοράς έχουμε UDP πρωτόκολλο.

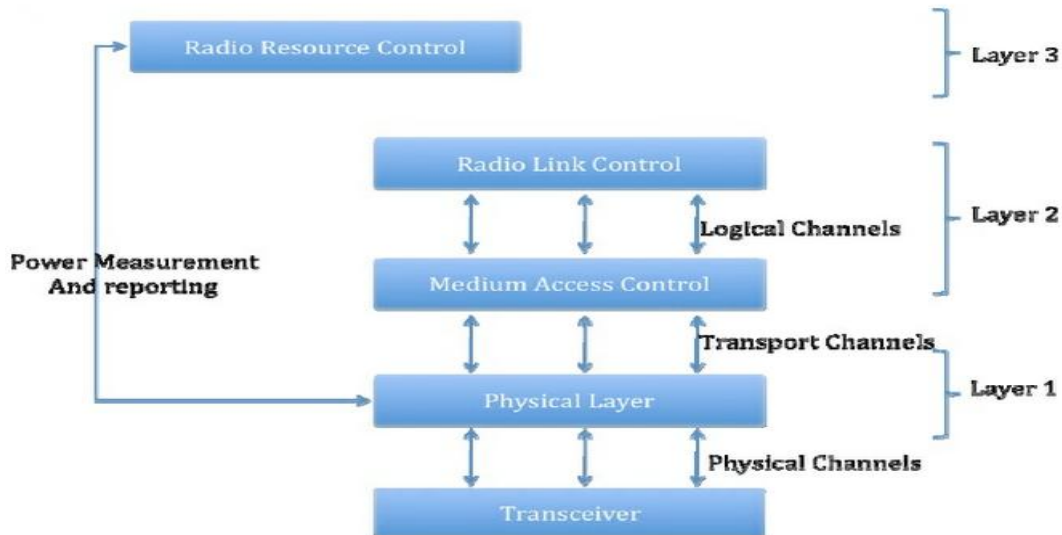
2.6.5. Διεπαφή S5

Πρόκειται για την διεπαφή μεταξύ SGW και PGW. Είναι επίσης διεπαφή IP με δύο επιλογές. Η S5 μπορεί να είναι είτε μια GTP διεπαφή είτε μια Proxy Mobile IPv6 (PMIPv6) διεπαφή. Η επιλογή PMIPv6 χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει πρόσβαση σε μη ασφαλή 3GPP δίκτυα.

2.7. Επίπεδα Ραδιο-Καναλιών LTE

Για να είναι ευέλικτο και να επιτρέπει διαφορετικά συστήματα για τη μετάδοση των δεδομένων, οι προδιαγραφές του E-UTRAN εισάγουν διάφορα είδη καναλιών [23]:

- Τα φυσικά κανάλια.
- Τα κανάλια μεταφοράς – πώς μεταδίδεται.
- Τα λογικά κανάλια - τι μεταδίδεται.



Εικόνα 13 Σύνοψη επιπέδων ραδιο-καναλιών στο LTE [23]

2.7.1. Φυσικά Κανάλια

Τα κανάλια μεταφοράς περιγράφουν τον τρόπο και τα χαρακτηριστικά με τα οποία μεταφέρονται τα δεδομένα μέσω των ραδιο-διεπαφών. Είναι δύο κατηγοριών κατερχόμενης ζεύξης και ανερχόμενης ζεύξης [23].

Κανάλια στην Κατερχόμενη Ζεύξη (Downlink)	Ιδιότητες/ Χρησιμότητα
Physical Broadcast Channel (PBCH)	Κανάλι Broadcast μετάδοσης
Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	Ενημερώνει τον UE για τον αριθμό των συμβόλων OFDM που χρησιμοποιούνται για το PDCCH
Physical Downlink Control Channel (PDCCH)	Ενημερώνει τον UE για την ανάθεση πόρων στο PCH και στο DL-SCH και για πληροφορίες HARQ σχετικά με το DL-SCH
Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)	Φέρει τις υβριδικές απαντήσεις ARQ Ack/NAK που αφορούν την μετάδοση στην ανερχόμενη ζεύξη
Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)	Φέρει τα DL-SCH και PCH
Physical Multicast Channel (PMCH)	Φέρει το κανάλι Multicast (MCH)

Πίνακας 3 Φυσικά Κανάλια στην Κατερχόμενη Ζεύξη

Κανάλια στην Ανερχόμενη Ζεύξη (Uplink)	Ιδιότητες/ Χρησιμότητα
Physical Uplink Control Channel (PUCCH)	Φέρει τις απαντήσεις ARQ Ack/NAK που αφορούν την μετάδοση στην κατερχόμενη ζεύξη και φέρει την απαίτηση για προγραμματισμό
Physical Uplink Share Channel (PUSCH)	Φέρει τον UL-SCH
Physical Random Access Channel (PRACH)	Φέρει την κεφαλίδα της τυχαίας πρόσβασης

Πίνακας 4 Φυσικά Κανάλια στην Ανερχόμενη Ζεύξη

2.7.2. Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς περιγράφουν τον τρόπο και τα χαρακτηριστικά με τα οποία μεταφέρονται τα δεδομένα μέσω των ραδιο-διεπαφών. Είναι δύο κατηγοριών κατερχόμενης ζεύξης και ανερχόμενης ζεύξης [23].

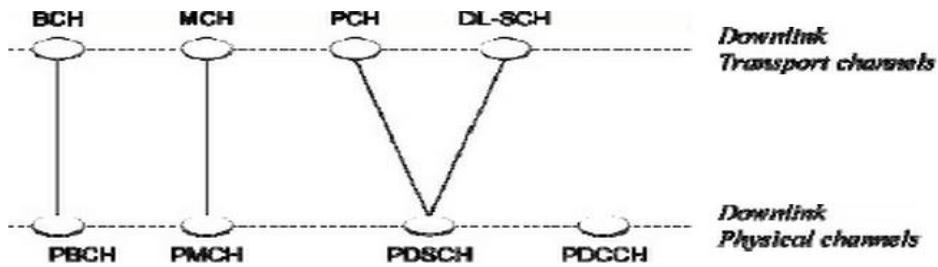
Κανάλια στην Κατερχόμενη Ζεύξη (Downlink)	Ιδιότητες/ Χρησιμότητα
Broadcast Channel (BCH)	Μεταδίδει broadcast πληροφορίες σε όλη την κυψέλη και έχει φτιάξει και προ-ορίσει το σχήμα μετάδοσης
Downlink Shared Channel (DL-SCH)	Μεταδίδει δεδομένα στην κατερχόμενη ζεύξη, υποστηρίζει HARQ και δυναμική προσαρμογή ζεύξης, μπορεί να μεταδώσει broadcast δεδομένα σε όλο την κυψέλη, υποστηρίζει μη συνεχή λήψη (DRX) για να εξοικονομεί ενέργεια ο UE και επίσης υποστηρίζει μετάδοση Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS)
Paging Channel(PCH)	Μεταδίδει πληροφορίες ανίχνευσης και υποστηρίζει DRX λειτουργία ώστε ο UE να κοιμάται και να ξυπνάει για να δέχεται ανίχνευση καναλιού σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα
Multicast Channel (MCH)	Υποστηρίζει MBMS

Πίνακας 5 Κανάλια Μεταφοράς στην Κατερχόμενη Ζεύξη

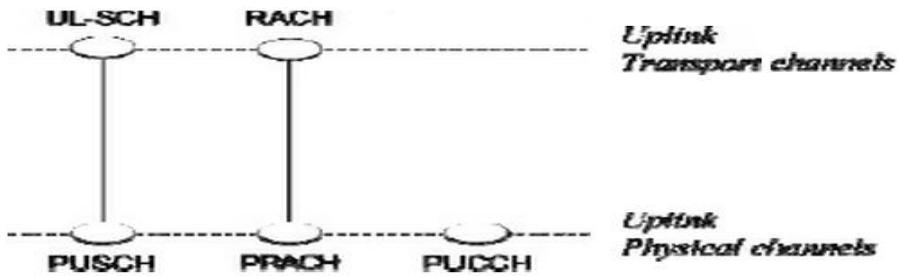
Κανάλια στην Ανερχόμενη Ζεύξη (Uplink)	Κανάλια στην Ανερχόμενη Ζεύξη (Uplink)
Uplink Shared Channel (UL-SCH)	Υποστηρίζει HARQ και είναι το αντίστοιχο αλλά στην ανάποδη ζεύξη με το DL-SCH

Random Access Channel (RACH)	Κανάλι τυχαίας πρόσβασης
------------------------------	--------------------------

Πίνακας 6 Κανάλια Μεταφοράς στην Ανερχόμενη Ζεύξη



Εικόνα 14 Αντιστοίχιση Φυσικών Καναλιών με Κανάλια μεταφοράς στην κατερχόμενη ζεύξη



Εικόνα 15 Αντιστοίχιση Φυσικών Καναλιών με Κανάλια μεταφοράς στην ανερχόμενη ζεύξη

2.7.3. Λογικά Κανάλια

Τα λογικά κανάλια ανταποκρίνονται στις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που παρέχονται από τα πρωτόκολλα ραδιο-διεπαφών στα ανώτερα στρώματα. Είναι δύο ειδών: τα κανάλια ελέγχου (για τη μεταφορά των πληροφοριών του επιπέδου ελέγχου (control plane) και τα κανάλια δοσοληψίας (για την μεταφορά των πληροφοριών του επιπέδου χρήστη(user plane)). Κάθε ένα από τα κανάλια των δύο αυτών κατηγοριών αντιστοιχεί σε ορισμένο τύπο της ροής πληροφοριών[23].

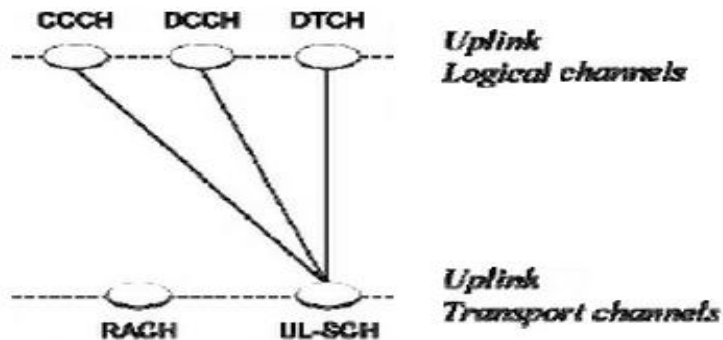
Κανάλια Ελέγχου	Ιδιότητες/ Χρησιμότητα
Broadcast Control Channel (BCCCH)	Κάνει broadcast σε πληροφορίες ελέγχου συστήματος και πρόκειται για κατερχόμενης ζεύξης κανάλι
Paging Control Channel(PCCH)	Κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, μεταφέρει πληροφορίες ανίχνευσης και ειδοποιήσεις αλλαγών στις πληροφορίες συστήματος
Common Control Channel (CCCH)	Μεταδίδει πληροφορίες ελέγχου μεταξύ του UE και του δικτύου και χρησιμοποιείται για UE που δεν έχουν RRC σύνδεση με το δίκτυο

Multicast Control Channel (MCCH)	Από ένα σε πολλά σημεία κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, που μεταδίδει MBMS πληροφορίες ελέγχου από το δίκτυο στο UE
Dedicated Control Channel (DCCH)	Από σημείο σε σημείο αμφίδρομο κανάλι, που μεταδίδει αφιερωμένες πληροφορίες ελέγχου μεταξύ UE και δικτύου και χρησιμοποιείται από UE που έχουν σύνδεση RRC

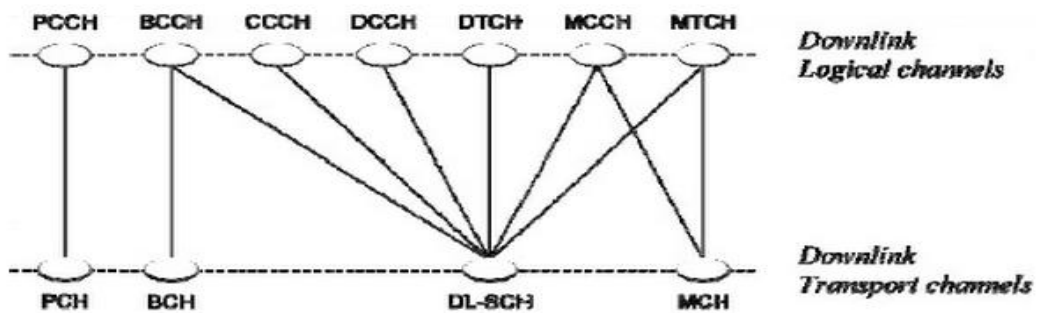
Πίνακας 7 Λογικά Κανάλια Ελέγχου

Κανάλια Δοσοληψίας	Ιδιότητες/ Χρησιμότητα
Dedicated Traffic Channel (DTCH)	Κανάλι ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης, από σημείο σε σημείο, αφιερωμένο σε έναν UE για την μεταφορά δεδομένων χρήστη
Multicast Traffic Channel (MTCH)	Από σημείο σε πολλά σημεία κανάλι κατερχόμενης ζεύξης που μεταδίδει δεδομένα κίνησης από το δίκτυο στο UE

Πίνακας 8 Λογικά Κανάλια Δοσοληψίας



Εικόνα 16 Αντιστοίχιση Λογικών Καναλιών με Κανάλια Μετάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη



Εικόνα 17 Αντιστοίχιση Λογικών Καναλιών με Κανάλια Μετάδοσης στην κατερχόμενη ζεύξη

2.8. Φορείς Σύνδεσης και Ποιότητα Υπηρεσιών

Ο φορέας σύνδεσης είναι αυτός που φέρει την πληροφορία. Υπάρχουν τρία είδη φορέων στο LTE:

- Οι ραδιο-φορείς σύνδεσης
- Οι φορείς σύνδεσης S1
- Οι EPS φορείς σύνδεσης

Οι ραδιο-φορείς φέρουν την πληροφορία πάνω στην ραδιο-διεπαφή ενώ οι S1 φορείς υπάρχουν μεταξύ του eNodeB και της MME/SGW. Οι φορείς EPS βρίσκονται μεταξύ της MME και της SGW (και μεταξύ της SGW και της PGW). Υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοίχιση μεταξύ των ραδιο-φορέων, των S1 φορέων και των EPS φορέων. Οι ραδιο-φορείς εγκαθιδρύονται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο RRC. Οι EPS φορείς παρέχουν τις υπηρεσίες σύνδεσης ώστε να έχει πρόσβαση το E-UTRAN στο EPS.

Υπάρχει μια σημαντική έννοια που αφορά τους EPS φορείς, το TFT. Το Πρότυπο Ροής Κίνησης (Traffic Flow Template - TFT) χρησιμοποιείται για να διακρίνονται τα διαφορετικά φορτία κίνησης. Το TFT χρησιμοποιεί κεφαλίδα IP, όπως διεύθυνση IP ή νούμερο θύρας κλπ, για να κάνει την διάκριση. Κάθε TFT αντιστοιχεί σε μία ποιότητα υπηρεσιών και όλα τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτό το TFT έχουν την ίδια μεταχείριση όσον αφορά την QoS.

Ένας EPS φορέας εγκαθιδρύεται όταν το UE συνδέεται στο PDN και παραμένει καθ' όλη την διάρκεια της σύνδεσης. Λέγεται προεπιλεγμένος φορέας. Ο προεπιλεγμένος φορέας παρέχει πάντα IP σύνδεση στο δίκτυο. Κάθε επιπρόσθετος EPS φορέας λέγεται αφιερωμένος φορέας. Κάθε αφιερωμένος φορέας σχετίζεται με ένα TFT και κάθε TFT έχει μια QoS. Έτσι κάθε αφιερωμένος φορέας σχετίζεται πάντα με μια QoS. Το TFT ανερχόμενης ζεύξης και το TFT κατερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση της κίνησης στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη αντίστοιχα με μια QoS. Η αντιστοίχιση αυτή για την μεν ανερχόμενη ζεύξη συμβαίνει στον e-NodeB, για την δε κατερχόμενη ζεύξη συμβαίνει είτε στη SGW είτε στη PGW.

Ένας EPS φορέας αναφέρεται και ως GBR φορέας αν αφιερωμένοι πόροι του δικτύου που σχετίζονται με μια τιμή του Εγγυημένου Ρυθμού bit (Guaranteed Bit Rate - GBR) που αντιστοιχεί σε ένα EPS φορέα, έχουν ανατεθεί μόνιμα κατά την εγκαθίδρυση/τροποποίηση του φορέα. Αλλιώς ο EPS φορέας λέγεται Non-GRB φορέας. Ένας αφιερωμένος φορέας μπορεί να είναι είτε GBR είτε Non-GBR αλλά ένας προεπιλεγμένος φορέας είναι πάντα Non-GBR φορέας.

2.8.1. Η Ποιότητα Υπηρεσιών του επιπέδου Φορέα

Το προφίλ της QoS του EPS φορέα περιλαμβάνει κάποιες παραμέτρους. Κάθε EPS φορέας (GRB ή Non-GRB) σχετίζεται με αυτές και είναι οι εξής:

- Η Ταυτότητα Κλάσης της QoS (QoS Class Identifier - QCI)
- Η Προτεραιότητα Ανάθεσης και Κράτησης (Allocation and Retention Priority - ARP)

Μια QCI είναι ένας βαθμωτός που χρησιμοποιείται σαν αναφορά για να έχει πρόσβαση σε κομβο-στραφείς παραμέτρους που ελέγχουν την διαχείριση της προώθησης πακέτων του επιπέδου φορέα (π.χ. τα βάρη του προγράμματος, τα κατώφλια υποδοχής, τα κατώφλια διαχείρισης ουράς, την ρύθμιση του πρωτοκόλλου επιπέδου σύνδεσης κλπ.) και οι οποίες είναι προ-ρυθμισμένες από αυτόν που κατέχει τον κόμβο πρόσβασης (π.χ. τον eNodeB).

Η ARP περιέχει πληροφορίες για το επίπεδο προτεραιότητας, της εκ των προτέρων χωρητικότητας προτίμησης και της εκ των προτέρων τρωτής προτίμησης. Ο πρωταρχικός σκοπός της ARP είναι να αποφασίζει αν η αίτηση εγκαθίδρυσης/τροποποίησης μπορεί να γίνει δεκτή ή χρειάζεται να απορριφθεί σε περίπτωση περιορισμένων πόρων (τυπικά η διαθέσιμη ραδιο- χωρητικότητα σε περίπτωση GRB φορέων).

Κάθε GRB φορέας σχετίζεται επιπλέον με τις ακόλουθες παραμέτρους QoS του επιπέδου φορέα:

- Τον Εγγυημένο Ρυθμό Bit
- Τον Μέγιστο Ρυθμό Bit

Ο GRB δηλώνει τον ρυθμό bit που μπορεί να αναμένεται ότι θα παρέχει ένας GBR φορέας. Ο MBR περιορίζει τον ρυθμό bit που αναμένεται να παρέχει ένας GBR φορέας (π.χ. μπορεί να αποφευχθεί μια εξαιρετικά υψηλή κίνηση από μια συνάρτηση διαμόρφωσης ρυθμού)

Κάθε APN πρόσβαση, από τον UE, σχετίζεται επίσης με την ακόλουθη παράμετρο QoS:

- Τον για-κάθε- σημείο πρόσβασης (Access Point Name - APN) συνολικό Μέγιστο Ρυθμό Bit (APN-AMBR)

Ο APN-AMBR είναι μια παράμετρος που αποθηκεύεται για κάθε APN στον HSS. Είναι ένα όριο του συνολικού ρυθμού που αναμένεται να παρέχεται κατά μήκος όλων των Non-GBR φορέων και όλων των συνδέσεων PDN της ίδιας APN. Κάθε ένας από αυτούς του φορείς μπορεί να χρησιμοποιήσει σημαντικά όλο τον APN-AMBR, π.χ. όταν ο άλλος φορέας δεν έχει κίνηση καθόλου. Οι GRB φορείς εξαιρούνται από την έννοια αυτού του ρυθμού. Η PGW επιβάλλει τον APN-AMBR στην καθοδική ζεύξη. Η επιβολή του στην ανοδική ζεύξη γίνεται στον UE και επιπρόσθετα στην PGW.

Κάθε UE στην κατάσταση EMM-REGISTERED σχετίζεται με την ακόλουθη παράμετρο συνολικού επιπέδου φορέα QoS:

- Τον για-κάθε-UE συνολικό Μέγιστο Ρυθμό Bit (UE-AMBR)

Ο UE-AMBR περιορίζεται από μια παράμετρο που είναι αποθηκευμένη στον HSS. Η MME θέτει στον UE-AMBR την τιμή του αθροίσματος των APN-AMBR όλων των ενεργών APN μέχρι την τιμή του αποθηκευμένου UE-AMBR. Ο UE-AMBR περιορίζει τον συνολικό ρυθμό bit που αναμένεται κατά μήκος όλων των Non-GBR φορέων ενός UE. Κάθε ένας από αυτούς του φορείς μπορεί να χρησιμοποιήσει σημαντικά όλο τον UE-AMBR, π.χ. όταν ο άλλος φορέας δεν έχει κίνηση καθόλου. Οι GRB φορείς εξαιρούνται από την έννοια αυτού του ρυθμού. Το E-UTRAN επιβάλλει τον UE-AMBR και στις δύο ζεύξεις (ανερχόμενη και κατερχόμενη).

Το ARP του προεπιλεγμένου φορέα πρέπει να είναι κατάλληλα ορισμένο ώστε να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο της άσκοπης διάθεσης του προεπιλεγμένου φορέα. [23][1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ
ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ
LTE LINK LEVEL SIMULATOR

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΣΤΟΝ LTE LINK LEVEL SIMULATOR

3.1. Μοντέλα Καναλιών Μετάδοσης

Οι Gaussian διαδικασίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στα συστήματα επικοινωνίας. Η κύρια αιτία γι' αυτό είναι το γεγονός ότι ο θερμικός θόρυβος στις ηλεκτρονικές κατασκευές που παράγεται από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων η οποία οφείλεται στην θερμική αναταραχή μπορεί να μοντελοποιηθεί πιστά ως Gaussian διαδικασία.

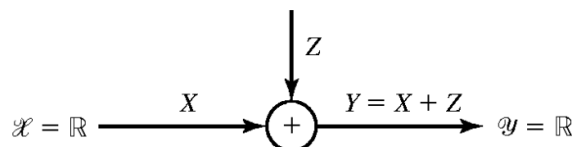
Ο όρος λευκή διαδικασία αναφέρεται στο πεδίο συχνοτήτων και χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη διαδικασία στην οποία όλες οι συχνότητες εμφανίζονται με ίση ισχύ, δηλαδή, η φασματική πυκνότητα ισχύος για μια τέτοια διαδικασία είναι ίδια για όλες τις συχνότητες. Η ονομασία αυτή είναι αντίστοιχη του "λευκού φωτός" στο οποίο υπάρχουν όλα τα χρώματα. Η σπουδαιότητα των λευκών διαδικασιών στην πράξη απορρέει από το γεγονός ότι ο θερμικός θόρυβος μπορεί να μοντελοποιηθεί πιστά ως λευκή διαδικασία σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων.[12]

3.1.1. Μοντέλο Καναλιού Προσθετικού Λευκού Gaussian Θορύβου

Μια τυχαία διαδικασία $X(t)$ είναι *Gaussian διαδικασία* εάν για όλα τα n και για όλες τις χρονικές στιγμές (t_1, t_2, \dots, t_n) οι τυχαίες μεταβλητές $\{X(t_i)\}_{i=1}^n$ έχουν μια συνδυασμένα Gaussian συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

Μια διαδικασία $X(t)$ ονομάζεται *λευκή διαδικασία* εάν έχει επίπεδη φασματική πυκνότητα ισχύος, δηλαδή εάν η $S_X(f)$ είναι σταθερή για όλες τις f .

Το κανάλι προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου είναι ένα μοντέλο καναλιού στο οποίο το μόνο πρόβλημα στην επικοινωνία είναι μια γραμμική πρόσθεση του εύρους ζώνης ή του λευκού θορύβου με μια σταθερή φασματική πυκνότητα και μια Gaussian κατανομή πλάτους. Το μοντέλο δεν αναφέρεται σε εξασθένιση σήματος, επιλογή συχνότητας, παρεμβολή, μη γραμμικότητα ή διασπορά. Ωστόσο παράγει ένα απλό και εύχρηστο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμεύει στην κατανόηση του συστήματος πριν συμβούν αυτά τα φαινόμενα. [12]



Εικόνα 18 Μοντέλο Καναλιού AWGN[15]

Αυτός ο θόρυβος προκύπτει από πολλές φυσικές πηγές, όπως θερμικές δονήσεις των ατόμων στους αγωγούς, θόρυβο κρούσης, ραδιενέργεια από την γη και άλλα αντικείμενα και από ουράνιες πηγές όπως ο ήλιος.

Το κανάλι AWGN αναπαρίσταται από μια σειρά εξόδων Y_i σε διακριτές χρονικές στιγμές i . Το Y_i είναι το άθροισμα της εισόδου X_i και του θορύβου Z_i , όπου Z_i είναι ανεξάρτητη, όμοια κατανεμημένη και μηδενικής μέσης τιμής κανονική κατανομή με διασπορά n . Επιπλέον το Z_i θεωρείται άσχετο από το X_i .

- $Z_i \sim N(0, n)$
- $Y_i = X_i + Z_i \sim N(X_i, n)$

Η χωρητικότητα του καναλιού είναι άπειρη εκτός και αν ο θόρυβος δεν είναι μηδενικός και το X_i περιορίζεται σημαντικά. Ο πιο σημαντικός περιορισμός της εισόδου είναι η Ισχύς κατά τον οποίο:

Έστω ότι μια κωδική λέξη (x_1, x_2, \dots, x_k) μεταδίδεται μέσα από το κανάλι τότε

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i^2 \leq P$$

όπου P η μέγιστη ισχύς του καναλιού.

Η χωρητικότητα του καναλιού δίνεται από το n τύπο:

$$C = \frac{1}{2} \log\left(1 + \frac{P}{n}\right)$$

που είναι και ο μέγιστος ρυθμός κωδικοποίησης που μπορεί να μεταδοθεί πάνω στο κανάλι.[19]

3.1.2. Μοντέλο Καναλιού Flat Rayleigh Fading

Η κατανομή Rayleigh, από την οποία και έχει πάρει το όνομα του το κανάλι αυτό, είναι μια συνεχής κατανομή πιθανότητας. Η κατανομή αυτή παρατηρείται συχνά όταν το μέγεθος ενός διανύσματος συνολικά σχετίζεται με τις διαστάσεις των υπο-διανυσμάτων του. Ένα παράδειγμα είναι η ταχύτητα του ανέμου που αναλύεται σε ορθογώνια δυσδιάστατα υπο-διανύσματα. Έστω ότι τα μεγέθη των υπο-διανυσμάτων είναι ασυσχέτιστα και κανονικά κατανεμημένα με ίση διασπορά τότε η συνολική ταχύτητα του ανέμου (το συνολικό διάνυσμα) χαρακτηρίζεται από κατανομή Rayleigh. Ένα δεύτερο παράδειγμα της κατανομής είναι η περίπτωση των τυχαίων μιγαδικών αριθμών των οποίων το πραγματικό και φανταστικό μέρος είναι ανεξάρτητα και όμοια κατανεμημένα με κατανομή Gauss. Σε αυτή την περίπτωση η απόλυτη τιμή του μιγαδικού έχει Rayleigh κατανομή.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Rayleigh είναι

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0$$

για $\sigma > 0$ και συνάρτηση συσσωρευτικής κατανομής $F(x) = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \in [0, \infty)$.

Άλλες Ιδιότητες της Rayleigh κατανομής:

- Μέση τιμή : $\sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$
- Διασπορά $\frac{4-\pi}{2} \sigma^2$

To Flat Rayleigh Fading κανάλι είναι ένα μοντέλο που βασίζεται στην προϋπόθεση ότι όταν το σήμα περνά το κανάλι το μέγεθος του ποικίλει τυχαία ή εξασθενεί σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh. Η τυχαία ποικιλία και η εξασθένηση είναι αποτέλεσμα των πολλαπλών μονοπατιών που δημιουργούνται λόγω ανακλάσεων από αντικείμενα στο ραδιο-κανάλι οι οποίες εμφανίζονται με διάφορους τρόπους στους τηλεπικοινωνιακούς δέκτες βάσει του βαθμού διαφοράς μονοπατιού σε σχέση με τον ρυθμό σηματοδότησης, που επίσης σχετίζεται με την διάδοση μήκους κύματος και την σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη. Με βάση το Κεντρικό Θεώρημα Ορίων, αν η σκέδαση που θα συμβεί είναι αρκετή, η κρουστική απόκριση του καναλιού θα μοντελοποιηθεί καλά σαν διαδικασία Gauss άσχετα από την κατανομή των υποδιανυσμάτων, αλλά αν δεν υπάρχει επικρατές διάνυσμα στην σκέδαση τότε αυτή η διαδικασία θα έχει μηδενική μέση τιμή και φάση όμοια κατανεμημένη μεταξύ 0 και 2π. Η απόκριση του καναλιού γι' αυτό θα έχει τυχαίο πλάτος του οποίου η συνάρτηση θα ακολουθεί κατανομή Rayleigh. Αυτή η τυχαία μεταβλητή ονομάζεται R, και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της δίνεται ως:

$$PR(r) = \frac{2r}{\Omega} e^{-r^2/\Omega}, r \geq 0$$

όπου $\Omega = E(R^2)$. [5][24]

3.1.3. Μοντέλο Καναλιού ITU

Τα μοντέλα καναλιών ITU χρησιμοποιούνταν κυρίως στην ανάπτυξη του 3G συστήματος ραδιο-πρόσβασης "IMT-2000". Το βασικό πλάνο περιέχει "μέσα στο γραφείο", "από έξω προς τα μέσα", "πεζοπορία" και "εν όχημα" περιβάλλοντα διάδοσης. Οι κύριες παράμετροι για την περιγραφή του κάθε μοντέλου διάδοσης είναι η εξάπλωση της χρονικής καθυστέρησης και η στατική πολυμορφία της, η απώλεια μονοπατιού και τα χαρακτηριστικά εξασθένησης σκιάς, τα χαρακτηριστικά της πολύδρομης εξασθένησης και η λειτουργική ραδιο-συχνότητα. Το ITU έχει προτείνει πολυδρομικά μοντέλα καναλιών που χρησιμοποιούνται για την σημαντική επιλογή των συνθηκών πολύδρομης μετάδοσης σε τυπικά περιβάλλοντα υπό τις οποίες ορίζονται οι απαιτήσεις της μέσης ισχύος ανά bit προς τον λόγο πυκνότητας θορύβου ή του SNR ποικίλων υπηρεσιών για συγκεκριμένη απόδοση.

Τρία διαφορετικά περιβάλλοντα δοκιμών έχουν προταθεί από το ITU για την αξιολόγηση της απόδοσης και την ανάλυση των UMTS συστημάτων και είναι τα εξής [3][1]:

- Περιβάλλον δοκιμής "**μέσα στο γραφείο**" (**Pedestrian A**): τα χαρακτηριστικά αυτού του περιβάλλοντος είναι οι μικρές κυψέλες, η χαμηλή ισχύς μετάδοσης και η τοποθέτηση σε εσωτερικό χώρο των σταθμών βάσης και των πεζών χρηστών.

- Περιβάλλον δοκιμής "από έξω προς τα μέσα" (**Pedestrian B**): έχει επίσης μικρές κυψέλες και χαμηλή ισχύ μετάδοσης. Οι σταθμοί βάσης με μικρό ύψος κεραίας είναι τοποθετημένοι εξωτερικά ενώ οι πεζοί χρήστες βρίσκονται στους δρόμους ή μέσα σε κτήρια. Ο ρυθμός Doppler τίθεται από τις ταχύτητες βαδίσματος με περιστασιακά υψηλότερους ρυθμούς λόγω των ανακλάσεων σε οχήματα.
- Περιβάλλον δοκιμής "εν όχημα" (**Vehicular A**): αυτό το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μεγάλες κυψέλες, υψηλή ισχύ μετάδοσης και γρήγορα κινούμενα τερματικά

	ITU Pedestrian A		ITU Pedestrian B		ITU Vehicular A	
Tap	Relative Relative		Relative Relative		Relative Relative	
num	delay (ns)	mean power	delay (ns)	mean power	delay (ns)	mean power
ber	(dB)		(dB)		(dB)	
1	0	0	0	0	0	0
2	110	-9.7	200	-0.9	310	-1.0
3	190	-19.2	800	-4.9	710	-9.0
4	410	-22.8	1200	-8.0	1090	-10.0
5			2300	-7.8	1730	-15.0
6			3700	-23.9	2510	-20.0

Πίνακας 9 Συνθήκες Διάδοσης για Πολύδρομη εξασθένηση στα μοντέλα καναλιών ITU

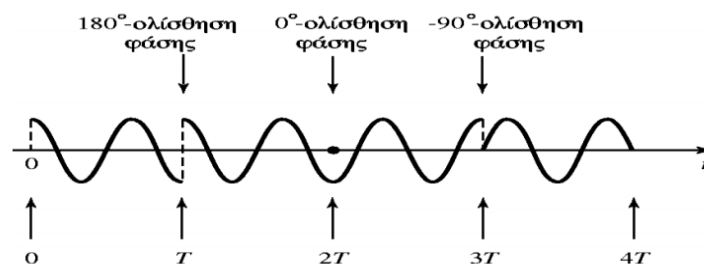
3.2. Μέθοδοι Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (Modulation and Coding Schemes - MCS)

3.2.1. Quadrature Phase Shift Keying

Ο QPSK είναι ένας αλγόριθμος κωδικοποίησης φάσης. Η κωδικοποίηση φάσης είναι μία εκδοχή της κωδικοποίησης συχνότητας όπου η φάση του φέροντος κύματος κωδικοποιείται, ώστε τα bit της ψηφιακής πληροφορίας να ορίζονται σε κάθε αλλαγή φάσης. Η μορφή του σήματος είναι η εξής:

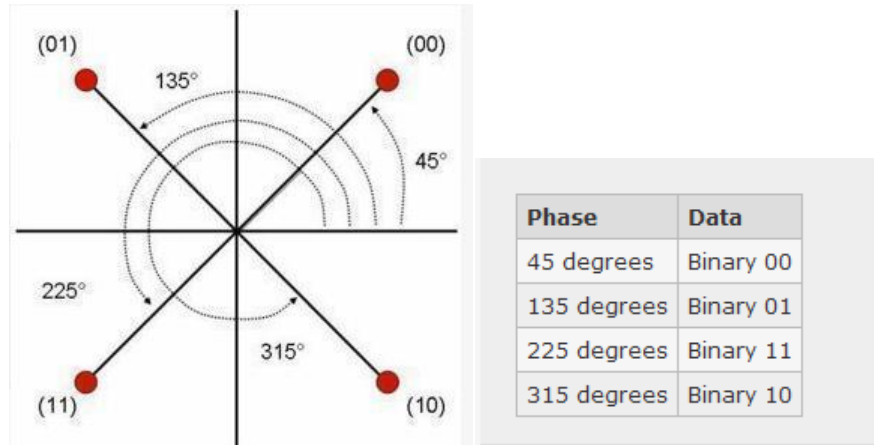
$$u_m(t) = s_m(t) \cos(2\pi f_c t),$$

όπου $s_m(t)$ είναι το προς μετάδοση σήμα και $\cos(2\pi f_c t)$ το φέρον με f_c την συχνότητα που αλλάζει κάθε φορά για να αναπαραστήσει το σήμα διαφορετικό bit.



Εικόνα 19 Αλλαγή φάσης φέροντος στο QPSK[14]

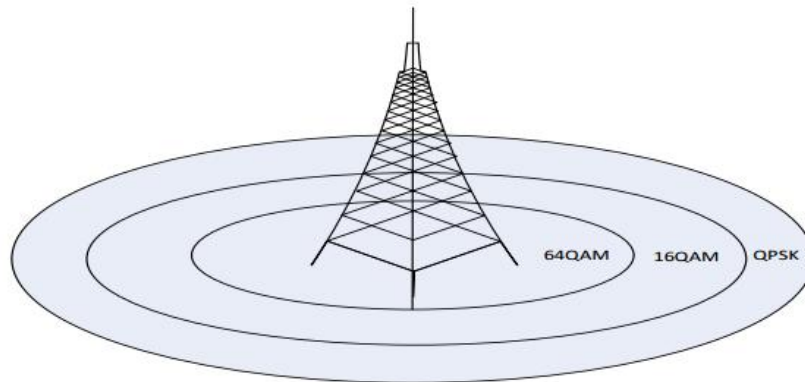
Τα αρχικά PSK αναφέρονται στην χρήση της κωδικοποίησης Phase Shift Keying. Αυτή είναι μια κωδικοποίηση φάσης που επιτυγχάνεται με την χρήση διακριτών αριθμών καταστάσεων. Το QPSK είναι το PSK με 4 καταστάσεις στις οποίες το φέρον ολισθαίνει την φάση του κατά 45, 135, 225 και 315 μοίρες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 20 Αναπαράσταση Κωδικοποίησης QPSK στο χώρο[25]

3.2.2. *Quadrature Amplitude Modulation*

Το QAM είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης και για αναλογικά και για ψηφιακά σήματα. Μεταφέρει δύο αναλογικά μηνύματα ή δυο ψηφιακές ομάδες bit, αλλάζοντας/ κωδικοποιώντας τα πλάτη δύο φερόντων κυμάτων χρησιμοποιώντας την μέθοδο κωδικοποίησης amplitude-shift keying (ASK) για τα ψηφιακά δεδομένα και την μέθοδο amplitude modulation (AM) για τα αναλογικά δεδομένα. Τα δύο φέροντα που συνήθως έχουν ημιτονοειδή μορφή έχουν διαφορά φάσης 90 μοίρες και γι' αυτό ονομάζονται ορθογώνια. Τα δύο φέροντα αθροίζονται και το αποτέλεσμα είναι ένας συνδυασμός διαμόρφωσης κατά φάση phase-shift keying (PSK) και διαμόρφωσης κατά πλάτος amplitude-shift keying (ASK). Στην ψηφιακή περίπτωση χρησιμοποιείται ένα πεπερασμένο πλήθος φάσεων και πλατών (τουλάχιστον δύο). Το QAM χρησιμοποιείται κατά κόρον στην ψηφιακές τηλεπικοινωνίες καθώς κατορθώνει να έχει υψηλή φασματική απόδοση αν του θέσουμε κατάλληλο μέγεθος αστερισμού, η απόδοση περιορίζεται μόνο από το επίπεδο θορύβου και την γραμμικότητα του καναλιού. Όσο πιο υψηλή είναι η τάξη της διαμόρφωσης τόσο πιο γρήγορο ρυθμό έχουμε και υψηλότερα επίπεδα φασματικής απόδοσης για το τηλεπικοινωνιακό σύστημα με κόστος όμως την ανθεκτικότητα στο θόρυβο που μειώνεται και την παρεμβολή που αυξάνεται[26].



Εικόνα 21 Οι μεγαλύτερης τάξης διαμόρφωσης τεχνικές λειτουργούν καλύτερα κοντά στο σταθμό βάσης

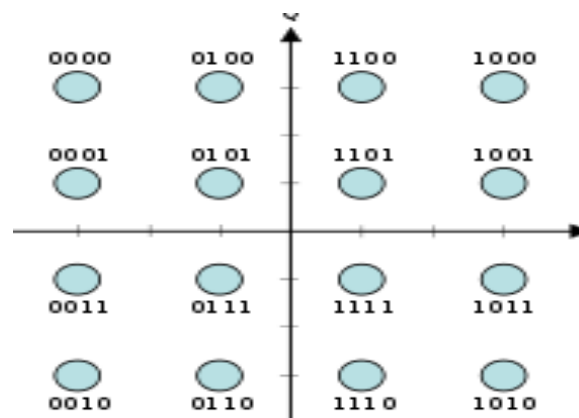
Η μορφή του σήματος είναι η εξής:

$$u_m(t) = A_{mc}g_T(t) \cos(2\pi f_c t) + A_{ms}g_T(t) \sin(2\pi f_c t), [14]$$

όπου A_{mc} και A_{ms} είναι τα πλάτη των φερόντων που διαμορφώνονται και οι εκφράσεις συνημίτονου και ημιτόνου δείχνουν την κατά 90 μοίρες διαφορά φάσης τους.

3.2.2.1. 16-QAM

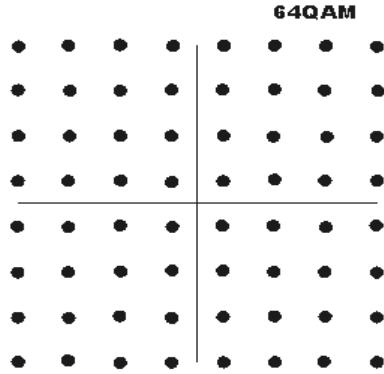
Το 16-QAM πρόκειται για το QAM με μέγεθος αστερισμού 16. Που σημαίνει ότι μπορεί να αναπαραστήσει έως και 16 καταστάσεις άρα έως και 4 bit λέξεις.



Εικόνα 22 Αστερισμός Τετράγωνου 16- QAM [14]

3.2.2.2. 64-QAM

Το 64-QAM πρόκειται για το QAM με μέγεθος αστερισμού 64. Που σημαίνει ότι μπορεί να αναπαραστήσει έως και 64 καταστάσεις άρα έως και 6 bit λέξεις.



Εικόνα 23 Αστερισμός Τετράγωνου 64- QAM [14]

3.3. Μετρικές Εκτίμησης

3.3.1. Ρυθμαπόδοση

Στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα η ρυθμαπόδοση ή αλλιώς throughput είναι ο μέσος όρος των επιτυχημένων παραδόσεων μηνυμάτων μέσα από ένα επικοινωνιακό κανάλι. Τα δεδομένα μπορεί να μεταφέρονται μέσα από ένα φυσικό ή λογικό κανάλι ή να περνούν μέσα από ένα συγκεκριμένο κόμβο του δικτύου. Η ρυθμαπόδοση μετριέται συνήθως σε bits ανά δευτερόλεπτο (bit/s ή bps), και μερικές φορές σε πακέτα δεδομένων ανά δευτερόλεπτο ή ανά χρονική υποδοχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη θεωρητικά ρυθμαπόδοση έχει άμεση σχέση με την χωρητικότητα του καναλιού και είναι η μέγιστη δυνατή ποσότητα δεδομένων που μπορούν να μεταδοθεί υπό ιδανικές συνθήκες [31].

3.3.2. Λόγος σήματος προς θόρυβο

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio - SNR) είναι μια μετρική που χρησιμοποιείται στην επιστήμη για να συγκρίνει τα επίπεδα του επιθυμητού σήματος με τα επίπεδα του παρασκηνακού θορύβου. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου [17].

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

Ένας λόγος μεγαλύτερος του 1:1 υποδεικνύει περισσότερο σήμα από θόρυβο.

Το SNR, το εύρος ζώνης B και η χωρητικότητα του καναλιού C , συνδέονται μέσω του θεωρήματος Shannon-Hartley:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

3.3.3. Λόγος σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο

Ο Λόγος Σήματος προς παρεμβολή συν το Θόρυβο (Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR) χρησιμοποιείται ευρέως στην ασύρματη επικοινωνία σαν ένας τρόπος μέτρησης της ποιότητας της ασύρματης σύνδεσης. Τυπικά, η ενέργεια ενός σήματος εξασθενεί με την απόσταση. Στα ασύρματα δίκτυα αυτό το φαινόμενο ορίζεται ως απώλεια μονοπατιού. Αντίθετα με τα ενσύρματα δίκτυα (όπου η ύπαρξη ενός συρμάτινου μονοπατιού μεταξύ αποστολέα και λήπτη ορίζει την σωστή λήψη του μηνύματος), μια ασύρματη επικοινωνία πρέπει να λάβει υπόψη της πολλές περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως για παράδειγμα τον παρασκευαστικό θόρυβο και την δύναμη της παρεμβολής από άλλες ταυτόχρονες μεταδόσεις. Ο SINR στοχεύει στο να δημιουργήσει μια αναπαράσταση αυτών των παραγόντων και ορίζεται ως εξής [18]:

$$SINR = \frac{P}{I + N}$$

όπου:

- $P = \Psi_s / PL_{s,r}$ (αναπαριστά την λαμβανόμενη ισχύ)
- $I = \sum_{i \neq s} \Psi_i / PL_{i,r}$ (αναπαριστά την ισχύ παρεμβολής άλλων ταυτόχρονων μεταδόσεων)
- $N =$ (Παρασκευαστικός) Θόρυβος (Τυπικά ορισμένος)
- $\Psi_s =$ η ισχύς μετάδοσης του αποστολέα s (Σε ένα δίκτυο ομοιόμορφης ισχύος, θεωρείται ίδιο για όλους του σταθμούς)
- $PL_{i,r} =$ Απώλεια μονοπατιού μεταξύ αποστολέα s και παραλήπτη r (λαμβάνεται υπόψη και η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους)

3.3.4. Ρυθμός εσφαλμένων μπλόκ

Η αναφορές του ρυθμού εσφαλμένων μπλόκ (Block Error Rate - BLER) χρησιμοποιούνται για την δόκιμη του αποδέκτη σε έναν τηλεπικοινωνιακό σταθμό. Το αποτέλεσμα BLER προκύπτει από τα μηνύματα ACK/NACK (Acknowledged/Not Acknowledged) πακέτων από το επίπεδο Radio Link Control. Πρόκειται απλώς για το λόγο του αριθμού των αρνητικά αναγνωρισμένων πακέτων προς των συνολικό αριθμό αναγνωρισμένων πακέτων από ένα κινητό σταθμό.

3.3.5. Δείκτης Ποιότητας Καναλιού

Ο δείκτης ποιότητας καναλιού (Channel Quality Indicator - CQI) είναι μια μέτρηση της ποιότητας επικοινωνίας των ασύρματων καναλιών, δηλαδή είναι το μέτρο της ποιότητας ενός συγκεκριμένου καναλιού. Ο CQI περιέχει πληροφορίες σταλμένες από έναν UE στον eNodeB για να υποδείξει έναν κατάλληλο ρυθμό καθοδικής μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή μια τιμή ενός σχήματος Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης. Ο CQI είναι ένας ακέραιος των 4 bit και βασίζεται στην παρατήρηση του λόγου σήματος προς παρεμβολή συν θόρυβο στον UE. Η διαδικασία

υπολογισμού του CQI λαμβάνει υπόψη της τις δυνατότητες του UE όπως των αριθμών των κεραιών και τον τύπο δέκτη που χρησιμοποιείται για ανίχνευση. Αυτό είναι σημαντικό διότι για το ίδιο SINR το επίπεδο MCS που μπορεί να υποστηριχτεί από τον UE βασίζεται σε ποικίλες δυνατότητες του UE, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου ο eNodeB να επιλέξει το βέλτιστο επίπεδο MCS για την μετάδοση. Οι τιμές του CQI που αναφέρονται χρησιμοποιούνται από τον eNodeB για δρομολόγηση καθοδικής ζεύξης και για προσαρμογή συνδέσμου, τα οποία είναι πολύ σημαντικά στο LTE.

Το LTE υποστηρίζει δύο τρόπους αναφοράς του CQI, τους:

- wideband CQI reporting
- subband CQI reporting

Η wideband CQI τιμή είναι ένας ακέραιος 4 bits που αναπαριστά το effective SINR που παρατηρείται από τον UE κατά μήκος ολόκληρου του εύρους ζώνης του καναλιού. Με αυτόν τον τρόπο η διακυμάνσεις στο SINR κατά μήκος του καναλιού εξαιτίας της επιλεκτικής στην συχνότητα φύσης του καναλιού παραλείπονται. Γι' αυτό η δρομολόγηση επιλογής συχνότητας όπου ο UE τίθενται μόνο σε μπλοκ πόρων που έχουν υψηλό SINR, δεν είναι δυνατή με αυτό το είδος αναφοράς. Αντιθέτως αυτή η περίπτωση, όπου ο UE χρειάζεται να αναφέρει τον CQI σε λεπτή χρονικά διαστήματα, καλύπτεται με την subband CQI reporting. Μια τέτοια αναφορά αποτελείται από ένα διάνυσμα CQI τιμών όπου κάθε CQI αντιπροσωπεύει το SINR που παρατηρεί ένας UE κατά την διάρκεια μια υπό-συχνότητας. Μια υπό-συχνότητα είναι μια συλλογή από n παρακείμενα Φυσικά Μπλοκ Πόρων όπου η τιμή του n μπορεί να είναι 2,3,3,4,6 ή 8 βάσει του εύρους ζώνης του καναλιού και του τρόπου ανάδρασης του CQI [29].

3.3.6. *Effective Code Rate (ERC)*

Πρόκειται για τον λόγο $ECR = \frac{c_r}{e_r}$, όπου c_r είναι το πλήθος των χρησιμων δεδομένων μαζί με τον CRC και e_r είναι το συνολικό πλήθος των κωδικοποιημένων bits στην έξοδο. Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται και ως $ECR = 1024 * \frac{c_r}{e_r}$ και λέγεται $ECR*1024$.

3.4. *Τεχνική Hybrid Automatic Repeat request*

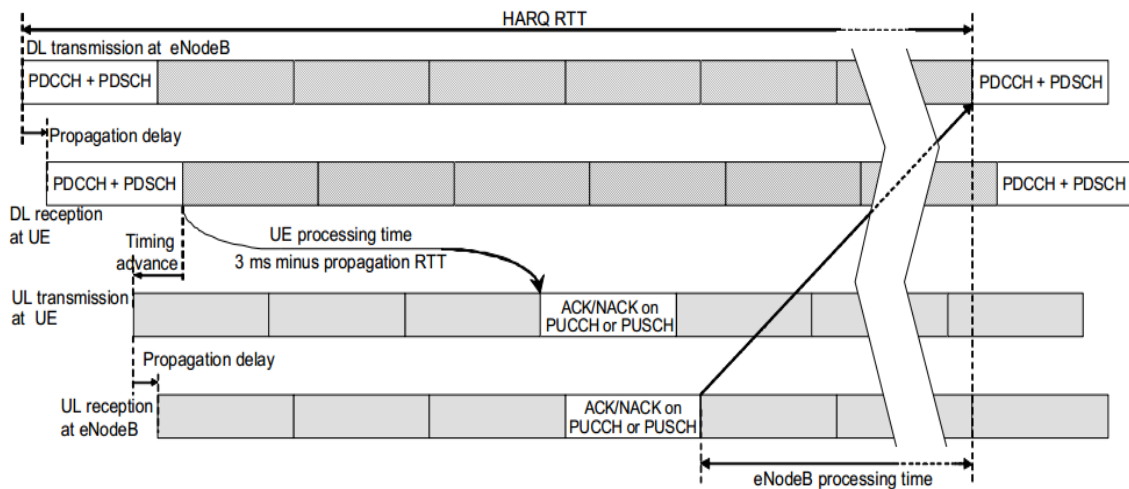
Η τεχνική HARQ είναι ένας συνδυασμός υψηλού ρυθμού forward error-correcting coding και της τεχνικής ελέγχου σφαλμάτων ARQ. Στην κανονική ARQ τεχνική, προστίθενται κάποια επιπλέον bits στα δεδομένα που πρόκειται να μεταφερθούν χρησιμοποιώντας κώδικα ανίχνευσης σφαλμάτων όπως ο cyclic redundancy check (CRC). Οι δέκτες που ανιχνεύουν ένα εσφαλμένο μήνυμα θα ζητήσουν να ξανά σταλεί το μήνυμα από τον πομπό. Στην HARQ τεχνική, τα αρχικά δεδομένα κωδικοποιούνται με έναν κώδικα forward error correction (FEC) και τα bits ισοτιμίας στέλνονται άμεσα μαζί με το μήνυμα ή στέλνονται μόνο μετά από απαίτηση του δέκτη που ανίχνευσε ένα εσφαλμένο μήνυμα. Ο κώδικας ανίχνευσης σφαλμάτων

μπορεί να παραλειφθεί όταν χρησιμοποιείται ένας κώδικας FEC μαζί με ένα κώδικα ανίχνευσης όπως ο Reed-Solomon κώδικας. Ο κώδικας FEC επιλέγεται ώστε να διορθώνει ένα αναμενόμενο υποσύνολο σφαλμάτων που μπορεί να συμβούν, ενώ η τεχνική ARQ χρησιμοποιείται για να διορθώνει λάθη που δεν διορθώνονται διαφορετικά χρησιμοποιώντας μόνο τον πλεονασμό που στάλθηκε στην αρχική αποστολή. Σαν συνέπεια η τεχνική HARQ έχει καλύτερες επιδόσεις από την συνηθισμένη ARQ σε συνθήκες εξασθενημένου σήματος, αλλά στην απλή της μορφή επιβαρύνει σημαντικά και μειώνει το throughput σε καλές συνθήκες σήματος [32].

3.4.1. Η Τεχνική HARQ στο LTE

Το φυσικό επίπεδο στο LTE υποστηρίζει την τεχνική HARQ στα φυσικά κανάλια διαμοιραζόμενης καθοδικής και ανοδικής ζεύξης, με ξεχωριστά κανάλια ελέγχου για να στέλνουν τις σχετικές αναδράσεις αναγνώρισης. Για την μετάδοση των δεδομένων είτε στην ανοδική είτε στην καθοδική ζεύξη χρειάζεται η αποστολή ενός αναγνωριστικού (ACK ή NACK) προς την αντίθετη κατεύθυνση για να ενημερωθεί η πλευρά που αποστέλλει για την επιτυχία ή αποτυχία της λήψης του πακέτου.

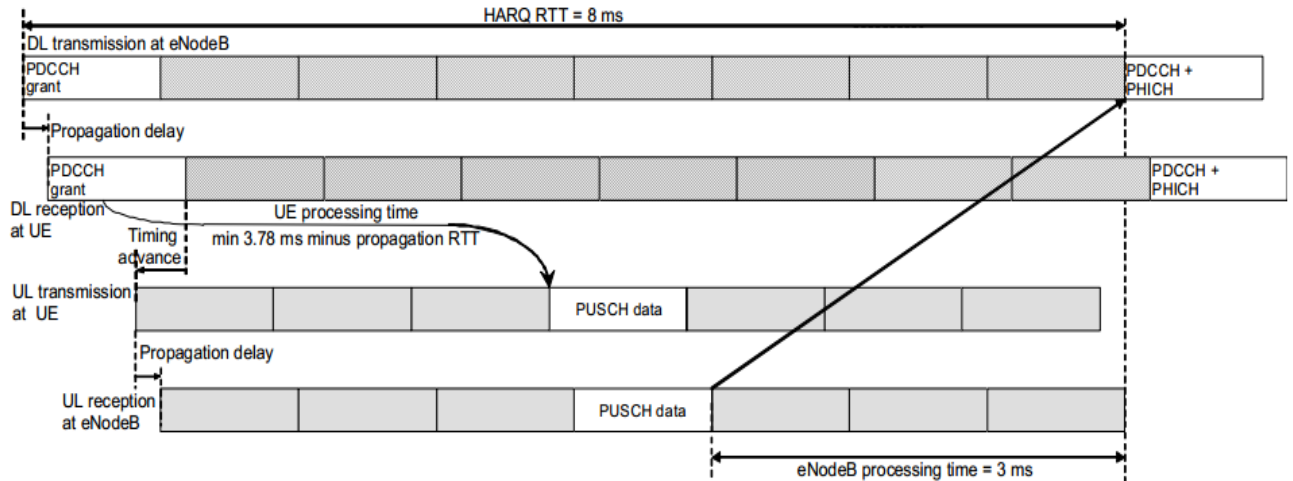
Στην λειτουργία δυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας, οκτώ Stop-And-Wait (SAW) διεργασίες HARQ διατίθενται και στην ανοδική και στην καθοδική ζεύξη με ένα τυπικό Round-Trip-Time (RTT) των 8ms [1] [2].



Εικόνα 24 Χρονικό Διάγραμμα του πρωτοκόλλου SAW καθοδικής ζεύξης. [1]

Κάθε διεργασία HARQ αναγνωρίζεται με ένα μοναδικό δείκτη διεργασίας των 3 bit, και απαιτεί μια ξεχωριστή ανάθεση ενός buffer στον δέκτη για να συνδυάζει τις επαναποστολές. Υπάρχουν διάφορα πεδία στην πληροφορία ελέγχου καθοδικής ζεύξης για να βοηθούν την διαδικασία HARQ:

- Δείκτης Νέων Δεδομένων (New Data Indicator - NDI): κινητοποιείται όποτε αρχίζει η αποστολή ενός νέου πακέτου
- Έκδοση Πλεονασμού (Redundancy Version - RV): δείχνει την RV που επιλέγεται για την αποστολή ή την επαναποστολή
- MCS: σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης



Εικόνα 25 Χρονικό Διάγραμμα του πρωτοκόλλου SA-W ανοδικής ζεύξης.[1]

Η HARQ καθοδικής ζεύξης στο LTE είναι ασύγχρονη και προσαρμοστική και γι' αυτό κάθε αποστολή καθοδικής ζεύξης συνοδεύεται από σαφή σηματοδότηση πληροφοριών ελέγχου. Η HARQ ανοδικής ζεύξης είναι σύγχρονη και είτε προσαρμοστική είτε όχι. 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.

Στην κανονική περίπτωση υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοίχιση μεταξύ των μεταδιδόμενων πακέτων και των αναγνωριστικών. Ωστόσο στην περίπτωση της TDD, τα υπό-πλαίσια είναι σχεδιασμένα σε μια κυβελο-στραφή βάση ως ανοδική ή καθοδική ζεύξη, η οποία περιορίζει το πλήθος των αποστολών δεδομένων, των αποστολών αναγνωριστικών και των επαναποστολών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο LTE Link Level Simulator 1.3 r620 [33], ο οποίος έτρεξε μέσω του προγράμματος Matlab R2010a. Σκοπός μας είναι να μελετήσουμε και να συγκρίνουμε τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τα εξής αρχεία του προσομοιωτή [10] [13]:

1. plot_quick_test_results_r553.m
2. plot_R1071967_BLER_curves_r553.m

Πρόκειται για γραφικές BLER-SNR, throuput-SNR, υπό διάφορες μορφές κωδικοποιήσεων, τεχνικές μεταδόσεων και διάφορα κανάλια μετάδοσης καθώς επίσης και διαφορετικούς δείκτες CQI και ECR.

4.1. Ανάλυση Γραφικών Παραστάσεων Αρχείου plot_quick_test_results_r553.m

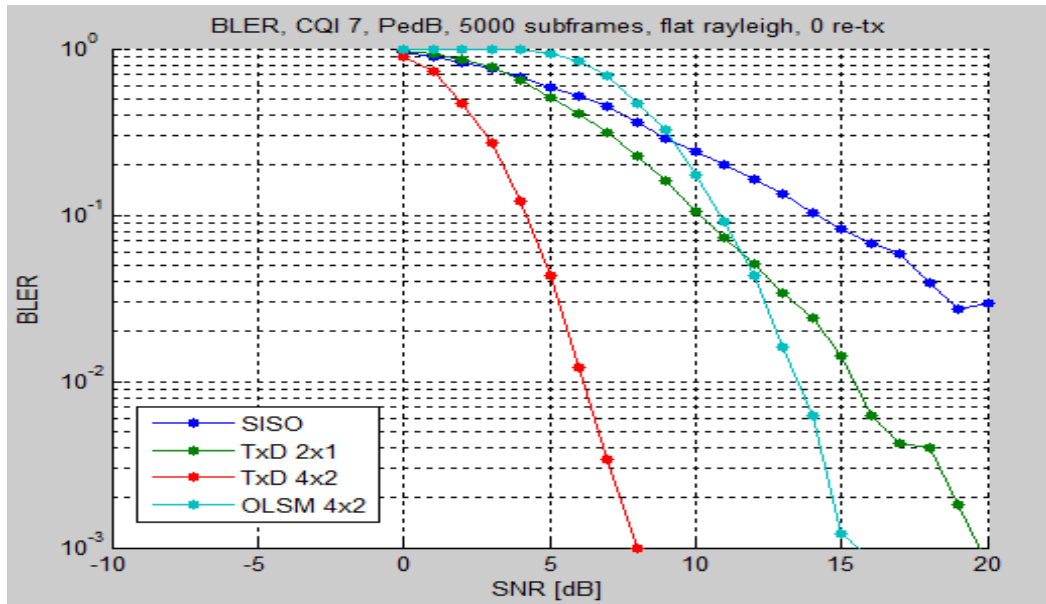
Στο αρχείο αυτό παράγονται γραφικές παραστάσεις BLER-SNR και throughput-SNR για δύο τύπους καναλιών μετάδοσης, το *flat rayleigh* και το *PedB*. Για τιμή CQI=7, αριθμό υποπλαισίων 5000 και αριθμό αναμεταδόσεων 0 και 3 κάθε φορά. Η τεχνικές μετάδοσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι: SISO, η transmit diversity TxD 2x1 και TxD 4x2, και τέλος η χωρική πολυπλεξία ανοιχτού βρόγχου OLSM 4x2.

Σε επίπεδο κώδικα οι αντίστοιχες μεταβλητές είναι η εξής:

- N_subframes = 5000; % Αριθμός subframes που στάλθηκαν κατά την εξομοίωση από τον eNodeB στο UE
- channel_type = 'PedB'; % Η εξομοίωση έγινε για τον τύπο καναλιού PedB
- channel_type = 'flat Rayleigh'; % Η εξομοίωση επίσης έγινε για τον τύπο καναλιού PedB
- cqi_s_to_simulate = [7]; CQI=7 (Channel Quality Indicator)
- tx_modes_to_simulate = [111 221 242 342]; % Κάθε τριάδα XYZ αντιπροσωπεύει μια τεχνική μετάδοσης, όπου X-> τεχνική μετάδοσης, Y-> αριθμός κεραιών του πομπού, Z-> αριθμός κεραιών του δέκτη
- nr_re_tx_vect = [0 3]; % Η εξομοίωση έγινε για 0 και 3 επαναποστολές
- LTE_params.Bandwidth = 1.4e6; % Εύρος bandwidth 1.4 MHz

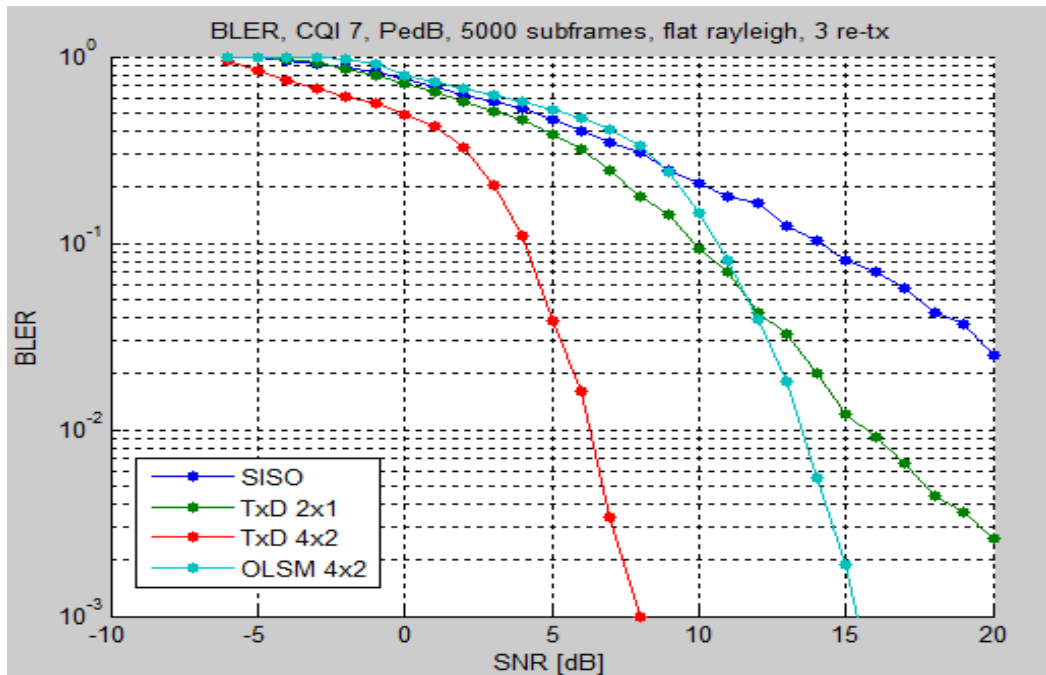
4.1.1. Κανάλι Τύπου *flat rayleigh*

Για αυτό το κανάλι και αριθμό επαναποστολών ίσο με 0, και υπόλοιπες παραμέτρους όπως περιγράφηκε πιο πάνω έχουμε την εξής γραφική παράσταση BLER-SNR:



Εικόνα 26 Καμπύλη BLER-SNR Κανάλι flat-rayleigh με μηδέν επαναποστολές

Για αριθμό επαναποστολών ίσο με 3 και υπόλοιπες παραμέτρους όπως πριν έχουμε για αυτό το κανάλι:



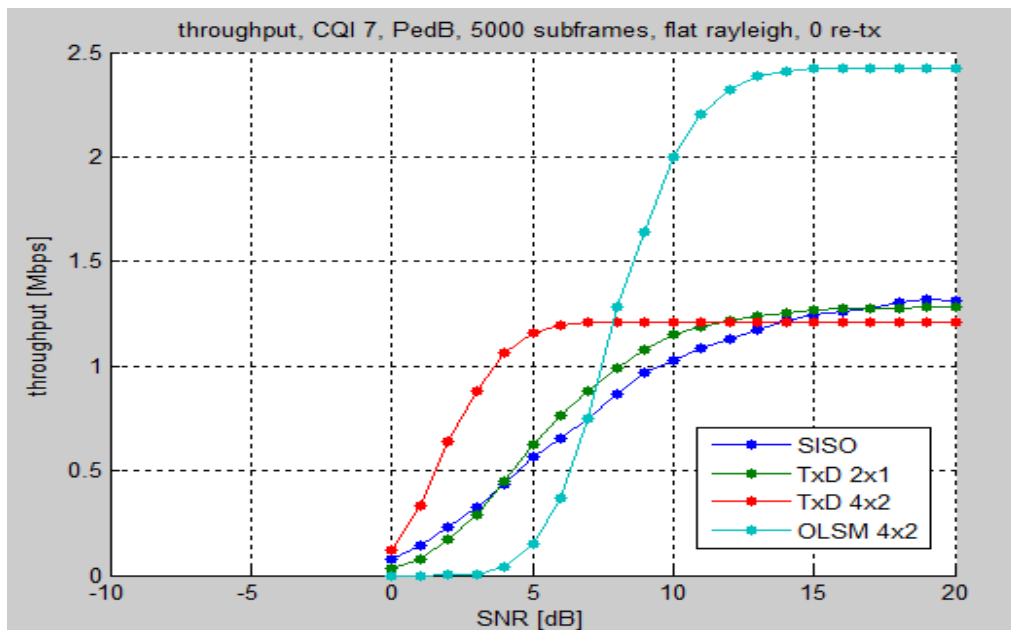
Εικόνα 27 Καμπύλη BLER-SNR κανάλι flat rayleigh με τρεις επαναποστολές

Σχολιασμός- Σύγκριση γραφικών:

- **Τεχνική SISO (μπλε γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 26), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB και το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 η γραφική παράσταση έχει φθίνουσα μονοτονία. Ενώ, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 27) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής αυτής ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions.
- **Τεχνική TxD 2x1 (πράσινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 26), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB και το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 η γραφική παράσταση έχει φθίνουσα μονοτονία. Ενώ, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 27) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής αυτής ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions.
- **Τεχνική TxD 4x2 (κόκκινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 26), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB και το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 η γραφική παράσταση έχει φθίνουσα μονοτονία. Ενώ, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 27) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής αυτής ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions.
- **Τεχνική OLSM 4x2 (γαλάζια γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 26), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB και το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 η γραφική παράσταση έχει φθίνουσα μονοτονία.. Ωστόσο μέχρι και την τιμή 5 db για το SNR εξακολουθεί η τιμή του BLER να είναι 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Επίσης για $5 < SNR < 10$ βλέπουμε ότι έχει τις υψηλότερες τιμές. Ενώ, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 27) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής αυτής ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές $0 \leq SNR < 10$ οι τιμές του BLER είναι αισθητά οι υψηλότερες, δηλαδή οι χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε αυτό το φάσμα SNR έχουν χειρότερη ποιότητα υπηρεσιών. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions

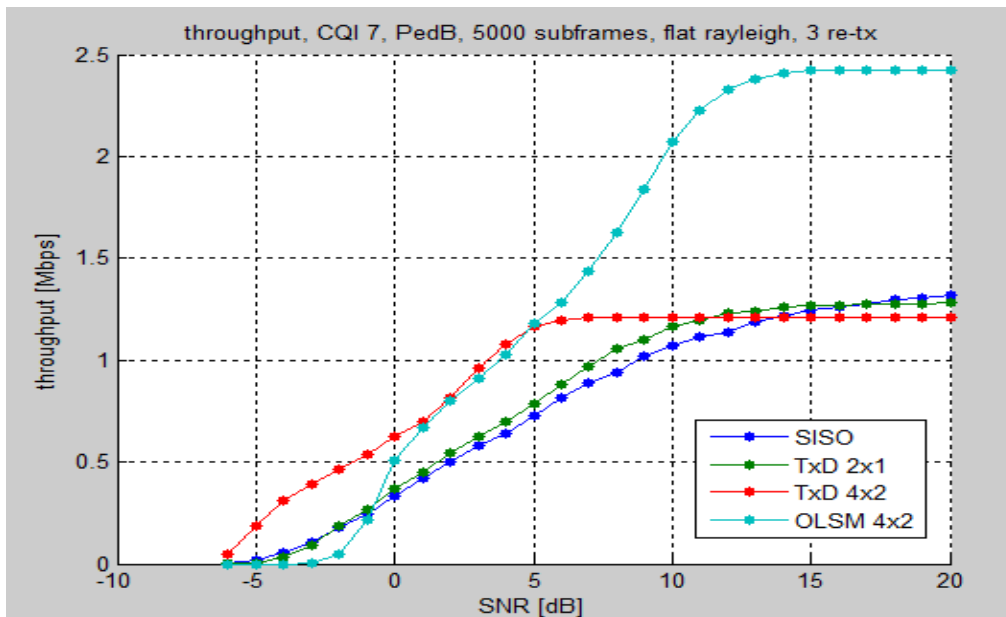
Συνεπώς βλέπουμε ότι την καλύτερη ποιότητα μετάδοσης την έχουμε και στις δυο περιπτώσεις (με ή χωρίς επαναποστολές) για την τεχνική TxD 4x2 καθώς το BLER μειώνεται πιο γρήγορα σε αυτή την περίπτωση. Στην περίπτωση 0 επαναποστολών την χειρότερη επίδοση την έχει σαφέστατα η τεχνική OLSM 4x2 και ακολουθούν με μικρή μεταξύ τους διαφορά στο διάστημα $5 < \text{SNR} < 10$ οι τεχνικές TxD 2x1 και SISO ενώ στο διάστημα $10 < \text{SNR} < 20$ βλέπουμε μια εμφανή βελτίωση της τεχνικής OLSM 4x2 η οποία σε αυτό το διάστημα έρχεται δεύτερη σε απόδοση μετά τη TxD 4x2. Στην περίπτωση των 3 επαναμεταδόσεων ισχύουν τα ίδια περίπου μόνο που η τεχνική OLSM 4x2 παραμένει για περισσότερες τιμές του SNR η χειρότερη και συγκεκριμένα για τις τιμές -6 έως 10. Επίσης παρατηρούμε ότι σε όλες τις τεχνικές μετάδοσης με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο μακριά από τον eNodeB μπορούν να έχουν κάλυψη, αλλά το σήμα δεν θα είναι ικανοποιητικό για απαιτητικές υπηρεσίες λόγω του υψηλού ρυθμού εσφαλμένων μπλοκ.

Για αριθμό επαναποστολών δεδομένων ίσο με το 0 (μηδέν), προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση throughput - SNR:



Εικόνα 28 Καμπύλη throughput-SNR σε κανάλι flat rayleigh με μηδέν επαναποστολές

Για αριθμό επαναποστολών δεδομένων ίσο με τρία προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση throughput - SNR:



Εικόνα 29 Καμπύλη throughput-SNR σε κανάλι flat rayleigh με τρεις επαναποστολές

Σχολιασμός- Σύγκριση γραφικών:

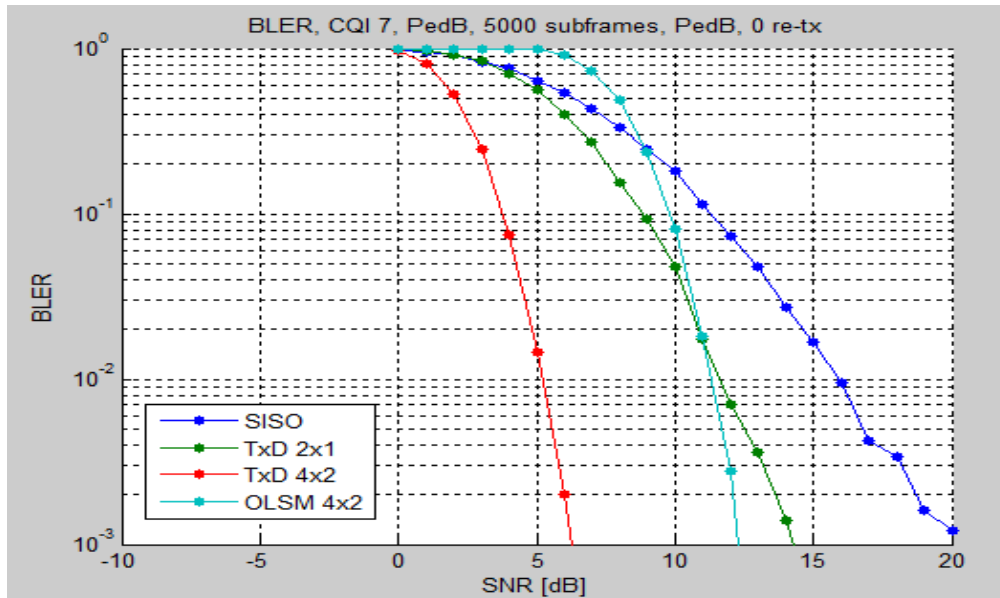
- Τεχνική SISO (μπλε γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 28), ξεκινάει με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές $\text{SNR} > 0 \text{ dB}$ η γραφική παράσταση έχει αύξουσα μονοτονία. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 29) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής SISO ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα μονοτονία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 10$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$ ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0 στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput προσεγγίζει τα 0.4 Mbps. Για $\text{SNR} > 10$ η γραφική είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions.
- Τεχνική TxD 2x1 (πράσινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 28), ξεκινάει με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές $\text{SNR} > 0 \text{ dB}$ η γραφική παράσταση έχει αύξουσα μονοτονία. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 29) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 2x1 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα μονοτονία. Στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 10$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$ ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0 στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput είναι 0.4 Mbps. Για $\text{SNR} > 10$ η γραφική είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions.

- Τεχνική TxD 4x2 (κόκκινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 28), ξεκινάει με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές SNR >0 dB η γραφική παράσταση είναι αύξουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 29) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 4x2 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα μονοτονία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 5$ το throughput λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για SNR=0 db ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0 στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput είναι 0.6 Mbps. Για SNR >5 η γραφική παράσταση έχει ίδια συμπεριφορά με αυτήν των 0 retransmissions, δηλαδή σχεδόν σταθερή.
- Τεχνική OLSM 4x2 (γαλάζια γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 28), ξεκινάει με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές SNR>0 dB η γραφική παράσταση είναι αύξουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 29) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 4x2 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα μονοτονία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 10$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για SNR=0 db ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0 στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput είναι 0.5 Mbps. Για SNR >10 η γραφική παράσταση είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions.

Συνεπώς βλέπουμε ότι την καλύτερη ποιότητα μετάδοσης την έχουμε και στις δυο περιπτώσεις (με ή χωρίς επαναποστολές) για την τεχνική OLSM 4x2 με εμφανή διαφορά για SNR>5, ενώ για SNR<5 καλύτερη συμπεριφορά έχει η τεχνική TxD 4x2. Επίσης βλέπουμε ότι για την περίπτωση των 0 επαναποστολών η τεχνική OLSM 4x2 ενώ δεν έχει την καλύτερη επίδοση στο διάστημα [0,5] του SNR ωστόσο έχει πιο απότομη βελτίωση - αύξηση από ότι στην περίπτωση των 3 επαναποστολών. Αυτό σημαίνει ότι οι επαναποστολές δυσκολεύουν την αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Να σημειωθεί επιπλέον ότι οι δύο άλλες τεχνικές έχουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά παντού. Επίσης να σημειώσουμε ότι το μέγιστο throughput που μπορεί να έχει ένας χρήστης είναι ανεξάρτητο από την χρήση retransmissions καθώς και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές του throughput δεν επηρεάζονται από την χρήση retransmissions.

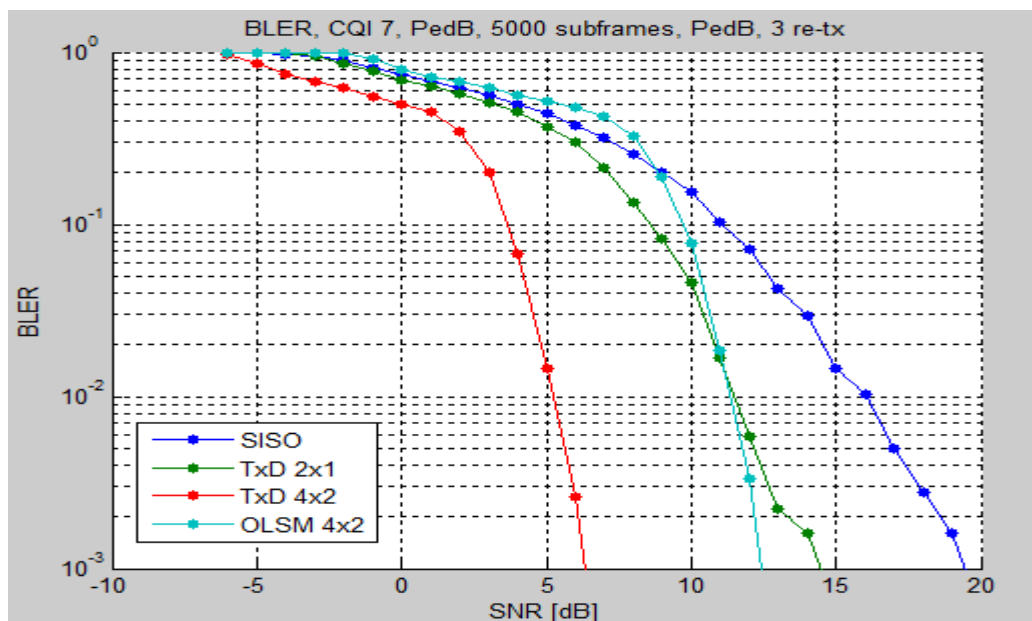
4.1.2. Κανάλι Τύπου PedB

Για αυτό το κανάλι και αριθμό επαναποστολών ίσο με 0, και υπόλοιπες παραμέτρους όπως περιγράφηκε πιο πάνω έχουμε την εξής γραφική παράσταση BLER-SNR:



Εικόνα 30 Καμπύλη BLER-SNR για κανάλι PedB με μηδέν επαναποστολές

Για αριθμό επαναποστολών ίσο με 3 και υπόλοιπες παραμέτρους όπως πριν έχουμε για αυτό το κανάλι:



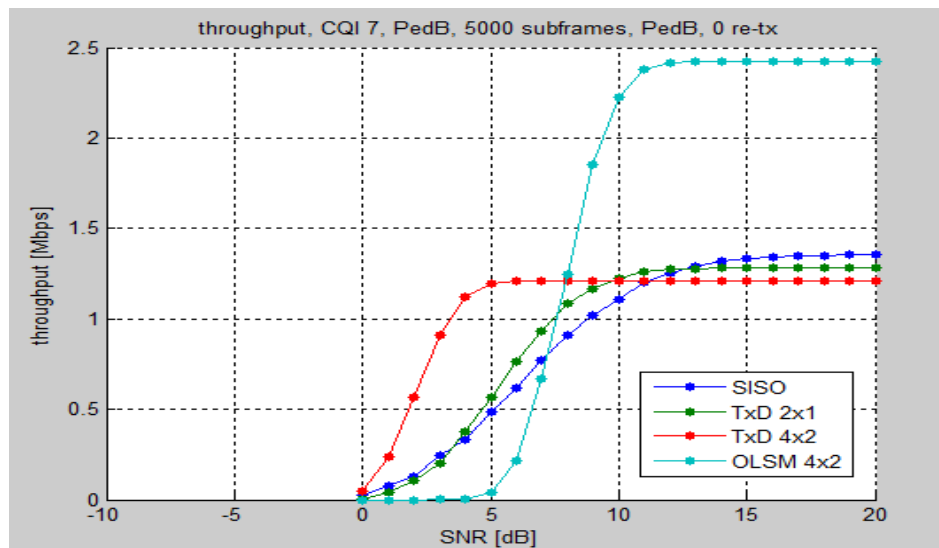
Εικόνα 31 Καμπύλη BLER-SNR για κανάλι PedB με τρεις επαναποστολές

Σχολιασμός- Σύγκριση γραφικών:

- Τεχνική SISO (μπλε γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 30), ξεκινάει με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 31), παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής SISO ξεκινά για τιμή του SNR ίση με -6, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100%. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions. Επίσης για τους χρήστες με τιμή SNR κοντά στα 20 dB, ο ρυθμός λαθών γίνεται σχεδόν ίσος με 0.
- Τεχνική TxD 2x1 (πράσινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 30), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 dB η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 31) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 2x1 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions.
- Τεχνική TxD 4x2 (κόκκινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 30), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100%. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 dB η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 31) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 4x2 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του -6 η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions.
- Τεχνική OLSM 4x2 (γαλάζια γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 30), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές SNR μεγαλύτερες του 0 dB η γραφική παράσταση είναι φθίνουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 31) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής OLSM 4x2 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το BLER έχει τιμή 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ. Για τιμές $0 \leq \text{SNR} < 10$ οι τιμές του BLER είναι αισθητά υψηλότερες, δηλαδή οι χρήστες οι οποίοι βρίσκονται σε αυτό το φάσμα SNR έχουν την χειρότερη ποιότητα υπηρεσιών. Για τιμές $\text{SNR} \geq 10$ η γραφική παράσταση είναι επίσης φθίνουσα, διατηρώντας σε γενικές γραμμές την ίδια κλίση με αυτή στην περίπτωση των 0 retransmissions.

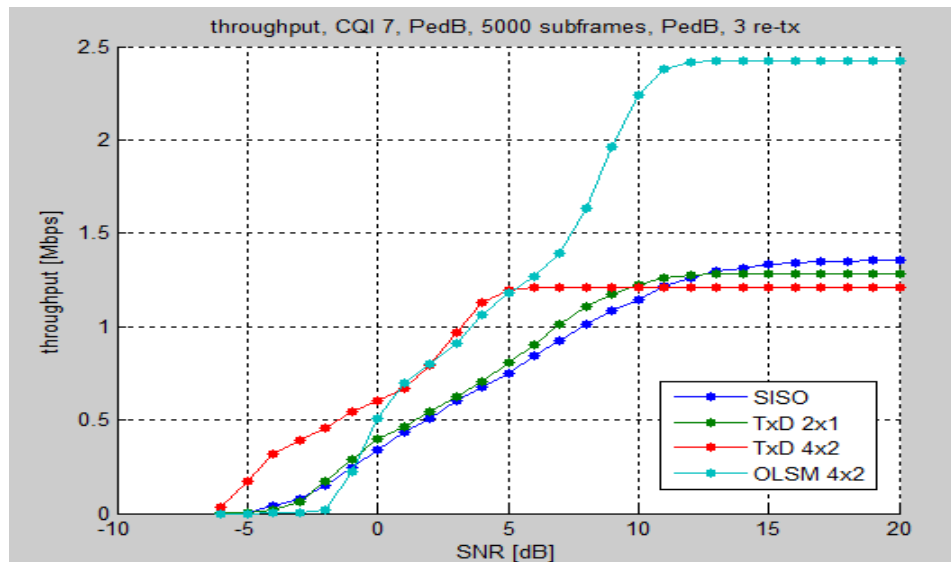
Συνεπώς βλέπουμε ότι την καλύτερη ποιότητα μετάδοσης την έχουμε και στις δυο περιπτώσεις (με ή χωρίς επαναποστολές) για την τεχνική TxD 4x2 καθώς το BLER μειώνεται πιο γρήγορα σε αυτή την περίπτωση. Στην περίπτωση 0 επαναποστολών την χειρότερη επίδοση την έχει σαφέστατα η τεχνική OLSM 4x2 και ακολουθούν με μικρή μεταξύ τους διαφορά στο διάστημα $5 < \text{SNR} < 10$ αλλά μεγαλύτερη στο διάστημα $10 < \text{SNR} < 20$ οι τεχνικές TxD 2x1 και SISO, ενώ στο διάστημα $10 < \text{SNR}$ βλέπουμε μια εμφανή βελτίωση της τεχνικής OLSM 4x2 η οποία σε αυτό το διάστημα έρχεται δεύτερη σε απόδοση μετά τη TxD 4x2. Στην περίπτωση των 3 επαναμεταδόσεων ισχύουν τα ίδια περίπου μόνο που η τεχνική OLSM 4x2 παραμένει για περισσότερες τιμές του SNR η χειρότερη και συγκεκριμένα για τις τιμές -6 έως 7,5. Επίσης παρατηρούμε ότι σε όλες τις τεχνικές μετάδοσης με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι χρήστες που βρίσκονται πιο μακριά από τον eNodeB μπορούν να έχουν κάλυψη, αλλά το σήμα δεν θα είναι ικανοποιητικό για απαιτητικές υπηρεσίες λόγω του υψηλού ρυθμού εσφαλμένων μπλοκ.

Για αριθμό επαναποστολής δεδομένων ίσο με το 0 (μηδέν), προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση throughput - SNR:



Εικόνα 32 Καμπύλη throughput-SNR για κανάλι PedB με μηδέν επαναποστολές

Για αριθμό επαναποστολής δεδομένων ίσο με τρία προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση throughput - SNR:



Εικόνα 33 Καμπύλη throughput-SNR για κανάλι PedB με 3 επαναποστολές

Σχολιασμός- Σύγκριση γραφικών:

- Τεχνική SISO (μπλε γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 32), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές SNR μεγαλύτερες από 0 dB η γραφική παράσταση είναι αύξουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 33) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής SISO ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες από -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα πορεία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 10$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για $\text{SNR}=0$ db ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0, στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput προσεγγίζει τα 0.4 Mbps. Για $\text{SNR} > 10$ η γραφική είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions.
- Τεχνική TxD 2x1 (πράσινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 32), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές SNR μεγαλύτερες από 0 dB η γραφική παράσταση είναι αύξουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 33) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 2x1 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες από -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα πορεία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 < \text{SNR} < 10$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για $\text{SNR}=0$ db ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0, στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput είναι 0.4 Mbps. Για $\text{SNR} > 10$ η γραφική είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions.

- Τεχνική TxD 4x2 (κόκκινη γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 32), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές SNR μεγαλύτερες από 0 dB η γραφική παράσταση είναι αύξουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 33) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 4x2 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες από -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα πορεία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 5$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για $\text{SNR}=0$ db ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0, στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput είναι 0.6 Mbps. Για $\text{SNR} > 5$ η γραφική είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions, δηλαδή σχεδόν σταθερή.
- Τεχνική OLSM 4x2 (γαλάζια γραμμή):** Παρατηρούμε ότι η γραφική της παράσταση στην περίπτωση των 0 retransmissions (Εικόνα 32), ξεκινά με τιμή του SNR ίση με 0 dB, όπου το throughput έχει επίσης τιμή 0. Για τιμές SNR μεγαλύτερες από 0 dB η γραφική παράσταση είναι αύξουσα. Αντίθετα, στην περίπτωση των 3 retransmissions (Εικόνα 32) παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση της τεχνικής TxD 4x2 ξεκινά από την τιμή -6 περίπου του SNR, όπου το throughput έχει τιμή 0 και για τιμές του SNR μεγαλύτερες από -6 η γραφική παράσταση έχει αύξουσα πορεία. Άρα με την χρήση 3 retransmissions καλύπτονται και οι χρήστες με μικρότερο SNR. Συγκεκριμένα στο διάστημα $0 \leq \text{SNR} < 10$ το throughput λαμβάνει εμφανώς μεγαλύτερες τιμές. Ειδικότερα για $\text{SNR}=0$ db ενώ στην πρώτη περίπτωση η τιμή του throughput είναι 0, στην δεύτερη περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών retransmissions η τιμή του throughput είναι 0.5 Mbps. Για $\text{SNR} > 10$ η γραφική είναι ίδια με την περίπτωση των 0 retransmissions.

Συνεπώς βλέπουμε ότι την καλύτερη ποιότητα μετάδοσης την έχουμε και στις δυο περιπτώσεις (με ή χωρίς επαναποστολές) για την τεχνική OLSM 4x2 με εμφανή διαφορά για $\text{SNR} > 5$, ενώ για $\text{SNR} < 5$ καλύτερη συμπεριφορά έχει η τεχνική TxD 4x2. Επίσης βλέπουμε ότι για την περίπτωση των 0 επαναποστολών η τεχνική OLSM 4x2 ενώ δεν έχει την καλύτερη επίδοση στο διάστημα $[0,5]$ του SNR ωστόσο έχει πιο απότομη βελτίωση - αύξηση από ότι στην περίπτωση των 3 επαναποστολών. Αυτό σημαίνει ότι οι επαναποστολές δυσκολεύουν την αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Να σημειωθεί επιπλέον ότι οι δύο άλλες τεχνικές έχουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά παντού. Επίσης να σημειώσουμε ότι το μέγιστο throughput που μπορεί να έχει ένας χρήστης είναι ανεξάρτητο από την χρήση retransmissions καθώς και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές του throughput δεν επηρεάζονται από την χρήση retransmissions.

4.2. Ανάλυση Γραφικών Παραστάσεων Αρχείου *plot_R1071967_BLER_curves_r553.m*

Στο αρχείο αυτό δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις BLER-SNR και throughput-SNR για κανάλι AWGN με τεχνική SISO, εύρος ζώνης 1.4MHz και 5000 υποπλαίσια.

Σε επίπεδο κώδικα οι αντίστοιχες μεταβλητές είναι η εξής:

- `N_subframes = 5000;` % Αριθμός subframes που στάλθηκαν κατά την εξομοίωση από τον eNodeB στο UE
- `channel_type = 'AWGN';` % Η εξομοίωση έγινε για τον τύπο καναλιού AWGN
- `cqi_i = [1:27];` CQI πίνακας με 20 ζεύγη MCS-ERC(Channel Quality Indicator)
- `tx_modes_to_simulate = [111];` % Κάθε τριάδα XYZ αντιπροσωπεύει μια τεχνική μετάδοσης, όπου X-> τεχνική μετάδοσης, Y-> αριθμός κεραιών του πομπού, Z-> αριθμός κεραιών του δέκτη (SISO)
- `LTE_params.Bandwidth = 1.4e6;` % Εύρος bandwidth 1.4 MHz

Για να πάρουμε το BLER για ένα δοσμένο MCS, πραγματοποιήθηκαν εξομοιώσεις σε επίπεδο LTE συνδέσμου (link level) όπου είχε προστεθεί AWGN θόρυβος. Το MCS καθορίζει το αλφάβητο κωδικοποίησης και το ERC του κωδικοποιητή καναλιού.

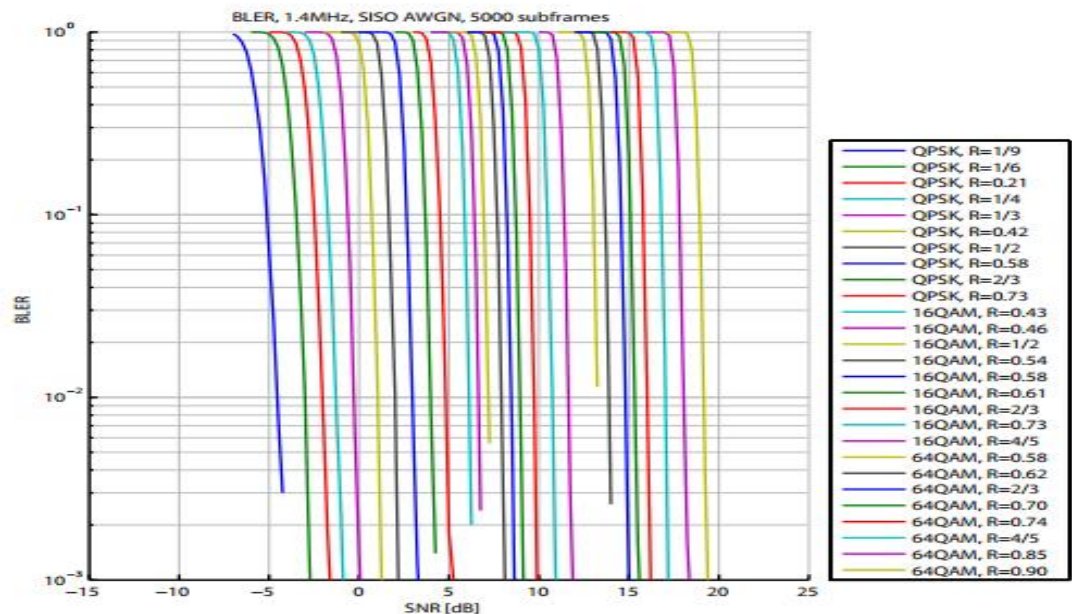
Τα 27 διαφορετικά ζεύγη MCS και ECR φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Modulation	ERC
QPSK	1/9
QPSK	1/6
QPSK	0,21
QPSK	1/4
QPSK	1/3
QPSK	0,42
QPSK	1/2
QPSK	0.58
QPSK	2/3
QPSK	0.73
16QAM	0.43
16QAM	0.46
16QAM	1/2
16QAM	0.54

16QAM	0.58
16QAM	0.61
16QAM	2/3
16QAM	0.73
16QAM	4/5
64QAM	0.58
64QAM	0.62
64QAM	2/3
64QAM	0.70
64QAM	0.74
64QAM	4/5
64QAM	0.85
64QAM	0.90

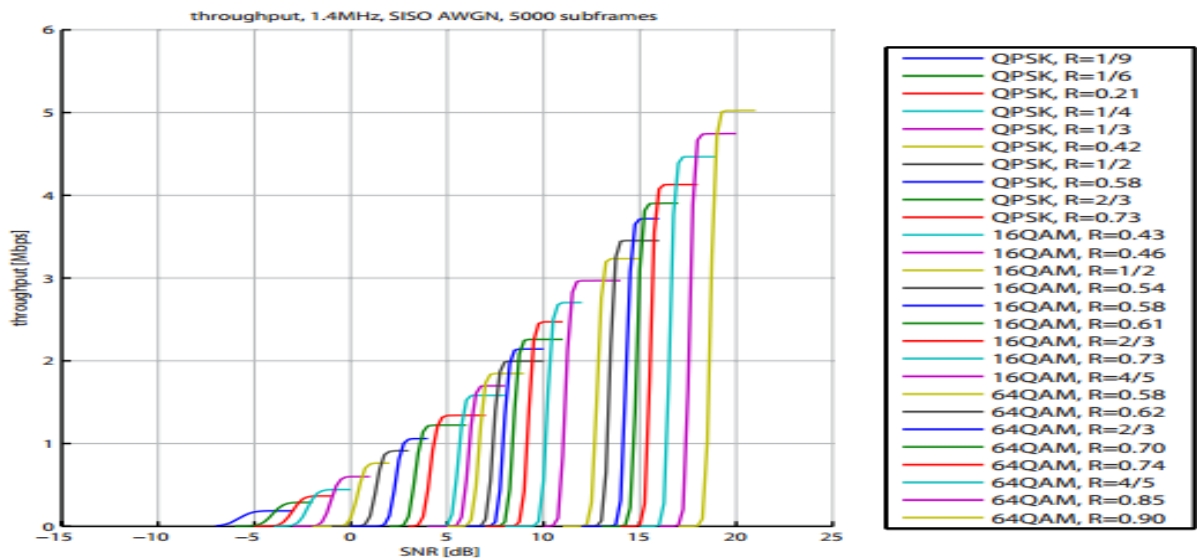
Πίνακας 10 Σειρά MCS-ERC για το αρχείο plot_R1071967_BLER_curves_r553.m

Οπότε προκύπτει η γραφική παράσταση BLER-SNR με τις παραμέτρους που αναφέραμε πιο πάνω:



Εικόνα 34 Καμπύλη BLER-SNR για 27 διαφορετικά MCS σε κανάλι AWGN με τεχνική SISO [11]

Ακολουθεί η γραφική παράσταση throughput-SNR:



Εικόνα 35 Καμπύλη throughput-SNR για 27 διαφορετικά MCS σε κανάλι AWGN με τεχνική SISO [11]

Σχολιασμός αποτελεσμάτων:

Όλες οι καμπύλες BLER (Εικόνα 34) ξεκινούν από το μέγιστο 1 δηλαδή 100% ποσοστό εσφαλμένων μπλόκ και έχουν φθίνουσα μονοτονία όσο μεγαλώνει το SNR και πιο απότομη κλίση όσο μεγαλώνει το MCS και το ERC. Οι καμπύλες throughput (Εικόνα 35) ξεκινούν όλες από το 0, έχουν αύξουσα μονοτονία η οποία είναι πιο απότομη όσο μεγαλώνει το MCS και το ERC και φτάνουν στο μέγιστο 5 για SNR=20 και για κωδικοποίηση 64 QAM. Επίσης το SNR και στις δύο γραφικές ξεκινάει από -6 περίπου.

Αυτό που είναι εμφανές και από τις δύο γραφικές είναι ότι όσο μεγαλώνει το SNR χρησιμοποιείται και μεγαλύτερης τάξης κωδικοποίηση και μεγαλύτερο ERC. Όπως βλέπουμε για την ίδια κωδικοποίηση ο μεγαλύτερος ERC αναφέρεται σε μεγαλύτερο SNR. Και φυσικά για SNR=20 που είναι και η μέγιστη τιμή χρησιμοποιείται κωδικοποίηση 64QAM. Όπως επίσης μπορούμε να δούμε οι μεγαλύτερης τάξης κωδικοποιήσεις έχουν μια απότομη αύξηση του throughput καθώς μεγαλώνει το SNR ενώ οι πιο μικρής τάξης έχουν μια πιο απαλή κλίση. Αυτό όπως έχουμε αναφέρει και πιο πάνω συμβαίνει διότι οι μεγαλύτερης τάξης κωδικοποιήσεις λειτουργούν καλύτερα όσο πιο κοντά στο σταθμό βάσης βρίσκονται δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το SNR. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για τα ζεύγη MCS - ERC: QPSK-R=1/9, QPSK-R=2/3, 16QAM-R=0.43, 16QAM-R=0.46, 16QAM-R=1/2, 64QAM-R=0.58 και 64QAM-R=0.62, ο δείκτης BLER δεν καταφέρνει ούτε ασυμπτωτικά να προσεγγίσει το μηδέν όπως γίνεται στις άλλες περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι για το διάστημα SNR στο οποίο χρησιμοποιείται κάθε μια από αυτές τις κωδικοποιήσεις θα υπάρχει πάντα σφάλμα και μάλιστα η τάξη του σφάλματος θα είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Το Σύστημα Long Term Evolution του Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) γνωστό και ως Evolved Packet System (EPS) είναι μια καινοτόμα κίνηση στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Μια τέτοια επαναστατική κίνηση υποκινείται από την ακατάπαυστη αύξηση της ζήτησης συνδέσεων γρήγορων ταχυτήτων στα δίκτυα, χαμηλών χρόνων καθυστέρησης, χαμηλών ρυθμών σφαλμάτων και ελαστικότητας διότι οι νέοι χρήστες και οι εφαρμογές δικτύων εξαρτώνται πολύ από αυτές τις απαιτήσεις για να απολαμβάνουν επαρκή λειτουργικότητα και απόδοση.

Το Third Generation Partnership Project Long Term Evolution (3GPP LTE) υπόσχεται υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη, φασματική επάρκεια, χαμηλούς χρόνους καθυστέρησης και χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων. Αυτοί οι στόχοι λειτουργίας και επίδοσης του 3GPP LTE είναι αξιόπαινοι και μπορούν να επιτευχθούν με αρκετή σιγουριά. Το LTE αξιοποιεί μια πληθώρα τεχνολογιών. Ονομαστικά τις Τεχνικές Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων κεραιών (Multiple Input Multiple Output - MIMO), της Πολυπλεξίας Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), της Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογώνιας Διαίρεσης Χρόνου (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) στην κατερχόμενη ζεύξη και της τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας Μονού Φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access - SC-FDMA) στην ανερχόμενη ζεύξη. Επίσης υποστηρίζει τις τεχνικές διαμόρφωσης Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16 Quadrature Amplitude Modulation (16QAM), και 64QAM.

Παρ' όλο που αναφέρεται ως σύστημα 4ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (4G) αυτό δεν ισχύει καθώς δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που έχει ορίσει ο διεθνής οργανισμός ITU-R. Γι' αυτό το λόγο, το LTE αναβαθμίστηκε σε LTE Advanced για να πληροί τις προϋποθέσεις έτσι ώστε να θεωρείται σύστημα 4G.

Από την στιγμή που η αξιολόγηση της απόδοσης του LTE χρειάζεται προσομοιώσεις σε επίπεδο συνδέσμου και συστήματος, έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα - εργαλείο βασισμένο στην τεχνική OFDMA που προσομοιώνει το LTE, ο ούτος αποκαλούμενος LTE Προσομοιωτής Επιπέδου Συνδέσμου (LTE Link Level Simulator) LTE_Link_Level_1.3_r620. Αυτός ο προσομοιωτής περιέχει τα χωρικά μοντέλα καναλιών και τα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για το LTE. Τα αποτελέσματα αυτού του προσομοιωτή χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση της επίδοσης του επιπέδου συνδέσμου του OFDMA LTE σε διαφορετικά περιβάλλοντα και δημιουργεί πίνακες αναφοράς που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σαν είσοδο σε μελλοντικούς προσομοιωτές επιπέδου συνδέσμου.

Στην διπλωματική αυτή εργασία μελετήσαμε τον LTE_Link_Level_1.3_r620 και τα αποτελέσματα που αυτός παράγει σύμφωνα με τις μετρικές εκτίμησης της απόδοσης του LTE: ρυθμός εσφαλμένων μπλοκ (BLER), ρυθμαπόδοση (throughput) και λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Είδαμε λοιπόν ότι για τύπους καναλιών ITU pedestrian B και flat rayleigh fading με τεχνικές μετάδοσης SISO, Transmit Diversity 2x1 και 4x2 και Open Loop Spatial Multiplexing 4x2, τεχνική TxD 4x2 έχει την καλύτερη

επίδοση και στα δυο κανάλια με ή χωρίς επαναμεταδόσεις και επίσης ότι η τεχνική OLSM 4x2 δίνει την μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση από όλες. Επίσης παρατηρήσαμε ότι οι επαναμεταδόσεις ενώ βοηθούν τους χρήστες με χαμηλό SNR να έχουν μια επικοινωνία ωστόσο δυσκολεύουν την αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Παρά ταύτα όμως η μέγιστη ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται για κάθε τεχνική είναι ανεξάρτητη αυτού του φαινομένου. Επιπλέον είδαμε τις επιδόσεις του LTE για διάφορους τύπου MCS. Παρατηρήσαμε ότι όσο μεγαλώνει το SNR χρησιμοποιούνται μεγαλύτερης τάξης σχήματα διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων και επίσης η αύξηση της ρυθμαπόδοσης και η μείωση του BLER γίνεται πιο απότομα για μεγάλης τάξης σχήματα κωδικοποίησης.

Ως μελλοντική εργασία η οποία μπορεί να επιτευχθεί έχοντας σαν βάση τα αποτελέσματα της παρούσας είναι η κατασκευή μια νέας έκδοσης του Link Level Simulator που να υποστηρίζει περισσότερους τύπους καναλιών, περισσότερες κωδικοποιήσεις και να απευθύνεται σε μια κατάσταση που μέχρι τώρα δεν έχουμε συναντήσει την MIMO πολλαπλών χρηστών (MU-MIMO). Οι μέχρι τώρα εξομοιώσεις αναφέρονταν στην ύπαρξη μόνο πολλαπλών κεραιών σε έναν εξοπλισμό χρήστη και στους σταθμούς βάσης. Από εδώ και πέρα πρέπει να μελετηθεί και να προσομοιωθεί η κατάσταση στην οποία αυτό γίνεται με ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλούς χρήστες που θα διαθέτουν εξοπλισμούς με πολλές κεραιές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S.Sesia, I.Toufik and M.Baker, "*LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*". © 2009 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69716-0.
- [2] J.Hågstrand, P.Karlsson,O.Silverplats, "*Proof of Concept Implementation of UMTS Long Term Evolution*". Luleå University of Technology, 2007.
- [3] Gessese Mengistu Kebede, Oladele Olayinka Paul, "*Performance Evaluation of LTE Downlink with MIMO Techniques*". Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, November, 2010.
- [4] Albert Serra Pagès, "*A Long Term Evolution Link Level Simulator*". Universitat Politècnica de Catalunya, February,2009.
- [5] F.Belloni, "*Fading Models*". Helsinki University of Technology, November, 2004.
- [6] Motorola, white paper, "*Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview*". 2007.
- [7] Ericsson, white paper "*Long Term Evolution (LTE): an introduction*" , October, 2007..
- [8] A.Hamza, "*Long Term Evolution (LTE) - A Tutorial*". Simon Fraser University, October, 2009.
- [9] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG "*Introduction to MIMO - Application Note*". München, 2009.
- [10] C. Mehlfrher, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "*Simulating the Long Term Evolution Physical Layer*", 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Scotland, 2009.
- [11] Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, "*Link Level Simulator Documentation, v1.3r620*". Vienna University of Technology, Austria, February,2010.
- [12] J.G.Proakis, M.Salehi, "*Συστήματα Τηλεπικοινωνιών*". Μετάφραση - Επιμέλεια: Κ.Καρούμπαλος, Ε.Ζέρβας, Σ.Καραμπογιάς, Ε. Σαγκριώτης, Έκδοση Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, 2002. ISBN:960-8313-04-X.
- [13] Tshiteya Dikamba, "*Downlink Scheduling in 3GPP Long Term Evolution (LTE)*". Delft University of Technology, March,2011.
- [14] Μπερμπερίδης Κ., "*Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες-Δισδιάστατες Κυματομορφές Σήματος*". Βοηθητικές Διαφάνειες, Πατρα 2012.

- [15] Μπερμπερίδης Κ., *"Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες-Θεωρία Πληροφορίας: Χωρητικότητα Καναλιού"*. Βοηθητικές Διαφάνειες, Πάτρα 2012.
- [16] Airgo Networks, Bermai, Broadcom, Conexant, STMicroelectronics, Texas Instruments, *"WWiSE IEEE 802.11n Proposal"*. August, 2004.
- [17] Signal-to-noise ratio-Wikipedia, the free encyclopedia - http://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio
- [18] SINR-Wikipedia, the free encyclopedia - <http://en.wikipedia.org/wiki/SINR>
- [19] Additive White Gaussian noise-Wikipedia, the free encyclopedia - http://en.wikipedia.org/wiki/Additive_white_Gaussian_noise
- [20] LTE (telecommunication)-Wikipedia, the free encyclopedia - [http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_\(telecommunication\)](http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_(telecommunication))
- [21] LTE, Long Term Evolution, Technology, 4G Americas - <http://www.4gamericas.org/index.cfm?fuseaction=page§ionid=249>
- [22] Long Term Evolution (LTE) Tutorials - <http://www.eventhelix.com/lte/lte-tutorials.htm>
- [23] LTE Whitepaper - <http://www.scribd.com/doc/20786641/LTE-Whitepaper>
- [24] Rayleigh multipath channel model - <http://www.dsplg.com/2008/07/14/rayleigh-multipath-channel/>
- [25] QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) - <http://www.tech-faq.com/qpsk.html>
- [26] Quadrature amplitude modulation - Wikipedia, the free encyclopedia - http://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation
- [27] Choosing between open- and closed- loop MIMO in BTS systems - <http://embedded-computing.com/article-id/?3973>
- [28] LTE Network Infrastructure and Elements- lteencyclopedia - <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-network-infrastructure-and-elements>
- [29] Fundamentals of LTE > Physical Layer Procedures and Scheduling > Channel Quality Indicator (CQI) Feedback - Pg .: Safari Books Online - <http://my.safaribooksonline.com/book/electrical-engineering/communications-engineering/9780137033638/physical-layer-procedures-and-scheduling/ch09lev1sec2>
- [30] User Equipment-Wikipedia, the free encyclopedia - http://en.wikipedia.org/wiki/User_equipment
- [31] Throughput -Wikipedia, the free encyclopedia - <http://en.wikipedia.org/wiki/Throughput>
- [32] Hybrid Automatic Repeat reQuest-Wikipedia, the free encyclopedia - http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_automatic_repeat_request
- [33] LTE_Link_Level_1.3_r620 - 4shared.com download free-1 - http://search.4shared.com/q/1/LTE_Link_Level_1.3_r620

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΚΩΔΙΚΑΣ
ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αρχείο plot_quick_test_results_r553.m

```
function plot_quick_test_results_r553
% Script that shows example BLER and throughput results of the
simulation.
% Author: Josep Colom Ikuno, jcolom@nt.tuwien.ac.at
% (c) 2009 by INTHFT
% www.nt.tuwien.ac.at

folder = './examples/LTE_sim_batch_quick_test_r553/';

flat_rayleigh_0retx = {
    'cqi_7_0re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_model_1x1_freqoff0_none_5000TTI_r553_20091209_120746','SI
SO';
    'cqi_7_0re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_mode2_2x1_freqoff0_subframe_5000TTI_r553_20091209_194928'
, 'TxD 2x1';
    'cqi_7_0re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_mode2_4x2_freqoff0_subframe_5000TTI_r553_20091209_143153'
, 'TxD 4x2';
    'cqi_7_0re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_mode3_4x2_freqoff0_subframe_5000TTI_r553_20091209_180003'
, 'OLSM 4x2';
};

PedB_0retx = {
    'cqi_7_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091209_123347','SISO';
    'cqi_7_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode2_2x1_SSD_freqoff0_subframe_5000T
TI_r553_20091209_211022','TxD 2x1';
    'cqi_7_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode2_4x2_SSD_freqoff0_subframe_5000T
TI_r553_20091209_151820','TxD 4x2';
    'cqi_7_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode3_4x2_SSD_freqoff0_subframe_5000T
TI_r553_20091209_191856','OLSM 4x2';
};

flat_rayleigh_3retx = {
    'cqi_7_3re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_model_1x1_freqoff0_none_5000TTI_r553_20091209_230459','SI
SO';
    'cqi_7_3re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_mode2_2x1_freqoff0_subframe_5000TTI_r553_20091210_003335'
, 'TxD 2x1';
    'cqi_7_3re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_mode2_4x2_freqoff0_subframe_5000TTI_r553_20091210_025530'
, 'TxD 4x2';
};
```

```

    'cqi_7_3re-tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_flat
Rayleigh_TX_mode3_4x2_freqoff0_subframe_5000TTI_r553_20091210_060011'
, 'OLSM 4x2';
};

PedB_3retx = {
    'cqi_7_3re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode1_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091209_231213', 'SISO';
    'cqi_7_3re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode2_2x1_SSD_freqoff0_subframe_5000T
TI_r553_20091210_005112', 'TxD 2x1';
    'cqi_7_3re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode2_4x2_SSD_freqoff0_subframe_5000T
TI_r553_20091210_033207', 'TxD 4x2';
    'cqi_7_3re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_PedB_TX_mode3_4x2_SSD_freqoff0_subframe_5000T
TI_r553_20091210_070634', 'OLSM 4x2';
};

plot_one_set(folder, flat_rayleigh_0retx, 'flat rayleigh, 0 re-tx');
plot_one_set(folder, PedB_0retx, 'PedB, 0 re-tx');
plot_one_set(folder, flat_rayleigh_3retx, 'flat rayleigh, 3 re-tx');
plot_one_set(folder, PedB_3retx, 'PedB, 3 re-tx');

function plot_one_set(folder, filenames, titles)

first_figure = figure;
first_axes = axes;
set(first_axes, 'YScale', 'log');
title(first_axes, sprintf('BLER, CQI 7, PedB, 5000 subframes,
%s', titles));
ylabel(first_axes, 'BLER');
xlabel(first_axes, 'SNR [dB]');
ylim([1e-3 1]);
hold all;
grid on;

second_figure = figure;
second_axes = axes;
title(second_axes, sprintf('throughput, CQI 7, PedB, 5000 subframes,
%s', titles));
ylabel(second_axes, 'throughput [Mbps]');
xlabel(second_axes, 'SNR [dB]');
hold all;
grid on;

% markers = {'x' '*' '+' '.'};
markers = {'.' '.' '.' '.'};
marker_s = [ 15 15 15 15 ];

for file_idx=1:size(filenames,1)
    load(fullfile(folder, [ filenames{file_idx,1}
'.mat'] ), 'simulation_results', 'name', 'N_subframes');

    if length(markers)<file_idx
        current_marker = markers(end);
        current_marker_size = marker_s(end);
    else

```



```

        current_marker = markers{file_idx};
        current_marker_size = marker_s(file_idx);
    end
    displayname = filenames{file_idx,2};

plot(first_axes,simulation_results.SNR_vector,simulation_results.cell_
specific.BLER_overall,'DisplayName',displayname,'Marker',current_mar
ker,'LineWidth',1,'MarkerSize',current_marker_size);

plot(second_axes,simulation_results.SNR_vector,squeeze(sum(sum(simula
tion_results.cell_specific.throughput_coded,1),3))/(N_subframes*1e-
3)/1e6,'DisplayName',displayname,'Marker',current_marker,'LineWidth',
1,'MarkerSize',current_marker_size);
end

xlim(first_axes,[-10 20]);
xlim(second_axes,[-10 20]);
legend(first_axes,'show','Location','Best');
legend(second_axes,'show','Location','Best');

```

Αρχείο plot_R1071967_BLER_curves_r553.m

```

% Script that shows reference BLER curves.
% Author: Josep Colom Ikuno, jcolom@nt.tuwien.ac.at
% (c) 2009 by INTHTF
% www.nt.tuwien.ac.at

folder = './examples/R1-071967_r553';

first_figure = figure;
first_axes = axes;
set(first_axes,'YScale','log');
title('BLER, 1.4MHz, SISO AWGN, 5000 subframes');
ylabel('BLER');
xlabel('SNR [dB]');
ylim([1e-3 1]);
hold all;
grid on;

second_figure = figure;
second_axes = axes;
title(second_axes,sprintf('throughput, 1.4MHz, SISO AWGN, 5000
subframes'));
ylabel(second_axes,'throughput [Mbps]');
xlabel(second_axes,'SNR [dB]');
hold all;
grid on;

files = {
    'cqi_101_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_171037'
    'cqi_102_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_172933'
    'cqi_103_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_174856'

```

```
'cqi_104_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_171116'  
'cqi_105_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_173301'  
'cqi_106_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_175543'  
'cqi_107_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_171520'  
'cqi_108_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_173949'  
'cqi_109_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_180257'  
'cqi_110_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_201750'  
'cqi_111_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_204015'  
'cqi_112_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_210414'  
'cqi_113_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_212715'  
'cqi_114_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_215028'  
'cqi_115_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_221449'  
'cqi_116_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_195706'  
'cqi_117_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_193022'  
'cqi_118_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_190052'  
'cqi_119_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_183056'  
'cqi_120_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_200924'  
'cqi_121_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_193723'  
'cqi_122_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_190524'  
'cqi_123_0re-  
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r  
553_20091211_182908'
```

```

    'cqi_124_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_195743'
    'cqi_125_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_192633'
    'cqi_126_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_185442'
    'cqi_127_0re-
tx_1TTI_UL_delay_1.4MHz_AWGN_TX_model_1x1_SSD_freqoff0_none_5000TTI_r
553_20091211_182213'
};

```

```

legend_name = {
    'QPSK, R=1/9'
    'QPSK, R=1/6'
    'QPSK, R=0.21'
    'QPSK, R=1/4'
    'QPSK, R=1/3'
    'QPSK, R=0.42'
    'QPSK, R=1/2'
    'QPSK, R=0.58'
    'QPSK, R=2/3'
    'QPSK, R=0.73'
    '16QAM, R=0.43'
    '16QAM, R=0.46'
    '16QAM, R=1/2'
    '16QAM, R=0.54'
    '16QAM, R=0.58'
    '16QAM, R=0.61'
    '16QAM, R=2/3'
    '16QAM, R=0.73'
    '16QAM, R=4/5'
    '64QAM, R=0.58'
    '64QAM, R=0.62'
    '64QAM, R=2/3'
    '64QAM, R=0.70'
    '64QAM, R=0.74'
    '64QAM, R=4/5'
    '64QAM, R=0.85'
    '64QAM, R=0.90'
};

```

```

for cqi_value=1:27
    load(fullfile(folder, [files{cqi_value}
'.mat']),'simulation_results','cqi_i','N_subframes');

    name = legend_name{cqi_value};

    plot(first_axes,simulation_results.SNR_vector,simulation_results.cell_
_specific.BLER_overall,'DisplayName',name);

    plot(second_axes,simulation_results.SNR_vector,squeeze(sum(sum(simula
tion_results.cell_specific.throughput_coded,1),3))/(N_subframes*1e-
3)/1e6,'DisplayName',name);
end

xlim(first_axes,[-15 25]);

```

```
xlim(second_axes, [-15 25]);  
legend(first_axes, 'show', 'Location', 'SouthEastOutside');  
legend(second_axes, 'show', 'Location', 'SouthEastOutside');
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΚΡΩΝΥΜΑ

ΑΚΡΩΝΥΜΑ

Ακρόνυμο	Επεξήγηση
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
AGW	Access Gateway
AM	Amplitude Modulation
AM	Acknowledgement Mode
AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate
APN	Access Point Name
ARP	Allocation and Retention Priority
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ASK	Amplitude Shift Keying
AuC	Authentication Center
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BLER	Block Error Rate
CCCH	Common Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CQI	Channel Quality Indicator
CRF	Charging Rules Function
DCCH	Dedicated Control Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld

EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
eNodeB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ERC	Effective Code Rate
EUTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
EUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transformation
GBR	Guaranteed Bit Rate
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GTP-U	GPRS Tunneling Protocol
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HLR	Home Location Register
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBR	Maximum Bit Rate
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output

MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
MSISDN	Mobile ISDN Number
MTCH	Multicast Traffic Channel
MU-MIMO	Multiple User MIMO
NAS	Non-Access Stratum
NDI	New Data Indicator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLSM	Open Loop Spatial Multiplexing
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging Channel
PCRF	Policy Control and charging Rules Function
P-CSCF	Proxy-Call Session Control Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDF	Policy Decision Function
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Union
P-GW	PDN Gateway
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PMCH	Physical Multicast Channel
PMIP	Proxy Mobile IPv6
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
PSK	Phase Shift Keying
PUCCH	Physical Uplink Control Channel

PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
ROHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Control
RTT	Round Trip Time
RV	Redundancy Version
SAE	System Architecture Evolution
SAW	Stop And Wait
SC-FDMA	Single-Carrier frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDU	Service Data Unit
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIP	Session Initial Protocol
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self Organizing Networks
SU-MIMO	Single User MIMO
TDD	Time Division Duplexing
TFT	Traffic Flow Template
TxD	Tx Diversity
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment

UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VoIP	Voice over IP
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
