



ΤΕΙ Κρήτης
Σχολή: Εφαρμοσμένων Επιστημών
Τμήμα: Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Πτυχιακή Εργασία

**Μελέτη του Air Interface του Long Term Evolution
(LTE/LTE-A) σύστημα κινητών επικοινωνιών**



Εμμανουέλα Βαρδιάμπαση
A. M. 4873

Επιβλέπων καθηγητής:
Δρ. (Ph.D.) Κόκκινος Ευάγγελος

Χανιά 2015

Περίληψη

Αυτή η πτυχιακή εργασία αναφέρεται στο Air Interface του πρότυπου κινητών τηλεπικοινωνιών Long Term Evolution (LTE /LTE- Advanced). Αρχικά δίνεται μία σύντομη περιγραφή της αρχιτεκτονικής του δικτύου του LTE και των τεχνολογιών ράδιο-πρόσβασης που αυτό αξιοποιεί. Επίσης περιγράφεται το φυσικό επίπεδο καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διάδοση του σήματος. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που μετρώνται στο UE, όπως RSRP, RSSI, RSRQ και SINR. Τέλος, ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση του Vienna προσομοιωτή του LTE συστήματος v1.0r247, καθώς επίσης η εξήγηση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προσφέρει κάτω από διάφορες παραμέτρους μετάδοσης.

Λέξεις Κλειδιά:

LTE, LTE-Advanced, E-UTRAN, EPC, OFDMA, SC-FDMA, MIMO, eNodeB, shadow fading, απώλειες διαδρομής, ISI, κυκλικό πρόθεμα, προσαρμογή ζεύξης, RSRP, RSSI, RSRQ, SINR και BLER.

Study of Air Interface of Long Term Evolution (LTE / LTE-A) system for mobile communications

Summary

This thesis refers to Air Interface of the standard Long Term Evolution (LTE / LTE- Advanced). At first, a brief description of the network architecture of LTE and radio-access technologies that it uses is given. Also, the physical level and the problems encountered in the propagation of the signal are described. Next, the basic UE measurements, namely RSRP, RSSI, RSRQ and SINR are presented. Finally, Vienna LTE system level simulator, v1.0r247, is shown briefly, as well as the explanation and discussion of the results offered under various transmission parameters.

KEY WORDS:

LTE, LTE-Advanced, E-UTRAN, EPC, OFDMA, SC-FDMA, MIMO, eNodeB, shadow fading, pathloss, ISI, cyclic prefix, link adaptation, RSRP, RSSI, RSRQ, SINR and BLER.

Περιεχόμενα

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 2 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 4 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ | 6 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: | 10 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LTE | 10 |
| 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 11 |
| 1.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ LTE | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: | 16 |
| ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ LTE | 16 |
| 2.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ LTE | 17 |
| 2.1.1 Ο ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΧΡΗΣΤΗ (USER EQUIPMENT- UE)..... | 18 |
| 2.1.2 ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (E-UTRAN)..... | 19 |
| 2.1.3 ΤΟ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ (EPC)..... | 21 |
| 2.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ LTE | 23 |
| 2.2.1 ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΡΗΣΤΗ (USER PLANE - UP)..... | 24 |
| 2.2.2 ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΛΕΓΧΟΥ (CONTROL PLANE -CP) | 25 |
| 2.2.3 ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ | 26 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: | 28 |
| LTE ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΡΑΔΙΟ-ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ | 28 |
| 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ OFDM | 29 |
| 3.1.1 DOWNLINK: ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (OFDMA) 31 | |
| 3.1.2 UPLINK: SINGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS (SC-FDMA)32 | |
| 3.2 MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT (MIMO) | 35 |
| 3.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ | 36 |
| 3.4 LTE ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ | 37 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: | 39 |
| LTE PHYSICAL LAYER | 39 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ PHYSICAL LAYER | 40 |
| 4.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ | 40 |

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.1 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ | 41 |
| 4.2.2 INTER-SYMBOL INTERFERENCE (ISI) AND CYCLIC PREFIXING | 43 |
| 4.2.3 RESOURCE ELEMENTS AND BLOCKS | 44 |
| 4.2.4 ΣΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ | 46 |
| 4.3 ADAPTIVE MODULATION AND CODING (AMC)..... | 48 |
| 4.4 ΠΕΡΙΛΗΨΗ..... | 50 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: | 51 |
| ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ LTE | 51 |
| 5.1 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΖΕΥΞΗΣ (LINK ADAPTATION)..... | 52 |
| 5.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ RSRP ΚΑΙ RSRQ ΣΤΟ LTE..... | 54 |
| 5.2.1 REFERENCE SIGNAL RECEIVED POWER (RSRP)..... | 55 |
| 5.2.2 RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATOR (RSSI)..... | 55 |
| 5.2.3 REFERENCE SIGNAL RECEIVED QUALITY (RSRQ)..... | 56 |
| 5.2.4 SIGNAL TO INTERFERENCE-NOISE RATIO (SINR)..... | 57 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: | 58 |
| LTE SYSTEM LEVEL SIMULATOR V1.0R247 | 58 |
| 6.1 Η ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ | 59 |
| 6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 59 |
| 6.3 ΘΕΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ | 72 |
| 6.4 Η ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 73 |
| 6.4.1 BLOCK LENGTH ERROR RATE..... | 73 |
| 6.4.2 TRANSMISSION TIME INTERVAL..... | 74 |
| 6.4.3 REGION OF INTEREST - ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ..... | 74 |
| 6.4.4 MACROSCOPIC PATHLOSS | 75 |
| 6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..... | 90 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΗΓΕΣ..... | 91 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

| | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|
| 3G | Third Generation |
| 3GPP | Third Generation Partnership Project |
| 4G | Fourth Generation |
| 16-QAM | 16 Quadrature Amplitude Modulation |
| 64-QAM | 64 Quadrature Amplitude Modulation |
| AMC | Adaptive Modulation and Coding |
| APN | Access Point Name |
| ARQ | Automatic Repeat Request |
| AS | Access Stratum |
| AWGN | Additive White Gaussian Noise |
| BLER | Block Error Rate |
| BS | Base Station |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CLSM | Closed Loop Spatial Multiplexing |
| CP | Cyclic Prefix |
| CP | Control Plane |
| CQI | Channel Quality Indicator |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| dB | Decibel |
| dBm | Decibels relative to one milliwatt |
| DFT | Discrete Fourier Transform |
| DL | Downlink |
| DSP | Digital Signal Processor |
| DwPTS | Downlink Pilot Time Slot |
| EDGE | Enhanced Data Rates for GSM Evolution |
| EESM | Exponential Effective Signal to Interference and Noise Ratio Mapping |
| EIR | Equipment Identity Register |
| EMM | EPS Mobility Management |

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|
| eNB | Evolved Node B |
| EPC | Evolved Packet Core |
| EPS | Evolved Packet System |
| ESM | EPS Session Management |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| ETWS | Earthquake and Tsunami Warning System |
| E-UTRAN | Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network |
| FDD | Frequency Division Duplex |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| FEC | Forward Error Correction |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| FTP | File Transfer Protocol |
| Gb | Guard band |
| GGSN | Gateway GPRS Support Node |
| GP | Guard Period |
| GPRS | General Packet Radio Service |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| GUI | Graphical User Interface |
| GW | Gateway |
| HARQ | Hybrid ARQ |
| HeNB | Home evolved Node B |
| HI | Hybrid ARQ Indicator |
| HSPA | High Speed Packet Access |
| HSS | Home Subscriber Server |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IFFT | Inverse Fast Fourier Transform |
| IMEI | International Mobile Equipment Identity |
| IP | Internet Protocol |
| ISI | Inter Symbol Interference |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LTE | Long Term Evolution |
| LTE-A | LTE-Advanced |
| MAC | Medium Access Control |
| MCS | Modulation Coding Scheme |
| ME | Mobile Equipment |
| MIESM | Mutual Information Effective Signal to Interference Noise Ratio Mapping |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| MM | Mobility Management |
| MME | Mobility Management Entity |
| MNC | Mobile Network Code |

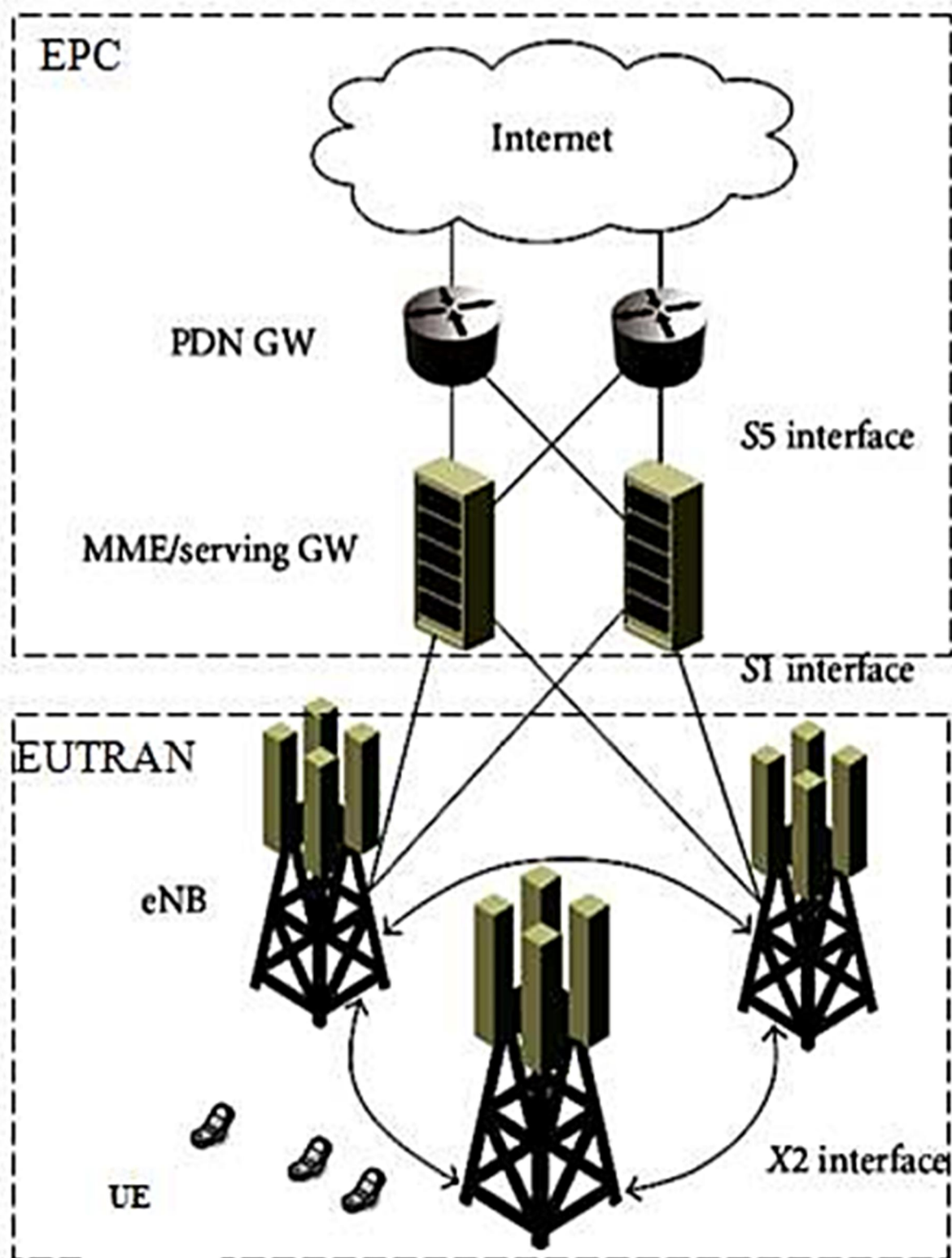
| | |
|---------|---------------------------------------------------|
| MSC | Mobile Switching Centre |
| MT | Mobile Termination |
| MU-MIMO | Multiple User MIMO |
| NACK | Negative Acknowledgement |
| NAS | Non Access Stratum |
| OFDM | Orthogonal Frequency Division Multiplexing |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access |
| OLSM | Open Loop Spatial Multiplexing |
| PAPR | Peak-to-Average Power Ratio |
| PCRF | Policy Control and Charging Rules Function |
| PDCP | Packet Data Convergence Protocol |
| PDN | Packet Data Network |
| PDU | Protocol Data Unit |
| P-GW | Packet Data Network Gateway |
| PHY | Physical Layer |
| PMI | Precoding Matrix Indicator |
| PRB | Physical Resource Block |
| PS | Packet Switched |
| QAM | Quadrature Amplitude Modulation |
| QoS | Quality of Service |
| QPSK | Quadrature Phase Shift Keying |
| RB | Resource Block |
| RE | Resource Element |
| RF | Radio Frequency |
| RI | Rank Indication |
| RLC | Radio Link Control |
| ROI | Region of Interest |
| RRC | Radio Resource Control |
| RS | Reference Signal |
| RSRP | Reference Signal Received Power |
| RSRQ | Reference Signal Received Quality |
| RTT | Radio Transmission Technology |
| RVs | Redundancy Versions |
| SAE | System Architecture Evolution |
| SC-FDMA | Single Carrier Frequency Division Multiple Access |
| SDU | Service Data Unit |
| SGSN | Serving GPRS Support Node |
| S-GW | Serving Gateway |
| SIM | Subscriber Identity Module |
| SINR | Signal to Interference plus Noise Ratio |
| SMS | Short Message Service |

| | |
|-------|-------------------------------------------------|
| SRS | Sounding Reference Signal |
| TAU | Tracking Area Updates |
| TB | Transport Block |
| TCP | Transmission Control Protocol |
| TDD | Time Division Duplex |
| TDMA | Time Division Multiple Access |
| TE | Terminal Equipment |
| TPC | Transmit Power Control |
| TTI | Transmission Time Interval |
| TxD | Transmission Diversity |
| UDP | User Datagram Protocol |
| UE | User Equipment |
| UICC | Universal Integrated Circuit Card |
| UL | Uplink |
| UP | User Plane |
| UpPTS | Uplink Pilot Time Slot |
| UMTS | Universal Mobile Telecommunication System |
| USIM | Universal Subscriber Identity Module |
| UTRAN | UMTS Terrestrial Radio Access Network |
| WCDMA | Wideband Code Division Multiple Access |
| WiMAX | Worldwide Interoperability for Microwave Access |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στο LTE

1.1 Εισαγωγή

Το LTE είναι η τεχνολογία που αναπτύχθηκε από την 3rd Generation Partnership Project (3GPP) για την παροχή αληθινής 4G ευρυζωνικής κινητής πρόσβασης. Η αρχιτεκτονική εξέλιξη του 3GPP LTE, με βάση τη λειτουργικότητα, χωρίζεται σε δύο μέρη: ένα ασύρματο δίκτυο πρόσβασης που ονομάζεται Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) και ένα κεντρικό δίκτυο που ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC) (Σχήμα 1.1). Το E-UTRAN υποστηρίζει όλες τις υπηρεσίες που σχετίζονται με το Radio, όπως ο χρονοπρογραμματισμός, ο χειρισμός ράδιο-πόρων, πρωτόκολλα αναμετάδοσης, κωδικοποίηση και διάφορα συστήματα πολλαπλών κεραιών. Το E-UTRAN περιέχει τα στοιχεία του δικτύου που ονομάζονται evolved NodeBs (eNBs), δηλαδή τους εξελιγμένους σταθμούς βάσης του LTE, τα οποία παρέχουν επίπεδο χρήστη και επίπεδο ελέγχου προς τον εξοπλισμό χρήστη (User Equipment - UE). Το EPC υποστηρίζει ισχυρές IP-based υπηρεσίες με απρόσκοπτη κινητικότητα και τον προηγμένο μηχανισμό Quality of Service (QoS). Το LTE έχει υποστεί πολλές αλλαγές αρχίζοντας από την πρώτη έκδοση τη Release 8 έως την Release 10, η οποία είναι επίσης γνωστή ως LTE-Advanced (LTE-A). Το LTE-A έχει εγκριθεί από τη Διεθνή Μονάδα Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Unit- ITU), ως 4G τεχνολογία. Η εναέρια διεπαφή LTE (air-interface) υποστηρίζει τόσο Frequency Division Duplexing (FDD) όσο και Time Division Duplexing (TDD) τρόπους λειτουργίας. Η κάτω ζεύξη (downlink) του LTE air-interface χρησιμοποιεί Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) και η άνω ζεύξη (uplink) χρησιμοποιεί Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης συχνότητας μονού φέροντος (Single Carrier Frequency Division Multiple Access- SC-FDMA) [3].



Σχήμα 1.1: Απλοποιημένη αρχιτεκτονική LTE.

1.2 Τα βασικά Χαρακτηριστικά του LTE

Το κύριο έργο του LTE 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 είναι το E-UTRA και τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων στο downlink έως και 300 Mbps και στο uplink έως και 75 Mbps, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει το UE. Όλες οι τερματικές συσκευές LTE είναι ικανές να επεξεργαστούν σήμα εύρους ζώνης έως και 20 MHz.
- Χαμηλές καθυστερήσεις κατά τη μεταφορά δεδομένων (καθυστέρηση IP πακέτων κάτω από 5 ms).
- Βελτιωμένη υποστήριξη για κινητές συσκευές ακόμη και αν αυτές κινούνται με ταχύτητες μέχρι και 500χλμ./ώρα ανάλογα και με την συχνότητα που χρησιμοποιείται.
- Χρησιμοποίηση διαμόρφωσης OFDMA για την καθοδική ζεύξη (downlink) και SC-FDMA για την ανοδική (uplink).
- Υποστήριξη διπλεξίας τόσο στο χρόνο (TDD) όσο και στη συχνότητα (FDD) .
- Δυνατότητα φασματικής ευελιξίας: προτυποποίηση καναλιών στα 1.4MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz.
- 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 αστικές περιοχές χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες έτσι ώστε να υποστηρίζονται υψηλές ευρυζωνικές ταχύτητες πρόσβασης. Σε

αυτήν τη περίπτωση κάθε κυψέλη του δικτύου έχει μέγεθος το πολύ 1 χλμ.

- Απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου.
- Υποστήριξη διαλειτουργικότητας και συνύπαρξη με παλαιότερα πρότυπα (π.χ. 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.
- Ράδιο-επικοινωνιακό δίκτυο μόνο μεταγωγής πακέτων [2].

Συνοψίζοντας, οι παράμετροι, τα χαρακτηριστικά και οι τεχνολογίες που αξιοποιεί το LTE παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Οι παράμετροι του LTE και οι περιγραφή τους

| Παράμετροι | Περιγραφή |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Duplexing | FDD, TDD, half-duplex FDD |
| Channel coding | Turbo Code |
| Mobility | Up to 500 km/h |
| Channel Bandwidth (MHz) | <ul style="list-style-type: none"> • 1.4 • 3 • 5 • 10 • 15 • 20 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Transmission Bandwidth Configuration NRB : (1resource block=180kHz in 1ms TTI) | <ul style="list-style-type: none"> • 6 • 15 • 25 • 50 • 75 • 100 |
| Modulation Schemes | <p>UL: QPSK, 16QAM, 64QAM</p> <p>DL: QPSK, 16QAM, 64QAM</p> |
| Multiple Access Schemes | <p>UL: SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) supports 50Mbps+ (20MHz spectrum)</p> <hr/> <p>DL: OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) supports 100Mbps+ (20MHz spectrum)</p> |
| Peak data rate in LTE | <p>UL: 75Mbps(20MHz bandwidth)</p> <hr/> <p>DL: 150Mbps(UE Category 4, 2x2 MIMO, 20MHz bandwidth)</p> <hr/> <p>DL: 300Mbps(UE category 5, 4x4 MIMO, 20MHz bandwidth)</p> |
| MIMO (Multiple Input Multiple Output) | <p>UL: 1 x 2, 1 x 4</p> <hr/> <p>DL: 2 x 2, 4 x 2, 4 x 4</p> |
| Coverage | 5 - 100km with slight degradation after 30km |
| Latency | End– user latency< 10ms |

Κεφάλαιο 2:

Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE

Η αρχιτεκτονική του συστήματος LTE είναι σχεδιασμένη με στόχο την υποστήριξη μόνο μεταγωγής πακέτων. Αυτό επιτρέπει μια πολύ απλοποιημένη αρχιτεκτονική στην οποία υπάρχουν μόνο δύο τύποι κόμβων. Ο σταθμός βάσης, που είναι επίσης γνωστός στο LTE ως evolved NodeB (eNB) και ο Mobility Management Entity (MME).

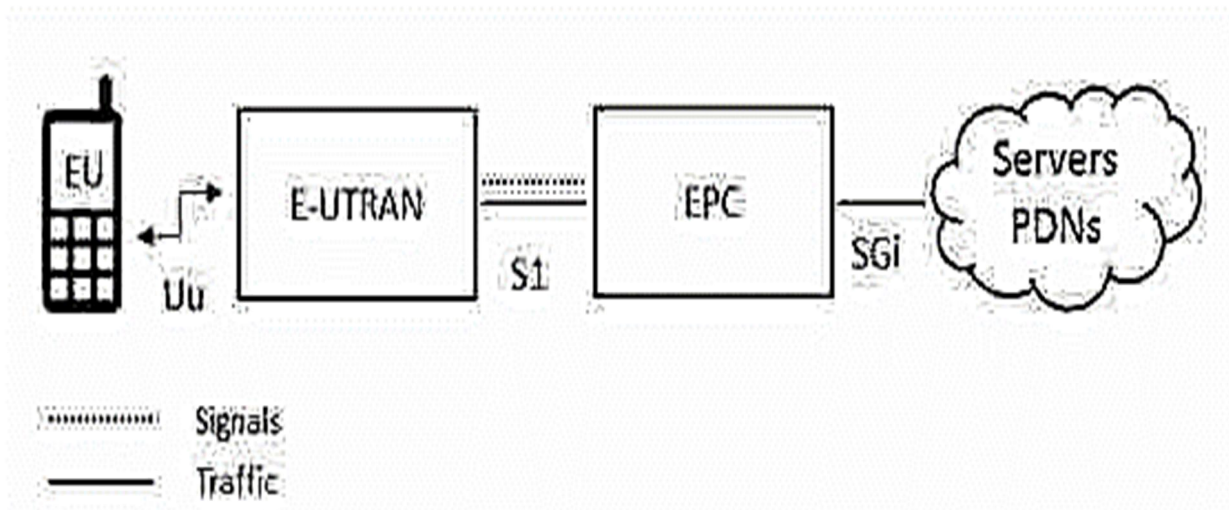
Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει μια σύντομη περιγραφή της αρχιτεκτονικής του συστήματος LTE. Πρώτα περιγράφεται εν ολίγοις είναι η αρχιτεκτονική του δικτύου και στη συνέχεια η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου

2.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE

Η αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του δικτύου LTE αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες:

- Τον **Εξοπλισμός Χρήστη (User Equipment- UE)**.
- Το **Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)**.
- Το **Evolved Packet Core (EPC)**.

Το Evolved Packet Core (EPC) επικοινωνεί με τα δίκτυα μεταφοράς πακέτων δεδομένων στον έξω κόσμο, όπως το διαδίκτυο, ιδιωτικά εταιρικά δίκτυα ή υποσύστημα πολυμέσων IP. Οι διεπαφές μεταξύ των διαφόρων μερών του συστήματος συμβολίζονται Uu, S1 και SGi όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.1 [4].



Σχήμα 2.1: Η αρχιτεκτονική του δικτύου LTE

2.1.1 Ο Εξοπλισμός Χρήστη (User Equipment- UE)

Η εσωτερική αρχιτεκτονική του εξοπλισμού του χρήστη για LTE είναι πανομοιότυπη με εκείνη που χρησιμοποιείται από UMTS και GSM όπου είναι στην πραγματικότητα ένας Κινητός Εξοπλισμός (Mobile Equipment- ME). Ο κινητός εξοπλισμός που αποτελείται από τις ακόλουθες σημαντικές ενότητες:

- **Mobile Termination (MT):** Αυτό χειρίζεται όλες τις λειτουργίες επικοινωνίας.
- **Terminal Equipment (TE):** Αυτό τερματίζει τις ροές δεδομένων.
- **Universal Integrated Circuit Card (UICC):** Είναι επίσης γνωστό ως η κάρτα SIM για εξοπλισμό LTE. Τρέχει μια εφαρμογή γνωστή ως Universal Subscriber Identity Module (USIM).

Μια **USIM** αποθηκεύει τα δεδομένα του συγκεκριμένου χρήστη και είναι πολύ παρόμοια με την κάρτα SIM 3G. Αυτή κρατά πληροφορίες

σχετικά με τον αριθμό τηλεφώνου του χρήστη, την ταυτότητα οικιακού δικτύου, τα κλειδιά ασφαλείας κ.λπ. [4].

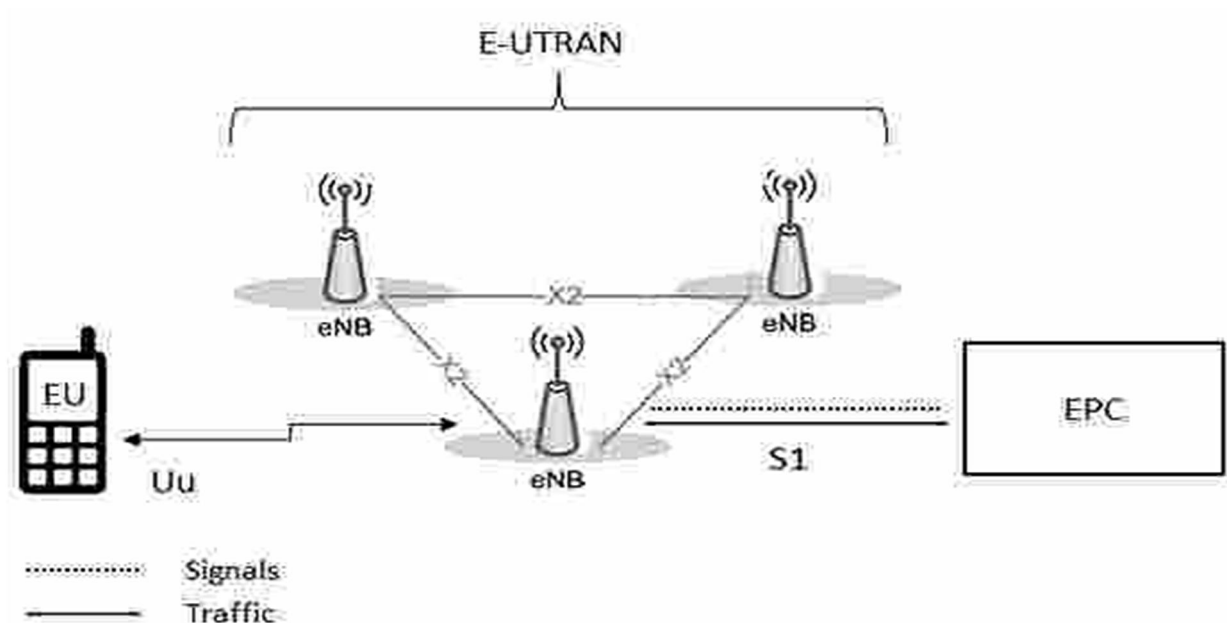
Πίνακας 2.1: Κατηγορίες UE σε LTE [5]

| Category | Maximum Downlink Throughput (Mbits/sec) | Maximum Uplink Throughput (Mbits/sec) | MIMO streams |
|----------|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 1 | 10 | 5 | 1 |
| 2 | 50 | 25 | 2 |
| 3 | 100 | 50 | 2 |
| 4 | 150 | 50 | 2 |
| 5 | 300 | 75 | 4 |

Ο Πίνακας 2.1 δείχνει τις διάφορες κατηγορίες των UEs που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Όπως δείχνει ο πίνακας, η κατηγορία βασίζεται στο ρυθμό μετάδοσης της ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης για το UE και στον αριθμό των ροών (streams) Multiple Input Multiple Output (MIMO).

2.1.2 Το δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN)

Η αρχιτεκτονική του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης E-UTRAN απεικονίζεται παρακάτω στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Το Δίκτυο Ράδιο πρόσβασης E-UTRAN

Το E-UTRAN χειρίζεται τις ραδιοεπικοινωνίες μεταξύ του κινητού (UE) και του EPC και έχει μόνο ένα συστατικό, που ονομάζεται **eNodeB** ή **eNB**. Κάθε eNB είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει τα κινητά σε μία ή περισσότερες κυψέλες. Ο σταθμός βάσης που επικοινωνεί με ένα κινητό, είναι γνωστό πως αυτό, σερβίρεται από τον eNB.

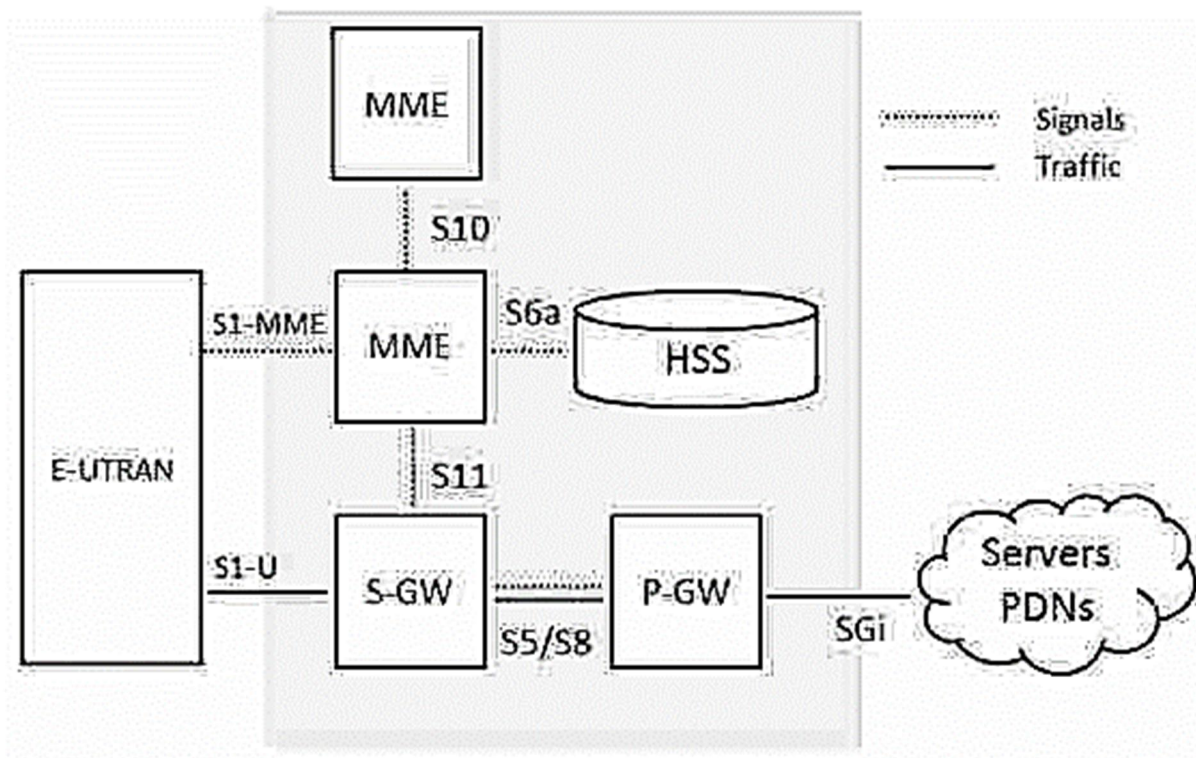
Το κινητό LTE επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης και μία κυψέλη σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και ακολουθούν οι εξής δύο βασικές λειτουργίες που υποστηρίζονται από τον eNB:

- Ο eNB στέλνει και λαμβάνει ράδιο μεταδόσεις για όλα τα κινητά με τη χρήση αναλογικών και ψηφιακών λειτουργιών επεξεργασίας σήματος της ασύρματης διεπαφής (air interface) του LTE.
- Ο eNB ελέγχει τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου όλων των κινητών τηλεφώνων του, με την αποστολή μηνυμάτων, όπως εντολές μεταβίβασης σηματοδότησης (handover).

Κάθε eNB συνδέεται με το EPC μέσω της διεπαφής S1 και μπορεί επίσης να συνδεθεί με κοντινούς σταθμούς βάσης από τη διεπαφή X2, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για τη σηματοδότηση και προώθηση πακέτων κατά τη διάρκεια του handover [4].

2.1.3 Το κεντρικό δίκτυο (EPC)

Η αρχιτεκτονική του Evolved Packet Core (EPC) απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 2.3. Υπάρχουν περισσότερα συστατικά τα οποία δεν φαίνονται στο διάγραμμα για να κρατηθεί αυτό απλό. Αυτά τα συστατικά είναι το Earthquake and Tsunami Warning System (ETWS), το Equipment Identity Register (EIR) και το Policy Control and Charging Rules Function (PCRF) [4].



Σχήμα 2.3: Η αρχιτεκτονική του Evolved Packet Core (EPC)

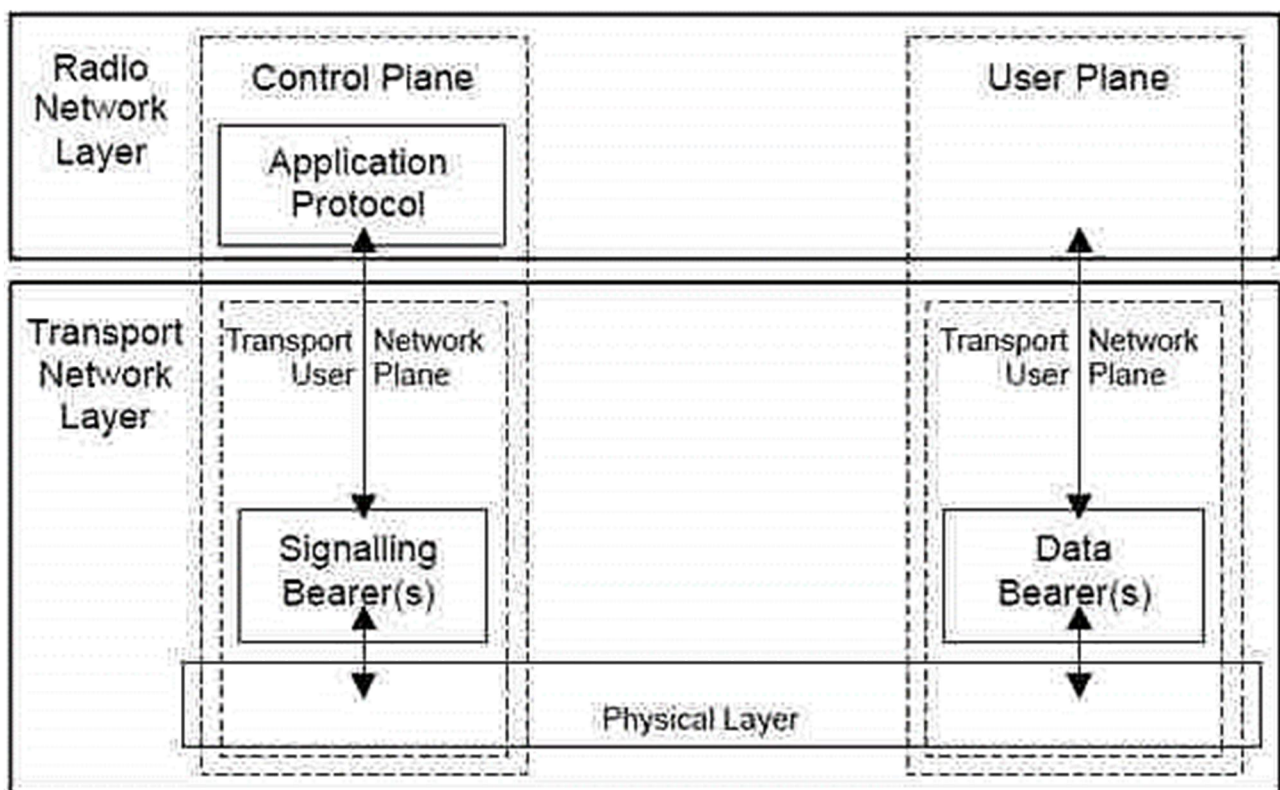
Παρακάτω είναι μια σύντομη περιγραφή του καθενός από τα συστατικά που φαίνονται στην παραπάνω αρχιτεκτονική, του σχήματος 2.3.

- ✓ Το **Home Subscriber Server (HSS)** είναι συστατικό που έχει μεταφερθεί από το UMTS και το GSM και είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές του δικτύου εκμετάλλευσης.
- ✓ Η Πύλη **P-GW** (Packet Data Network Gateway) επικοινωνεί με τον έξω κόσμο, δηλαδή τα δίκτυα πακέτων δεδομένων (PDNs), χρησιμοποιώντας την SGi διεπαφή. Κάθε PDN προσδιορίζεται από ένα όνομα σημείου πρόσβασης (Access point name - APN). Η πύλη **P-GW** έχει τον ίδιο ρόλο με τον κόμβο GPRS υποστήριξης (GGSN) και τον κόμβο εξυπηρέτησης υποστήριξης GPRS (SGSN) με το UMTS και το GSM.
- ✓ Η πύλη εξυπηρέτησης (**Serving Gateway S-GW**) ενεργεί ως δρομολογητής, των δεδομένων προς τα εμπρός μεταξύ του σταθμού βάσης και της πύλης **P-GW**.
- ✓ Ο φορέας διαχείρισης της κινητικότητας (**Mobility Management Entity MME**) ελέγχει τη λειτουργία υψηλού επιπέδου του κινητού μέσω των μηνυμάτων σηματοδότησης και του Home Subscriber Server (HSS).

Η διεπαφή μεταξύ της πύλης **S-GW** και της πύλης **P-GW** είναι γνωστή ως S5/S8. Αυτή έχει δύο ελαφρώς διαφορετικές εφαρμογές, δηλαδή η διεπαφή S5 χρησιμοποιείται αν οι δύο συσκευές είναι στο ίδιο δίκτυο, και S8 αν βρίσκονται σε διαφορετικά δίκτυα.

2.2 Αρχιτεκτονική Ράδιοπρωτοκόλλου LTE

Η αρχιτεκτονική ράδιοπρωτοκόλλου για το LTE μπορεί να χωριστεί σε επίπεδο ελέγχου (Control Plane - CP) και σε επίπεδο χρήστη (User Plane – UP), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Η αρχιτεκτονική ράδιο- πρωτόκολλο για το LTE

Από πλευράς επιπέδου χρήστη, η εφαρμογή δημιουργεί πακέτα δεδομένων που υποβάλλονται σε επεξεργασία από πρωτόκολλα όπως τα TCP, UDP και IP, ενώ στο επίπεδο του ελέγχου, το πρωτόκολλο Radio Resource Control (RRC) γράφει τα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού. Και στις δύο περιπτώσεις, οι πληροφορίες επεξεργάζονται από τα πρωτόκολλα Packet Data Convergence

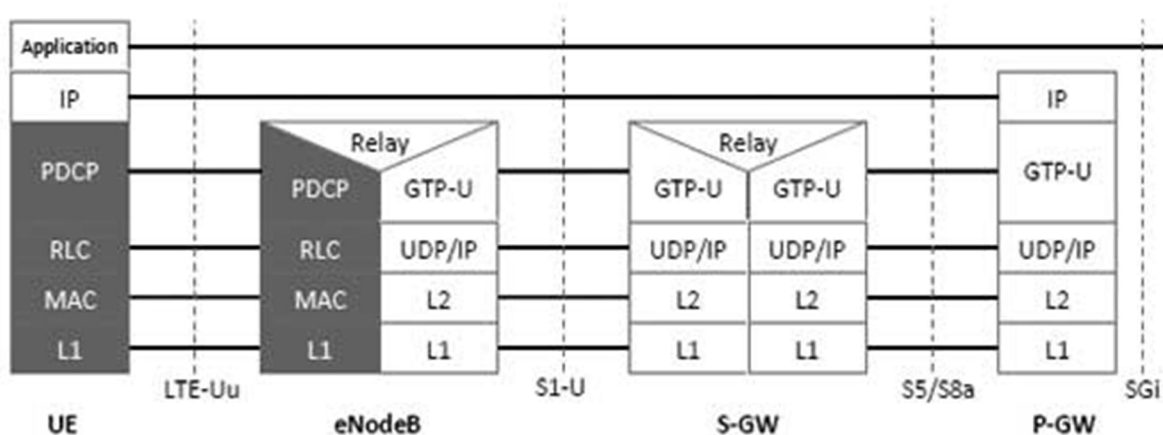
Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) και Medium Access Control (MAC), πριν περάσουν στο φυσικό επίπεδο για τη μετάδοση [4].

2.2.1 Επίπεδο χρήστη (User Plane - UP)

Στο επίπεδο χρήστη, η στοίβα πρωτοκόλλου μεταξύ του eNodeB και του UE αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους στρώματα:

- ❖ PDCP (Packet Data Convergence Protocol)
- ❖ RLC (Radio Link Control)
- ❖ Medium Access Control (MAC)

Από πλευράς επιπέδου χρήστη, τα πακέτα στο κεντρικό δίκτυο (EPC) είναι έγκλειστα σε ένα ειδικό πρωτόκολλο EPC και υπάρχει σήραγγα μεταξύ της πύλης P-GW και του κόμβου eNodeB. Διαφορετικά πρωτόκολλα ενθυλάκωσης χρησιμοποιούνται ανάλογα με το περιβάλλον. Το GPRS Tunneling Protocol (GTP) χρησιμοποιείται για τη διεπαφή S1 μεταξύ του eNodeB και της πύλης S-GW και τη διεπαφή S5 / S8 μεταξύ των πυλών S-GW και P-GW.



Σχήμα 2.6 Στοίβα πρωτοκόλλων σε επίπεδο χρήστη (UP)

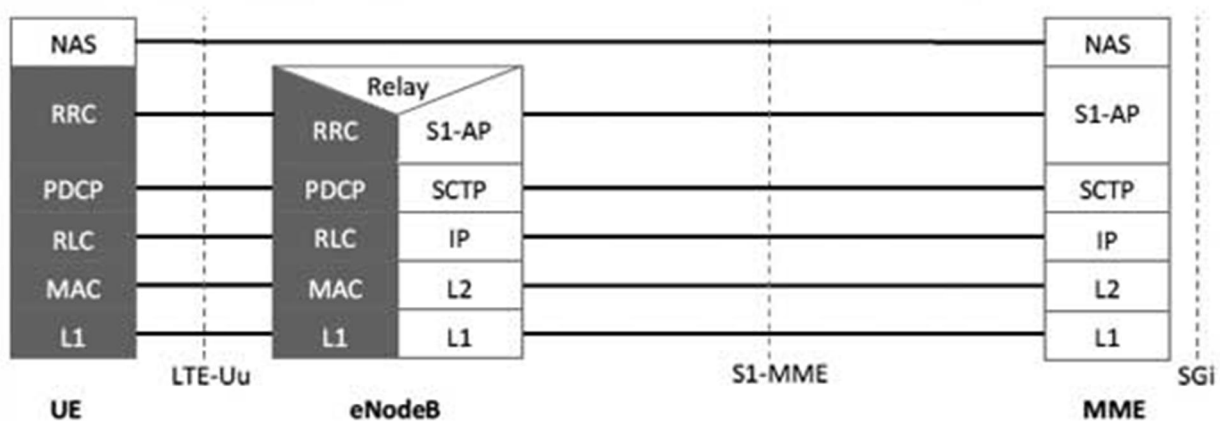
Τα πακέτα λαμβάνονται από ένα επίπεδο που ονομάζεται Service Data Unit (SDU), ενώ η έξοδος του πακέτου από ένα επίπεδο που αναφέρεται από το Protocol Data Unit (PDU) και πακέτα IP στο επίπεδο χρήστη ροή από πάνω προς τα κάτω επίπεδα (layers).

2.2.2 Επίπεδο ελέγχου (Control Plane -CP)

Το επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνει επιπλέον το στρώμα Radio Resource Control (RRC), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση των χαμηλότερων στρωμάτων.

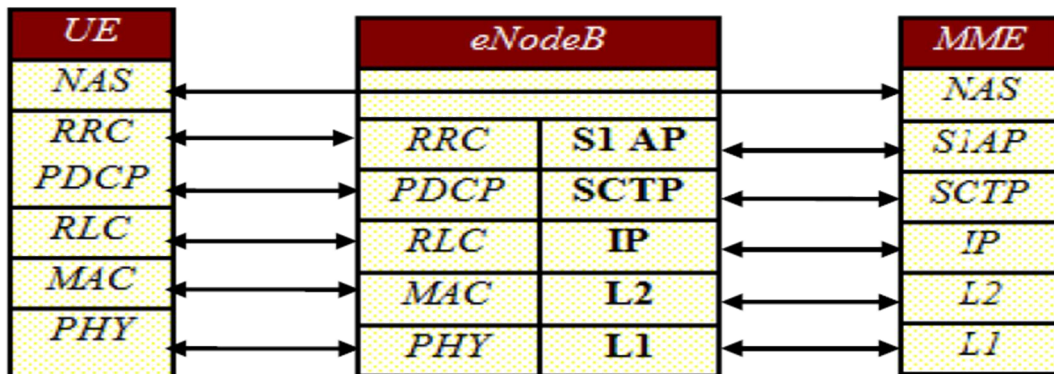
Το CP χειρίζεται ραδιο-ειδική λειτουργία η οποία εξαρτάται από την κατάσταση του εξοπλισμού χρήστη, το οποίο περιλαμβάνει δύο καταστάσεις: σε αδράνεια (idle) ή συνδεδεμένο (connected).

Η στοίβα πρωτοκόλλων του CP μεταξύ του UE και του MME φαίνεται παρακάτω. Η γκρίζα περιοχή της στοίβας, στο Σχήμα 2.7, δείχνει τα πρωτόκολλα Access Stratum (AS). Τα χαμηλότερα στρώματα εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες όπως και για το επίπεδο χρήστη με την εξαίρεση ότι δεν υπάρχει καμία λειτουργία συμπίεσης κεφαλίδας για τον επίπεδο ελέγχου. [4]



Σχήμα 2.7: Στοίβα πρωτοκόλλων επιπέδου ελέγχου (CP)

2.2.3 Διεπαφές και πρωτόκολλα



Σχήμα 2.8: Στοιβά πρωτοκόλλων CP από το UE στο MME

Το σχήμα 2.8 δείχνει την ιεραρχία στρωμάτων των πρωτοκόλλων στο CP με τις διεπαφές από το UE στο MME. Το Non-Access-Stratum (NAS) είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου ελέγχου. Αυτό συνδέει απευθείας το UE με MME. Το NAS έχει πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας EPS και συνόδου.

Το EPS Mobility Management (EMM) είναι υπεύθυνο για τη διαδικασία σύνδεσης / αποσύνδεσης του UE που συμβαίνει σε κατάσταση αδράνειας και Tracking Area Updates (TAU). Εκτός από αυτά, η ασφάλεια και τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τον έλεγχο ταυτότητας διαχειρίζονται από το EMM. Άλλα πρωτόκολλα είναι:

Radio Resource Connection (RRC): Διαχειρίζεται τη χρήση ραδιοπόρων μεταξύ του UE και του eNodeB. Οι λειτουργίες του RRC περιλαμβάνουν τη σηματοδότηση, τον έλεγχο παραδόσεως (handover control) και την επιλογή / επανεπιλογή (selection / re-selection) των κυψελών.

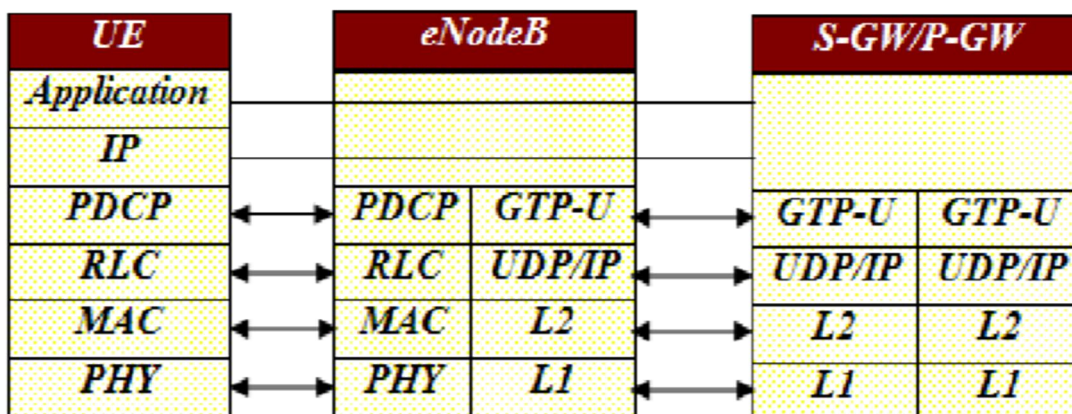
Packet Data Convergence Protocol (PDCP): Εκτελεί την IP κεφαλίδα συμπίεσης και τις λειτουργίες που σχετίζονται με την ασφάλεια.

Radio Link Control (RLC): Εκτελεί την τμηματοποίηση και την αλληλουχία των δεδομένων που αποστέλλονται από PDCP καθώς και την διόρθωση σφαλμάτων.

Medium Access Control (MAC): Κάνει τον χρονοπρογραμματισμό και την ιεράρχηση της χρήσης του φυσικού στρώματος (PHY).

Physical Layer (PHY): Αναφέρεται στο μέσο μετάδοσης. Περιλαμβάνει τη χρήση των λειτουργιών του κώδικα διαίρεσης πολυπλεξίας.

Η διεπαφή μεταξύ του UE και του eNodeB αναφέρεται ως Uu διεπαφή και η διεπαφή μεταξύ του eNodeB και του MME αναφέρεται ως S1 διεπαφή.



Σχήμα 2.9: Στοιβά πρωτοκόλλων UP από το UE σε S-GW / P-GW

Το σχήμα 2.9 δείχνει το πρωτόκολλο επιπέδου χρήστη που υπάρχει μεταξύ UE και S-GW / P-GW. Και πάλι η διεπαφή μεταξύ του UE και του eNodeB είναι η διεπαφή Uu και μεταξύ του eNodeB και της πύλης S-GW είναι η διεπαφή S1. Οι πύλες S-GW και P-GW συνδέονται με τη διεπαφή S5 / S8. Το πρωτόκολλο UP είναι παρόμοιο με το πρωτόκολλο CP με τη βασική διαφορά ότι το CP μεταφέρει πακέτα δεδομένων σηματοδότησης, ενώ το UP φέρει τα πακέτα δεδομένων του χρήστη [5].

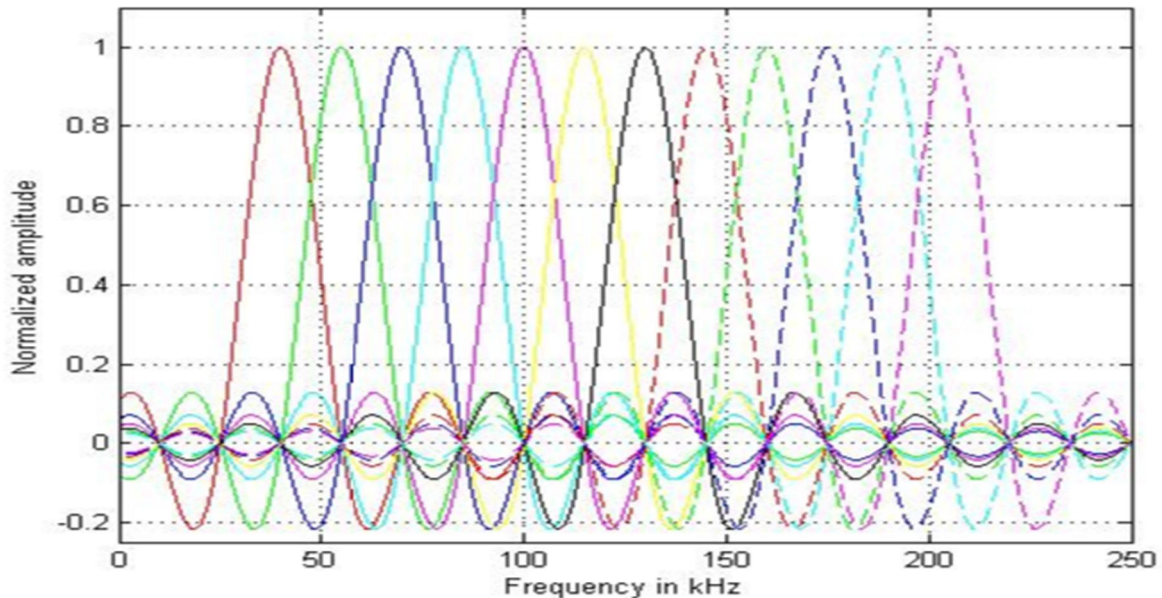
Κεφάλαιο 3: LTE Τεχνολογίες Ράδιο- πρόσβασης

Οι προγενέστερες τεχνολογίες, όπως το UMTS χρησιμοποιεί το WCDMA ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, ενώ το GSM χρησιμοποιεί το TDMA για την προσέγγιση της πολλαπλής πρόσβασης με πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας. Όλες αυτές οι τεχνολογίες είχαν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Οι περισσότερες από τις μεθόδους πρόσβασης στις παλαιότερες τεχνολογίες επέβαλαν περιορισμούς σχετικά με την χωρητικότητα, την κάλυψη και την απόδοση του συστήματος. Με τις απαιτήσεις της 3GPP καθορίζεται για το LTE, η αλλαγή στην τεχνολογία πρόσβασης και έτσι η τεχνολογία κατευθύνεται προς OFDMA [5].

3.1 Εισαγωγή στην OFDM

Η ανάγκη μεγάλης φασματικής απόδοσης μας οδήγησε στο OFDM όπου τα σήματα είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Σε Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας, οι χρήστες διαχωρίζονται μεταξύ τους φασματικά με πολλαπλούς χρήστες που χρησιμοποιούν χωριστά κανάλια συχνότητας και το εύρος ζώνης του καναλιού είναι ίσο με το εύρος ζώνης μετάδοσης.

Μια απλή διάταξη διαίρεσης συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (FDMA), θα είναι ότι πολλαπλά κανάλια συχνότητας τοποθετημένα σειριακά. Για χαμηλότερες παρεμβολές από γειτονικά κανάλια, η μπάντα περιφρούρησης (Guard band - Gb) είναι απαραίτητη η οποία αυξάνει τελικά το εύρος ζώνης του συστήματος και μειώνει την φασματική απόδοση [5].



Σχήμα 3.1: 12 OFDM υποφέρουσες σε ένα ενιαίο Resource Block

Βασική ιδέα είναι η χρησιμοποίηση ενός μεγάλου αριθμού ορθογώνιων υποφερουσών ταυτόχρονα. Το Σχήμα 3.1 δείχνει την δέσμη των 12 ορθογώνιων υποφερουσών που τοποθετούνται επικαλύπτοντας η μία την άλλη με τέτοιο τρόπο ώστε η παρεμβολή σε κάθε υποφέρουσα λόγω γειτονικών υποφερουσών κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας να είναι ελάχιστη. Η απόσταση μεταξύ υποφερουσών στο παραπάνω σχήμα είναι 15 kHz, δηλαδή η απόσταση από κορυφή σε κορυφή της κάθε υποφερούσας είναι 15 kHz. Αυτά τα μπλοκ των 12 υποφερουσών σχηματίζουν ένα Physical Resource Block (PRB) με εύρος ζώνης 180 kHz και στο πεδίο του χρόνου, αυτές οι υποφέρουσες έχουν διάρκεια 0,5 ms. Στα Resource Block (RB) θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο κεφάλαιο 4.

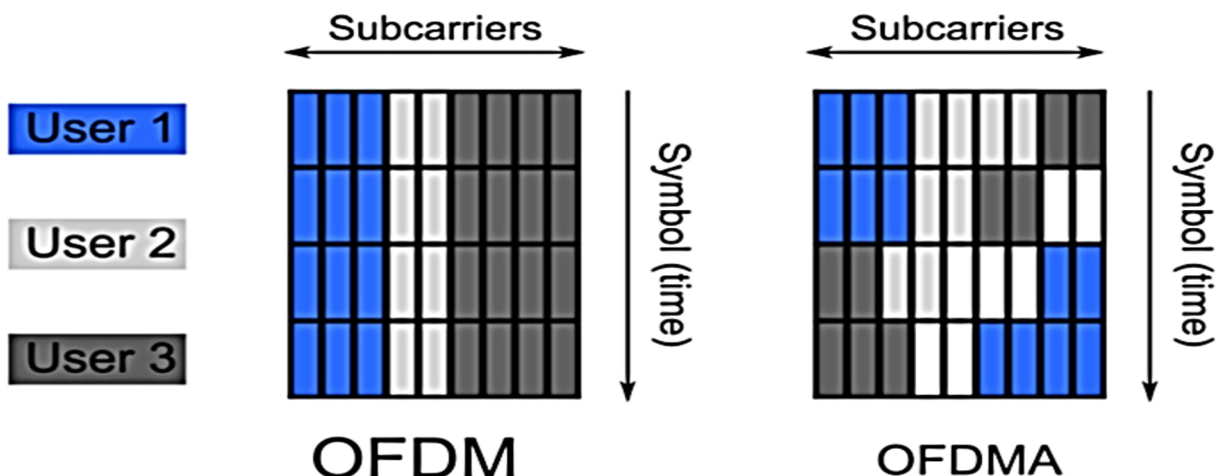
Οι εγγενείς ιδιότητες που καθιστούν την OFDM μια καλύτερη επιλογή ράδιο πρόσβασης είναι:

- Καλύτερη ανοχή έναντι selective fading που οφείλεται στη χρήση πολλαπλών υποφερουσών αφού έτσι μειώνεται το εύρος ζώνης του σήματος.
- Η προσαρμογή ζεύξης (Link adaptation) και ο προγραμματισμός στο πεδίο της συχνότητας.

- Απλούστερη αρχιτεκτονική του δέκτη με την χρήση τεχνικών της Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος (Digital Signal Processing-DSP).

3.1.1 Downlink: Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Από την εισαγωγή των μικρών αλλά ισχυρών (Digital signal processor - επεξεργαστής ψηφιακού σήματος) οι τεχνικές OFDM μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες. Στο downlink, το LTE χρησιμοποιεί OFDMA, η οποία είναι η πολλαπλή πρόσβαση που επιτυγχάνεται με την τεχνική OFDM, που επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Στην OFDMA το κανάλι διαιρείται σε πολλά στενά υποκανάλια που μεταδίδουν παράλληλα. Αυτό αυξάνει τη διάρκεια συμβόλου και έτσι μειώνεται το inter symbol interference (ISI). Στο ISI θα αναφερθούμε παρακάτω στο κεφάλαιο 4. Το κύριο πλεονέκτημα σε OFDMA είναι η ικανότητά της να διαθέτει υποφέρουσες δυναμικά, επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Η αρχή αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2 παρακάτω.

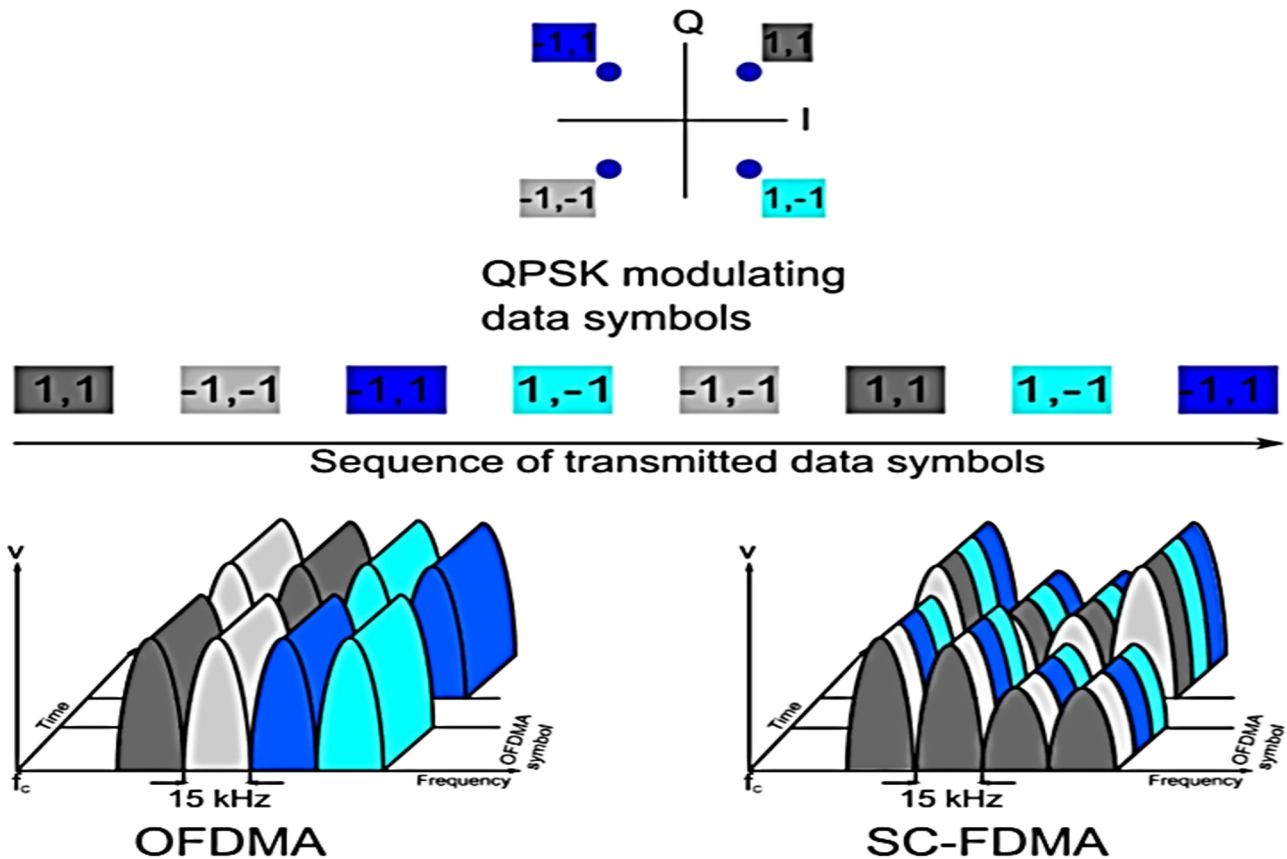


Σχήμα 3.2: κατανομή υποφερουσών σε OFDM και OFDMA. Με την αντιστοίχιση διαφορετικών OFDM υπο-κανάλια, FDMA επιτυγχάνεται.

3.1.2 Uplink: Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

Στην ανοδική ζεύξη δεν χρησιμοποιούμε την OFDMA τεχνική διότι αυτή απαιτεί υψηλή Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). Αυτό σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας των ενισχυτών ισχύος στον πομπό, πρέπει να χαμηλώσει αρκετά το οποίο με τη σειρά του μειώνει την αποτελεσματικότητα του ενισχυτή. Αυτό δεν είναι πρόβλημα στην καθοδική ζεύξη (downlink) καθώς η ισχύς είναι πολύ πιο άφθονη από την πλευρά του eNodeB σε σύγκριση με τον UE που λειτουργεί με μπαταρία. Ως εκ τούτου, για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του UE, στο uplink χρησιμοποιείται SC-FDMA.

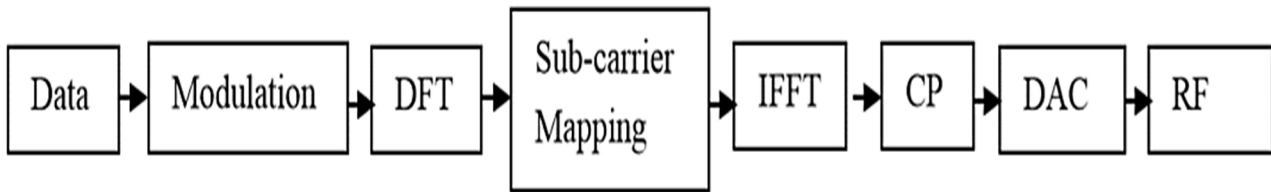
Το SC-FDMA μπορεί να θεωρηθεί ως ένα Discrete Fourier Transform (DFT) – διευρυμένου φάσματος (spread) OFDMA χρησιμοποιώντας τα σήματα δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και την μετατροπή αυτών σε πεδίο συχνότητας από ένα DFT πριν την ανάλυση μέσω OFDMA διαμόρφωσης. Αυτές οι τεχνικές μειώνουν τη στιγμιαία ισχύ μετάδοσης, αυξάνοντας την απόδοση του ενισχυτή ισχύος και έτσι μειώνεται η πολυπλοκότητα του δέκτη. Παράλληλα διατηρείται η ευελιξία του εύρους ζώνης (bandwidth) εκχώρησης. Η χρήση SC-FDMA επιτρέπει τη χρήση μονού φορέα συστήματος μετάδοσης, όπως στο GSM και στο Code Division Multiple Access (CDMA). Αυτοί οι τύποι των συστημάτων έχουν χαμηλή PAPR. Το SC-FDMA χρησιμοποιεί ένα σήμα εκπομπής μονής φέρουσας σε αντίθεση με το OFDMA που χρησιμοποιεί ένα πολλαπλό φορέα σύστημα μετάδοσης. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια γραφική σύγκριση των OFDMA και SC-FDMA.



Σχήμα 3.3: Μετάδοση μιας σειράς συμβόλων QPSK τόσο OFDMA και SC-FDMA

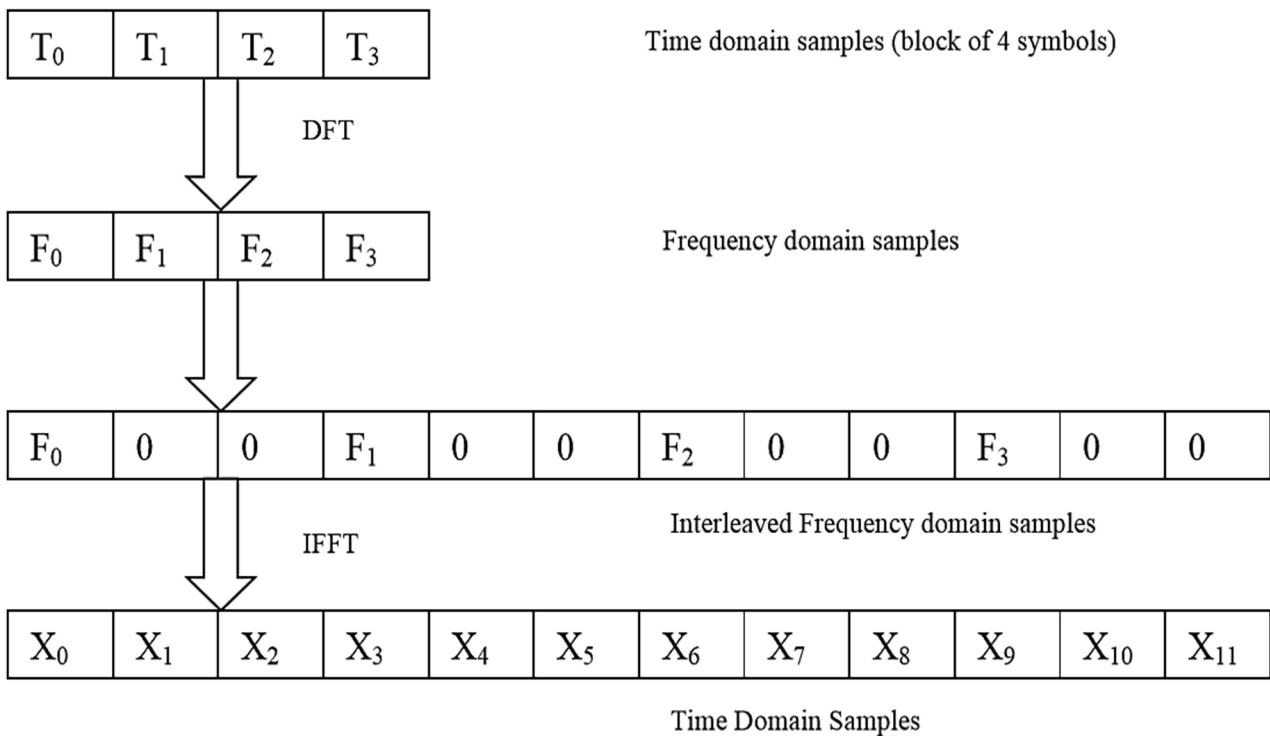
Στο SC-FDMA, τα σήματα χτίστηκαν πάνω σε μονάδες των 12 υποφορέων. Ωστόσο, στο σχήμα 3.3 υπάρχουν μόνο τέσσερις υποφέρουσες που χρησιμοποιούνται σε δύο περιόδους συμβόλου και απεικονίζονται για την περίπτωση QPSK διαμόρφωσης. Η προφανής διαφορά μεταξύ OFDMA και SC-FDMA είναι ότι η OFDMA μεταδίδει τέσσερα σύμβολα δεδομένων QPSK παράλληλα, ενώ η SC-FDMA μεταδίδει τα τέσσερα σύμβολα δεδομένων QPSK σε σειρά [6].

Έτσι, η κύρια διαφορά μεταξύ OFDMA και SC-FDMA στα δεδομένα είναι ότι στο OFDMA, τα σύμβολα μεταφέρονται από μεμονωμένους υποφορείς ενώ στη SC-FDMA, τα σύμβολα μεταφέρονται από μια ομάδα των υποφερόντων ταυτόχρονα. [5]



Σχήμα 3.4: σχήμα διαμόρφωσης SC-FDMA

Το σχήμα 3.4 δείχνει την ροή των δεδομένων για το SC-FDMA. Η 64 Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM) διαμόρφωση πραγματοποιείται στα δεδομένα. Στη συνέχεια εκτελείται ο DFT για να ληφθούν τα δεδομένα στο πεδίο συχνότητας. Το Sub-carrier mapping είναι η διαδικασία για την εξάπλωση των δειγμάτων στο πεδίο της συχνότητας των διαμορφωμένων δεδομένων.



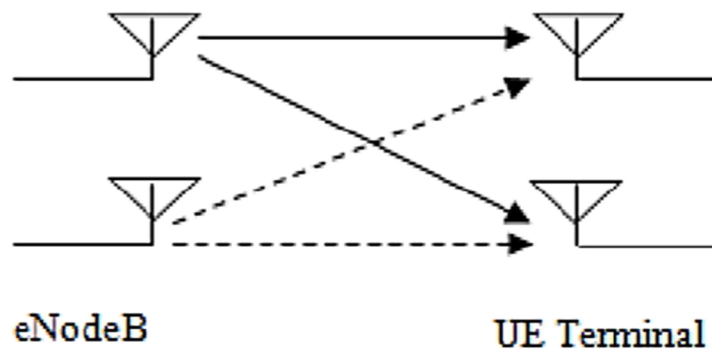
Σχήμα 3.5: Παράσταση των παρεμβαλλόμενων SC-FDMA στο πεδίο του χρόνου

Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει τη διαδικασία Sub-carrier mapping που εκτελείται παραπάνω με απλή τεχνική διαστρωμάτωσης (simple inter-leaving technique). Τα δείγματα στο πεδίο της συχνότητας που λαμβάνονται μετά τον DFT διαστρωματώνονται και τοποθετούνται σε μπλοκ των 12 υποφορέων. Τα εναπομένοντα κενά υποφορέων γεμίζουν με μηδέν. Ο Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)

εκτελείται στα δείγματα στο πεδίο της συχνότητας για να ληφθούν τα δείγματα στο πεδίο του χρόνου που είναι ομοιόμορφα καταναμημένα [5].

3.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Η σημαντική αλλαγή στην τεχνολογία του LTE που προτείνεται από το 3GPP στην Release 8, είναι η εφαρμογή του MIMO στο ασύρματο περιβάλλον.



Σχήμα 3.6: Μια διαμόρφωση 2x2 MIMO

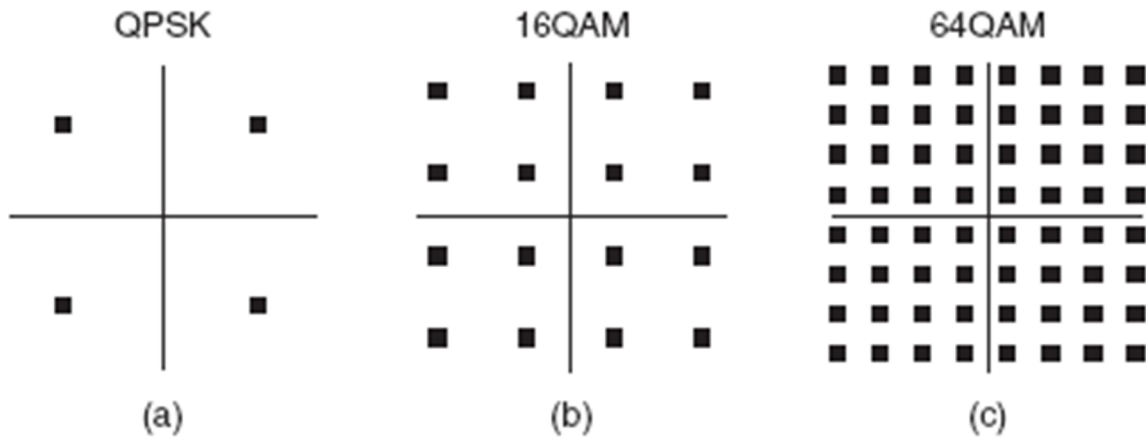
Το Σχήμα 3.6 δείχνει μια 2x2 MIMO διαμόρφωση με δύο κεραίες εκπομπής στην πλευρά του eNodeB και δύο κεραίες στο UE. Δύο ταυτόχρονες ροές διαφορετικών δεδομένων, που μεταδίδονται από κάθε μια κεραία εκπομπής του eNodeB και λαμβάνονται ταυτόχρονα. Βασική ιδέα για να διαχωρίζονται οι ροές δεδομένων, από ποια κεραία εκπομπής προέρχεται η κάθε μια, κατά την λήψη στο UE, είναι να χρησιμοποιηθεί διαφορετική τεχνική προκωδικοποίησης και διαφορετικά σύμβολα αναφοράς για την κάθε κεραία εκπομπής.

Τα σύμβολα αναφοράς στο LTE χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού. Διαφορετικά σύνολα συμβόλων αναφοράς χρησιμοποιούνται για διαφορετικές κεραίες μετάδοσης έτσι ώστε η κεραία λήψης να μπορεί να διακρίνει τα σήματα που προέρχονται από διαφορετικές κεραίες. Επίσης, λόγω του ότι η ροή δεδομένων χωρίζεται πλέον, καλύτερος λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) για

κάθε κανάλι πρέπει να διασφαλιστεί. Το UE κάνει την εκτίμηση του καναλιού με βάση τις μετρήσεις των συμβόλων αναφοράς, υπολογίζει το συντελεστή του weight matrix και το αναφέρει στον eNodeB που τον σερβίρει. Ο eNodeB τότε προσαρμόζει το επίπεδο ισχύος για διαφορετικά κανάλια ανάλογα με το weight matrix ώστε να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόχου (closed loop spatial multiplexing) και ο weight matrix ονομάζεται Precoding Matrix Indicator (PMI) [5].

3.3 Τεχνικές Διαμόρφωσης

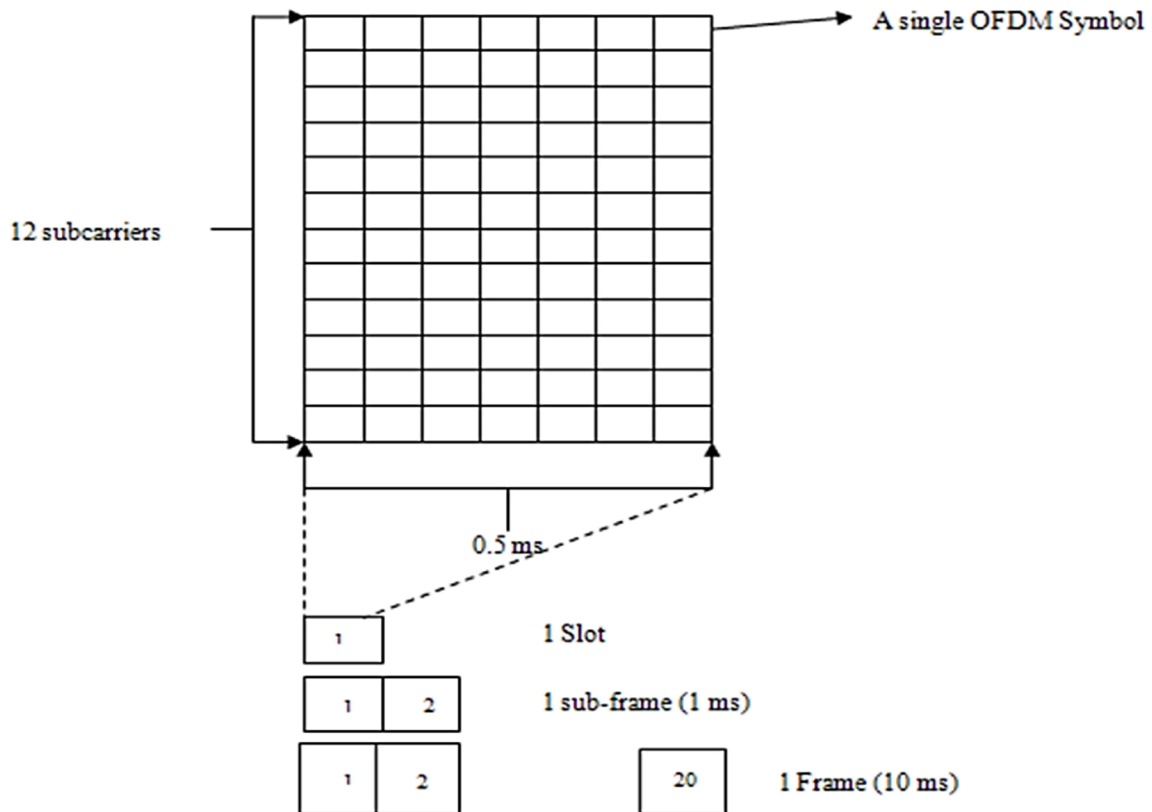
Υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) LTE. Αυτές είναι Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), 16-QAM και 64-QAM. Αυτά τα διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης εφαρμόζονται μόνο στην κατερχόμενη ζεύξη. Η χρήση των συστημάτων διαμόρφωσης εξαρτάται από την εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού. Εάν η ποιότητα του καναλιού είναι καλή, τότε χρησιμοποιείται υψηλότερη διαμόρφωση, όπως 16-QAM ή 64-QAM. Ανώτερης τάξης σχήματα διαμόρφωσης μας εξασφαλίζουν μεγαλύτερο αριθμό bits ανά σύμβολο, αλλά μειώνεται η απόσταση μεταξύ των συμβόλων. Το υψηλότερης τάξης σχήμα διαμόρφωσης λειτουργεί καλά, όταν η ποιότητα του καναλιού είναι καλή και ο θόρυβος συν την παρεμβολή είναι μικρότερος από το λαμβανόμενο σήμα. Αλλά εάν η ποιότητα του καναλιού είναι κακή, και παρεμβολές συν το θόρυβο, ξεπεράσουν το πραγματικό σήμα, τότε η αποκωδικοποίηση των bits από το λαμβανόμενο σήμα καθίσταται αδύνατη. Με την ισχύς του σήματος να παραμένει σταθερή, η απόσταση μεταξύ των συμβόλων πρέπει να αυξηθεί, για να διατηρηθεί η αναγνωσιμότητα του σήματος. Αυτό σημαίνει ότι η διαμόρφωση πρέπει να μειωθεί σε QPSK [5].



Σχήμα 3.7: Αστερισμούς σήματος για το (α) QPSK, (β) 16QAM και (γ) 64QAM.

3.4 LTE δομή πλαισίου

Ένα απλό PRB θεωρείται η μικρότερη μονάδα σε ένα πλαίσιο LTE και έχει χρονική διάρκεια 0,5 ms. Ένα απλό PRB μπορεί να θεωρηθεί από ένα δισδιάστατο πλέγμα των υποφερουσών και σύμβολα. Αυτό αποτελείται από μια ομάδα των 12 υποφερουσών και έχει 6 ή 7 σύμβολα ανάλογα με το μήκος του CP.



Σχήμα 3.8: Δομή πλαισίου LTE

Το σχήμα 3.8 δείχνει τη δομή του πλαισίου LTE. Ένα απλό PRB αναφέρεται ως ένα slot στο πλαίσιο LTE. Δύο slots κάνουν ένα υποπλαίσιο με διάρκεια από 1 ms. 20 PRBs σχηματίζουν ένα απλό πλαίσιο (Frame) που έχει μήκος 10 ms. Η δομή του πλαισίου είναι ίδια για την κατερχόμενη ζεύξη (OFDMA) και την ανερχόμενη ζεύξη (SC-FDMA). Τα σύμβολα αναφοράς χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού. Τα σύμβολα αναφοράς τοποθετούνται με ειδικό σχέδιο στα PRBs για την αποτελεσματική εκτίμηση καναλιού [5].

Κεφάλαιο 4: LTE Physical Layer

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τις αρχές του LTE, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε πώς λειτουργεί το χαμηλότερο στρώμα του, το φυσικό επίπεδο (Physical Layer). Κατά την διάρκεια αυτού του κεφαλαίου θα δοθεί, μία εισαγωγή στο φυσικό επίπεδο, καθώς και μία επισκόπηση, του πώς το Physical Layer κατασκευάζεται.

4.1 Εισαγωγή στο Physical Layer

Το φυσικό επίπεδο του LTE καλύπτει την downlink και uplink μετάδοση μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και του σταθμού βάσης (eNB). Το φυσικό στρώμα υποστηρίζει δύο συστήματα πολλαπλής πρόσβασης. Αυτά τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης είναι το OFDMA και το SC-FDMA, τα οποία θα συζητηθούν λεπτομερώς αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο. Επιπλέον τα OFDMA και SC-FDMA, υποστηρίζονται από τη χρήση Frequency Division Duplexing (FDD) και Time Division Duplexing (TDD) [6].

4.2 Αρχιτεκτονική Επισκόπηση

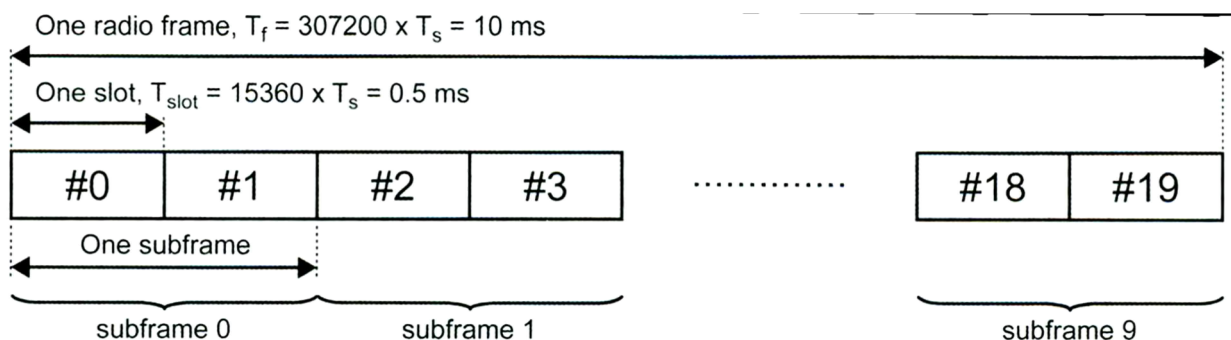
Υπάρχουν δύο τύποι καναλιών φυσικού στρώματος. Αυτοί οι δύο τύποι είναι τα φυσικά κανάλια, τα οποία μεταφέρουν πληροφορίες από τα υψηλότερα στρώματα, καθώς και δεδομένα, και τα φυσικά σήματα, τα οποία παράγονται στο φυσικό στρώμα για την αναγνώριση των κυψελών, την εκτίμηση του ράδιο-καναλιού, και το συγχρονισμό του συστήματος. Δύο τύποι πλαισίων ορίζονται επίσης στο φυσικό στρώμα, ο τύπος 1 για FDD και ο τύπος 2 για TDD.

4.2.1 Δομή Πλαισίου

Η δομή του πλαισίου ορίζει το πλαίσιο (frame), το υποπλαίσιο (subframe), την υποδοχή (slot) και τον υποφορέα (subcarrier) στο πεδίο του χρόνου. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 10 υποπλαίσια, κάθε υποπλαίσιο αποτελείται από δύο slot και κάθε slot από 7 υποφορείς.

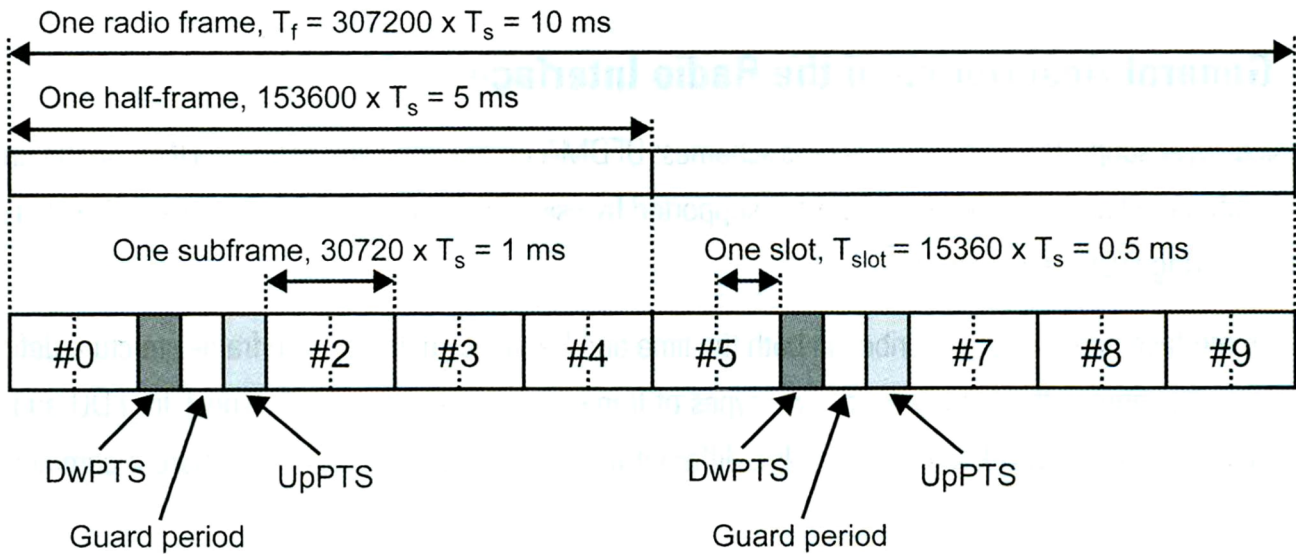
$$1 \text{ frame} = 10 \text{ subframes} = 20 \text{ slots} = 140 \text{ subcarriers}$$

Η απόσταση μεταξύ των subcarriers είναι 15 KHz, επομένως η χρονική διάρκεια του subcarrier είναι $1/15000 = 66.67 \mu\text{sec}$. Το κάθε subcarrier περιέχει 2048 σύμβολα, άρα η διάρκεια του συμβόλου είναι $T_s = 1 / (15000 \times 2048) = 32.55 \text{ nsec}$. Κάθε χρονική διάρκεια ορίζεται σε μονάδες του T_s .



Σχήμα 4.1: Δομή Πλαισίου τύπου 1 με τη λειτουργία FDD.

Η δομή του πλαισίου που φαίνεται στο σχήμα 4.1 είναι τύπος πλαισίου 1 ορίζεται για FDD λειτουργία. Κάθε πλαίσιο περιλαμβάνει 10 υποπλαίσια, το κάθε υποπλαίσιο αποτελείται από 2 slots. Ένα ράδιο πλαίσιο έχει μήκος 10 ms. Στη λειτουργία FDD, η ανερχόμενη (uplink) και κατερχόμενη (downlink) ζεύξη χρησιμοποιούν την ίδια δομή πλαισίου ωστόσο, χρησιμοποιούν διαφορετικά φάσματα. Η δομή πλαισίου τύπου 2 ορίζεται για τη λειτουργία TDD, και φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Δομή πλαισίου τύπου 2 για τη λειτουργία TDD.

Στη δομή πλαισίου τύπου 2 κάθε ράδιο πλαίσιο έχει μήκος 10 ms και αποτελείται από δύο μισά πλαίσια (5 ms το καθένα). Επιπλέον, κάθε μισό πλαίσιο αποτελείται από 5 υποπλαίσια, τα οποία είναι μήκους 1 ms.

Τα υποπλαίσια μπορούν να διαιρεθούν σε πρότυπο υποπλαίσια και ειδικά υποπλαίσια. Τα ειδικά υποπλαίσια αποτελούνται από τρία πεδία:

1. DwPTS – Downlink Pilot Time Slot
2. GP – Guard Period
3. UpPTS - Uplink Pilot Time Slot.

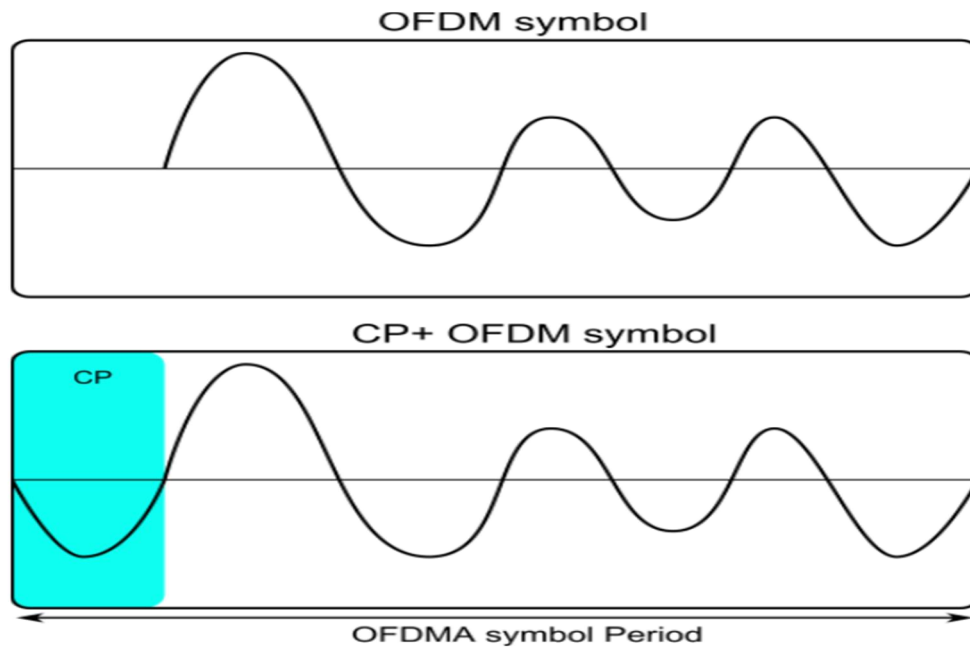
Αυτά τα τρία πεδία χρησιμοποιούνται επίσης σε TD-SCDMA και έχουν μεταφερθεί στο LTE TDD (TD-LTE). Τα πιλοτικά σύμβολα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού και την διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης. Τα πεδία έχουν χωριστή ρύθμιση ως αναφορά το μήκος, αν και το συνολικό μήκος των τριών μαζί, πρέπει να είναι 1ms.

4.2.2 Inter-Symbol Interference (ISI) and cyclic prefixing

Το φαινόμενο που στοιχειώνει τις περισσότερες από τις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης είναι οι παρεμβολές μεταξύ συμβόλων (Inter Symbol Interference-ISI). Το ISI προκαλείται από τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών (multipath) η οποία προκαλεί την επιμήκυνση των λαμβανόμενων σημάτων στο πεδίο του χρόνου. Αυτό προκαλεί τα bits να παρεμβαίνουν το ένα το άλλο, έτσι έχουμε υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος. Για να αποφευχθεί αυτό, ένα κυκλικό πρόθεμα (Cyclic Prefix- CP) προστίθεται στο σύμβολο το οποίο είναι απλά ένα αντίγραφο της ουράς του ίδιου του συμβόλου και προστίθεται κατά την έναρξη του συμβόλου. Το CP είναι προτιμότερο από το Guard Interval (GI), το οποίο είναι ο διαχωρισμός των συμβόλων στο πεδίο του χρόνου από ένα χρονικό διάστημα που αφήνουμε ανάμεσα στα σύμβολα για την εξουδετέρωση της εξάπλωσης της καθυστέρησης (delay spread) που προκαλείται από τις πολλαπλές διαδρομές (multipath) που ακολουθεί το σήμα. Αυτό συμβαίνει επειδή με τη χρήση του GI, το φίλτρο του δέκτη πρέπει να εξετάσει την καθυστέρηση που προστίθεται στην εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread). Με τη χρήση του CP, το ρεύμα δεδομένων γίνεται συνεχής και αυτό συντομεύει την καθυστέρηση στο φίλτρο του δέκτη.

Υπάρχουν ουσιαστικά δύο ομάδες CP που χρησιμοποιούνται βάση τη διάρκεια τους. Το μακρύ CP διάρκειας 16.67 μ s και το σύντομο CP με διάρκεια 4.67 μ s. Το μακρύ CP χρησιμοποιείται σε δύσκολα περιβάλλοντα multipath, όπου η εξάπλωση του λαμβανόμενου σήματος (delay spread) είναι πολύ μεγαλύτερη.

Με την εισαγωγή κυκλικού προθέματος, τα OFDM και SC-FDMA συστήματα είναι ικανά να προστατευτούν έναντι πολλαπλών διαδρομών εξάπλωσης (multipath spreads) έως 10 χιλιόμετρα. Στο σχήμα 4.3 το τελευταίο τμήμα του σήματος OFDM προστίθεται στην αρχή του OFDM σήματος. Το μήκος του κυκλικού προθέματος επιλέγεται να δεχθεί τη μέγιστη καθυστέρηση εξάπλωσης του ασύρματου καναλιού [6].

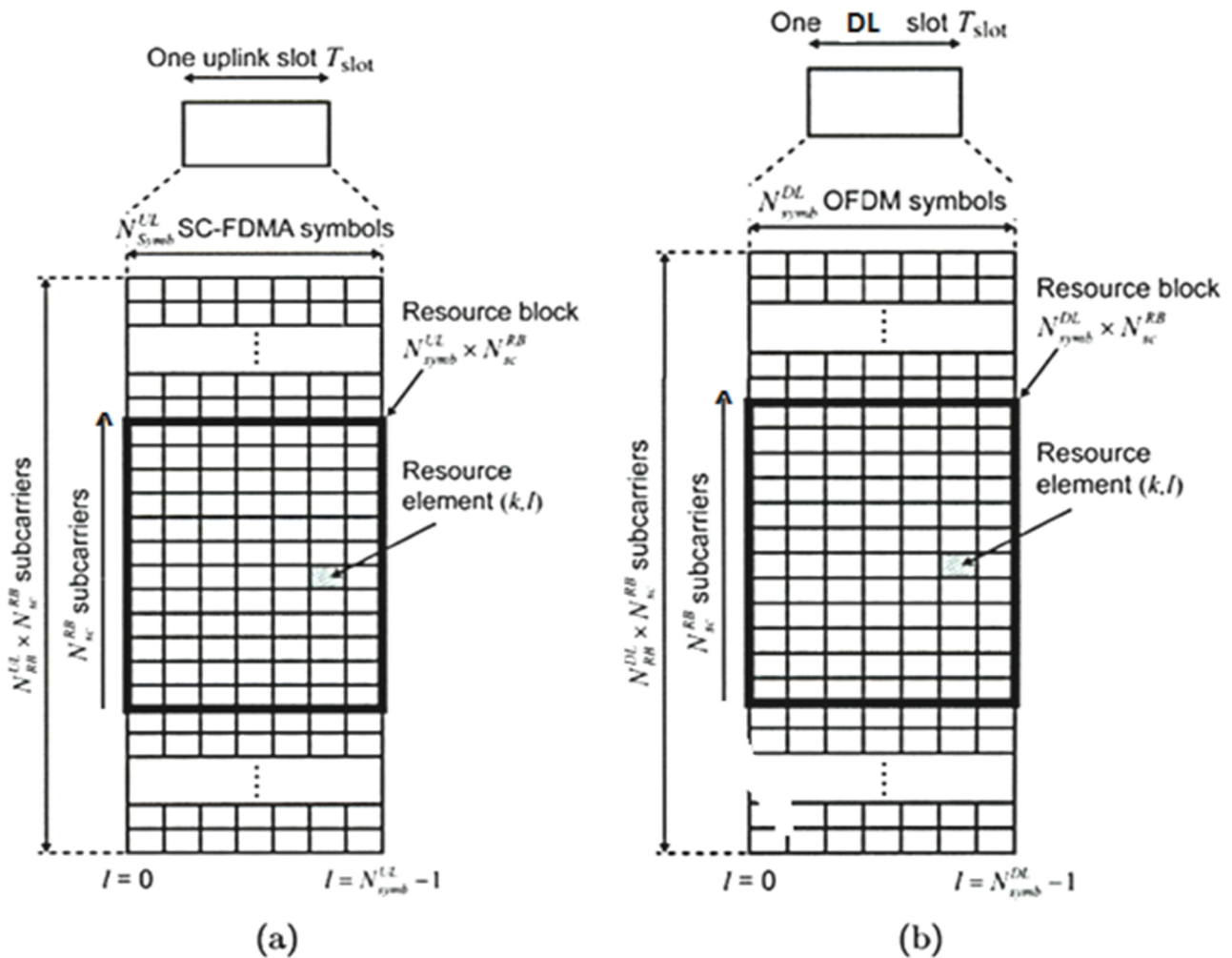


Σχήμα 4.3: OFDM σύμβολο έναντι του cyclic prefix + OFDM σύμβολο

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καθυστέρηση εξάπλωσης (delay spreads) αποτελεί τη μεταβολή στην καθυστέρηση διαδρομής, και μπορεί να ερμηνευθεί ως η διαφορά στο χρόνο άφιξης μεταξύ των ακραίων στοιχείων πολλαπλών διαδρομών, δηλαδή η πρώτη και η τελευταία ανάκλαση.

4.2.3 Resource elements and Blocks

Μέσα στο φυσικό στρώμα, ένα στοιχείο πόρου (Resource element) είναι η μικρότερη μονάδα και έχει διάρκεια ενός συμβόλου (OFDM ή SC-FDMA) στο πεδίο του χρόνου, και μίας υποφέρουσας στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 4.4: Resource πλέγμα για 1 uplink slot (a) και 1 downlink slot (b)

Το Resource Block (RB) είναι η μικρότερη μονάδα, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί. Αυτό καταλαμβάνει φυσικά 180 kHz στη συχνότητα, και 0,5 ms στο χρόνο. Έτσι, για ένα εύρος ζώνης καναλιού 10 MHz (συμπεριλαμβανομένων guard spaces, κ.λπ.), έχουμε 50 RBs. Για το μεγαλύτερο κανάλι που έχει εύρος ζώνης 20 MHz, υπάρχουν 100 RBs διαθέσιμα.

Στα περισσότερα συστήματα το εύρος ζώνης μετάδοσης είναι σταθερό, ωστόσο τα OFDM συστήματα επιτρέπουν κανάλια μεταβλητού εύρους ζώνης. Το Subcarrier spacing (15kHz) καθορίζεται από το αντίστροφο του χρόνου ολοκλήρωσης του FFT μετασχηματισμού. Στο LTE δίνεται η ευελιξία να έχουμε έξι διαφορετικά εύρη ζώνης μετάδοσης για να διαλέξουμε. Τα διαφορετικά εύρη ζώνης μετάδοσης φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Διαμόρφωση εύρους ζώνης μετάδοσης. (3GPP 2011a)

| | | | | | | |
|-------------------------|------|-----|-----|----|------|-----|
| Channel bandwidth [MHz] | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Configuration in MHz | 1.08 | 2.7 | 4.5 | 9 | 13.5 | 18 |
| Configuration in RB | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

Το εύρος ζώνης του καναλιού που ορίζεται σε MHz, αντιπροσωπεύει το ονομαστικό καταλαμβανόμενο κανάλι. Βασικά, αυτό είναι το εύρος ζώνης το οποίο παρέχει ο φορέας εκμετάλλευσης. Στην Ευρώπη κάποιες εταιρίες παρέχουν LTE με εύρος ζώνης 10 MHz, ενώ άλλες με 20 MHz. Το εύρος ζώνης μετάδοσης το οποίο ορίζεται σε μονάδες RB αντιπροσωπεύουν το μέγιστο αριθμό RB που μπορεί να μεταδοθεί, για οποιοδήποτε δεδομένο εύρος ζώνης του καναλιού.

Η αρχιτεκτονική επισκόπηση, ωστόσο, δεν καλύπτει μόνο τη φυσική κατανομή των Resource Blocks και τη δομή των πλαισίων του LTE. Ακολουθεί η σηματοδότηση φυσικού επιπέδου, το οποίο είναι ένα βασικό μέρος του φυσικού επιπέδου, δεδομένου ότι περιέχει διαφορετικές μεθόδους διόρθωσης λάθους [6].

4.2.4 Σηματοδότηση Φυσικού Επιπέδου

Εκτός από τους φυσικούς φορείς των δεδομένων, οι οποίοι είναι RBs υπάρχουν δύο βασικά μέτρα της απόδοσης σε συστήματα επικοινωνιών. Ρυθμός μετάδοσης (throughput) και χρόνος απόκρισης (latency). Ο ρυθμός μετάδοσης είναι το πραγματικό ποσό των δεδομένων εκπομπής και συνήθως μετράται σε bit ανά δευτερόλεπτο.

Για την αντιμετώπιση χαμηλού ρυθμού μετάδοσης και υψηλό χρόνο απόκρισης, το LTE χρησιμοποιεί μια σειρά μηχανισμών στο φυσικού επιπέδου. Δύο από αυτούς τους μηχανισμούς είναι το Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) και το Adaptive

Modulation and Coding (AMC). Το AMC θα συζητηθεί στην ενότητα 4.3 μαζί με τα σχήματα διαμόρφωσης.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα αποστέλλονται αξιόπιστα από τον ένα κόμβο στον άλλο, χρησιμοποιείται η Αυτόματη Αίτηση Επανάληψης- Automatic Repeat Request (ARQ). Αυτός είναι ένας μηχανισμός εντοπισμού σφαλμάτων, ο οποίος ζητεί την αναμετάδοση από το δέκτη, εντός ενός χρονικού ορίου. Το HARQ είναι ένας συνδυασμός της ARQ, και της προς τα εμπρός διόρθωσης σφαλμάτων- Forward Error Correction (FEC), η οποία είναι τεχνική διόρθωσης σφαλμάτων προσθέτοντας πλεονασμό στο μεταδιδόμενο σήμα. Ένα απλό παράδειγμα FEC παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 4.2 .

Πίνακας 4.2: Παράδειγμα Forward Error Correction (FEC).

| Triplet received | Interpreted as |
|------------------|----------------|
| 000 | 0 (error free) |
| 001 | 0 |
| 010 | 0 |
| 100 | 0 |
| 111 | 1 (error free) |
| 110 | 1 |
| 101 | 1 |
| 011 | 1 |

Λαμβάνοντας υπόψη το παράδειγμα ότι η δυαδική ακολουθία 101_2 πρόκειται να μεταδοθεί, στη συνέχεια, με τη χρήση FEC αντί μόνο του μεταδιδόμενου κάθε φορά bit, μία τριάδα bits μεταδίδονται. Έτσι, η ακολουθία 101_2 θα οδηγήσει σε 111000111_2 . Το προστιθέμενο πλεόνασμα επιτρέπει ένα σφάλμα σε οποιοδήποτε από τα τρία δείγματα πρέπει να διορθωθεί.

Υπάρχει δύο είδη HARQ. Ο τύπος I HARQ ο οποίο είναι η απλούστερη μορφή του HARQ, και ο τύπος II HARQ, όπου αυτός ο τύπος II, χρησιμοποιείται στο LTE. Στην πρώτη μετάδοση της ζωής πακέτων, ένα υποσύνολο των κωδικοποιημένων bits μεταδίδονται με αρκετές πληροφορίες για τον δέκτη ώστε να αποκωδικοποιήσει τις αρχικές πληροφορίες του πακέτου και το CRC, με μόνο μια μικρή ποσότητα του πλεονασμού, με αποτέλεσμα υψηλή αποδοτικότητα υπό καλές συνθήκες του καναλιού. Ωστόσο, εάν το πακέτο δεν έχει αποκωδικοποιηθεί σωστά, μια αναμετάδοση ενεργοποιείται. Όταν τα οφέλη της HARQ έρχεται στο φως μάλλον εκ νέου αποστέλλονται τα ίδια στοιχεία, η HARQ επιλέγει άλλο σύνολο των κωδικοποιημένων bits, που εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν τα αρχικά δυαδικά ψηφία πληροφορίας και ο κόμβος προορισμού προσθέτει αυτές τις νέες πληροφορίες σε ό, τι είχε λάβει νωρίτερα. Αυτή η διαδικασία HARQ είναι ένα πρωτόκολλο *‘σταμάτα και περίμενε’* (*‘stop-and-wait’*), πράγμα που σημαίνει ότι μόλις η διαδικασία HARQ έχει στείλει το πακέτο της, σταματάει και περιμένει μια *‘απάντηση’* (ACK/NACK) από τον τόπο προορισμού, πριν την αποστολή του επόμενου πακέτου. Σταματάει και περιμένει, έως ότου το πακέτο είτε έχει ληφθεί σωστά, ή το μέγιστο των αναμεταδόσεων έχουν επιτευχθεί· οπότε σε αυτή την περίπτωση η HARQ δηλώνει μια αποτυχία και δίνει το πακέτο στο ARQ στο επίπεδο RLC. Σε αυτό το σημείο AMC αναλαμβάνει [6].

Οι διαφορετικές εκδόσεις μετάδοσης πακέτων από τη διαδικασία HARQ περιέχει διαφορετικά μείγματα του πλεονασμού και των συστηματικών bits. Αυτές οι εκδόσεις ονομάζονται Πλεονάζον εκδόσεις (Redundancy Versions- RVs).

4.3 Adaptive Modulation and Coding (AMC)

Όταν η HARQ έχει δηλώσει μια αποτυχία στην αναμετάδοση, αυτή δίνει το πακέτο στο ARQ και η AMC αναλαμβάνει. Επιχειρεί να ταιριάζει με τις μεταδόσεις από τη διαδικασία HARQ στις συνθήκες του καναλιού, με σκοπό να επιλεγεί η κατάλληλη κωδικοποίηση. Σε ένα κανάλι με καλή ποιότητα η AMC θα χρησιμοποιήσει ένα υψηλό

σχήμα διαμόρφωσης, όπως 64-Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM), το οποίο χρησιμοποιεί λιγότερο πλεονασμό στη μετάδοση. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγαλύτερο μπλοκ μεταφοράς που πρέπει να μεταφέρονται στο διατιθέμενο κανάλι. Ωστόσο, αν το κανάλι είναι χαμηλής ποιότητας, η AMC θα επιλέξει μια κατώτερη τάξη διαμόρφωσης. Μια τέτοια διαμόρφωση είναι η Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK). Με την QPSK περισσότερα bits πλεονασμού θα αποσταλούν, προκειμένου να βελτιωθεί η πιθανότητα της υποδοχής, αλλά τότε, απασχολούν ένα μικρότερο μπλοκ μεταφοράς. Εάν το ποσοστό σφάλματος πακέτου είναι πολύ χαμηλό, αυτό σημαίνει ότι το βάθος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι σε υψηλό πλεονασμό. Αυτό οδηγεί σε ένα μικρότερο μέγεθος μπλοκ μεταφοράς, και έτσι μειώνει την απόδοση τελικά. Επιπλέον, αν το πακέτο είναι μεγάλο, τότε το ποσοστό σφάλματος πακέτου θα είναι υψηλό, και πάλι οδηγεί σε μειωμένη απόδοση.

Προκειμένου να δουλέψει η AMC απαιτείται ο eNB να ενημερώνεται σχετικά με την ποιότητα του καναλιού, όπως φαίνεται από τον UE. Αυτό γίνεται μέσω των πληροφοριών του Δείκτη Ποιότητας Καναλιού- Channel Quality Indicator (CQI), που αναφέρονται από τον UE στο uplink. Ο δείκτης CQI και το αντίστοιχο σχήμα διαμόρφωση του φαίνεται στον πίνακα 4.3 που ακολουθεί. [6]

Πίνακας 4.3: Το CQI δείχνει τον αντίστοιχο τύπο διαμόρφωσης.

| CQI Index | Modulation |
|-----------|--------------|
| 0 | Out of range |
| 1 | QPSK |
| 2 | QPSK |
| 3 | QPSK |
| 4 | QPSK |
| 5 | QPSK |
| 6 | QPSK |
| 7 | 16-QAM |
| 8 | 16-QAM |
| 9 | 16-QAM |
| 10 | 64-QAM |
| 11 | 64-QAM |
| 12 | 64-QAM |
| 13 | 64-QAM |
| 14 | 64-QAM |
| 15 | 64-QAM |

4.4 Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο έχουν περιγραφεί οι λεπτομέρειες του φυσικού επιπέδου. Αρχικά δόθηκε μία αρχιτεκτονική επισκόπηση του φυσικού επιπέδου του LTE. Το Φυσικό επίπεδο αποτελείται από αρκετούς μηχανισμούς διόρθωσης λάθους, οι οποίοι επιτρέπουν την ευκαιρία για μια χαμηλή πιθανότητα σφάλματος. Η χρήση και των δύο σχημάτων διαμόρφωσης, OFDMA για downlink και SC-FDMA για uplink, είναι δυνατή μόνο από την εισαγωγή των ισχυρών και των μικρών DSP (ψηφιακό επεξεργαστή σήματος- Digital signal processor). Αυτό δίνει μια σειρά βελτίωσης με βάση τον τρόπο πρόσβασης όπως φαίνεται στο OFDMA και χαμηλή κατανάλωση ισχύος όπως στο SC-FDMA.

Κεφάλαιο 5: Μετρήσεις στο LTE

5.1 Προσαρμογή ζεύξης (Link adaptation)

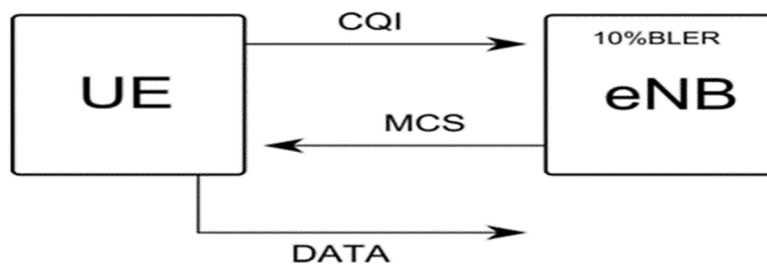
Η προσαρμογή ζεύξης (Link adaptation), ή προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (adaptive modulation and coding-AMC), είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες για να δηλώσει την αντιστοίχιση της διαμόρφωσης, της κωδικοποίησης και άλλες παραμέτρους του σήματος και του πρωτοκόλλου με τις συνθήκες σχετικά με τη ραδιοζεύξη (π.χ. το pathloss, την παρεμβολή που οφείλεται σε σήματα που προέρχονται από άλλους πομπούς, την ευαισθησία του δέκτη, το περιθώριο ισχύος των διαθέσιμο πομπό, κ.λπ.). Για παράδειγμα, το EDGE χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο προσαρμογής που προσαρμόζει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) ανάλογα με την ποιότητα του ραδιοκαναλιού, και ως εκ τούτου το ρυθμό μετάδοσης των bits και της αξιοπιστίας της μετάδοσης δεδομένων.

Η διαμόρφωση προσαρμοζόμενης ζεύξης (Adaptive link modulation) χρησιμοποιείται για να αξιοποιήσει καλύτερα την τρέχουσα ποιότητα του καναλιού. Αυτό το χαρακτηριστικό εξαρτάται από το Δείκτη Ποιότητας Καναλιού- Channel Quality Indicator (CQI). Το UE πραγματοποιεί την εκτίμηση του καναλιού και το αναφέρει στον eNodeB. Το UE κανονικά αναφέρει ξανά τον υψηλότερο δείκτη CQI που συνδέεται με το Modulation Coding Scheme (MCS) για το οποίο Block Error Rate (BLER) δεν υπερβαίνει το 10%, στο DL στρώμα μεταφοράς. Ο δείκτης CQI παίρνει τιμές μεταξύ 1 έως 15 ή μία τιμή CQI 0 αν το BLER υπερβαίνει το 10%, διότι το σήμα με BLER πάνω από 10% δεν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί, δεν ξεχωρίζει δηλαδή το σήμα πληροφορίας από τον θόρυβο. Τα σχήματα διαμόρφωσης που διατίθενται είναι 64-QAM, 16-QAM και QPSK αντίστοιχα σχετικά με την φθίνουσα σειρά ποιότητας του καναλιού (βλέπε πίνακα 4.3).

Η υψηλότερη τιμή CQI 15 δηλώνει την καλύτερη ποιότητα του καναλιού και έτσι υποστηρίζεται από το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης που είναι διαθέσιμο, δηλαδή το 64-QAM. Εκτός από το CQI, υπάρχουν και άλλες αναφορές εκτίμησης καναλιού όπως Rank Indicator (RI) και Precoding Matrix Indicator (PMI) που

σχετίζονται με την τεχνολογία MIMO. Οι μετρήσεις CQI αναφέρονται σε διάστημα ενός Transmission Time Interval (TTI), δηλαδή 1 ms. [5]

Η αναφορά CQI, χρησιμοποιεί μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σχετικά με τις συνθήκες κάτω ζεύξης, προκειμένου να αναφέρουν στο πρόγραμμα για το οποίο ο συνδυασμός της διαμόρφωσης και κωδικοποίησης θα είχε ως αποτέλεσμα το κατά 10% Block Error Ratio (BLER), αν είχε χρησιμοποιηθεί αυτός ο συνδυασμός. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η μέθοδος πώς το UE αναφέρει το CQI στον eNB.



Σχήμα 5.1: Το UE αναφέρει το CQI στον eNB και ο eNB απαντά με ένα δείκτη MCS

Μετά την αναφορά του UE για το CQI, ο eNB απαντά με ένα δείκτη MCS (Modulation and Coding Scheme). Στο σχήμα 5.1 το UE λαμβάνει το δείκτη MCS και με βάση αυτές τις πληροφορίες, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν πίσω, με την επιλεγμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση. [5]

Ο MCS είναι ένας δείκτης από 0 έως 31 ο οποίος υποδεικνύει στο UE, ποια διαμόρφωση και κωδικοποίηση θα πρέπει να χρησιμοποιήσει στην επόμενη μετάδοση, οι τιμές του δείκτη MCS αντιστοιχίζονται με τις τιμές CQI και τα σχήματα διαμόρφωσης στον παρακάτω πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Τιμές MCS Vs CQI, σχήματα διαμόρφωσης και τιμές φασματικής απόδοσης.

| MCS | CQI | Modulation | Spectral Efficiency | MCS | CQI | Modulation | Spectral Efficiency |
|-----|-----|------------|---------------------|-----|-----|------------|---------------------|
| 0 | 2 | QPSK | 0.2344 | 16 | | 16QAM | 2.5684 |
| 1 | | | 0.3057 | 17 | | 64 QAM | 2.5684 |
| 2 | 3 | | 0.3770 | 18 | 10 | | 2.7305 |
| 3 | | | 0.4893 | 19 | | | 3.0264 |
| 4 | 4 | | 0.6016 | 20 | 11 | | 3.3223 |
| 5 | | | 0.7393 | 21 | | | 3.6123 |
| 6 | 5 | | 0.8770 | 22 | 12 | | 3.9023 |
| 7 | | | 1.0264 | 23 | | | 4.2128 |
| 8 | 6 | | 1.1758 | 24 | 13 | | 4.5234 |
| 9 | | | 1.3262 | 25 | | | 4.8193 |
| 10 | | 16 QAM | 1.3262 | 26 | 14 | | |
| 11 | 7 | | 1.4766 | 27 | | | 5.3349 |
| 12 | | | 1.6953 | 28 | 15 | | 5.5547 |
| 13 | 8 | | 1.9141 | 29 | | QPSK | Reserved |
| 14 | | | 2.1602 | 30 | | 16QAM | |
| 15 | 9 | | 2.4063 | 31 | | 64QAM | |

5.2 Μετρήσεις RSRP και RSRQ στο LTE

Σε κυψελοειδή δίκτυα, όταν ένα κινητό μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη και διενεργεί cell selection/reselection (όταν είμαστε σε idle mode) και handover (για connected mode), θα πρέπει να μετρηθεί η ισχύς και η ποιότητα του σήματος των γειτονικών κυττάρων.

Για το σκοπό αυτό στο δίκτυο LTE, ένα UE μετρά δύο παραμέτρους του σήματος αναφοράς: το RSRP (Reference Signal Received Power) και το RSRQ (Reference Signal Received Quality).

5.2.1 Reference Signal Received Power (RSRP)

Η RSRP είναι η μέση τιμή της λαμβανόμενης στο UE ισχύος του σήματος αναφοράς μιας κυψέλης, στο συγκεκριμένο κανάλι της. Η RSRP είναι μια σημαντική μέτρηση του φυσικού στρώματος LTE που εκτελείται από το UE και χρησιμοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια της λήψης αποφάσεων για handover, αλλά και για cell selection και cell reselection.

Το μέτρο της RSRP δίνει την ένδειξη για την στάθμη του σήματος αναφοράς της κυψέλης, αλλά δεν είναι το απόλυτο μέτρο για την ποιότητα του σήματος, διότι μπορεί να έχεις καλή στάθμη σήματος αλλά κακή ποιότητα λόγω παρεμβολής.

Οι τιμές αναφοράς των RSRP ορίζονται από -140 dBm έως -44 dBm με βήμα 1 dB, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 5.2 [9].

Πίνακας 5.2: Τιμές αναφοράς των RSRP

| Reported value | Measured quantity value | Unit |
|----------------|-------------------------|------|
| RSRP_00 | RSRP < -140 | dBm |
| RSRP_01 | -140 ≤ RSRP < -139 | dBm |
| RSRP_02 | -139 ≤ RSRP < -138 | dBm |
| ... | ... | ... |
| RSRP_95 | -46 ≤ RSRP < -45 | dBm |
| RSRP_96 | -45 ≤ RSRP < -44 | dBm |
| RSRP_97 | -44 ≤ RSRP | dBm |

5.2.2 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Ο δείκτης RSSI αντιπροσωπεύει της μέση ολική λαμβανόμενη ισχύ του καναλιού στο UE, που προέρχεται όχι μόνο από το σήμα αναφοράς μιας συγκεκριμένης κυψέλης, αλλά από όλα τα σήματα αναφοράς των κυψελών που χρησιμοποιούν την ίδια

ραδιοσυχνότητα στην περιοχή μας συμπεριλαμβανομένης και της ισχύος του θορύβου στο εν λόγω κανάλι.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η τιμή του RSSI βοηθάει να καθοριστεί ή στάθμη της παρεμβολής και του θορύβου. Για τον λόγο αυτό, για τον υπολογισμό του RSRQ (Reference Signal Received Quality) χρησιμοποιούνται τα RSRP και RSSI.

5.2.3 Reference Signal Received Quality (RSRQ)

Το RSRQ δείχνει την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος αναφοράς. Δεδομένου του RSRP και του RSSI, το RSRQ είναι ένα σημαντικό μέτρο, καθώς ορίζεται ως μία σχέση μεταξύ RSRP και RSSI. Μια μαθηματική έκφραση του RSRQ φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$RSRQ = \#RB \frac{RSRP}{RSSI}$$

Όπου #RB είναι ο αριθμός των Resource Blocks.

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση όσο αυξάνεται το RSRP τόσο αυξάνεται και το RSRQ, είναι δηλαδή ποσά ανάλογα με συντελεστή αναλογίας τον αριθμό των Resource Blocks (#RB). Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του RSRP και κατά συνέπεια του RSRQ τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα του σήματος.

Το εύρος των τιμών RSRQ ορίζεται από -19.5 dB έως -3 dB με βήμα 0.5 dB και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3 [9].

Πίνακας 5.3: Το εύρος των τιμών RSRQ

| Reported value | Measured quantity value | Unit |
|----------------|-------------------------|------|
| RSRQ_00 | RSRQ < -19.5 | dB |
| RSRQ_01 | -19.5 ≤ RSRQ < -19 | dB |
| RSRQ_02 | -19 ≤ RSRQ < -18.5 | dB |
| ... | ... | ... |
| RSRQ_32 | -4 ≤ RSRQ < -3.5 | dB |
| RSRQ_33 | -3.5 ≤ RSRQ < -3 | dB |
| RSRQ_34 | -3 ≤ RSRQ | dB |

5.2.4 Signal to Interference-Noise Ratio (SINR)

Το SINR είναι ένα μέτρο το οποίο υπολογίζει την αναλογία μεταξύ του επιθυμητού σήματος και τα επίπεδα των παρεμβολών συν του θορύβου. Μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως

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

όπου,

P είναι η ισχύς του σήματος,

I είναι η ισχύς των παρεμβολών,

N είναι η ισχύς του θορύβου.

***Κεφάλαιο 6:
LTE System Level Simulator
v1.0r247***

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στον προσομοιωτή συστήματος του Long Term Evolution (LTE) v1.0r247 από τη Vienna που έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των αλλαγών στην απώλεια διαδρομής (pathloss) και στην κάλυψη, με τις αλλαγές στις συχνότητες λειτουργίας των 0,9 GHz έως 2 GHz. Παρουσιάζεται η δομή του και δίνονται οι υποθέσεις που έγιναν κατά την εκπόνησή της προσομοίωσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης και γίνεται ο σχετικός σχολιασμός.

6.1 Η ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το κύριο αρχείο του προσομοιωτή της LTE ραδιοζεύξης είναι *LTE_sim_main.m*, αν και μπορεί να τρέξει κανονικά την προσομοίωση μέσω ενός αρχείου δέσμης, όπως *LTE_sim_launcher.m*, το οποίο εκτελεί τα ακόλουθα καθήκοντα:

- Φορτώνει το αρχείο *LTE_load_params* που ρυθμίζει τις παραμέτρους της προσομοίωσης. Βλέπε Ενότητα 6.2 για μια λίστα ρύθμισης παραμέτρων.
- Εκτελεί το αρχείο κύριας προσομοίωσης *LTE_sim_main.m*.

6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Παρακάτω θα βρείτε μια λίστα με τις παραμέτρους που μπορούν να ρυθμιστούν όπως παρουσιάζονται στο αρχείο *LTE_load_params*, με εντολές, του προγράμματος *MATLAB*. Οι εντολές παρουσιάζονται με έντονη γραφή και δίνεται μία σύντομη εξήγηση για το τι ρυθμίζει η κάθε μία.

A. Γενικές παράμετροι

- ***LTE_config.debug_level***: Διαμορφώνει το κείμενο που θα εμφανίζεται σαν έξοδο σε περίπτωση λάθους. Οι επιλογές είναι:

- 0: δεν υπάρχει έξοδος.
 - **1: βασική έξοδο.**
 - 2: τα εκτεταμένα αποτελέσματα.
- ***LTE_config.show_network***: Διαμορφώνει πόσες γραφικές παραστάσεις εμφανίζονται. Οι επιλογές είναι:
- 0: Δεν εμφανίζονται γραφικές παραστάσεις.
 - **1: Εμφανίζονται κάποιες από τις γραφικές παραστάσεις.**
 - 2: Εμφάνιση όλων των γραφικών παραστάσεων, στις οποίες περιλαμβάνεται ένα γράφημα το οποίο δείχνει τους κινούμενους Χρήστες (UEs), το οποίο μπορεί να επιβραδύνει την προσομοίωση σημαντικά.
 - 3: Με αυτή την επιλογή, εμφανίζεται στις γραφικές παραστάσεις το *microscale/fast fading*.
- ***LTE_config.frequency***: Συχνότητα στην οποία το σύστημα λειτουργεί [Hz]. Η αρχική ρύθμιση είναι στα **2GHz**.
- ***LTE_config.bandwidth***: Το εύρος ζώνης του καναλιού του συστήματος LTE. Οι επιτρεπόμενες τιμές είναι 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, και 20 MHz. Αυτά τα εύρη ζώνης είναι ισοδύναμα με 6, 15, 25, 50, 75, και 100 ομάδες πόρων (Resource Blocks -RBs), αντιστοίχως. Η αρχική ρύθμιση είναι στα **5 MHz**.
- ***LTE_config.UEs_only_in_target_sector***: Καθορίζει εάν οι UEs, δημιουργούνται σε ολόκληρη την Περιοχή ενδιαφέροντος (Region of Interest- ROI) ή μόνο στον τομέα στόχο. Η αρχική ρύθμιση είναι **true**, που σημαίνει μόνο στο τομέα στόχο. Για την περίπτωση όπου οι UEs απλώς τοποθετούνται σε έναν τομέα, οι άλλοι πομποί ακτινοβολούν στη μέγιστη ισχύ, μόνο που ενεργούν ως παρεμβολές.

- **LTE_config.target_sector:** Αν οι UEs είναι μόνο στον τομέα στόχο, η ρύθμιση αυτή καθορίζει ένα από αυτούς που είναι. Ρυθμίστε σε **'center'** ώστε ο τομέας στόχος να προσδιοριστεί το κέντρο ενός.
- **LTE_config.nTX:** Καθορίζει τον αριθμό των κεραιών μετάδοσης. Το έχουμε ρυθμίσει αρχικά στο **2**, για δύο κεραιές εκπομπής.
- **LTE_config.nRX:** Καθορίζει τον αριθμό κεραιών λήψης. Το έχουμε ρυθμίσει αρχικά στο **2**, για δύο κεραιές λήψης.
- **LTE_config.tx_mode:** Οι τρόποι μετάδοσης που ορίζονται στο TS 36.213-820.
 - 1: Απλή κεραία.
 - 2: Transmission Diversity (TxD).
 - **3: Ανοικτού βρόγχου χωρική πολυπλεξία (Open Loop Spatial Multiplexing _OLSM).**
 - 4: Κλειστού βρόγχου χωρική πολυπλεξία (Closed Loop Spatial Multiplexing _CLSM).
 - 5: Multiuser MIMO
- **LTE_config.seedRandStream:** Προκειμένου να καταστεί δυνατή η επαναληψιμότητα, είναι δυνατόν να σπαρθεί προεπιλογή του MATLAB τυχαία γεννήτρια αριθμού. Ρυθμίστε true (αληθείς) ή false (ψευδείς). Το έχουμε ρυθμίσει σε **false**.
- **LTE_config.RandStreamSeed:** Αν η παραπάνω έχει οριστεί σε true, προσδιορίζει το seed. Το seed πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός μεταξύ 0 και 2^{32} . Το έχουμε ρυθμίσει αρχικά σε **0**.
- **LTE_config.simulation_time_tti:** Το μήκος της προσομοίωσης στα διαστήματα χρόνου μεταφοράς (Transmission Time Intervals -TTIs). Το ρυθμίσαμε σε **500** TTIs.

- **LTE_config.latency_time_scale:** Ο προσομοιωτής κρατάει μέση απόδοση του UE φιλτράρεται με μια εκθετική συνάρτηση παραθύρου. Αυτή η μέση απόδοση χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο από την ανάλογη έκθεση προγραμματιστή για τη λήψη της μέσης απόδοσης. Έχει ρυθμιστή στο **25**.

B. Cache options

- **LTE_config.cache_network:** Εάν θέλετε να αποθηκεύσετε τους παραγόμενους χάρτες eNodeBs, Pathloss και shadow fading σε ένα αρχείο .mat. Ρυθμίστε σε true ή false. Όλες οι cache επιλογές λειτουργούν με τον ακόλουθο τρόπο:
 - cache = true και το αρχείο υπάρχει: διαβάστε το αρχείο cache.
 - cache = true και το αρχείο δεν υπάρχει: δημιουργία και, στη συνέχεια, αποθήκευση δεδομένων στο αρχείο cache.
 - cache = false: δεν χρησιμοποιούν καθόλου μνήμη cache.
*Αυτή την εντολή την έχουμε ρυθμίσει σε **true**.
- **LTE_config.network_cache:** Δίνει όνομα στο αρχείου cache. Ρυθμίσαμε σε 'auto', ώστε ο προσομοιωτής να ορίζει ένα όνομα αυτόματα
(π.χ..data_files/
network_1_rings_5m_res_TS25814_2.00GHz_freq.mat).
- **LTE_config.delete_ff_trace_at_end:** Δεδομένου ότι το microscale fading ίχνος χρειάζονται μεγάλα ποσά του χώρου, όταν κάνει την τελική αποθήκευση εντολών, είναι προτιμότερο να το διαγράψετε, έτσι ώστε να μην έχουν πάρα πολύ μεγάλα αρχεία στα αποτελέσματα. Το έχουμε ρυθμίσει σε '**true**'.
- **LTE_config.UE_cache:** Εάν θέλετε να αποθηκεύσετε τη θέση του χρήστη σε ένα αρχείο. Ρυθμίστε είτε true ή false. Έχουμε ρυθμίσει σε **true**, ώστε να αποθηκευτεί η θέση του χρήστη.

- **LTE_config.UE_cache_file:** Δίνει όνομα στο αρχείου cache. Ρυθμίσαμε σε 'auto', ώστε ο προσομοιωτής να ορίζει ένα όνομα αυτόματα.
(π.χ.data_files/UE_cache_1rings_target_sector_only_20UEs_sector_20100301_114247.mat).

Γ. Network layout and macroscopic pathloss parameters

- **LTE_config.network_source:** Προς το παρόν υποστηρίζεται μόνο η επιλογή 'generated'. Ανάγνωση δεδομένων από τα εργαλεία σχεδιασμού του δικτύου, προκειμένου να πάρουμε πραγματικά δεδομένα pathloss μπορεί να υποστηριχθούν στο μέλλον.
- **LTE_config.inter_eNodeB_distance:** Όταν δημιουργείται το δίκτυο, αυτή η εντολή καθορίζει την απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης (eNodeBs) σε μέτρα. Ρυθμίσαμε στα **500** μέτρα.
- **LTE_config.map_resolution:** Η ανάλυση που χρησιμοποιείται για την αρχική δημιουργία του χρήστη. Το ρυθμίσαμε σε **5**, για ανάλυση 5 μέτρα/ pixel.
- **LTE_config.nr_eNodeB_rings:** Αριθμός των περιφερειακών σταθμών βάσης (eNodeB). Το ρυθμίσαμε σε **1**.
- **LTE_config.minimum_coupling_loss:** Περιγράφει την ελάχιστη απώλεια σήματος (σε dB), μεταξύ του Σταθμού Βάσης (BS) και του UE ή μεταξύ των UEs, στη χειρότερη περίπτωση και ορίζεται ως η ελάχιστη απώλεια απόστασης συμπεριλαμβανομένων των κερδών των κεραιών, μετράται μεταξύ των συνδέσεων της κεραίας. Προτεινόμενες τιμές είναι 70 dB για τις αστικές περιοχές και τα 80 dB για την αγροτική περιοχή. Έχουμε ρυθμίσει στα **70**.

- **LTE_config.macroscopic_pathloss_model:** Ρυθμίζει ποιο μακροσκοπικό μοντέλο pathloss θα χρησιμοποιηθεί. Ανάλογα με την επιλογή, διαφορετικές επιλογές είναι διαθέσιμες για LTE_config.macroscopic_pathloss_model_settings.environment.

Τα διαθέσιμα μακροσκοπικά μοντέλα pathloss είναι:

- **Free space:** Ελεύθερου χώρου pathloss. Περισσότερο για δοκιμαστικούς σκοπούς με προσομοιώσεις, παρά για την πραγματική χρήση.

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \cdot d \quad \text{σε μέτρα}$$

- **Cost231:** Σε αυτό το μοντέλο pathloss οι πιθανές επιλογές για LTE_config.macroscopic_pathloss_model_settings είναι:

- ✓ **Urban micro (αστική μικρο):** Μίκροκυψέλη LOS και NLOS pathloss βασίζεται στο μοντέλο COST231 Walfish-Ikegami.
- ✓ **Urban macro (αστική μακρο):** Αστική μακροκυψέλη pathloss βασίζεται στο Cost231 εκτεταμένο μοντέλο Hata.
- ✓ **Suburban macro (προαστιακό μακρο):** Προαστιακή μακροκυψέλη pathloss βασίζεται στο COST 231 επεκταμένο μοντέλο Hata.

- **TS36942:** Πιθανά περιβάλλοντα είναι:

- ✓ **Urban (Αστικό):**

$$L = 40(1 - 4 \times 10^{-3} \times D_{hb}) \times \log_{10}(R) - 18 \log_{10}(D_{hb}) + 21 \log_{10}(f) + 80 \text{ σε dB}$$

Όπου **R** είναι η απόσταση του σταθμού βάσης από το UE σε km, **f** η συχνότητα φορέα (carrier) σε MHz και **D_{hb}** είναι το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης, σε μέτρα, μετράται από το μέσο επίπεδο του τελευταίου ορόφου.

✓ *Suburban (Προαστιακό):*

$$L = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(Hb) + [44.9 - 6.55 \log_{10}(Hb)] \log_{10}(R) - 4.78 (\log_{10}(f))^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.94$$

Όπου **R** είναι η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του UE σε km, **f** η συχνότητα φορέα (carrier) σε MHz και **Hb** είναι το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης, πάνω από το έδαφος, σε μέτρα.

▪ **TS25814:**

$$L = I + 37.6 \log_{10}(R)$$

Όπου **R** είναι η απόσταση του σταθμού βάσης από το UE σε χλμ. και $I = 128.1$ όταν χρησιμοποιούμε συχνότητα φορέα 2 GHz και $I = 120.9$ για συχνότητα φορέα 900 MHz.

* Έχουμε ρυθμίσει αυτή την εντολή στο μοντέλο pathloss **TS25814**.

- **LTE_config.eNodeB_tx_power:** Με αυτή την εντολή ρυθμίζεται η ισχύς που εκπέμπει ο σταθμός βάσης (eNodeB), σε Watt. Προτεινόμενα είναι: 43 dBm για συχνότητα φορέα των 1.25 ή 5 MHz, 46/49 dBm για συχνότητα φορέα των 10 ή 20MHz.

Δ. Shadow fading

- **LTE_config.shadow_fading_type:** Καθορίζει πώς *Shadow fading* δημιουργείται. Αυτή τη στιγμή μόνο **Claussen** υποστηρίζεται. Αυτό παράγει μια χωροσυσχετισμένη λογαριθμοκανονική κατανομή 2D σε ένα χάρτη shadow fading.

- **LTE_config.shadow_fading_map_resolution:** Η ανάλυση του χάρτη shadow fading pathloss (σε μέτρα / pixel). Ρυθμίσαμε σε **5**.
- **LTE_config.shadow_fading_n_neighbors:** Καθορίζει τον αριθμό των γειτόνων. Πιθανές επιλογές είναι 4 και 8. Ρυθμίσαμε σε **8**.
- **LTE_config.shadow_fading_mean:** Ο μέσος όρος (μ) της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Το έχουμε ρυθμίσει στο **0**.
- **LTE_config.shadow_fading_sd:** Η τυπική απόκλιση (σ) της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Τη ρυθμίσαμε στο **10**.
- **LTE_config.r_eNodeBs:** Η συσχέτιση του shadow fading μεταξύ τοποθεσιών. Η συσχέτιση μεταξύ των τομέων σε μία τοποθεσία είναι σταθερή στο 1 (ίδιο χάρτη shadow fading). Το ρυθμίσαμε στο **0.5**.

E. Microscale fading

Microscale fading ίχνη που πρέπει να χρησιμοποιούνται μεταξύ του σταθμού βάσης (eNodeB) και τους συνδεδεμένους, σε αυτόν, χρήστες (UEs) .

- **LTE_config.use_fast_fading:** Εάν Microscale fading πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ή όχι. Οι επιλογές είναι **true** ή **false**. Έχουμε ρυθμίσει σε **true**.
- **LTE_config.channel_model.type:** Ποιο PDP να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του καναλιού. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι:
 - **PedA:** ITU Pedestrian A channel.
 - **PedB:** ITU Pedestrian B channel.
 - **extPedB:** Επέκταση του μοντέλου ITU κανάλι για συστήματα ευρείας ζώνης (OFDM).

- **VehA:** ITU Vehicular A channel.
- **VehB:** ITU Vehicular B channel.
- * επιλέξαμε το **PedB**

- **LTE_config.channel_model.trace_length:** Το μήκος του ίχνους του καναλιού σε δευτερόλεπτα. Να είστε επιφυλακτικοί όσον αφορά το μέγεθος της επιλογής σας, καθώς αυτό θα φορτωθεί στη μνήμη. Το ρυθμίσαμε σε **30**.
- **LTE_config.pregenerated_ff_file:** Πού να αποθηκεύσετε το ίχνος του καναλιού. Αν υπάρχει το συγκεκριμένο αρχείο, θα φορτωθεί. Για την περίπτωση του **auto** ή ανύπαρχτο όνομα αρχείου, ένα νέο ίχνος θα δημιουργηθεί. π.χ.. `ff_60.0s_2x2_PedB_5.0MHz_5Kmph_20100205_`
- **LTE_config.recalculate_fast_fading:** Αν παράγεται το ίχνος ακόμα και αν υπάρχει ήδη το αρχείο (εξαναγκάζεται ένα νέο ίχνος). Ρυθμίσαμε σε **false**.

ΣΤ. Ρυθμίσεις UE

- **LTE_config.UE.receiver_noise_figure:** Καθορίζει την εικόνα θορύβου του δέκτη σε dB. Ρυθμίσαμε σε **9 dB**.
- **LTE_config.UE.thermal_noise_density:** Καθορίζει την πυκνότητα του θερμικού θορύβου σε dBm / Hz. Το ρυθμίσαμε σε **-174**.
- **LTE_config.UE_per_eNodeB:** Ορίζει τον αριθμό των χρηστών (UEs) ανά τομέα. Ρυθμίσαμε σε **20**.
- **LTE_config.UE_speed:** Ορίζει την ταχύτητα με την οποία κινούνται οι χρήστες (UEs), σε μέτρα / δευτερόλεπτο. Ρυθμίσαμε σε **5/3.6** .

Z. Ρυθμίσεις eNodeB

- **LTE_config.antenna_gain_pattern:** πρότυπο κέρδος της κεραίας που συνδέεται σε κάθε τομέα. Αυτή τη στιγμή μόνο 2D πρότυπα υποστηρίζονται. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι:

- ✓ **Berger:** $A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{70^\circ}\right)^2, 20 \text{ dB}\right], -180 \leq \theta \leq 180$

- ✓ **TS36.942:** $A(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta}{65^\circ}\right)^2, 20 \text{ dB}\right], -180 \leq \theta \leq 180$

* Έχουμε επιλέξει **TS36.942**

- **LTE_config.mean_antenna_gain:** Το κέρδος της κεραίας, σε dB. Προτεινόμενες τιμές είναι: 15 dBi (για αγροτική περιοχή των 900 MHz και για αστική περιοχή των 2 GHz) και 12 dBi (για αστική ζώνη 900 MHz). Το ρυθμίσαμε στα **15**.
- **LTE_config.scheduler:** Ο τύπος του χρονοπρογραμματιστή που χρησιμοποιεί. Υποστηριζόμενοι χρονοπρογραμματιστές είναι **round robin**, **best CQI** (Max C / I), και **proportional fair**.
- **LTE_config.power_allocation:** Μόνο η επιλογή **homogeneous** υποστηρίζεται αυτή τη στιγμή.

H. Επιλογές Uplink καναλιών

- **LTE_config.feedback_channel_delay:** Καθορίζει την καθυστέρηση ανερχόμενης ζεύξης σε TTIs. Όταν ρυθμιστεί σε 0 TTIs, μόνο ο δείκτης ποιότητας καναλιού (Channel Quality Indicator- CQI) αναφέρει την εμπειρία μηδενικής καθυστέρησης.

Οι ACK αναφορές έχουν ελάχιστη καθυστέρηση του ενός TTI. Τη ρυθμίσαμε σε **3**, για 3 TTIs καθυστέρηση.

- **LTE config.unquantized_CQI_feedback:** Υπάρχει μια επιλογή να στείλετε μη ψηφιοποιημένη ανατροφοδότηση, η οποία εκ των πραγμάτων στέλνεται η μέτρηση Signal to Interference and Noise Ratio Mapping (SINR), στη συνέχεια το CQI δεν χαρτογραφείται. Ρυθμίσαμε σε **false**.

I. SINR μέσος όρος

- **LTE_config.SINR_averaging.algorithm:** Ποιός υποφορέας μέσο όρο αλγόριθμος πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Για κάθε επιλογή, οι συγκεκριμένες παράμετροι διαμόρφωσης θα ποικίλλουν. Πιθανές επιλογές είναι:
 - ✓ **EESM:** χρησιμοποιείται *Exponential Effective Signal to Interference and Noise Ratio Mapping* (EESM). Η ακόλουθη διαμόρφωση που χρειάζεται:
 - **LTE_config.SINR_averaging.MCSs:** Τα Modulation and Coding Schemes (MCSs)
 - **LTE_config.SINR_averaging.betas:** Οι παράμετροι βαθμονόμησης β που ταιριάζουν τη λειτουργία EESM στις καμπύλες Additive White Gaussian Noise (AWGN) Block Error Ratio (BLER).
 - ✓ **MIESM:** χρησιμοποιεί Mutual Information Effective Signal to Interference Noise Ratio Mapping (MIESM). Εδώ σημειώνουμε ότι MIESM δεν έχει ακόμη δοκιμαστεί επιμελώς με τον προσομοιωτή. Μερικά σφάλματα μπορεί να υπάρχουν. Ένα αρχείο .mat που περιέχει τους πίνακες χωρητικότητας Bit Interleaved Coded Modulation (BIOM) για τις σχετικές διαμορφώσεις και τις αντιστοιχίσεις των bit πρέπει να παρέχεται. Ένα περιλαμβάνεται με τον προσομοιωτή:

- **LTE_config.SINR_averaging.BICM_capacity_tables:** Τοποθεσία των πινάκων χωρητικότητας BICM. Ένα παρέχεται ήδη: `data_files / BICM_capacity_tables_10000_realizations.mat`.

* Ρυθμίσαμε σε **EESM**.

J. Αποθήκευση των αποτελεσμάτων

- **LTE_config.results_folder:** Ο φάκελος όπου θέλετε να αποθηκεύσετε τα αποτελέσματα. Ρυθμίσαμε τον **'./results'**
- **LTE_config.results_file:** Το όνομα του αρχείου με τα αποτελέσματα. Ρυθμίζουμε σε **'auto'** και εκχωρεί ένα όνομα αρχείου αυτόματα.
π.χ. `2.00GHz_freq_5.00_bw_200TTIs_20100304_103218_proportional_fair_r230.mat`.

K. Τιμές που δεν πρέπει να αλλάξουν

- **LTE_config.RB_bandwidth:** Το εύρος ζώνης ενός RB. Το ρυθμίσαμε σε **180 KHz** και δεν πρέπει να αλλάξει. Αυτό βασικά χρησιμοποιείται για αποδοτικούς υπολογισμούς.
- **LTE_config.TTI_length:** Το μήκος ενός TTI σε δευτερόλεπτα. Το ρυθμίσαμε σε **1 msec**.
 - **LTE_config.cyclic_prefix:** Ρυθμίσαμε σε **'normal'**. Χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τον αριθμό των διαθέσιμων bits σε κάθε υποπλαίσιο (subframe), έτσι δεν

θα αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά την επίδραση της χρήσης ένα άλλου μήκους κυκλικού προθέματος.

- **LTE_config.maxStreams:** Ο μέγιστος αριθμός των κωδικών λέξεων ανά TTI. Ρύθμιση σε 2.

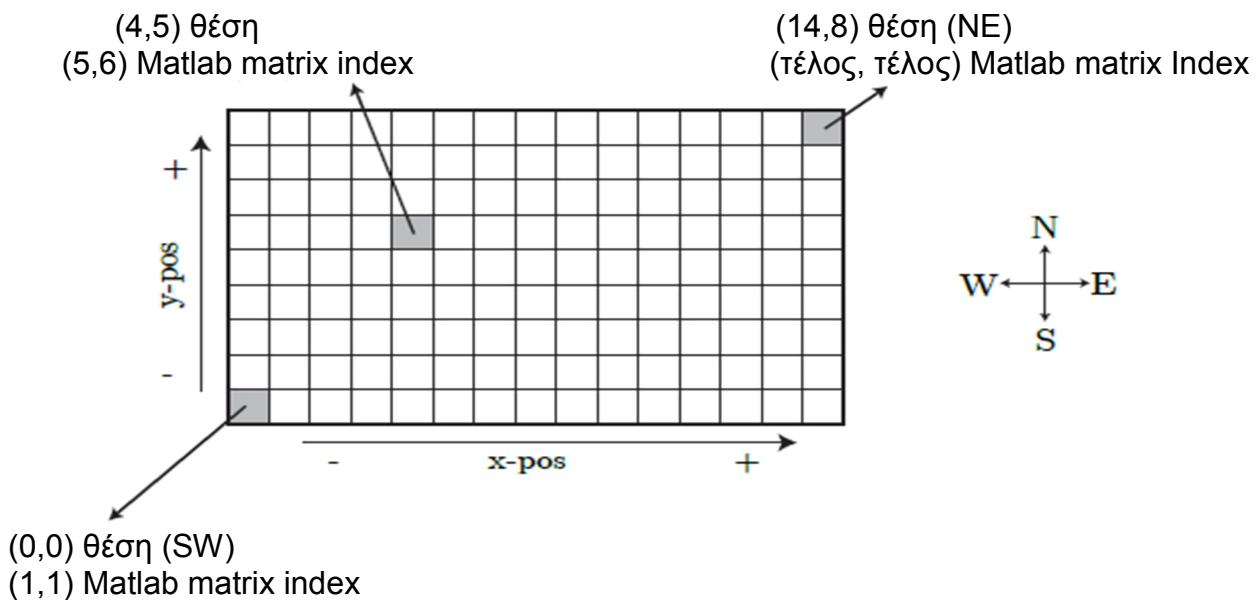
Οι προσομοιώσεις έγιναν με την ακόλουθη βασική διαμόρφωση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν

| Parameter | Value |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frequency | 2.0 GHz |
| Bandwidth | 5 MHz |
| Thermal noise density | -174 dBm/Hz |
| Receiver noise figure | 9 dB |
| nTX×nRX antennas | 2 × 2 |
| TX mode | TxD and OLSM |
| Simulation length | 500 TTIs |
| Number of simulations | 200 per scenario |
| Inter eNodeB distance | 500 m |
| Minimum Coupling Loss | 70 dB |
| Macroscopic pathloss | $128.1 + 37.6 \log_{10}(R)$ |
| Shadow fading | lognormal, space-correlated [8], $\mu = 0, \sigma = 10$ (dB) |
| Shadow fading correlation | Inter-site: 0.5, Intra-site: 1 |
| eNodeB TX power | 43 dBm |
| Microscale fading | PedB uncorrelated, time-correlated |
| UEs position | Homogeneous. UEs located in target sector only, 20UEs/sector |
| UE speed | 5 KM/h |
| BS Antenna pattern | $A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{65^\circ} \right)^2, 20 \text{ dB} \right], -180 \leq \theta \leq 180$ |
| BS antenna gain | 15 DBi |
| Scheduler | Round Robin, Max C/I (Best CQI) |
| Subcarrier averaging algorithm | EESM |
| Uplink delay | 3 TTIs |

6.3 ΘΕΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Πώς να διαβάσετε τους pathloss χάρτες. Κατά την ανάγνωση των pathloss χαρτών, η σύμβαση που φαίνεται στο Σχήμα 6.1 έχει χρησιμοποιηθεί



Σημειώσεις: - δεδομένα ανάλυσης στο παράδειγμα: 1 m / pixel.
 - Matlab γεμίζει μήτρες με στήλη, όχι με σειρά.

Σχήμα 6.1: Οι συντεταγμένες της σύμβασης που χρησιμοποιούνται στον προσομοιωτή επιπέδου του συστήματος LTE.

6.4 Η ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η τεχνική OFDMA χρησιμοποιείται στην κατερχόμενη ζεύξη, όπου ορθογωνιότητα μεταξύ διαφορετικών υποφορέων επιτρέπει αγνοώντας παρεμβολή μεταξύ των χρηστών εντός μίας κυψέλης. Το LTE θεωρεί έναν παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων μεταξύ γειτονικών κυττάρων, ως εκ τούτου οι χρήστες μπορεί να υποφέρουν από παρεμβολές μεταξύ κυψελών. Επιπλέον, η ρύθμιση της μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης, σύμφωνα με τους όρους του καναλιού που παρατηρήθηκαν στον Εξοπλισμό Χρήστη (UE), εργάζεται μέσω τεχνικών MIMO.

6.4.1 Block Length Error Rate

Το BLER και ο ρυθμός μετάδοσης (throughput), για 15 διαφορετικά Modulation Coding Scheme (MCS) αντιστοιχούν σε 15 τιμές του Channel Quality Indicator (CQI), στο δέκτη ελήφθη με Additive White Gaussian Noise (AWGN) και έτσι οι προσομοιώσεις διεξήχθησαν. Σε LTE, προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση έχει εξασφαλιστεί μια τιμή BLER μικρότερη από 10%. Η SINR-προς-CQI αντιστοίχιση που απαιτείται για την επίτευξη αυτού του στόχου λαμβάνεται με γραφική παράσταση των τιμών BLER 10% των καμπυλών πάνω στο SNR όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2. Μια αποτελεσματική SINR λήφθηκε από την αντιστοίχιση της σειράς υποφορέα- SINRs τοποθετήθηκε στο UE.

Η αποτελεσματική SINR προκύπτει από μη-γραμμική μέση τιμή αρκετών Resource Block SINRs δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma_{\text{eff}} = -\beta \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\frac{-\text{SINR}_i}{\beta}} \right)$$

Όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των υποφερουσών κατά μέσο όρο και το β βαθμονομείται με προσομοιώσεις ώστε να ταιριάζει η εξίσωση σε αποτελέσματα AWGN BLER. Τα λαμβανόμενα CQIs στρογγυλοποιήθηκαν για να ληφθούν ακέραιες τιμές CQI πίσω στον eNodeB όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.

6.4.2 Transmission Time Interval

Το Transmission Time Interval (TTI) είναι ένα χρονικό διάστημα μετάδοσης που χρησιμοποιείται συνήθως ως παράμετρος σε παλαιού τύπου κυψελοειδή συστήματα. Οι προδιαγραφές LTE υιοθέτησαν αυτή την παράμετρο, που η διάρκεια του έχει μειωθεί σε 1ms στο πρότυπο LTE. Το TTI καθορίζει τον ελάχιστο χρόνο που απαιτείται για την ανταλλαγή του Medium Access Control Protocol Data Units (MAC PDUs) με το φυσικό επίπεδο. Η προσέγγιση αυτή βελτιώνει την ευελιξία των πόρων του δικτύου. Σε αυτή τη μελέτη, διερευνήσαμε την απόδοση του eNodeB και τις θέσεις UE (βλέπε σχήμα 6.10 και 6.11). Για κάθε TTI το UE μετακινείται, όταν το UE πηγαίνει έξω από την περιοχή ενδιαφέροντος (Region of Interest-ROI) τότε το UE εκ νέου κατανέμονται τυχαία στη ROI. Κάθε eNodeB λαμβάνει ανατροφοδότηση μετά από κάθε καθυστέρηση ανάδρασης (feedback delay). Οι θέσεις υποδεικνύουν το όριο αναπήδηση και την περιοχή κάλυψης και χωρητικότητας, όπου μπορεί να συμβεί παρεμβολή.

6.4.3 Region of Interest - Περιοχή Ενδιαφέροντος

Η προσομοίωση διεξάγεται με τον καθορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος (ROI), στην οποία τοποθετούνται οι eNodeBs και οι UEs και το μήκος προσομοίωση σε TTIs. Για το σκοπό αυτό, το μοντέλο των απωλειών έχει χωριστεί σε τρία τμήματα για τη λήψη του SINR είναι το macroscopic pathloss, το shadow fading και το microscale fading. Το μοντέλο macroscopic pathloss εκφράζει το

pathloss συν το κέρδος της κεραίας. Το Shadow fading προκαλείται από εμπόδια στη διαδρομή διάδοσης μεταξύ του eNodeB και του UE. Ερμηνεύει τις παρατυπίες των γεωγραφικών χαρακτηριστικών του εδάφους που προέρχονται από το macroscopic pathloss. Τα Shadowing effects εμφανίζονται σε μια μεγάλη περιοχή καταγράφεται η δυναμική που επηρεάζει την ποικιλομορφία των μάκρο- κυψελών (macro-cell). Το microscale fading αλλάζει σημαντικά ακόμα και για μικρά ποσά κινήσεων αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να μοντελοποιήσει επαρκώς τις συνέπειες του shadow fading. Οι επιπτώσεις του shadow fading συμβαίνουν σε μεγάλη έκταση. Τα σχήματα 6.12 και 6.13 δηλώνουν το UE που διασχίζει τη ROI και αντιμετωπίζει ένα βραδέως μεταβαλλόμενο pathloss λόγω shadow fading. Η περιοχή πιο κοντά στο eNodeB (κόκκινη περιοχή) είναι η υψηλή περιοχή SINR και καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς τις άκρες, η παρεμβολή από γειτονικές κυψέλες αυξάνεται και έτσι η τιμή SINR μειώνεται.

6.4.4 Macroscopic Pathloss

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της μάκρο κεραίας του σταθμού βάσης που χρησιμοποιείται για κάθε τομέα σε χώρους με 3-τομείς ανά κυψέλη απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4 και με την παρακάτω εξίσωση.

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \text{ όπου } -180 < \theta < 180$$

θ_{3dB} είναι το πλάτος της δέσμης 3dB το οποίο αντιστοιχεί σε 65 μοίρες και $A_m = 20\text{dB}$ είναι η μέγιστη εξασθένηση. Παρατηρείται από το Σχήμα 6.4 ότι ευρύτερα σχήματα οριζόντια δοκό και μεγαλύτερες γωνίες με κάτω κλίση (downtilt) παρέχουν καλύτερη κάλυψη και χωρητικότητα επίδοσης καθώς παρεμβολές μεταξύ των κυττάρων είναι κυρίαρχες.

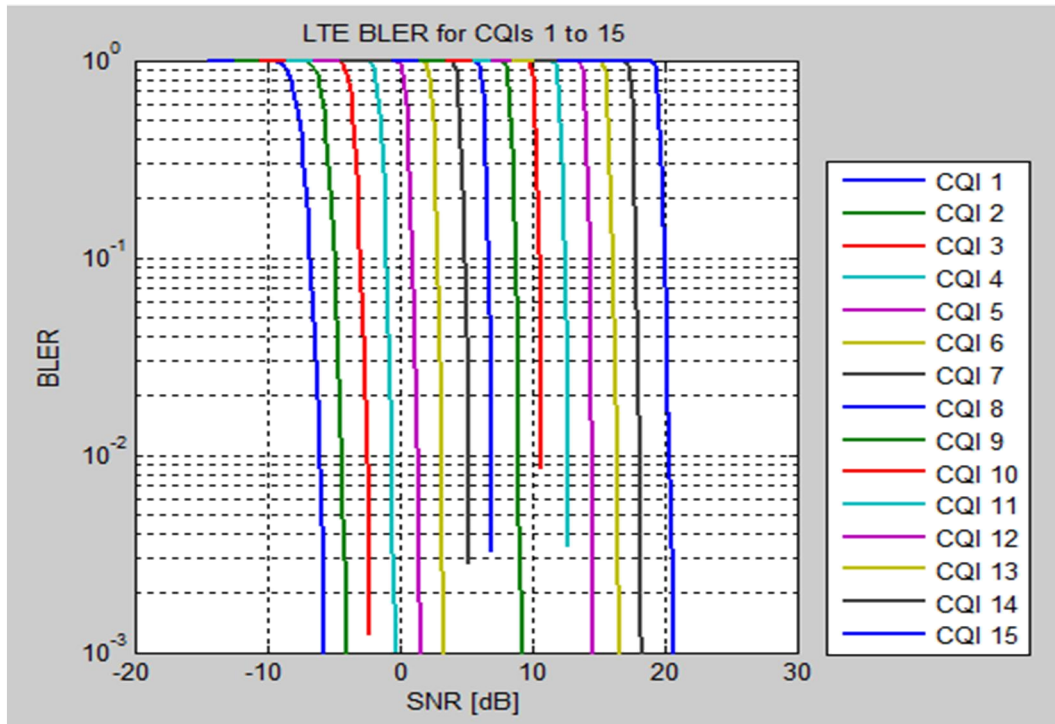
Το macroscopic pathloss μεταξύ ενός τομέα του eNodeB και ενός UE χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει από κοινού το pathloss διάδοσης λόγω της απόστασης και το κέρδος της κεραίας. Οι χρονικά αμετάβλητες και οι εξαρτώμενες θέσεις σε παραμέτρους μακρο-κλίμακας είναι το pathloss, το κέρδος της κεραίας και το shadow fading. Το Σχήμα 6.4 δείχνει το κέρδος συναρτήσει της γωνίας κλίσης της κεραίας, όπου το κέρδος της κεραίας είναι μέγιστο στις 0 μοίρες.

Οι απώλειες που προκαλούνται από το macroscopic pathloss και το shadow fading είναι εξαρτώμενες από τη θέση και χρονικά αμετάβλητες, ενώ οι απώλειες από το microscale fading είναι εξαρτώμενες από τον χρόνο.

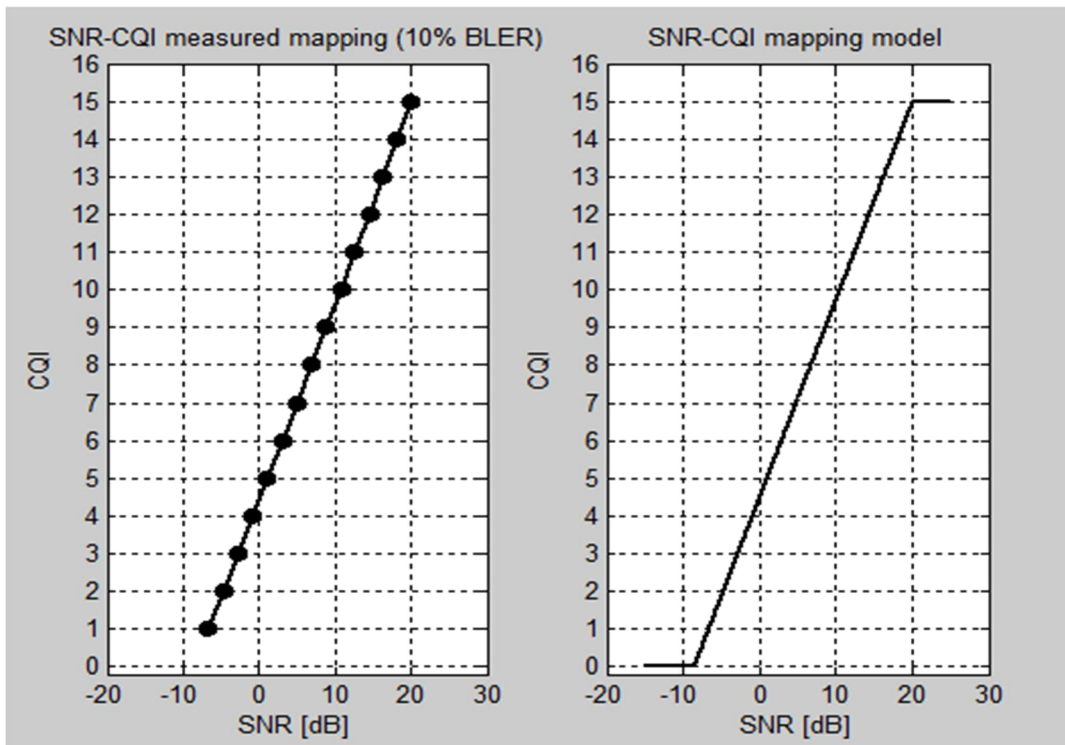
Για να τονίσουμε τη διαφορά το shadow fading ρυθμίστηκε σε 0 dB. Το Σχήμα 6.5 οφείλεται στο γεγονός ότι το πρότυπο κέρδος της κεραίας διατηρεί το αρχικό του σχήμα και σε περίπτωση του ηλεκτρικού downtilt, υπόψη ότι το σχήμα της κεραίας πρότυπο κέρδος μπορεί να δεχθεί αξιόλογη μεταβολή κατά την εφαρμογή του μηχανικού downtilt. Από την άλλη πλευρά, εφόσον το εύρος του ηλεκτρικού tilt είναι περιορισμένο στην πράξη, λόγω του μεταβαλλόμενου επιπέδου του πλευρικού λοβού, οι επιπτώσεις της υβριδικής προσέγγισης, η οποία περιλαμβάνει τόσο μηχανικά και ηλεκτρικά downtilts με διαφορετικές αναλογίες ερευνάται για να βρούμε τη βέλτιστη λύση από την άποψη της απόδοσης του δικτύου.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.14, και στις δύο περιπτώσεις της 3GPP, με macro και shadow fading και μόνο macro fading, έχουμε μειωμένη ισχύ ανά PRB και πρόσθετη παρεμβολή από το γειτονικό κατακόρυφο τομέα καθιστά το χειρότερο SINR. Το downtilt της κεραίας παρέχει βέλτιστη απόδοση για τη λεπτομερή εκτίμηση χωρητικότητας και απόδοσης.

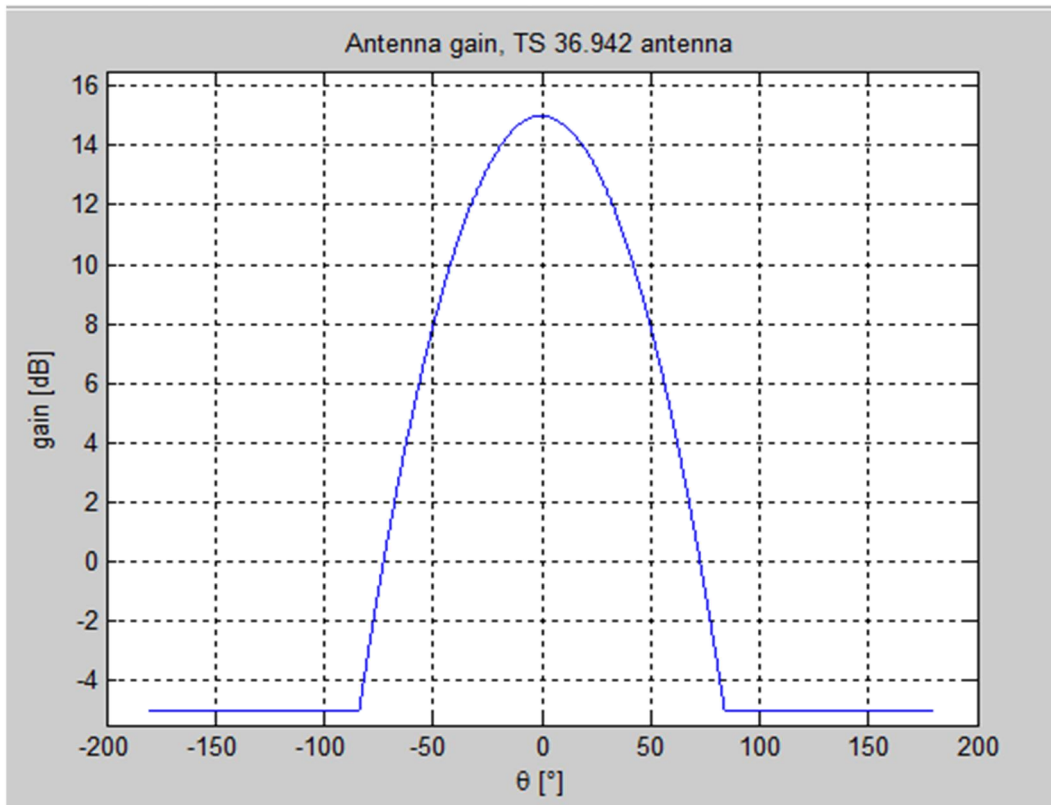
Η εκτέλεση του αρχείου LTE_sim_launcher.m της προσομοίωσης που μελετήσαμε παρέχει κάποια αποτύπωση των αποτελεσμάτων. Τα παραγόμενα γραφήματα είναι τα ακόλουθα.



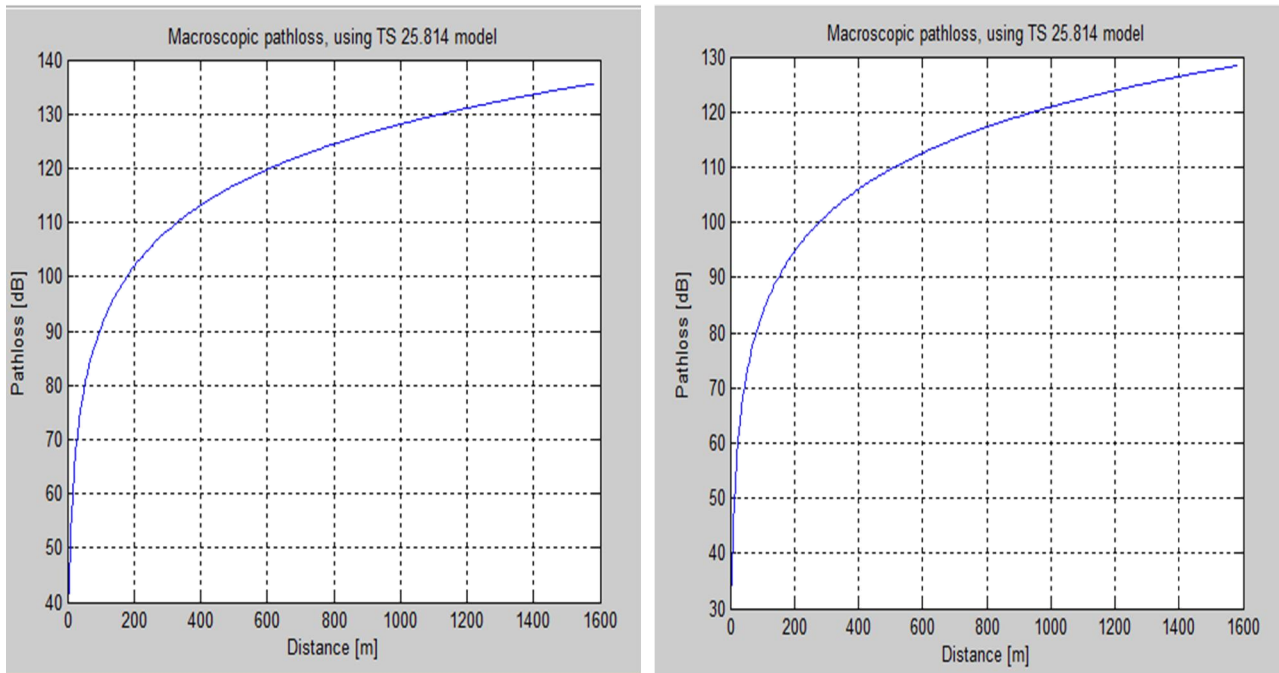
Σχήμα 6.2: οι καμπύλες BLER για διαφορετικά CQI συναρτήσει του SNR



Σχήμα 6.3: Οι τιμές του CQI συναρτήσει του SNR , στο 10% BLER



Σχήμα 6.4: Το κέρδος συναρτήσει της γωνίας κλίσης της κεραίας

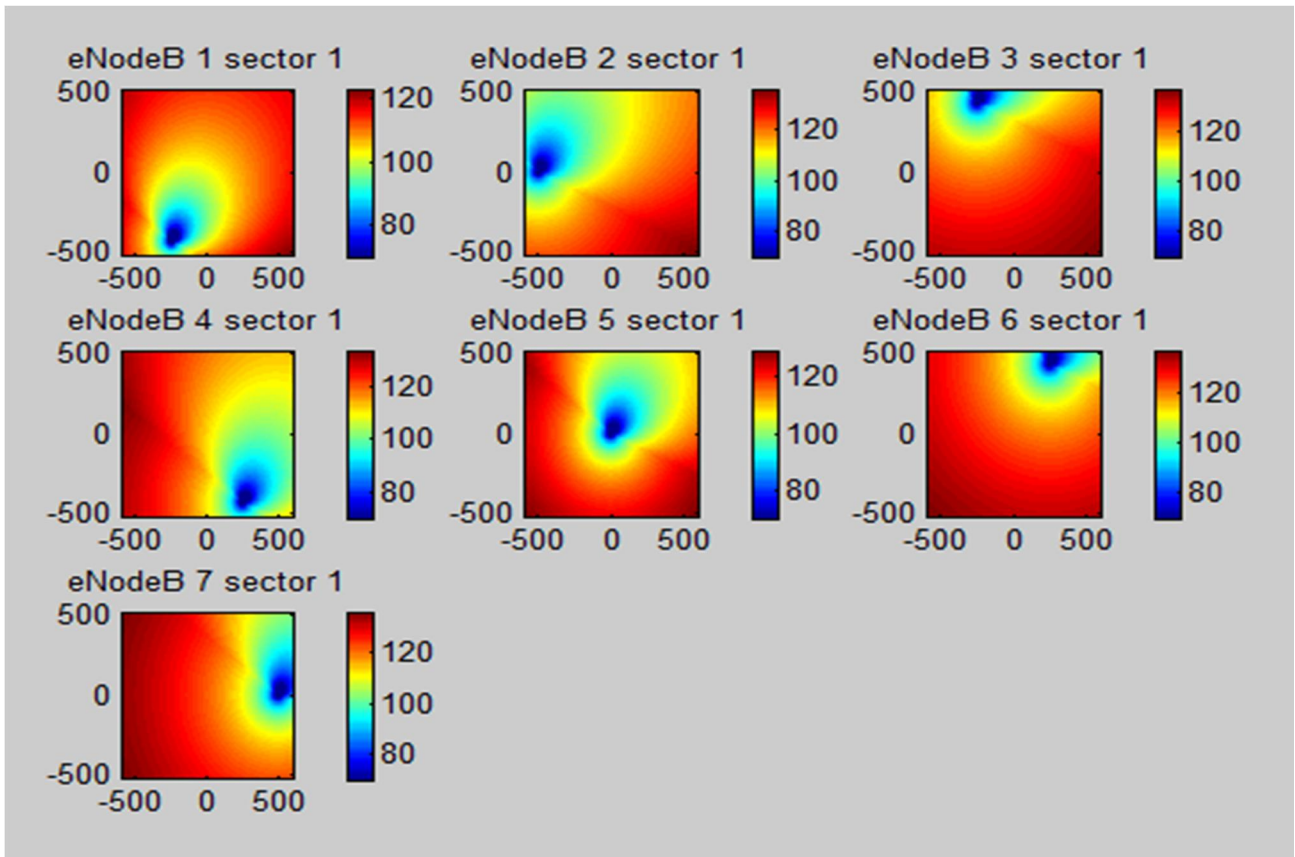


Σχήμα 6.5: Το Pathloss συναρτήσεως της απόστασης, σε αστικό περιβάλλον με συχνότητα λειτουργίας 2 GHz (αριστερά) και 900 MHz (δεξιά).

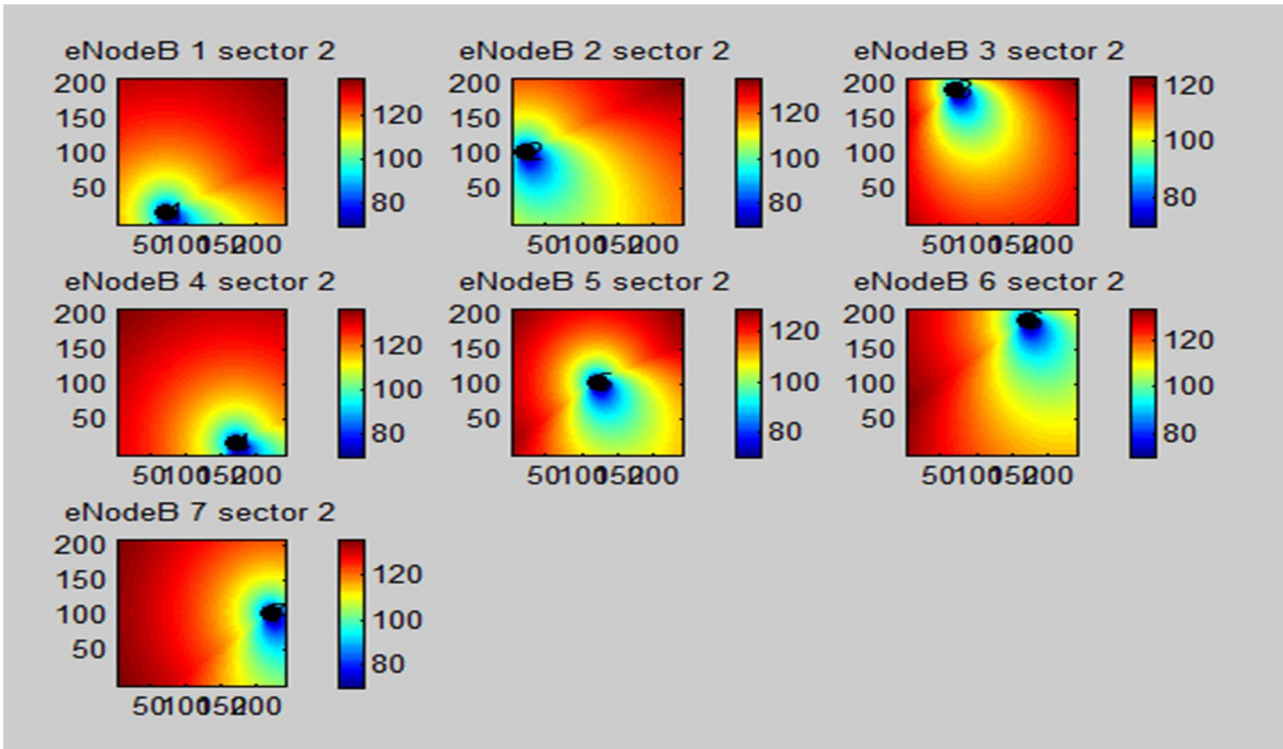
Το σχήμα 6.5 δείχνει τις μεταβολές απώλειας διαδρομής (pathloss) με την απόσταση για διαφορετικές συχνότητες διαμόρφωσης σε αστικό περιβάλλον. Σε αστική περιοχή λόγω της πυκνής κατανομής των χρηστών (UE) η ιδανική απόσταση μεταξύ των eNodeB θα πρέπει να είναι 500 m. Φαίνεται από το σχήμα ότι στην ίδια απόσταση 500 μέτρων η μακροσκοπική απώλεια διαδρομής (macroscopic pathloss) αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Ως εκ τούτου, για τα δίκτυα που αναπτύσσονται σε υψηλότερες συχνότητες, η αποστάσεις μεταξύ των eNodeB στο αστικό περιβάλλον πρέπει να είναι 500 μέτρα για να διασφαλιστεί ότι η ποιότητα του καναλιού είναι καλή και οι χρήστες παίρνουν την επιθυμητή ποιότητα των υπηρεσιών τους.

Οι υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, τείνουν να έχουν υψηλότερες απώλειες διάδοσης. Οι απώλειες αυτές οφείλονται σε πολλές επιπτώσεις, όπως οι απώλειες ελεύθερου χώρου, διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης, απώλειες σύζευξης, και απορρόφησης.

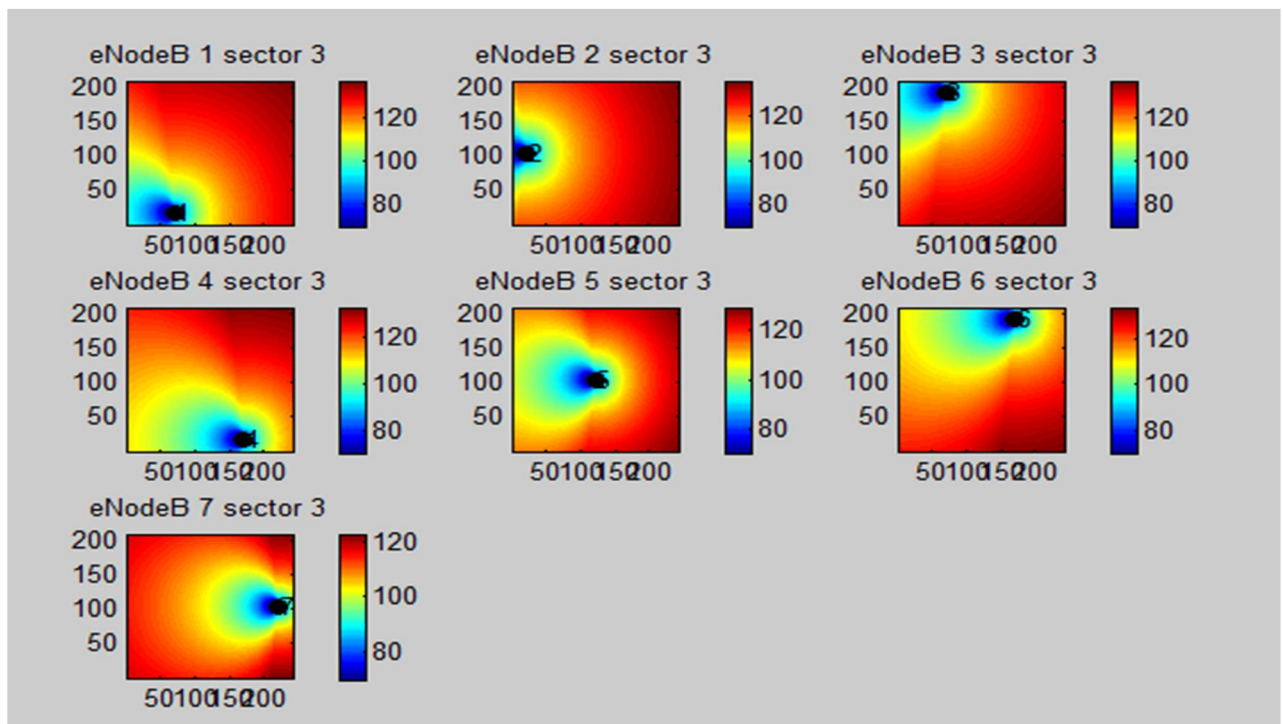
Επίσης οι απώλειες διαδρομής επηρεάζονται από τη μορφολογία του εδάφους, το περιβάλλον (αστικό ή αγροτικό, τη βλάστηση και το φύλλωμα) και το μέσο μετάδοσης (ξηρό ή υγρό αέρα).



Σχήμα 6.6: Η κάλυψη του κάθε eNodeB στον sector 1, με συχνότητα λειτουργίας 2GHz σε αστικό περιβάλλον.

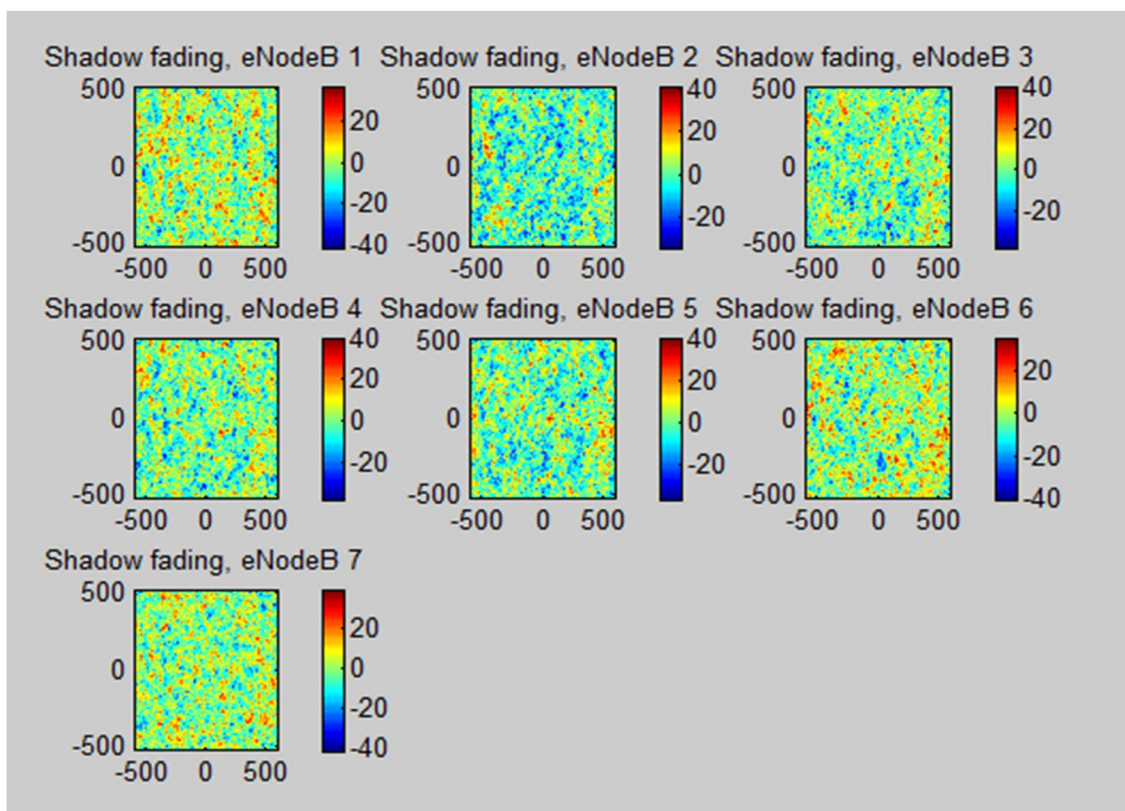


Σχήμα 6.7: Η κάλυψη του κάθε eNodeB στον sector 2, με συχνότητα λειτουργίας 2GHz σε αστικό περιβάλλον.

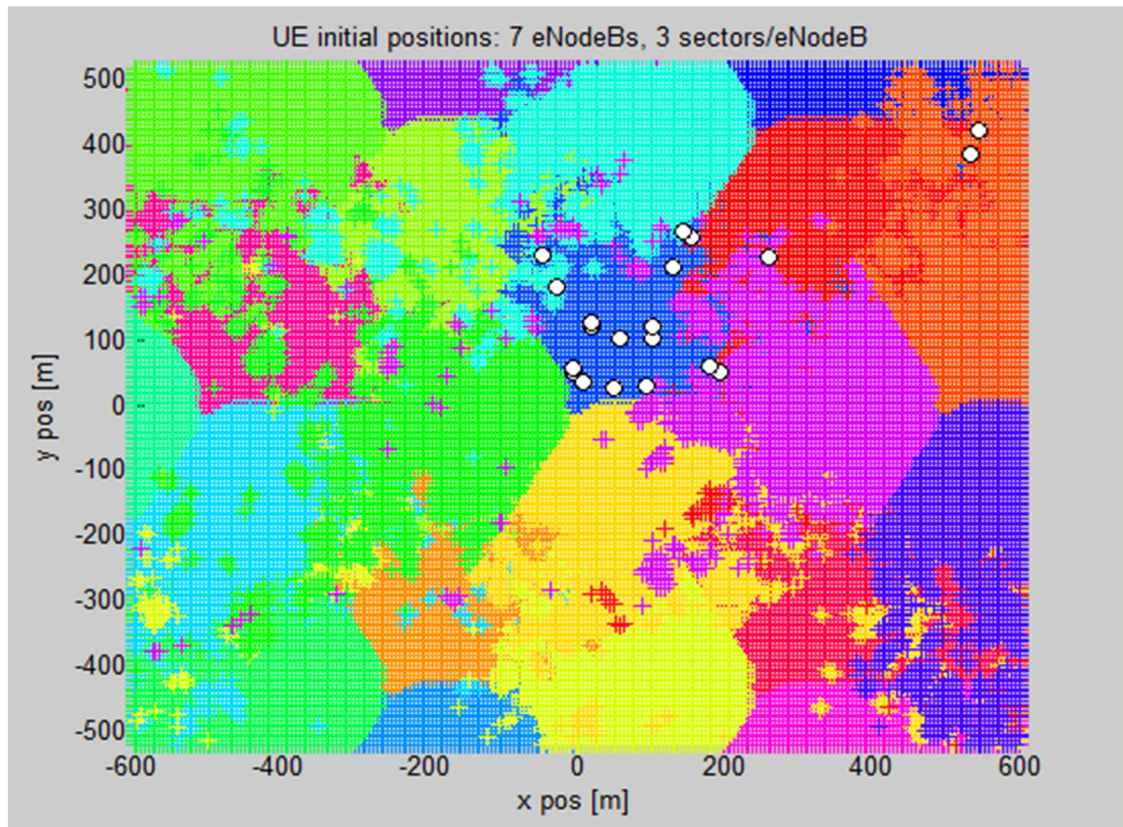


Σχήμα 6.8: Η κάλυψη του κάθε eNodeB στον sector 3, με συχνότητα λειτουργίας 2GHz σε αστικό περιβάλλον.

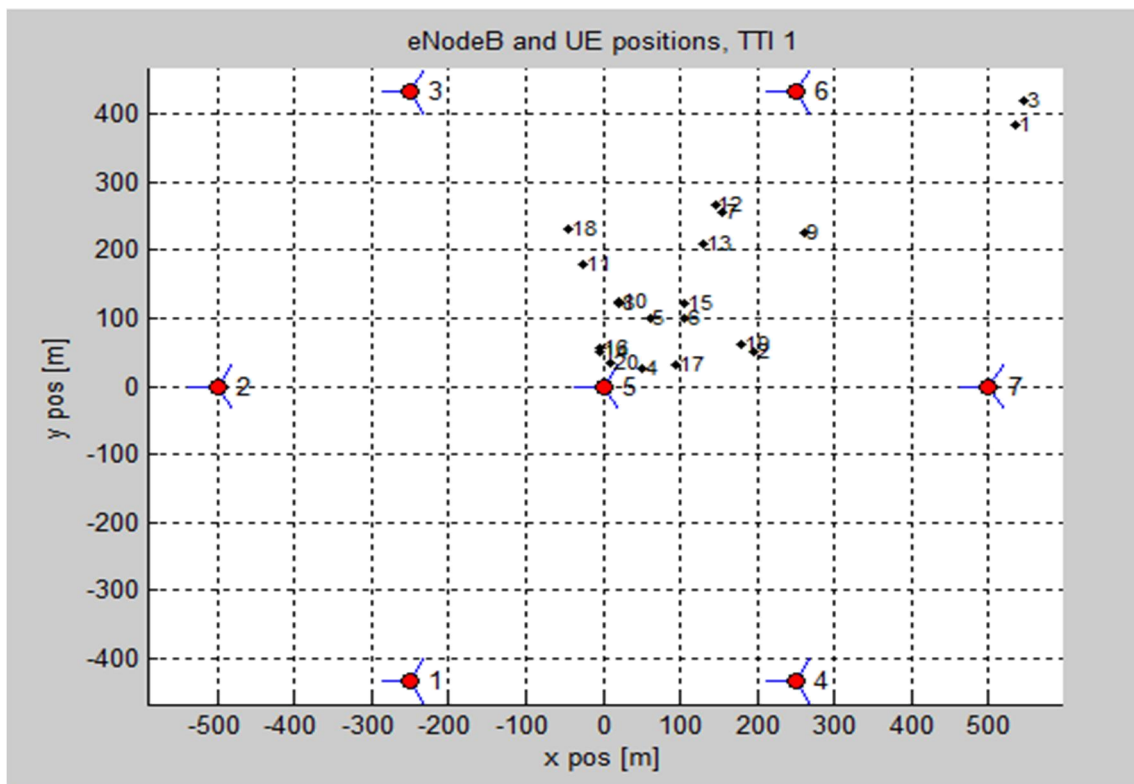
Η κάλυψη σε συχνότητα λειτουργίας 2 GHz, για το αστικό περιβάλλον, για τους τομής 1, 2 και 3 των eNodeBs, παρουσιάζεται στα σχήματα 6.6 , 6.7 και 6.8 αντίστοιχα. Κατά την μελέτη του προσομοιωτή παρατηρήσαμε ότι επιτυγχάνεται καλύτερη κάλυψη σε συχνότητα λειτουργίας 0.9 MHz παρά σε 2 GHz. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι σήματα υψηλής συχνότητας ταξιδεύουν σε μικρότερη απόσταση σε σύγκριση με τα σήματα χαμηλότερης συχνότητας. Σήματα χαμηλής συχνότητας έχουν βαθιά διείσδυση.



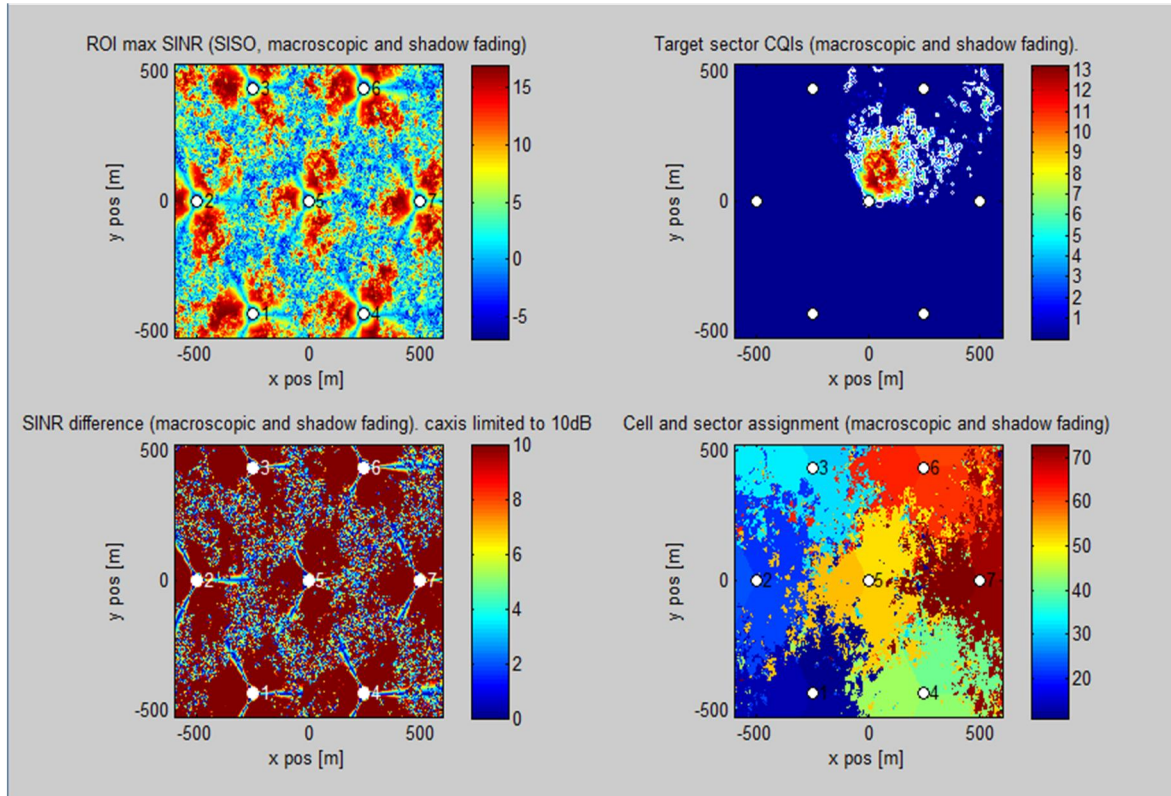
Σχήμα 6.9: Το Shadow fading για κάθε σταθμό βάσης.



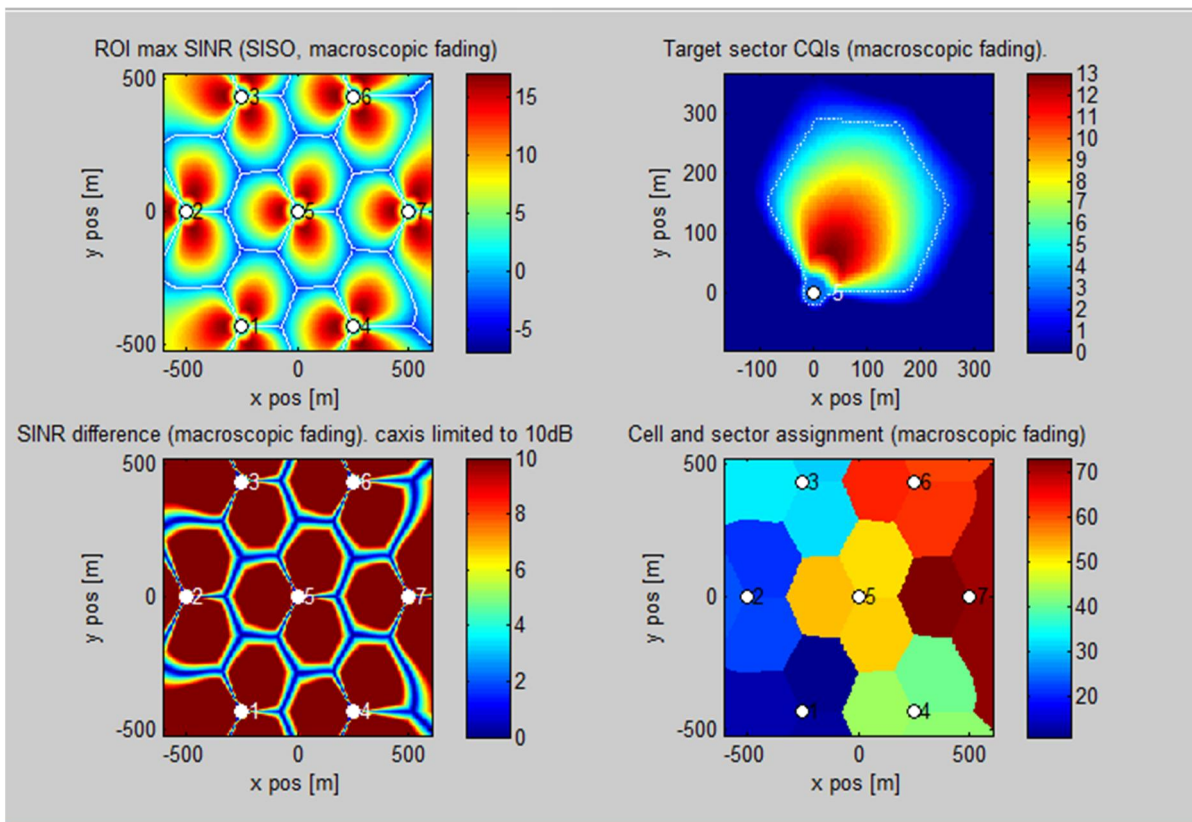
Σχήμα 6.10: Θέσεις των UE σε y pos και x pos, σε ένα τομέα στόχο



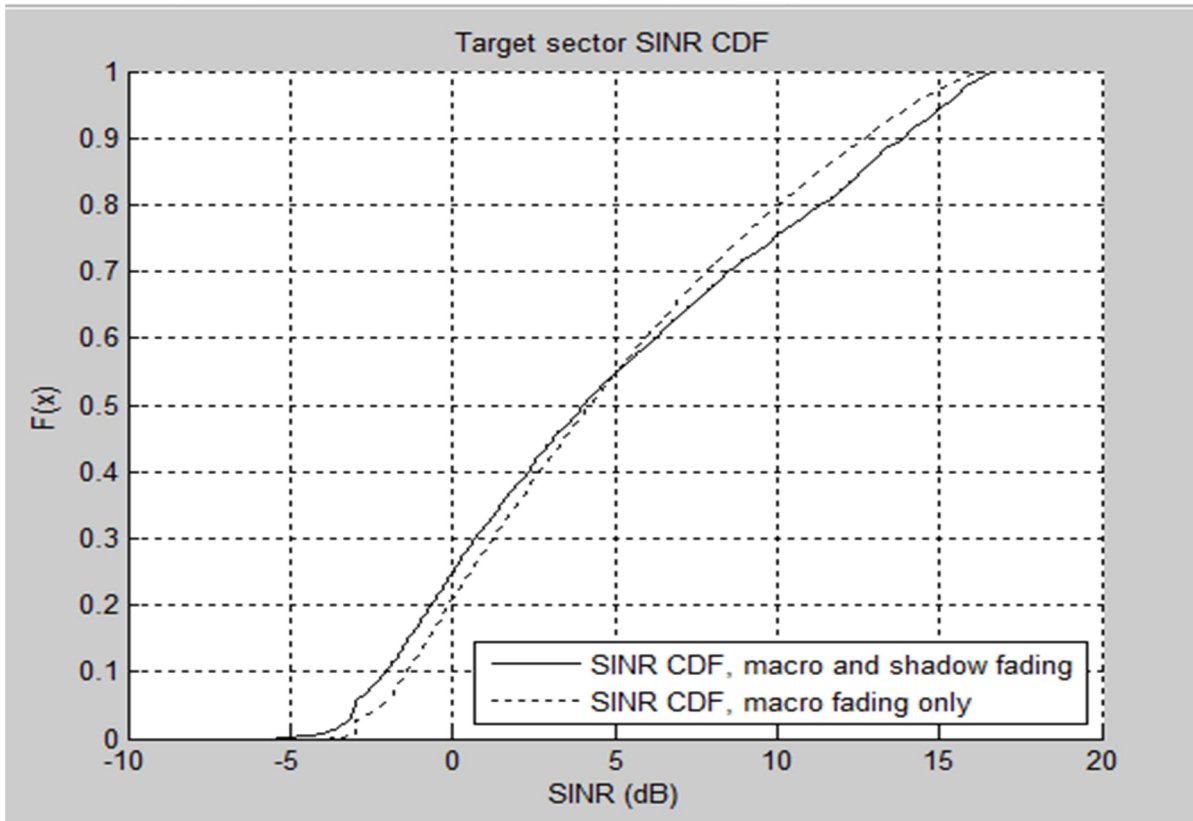
Σχήμα 6.11: Θέσεις eNodeB και UE σε ΤΤΙ 1



Σχήμα6.12: Η ROI με macroscopic και shadow fading



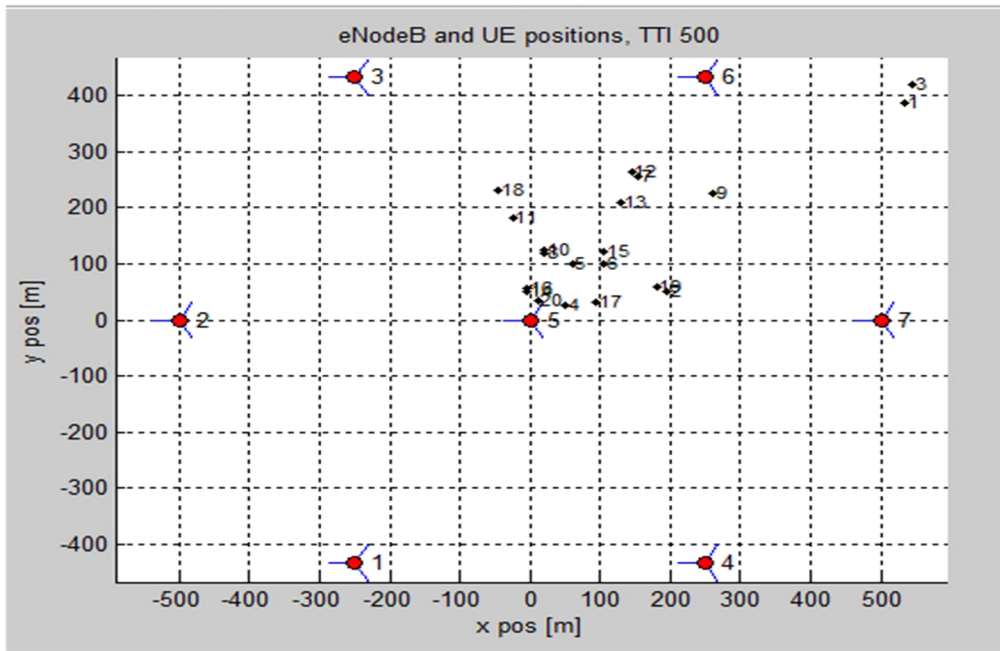
Σχήμα6.13: Η ROI μόνο με macroscopic fading



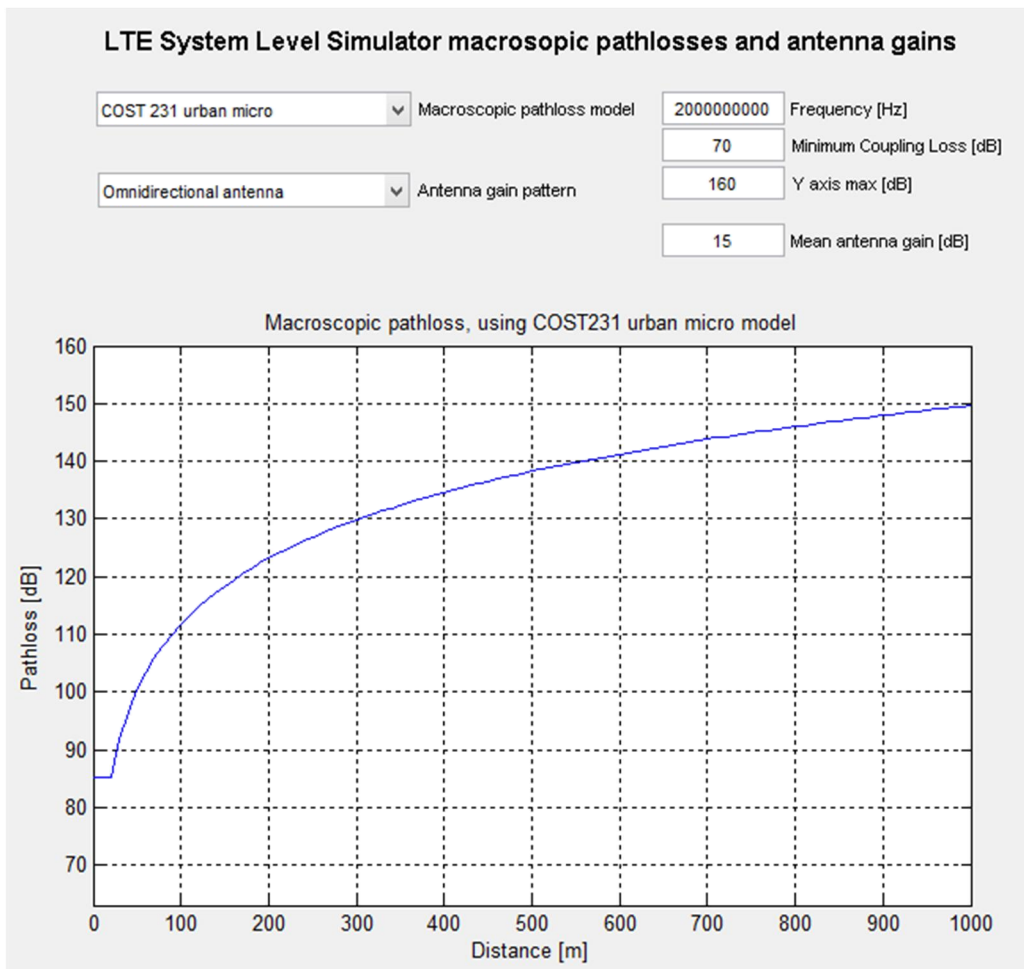
Σχήμα 6.14: SINR συναρτήσει fading effect

Κατά την εκτέλεση του αρχείου `LTE_sim_results.m` της προσομοίωσης παρήχθησαν κάποια γραφήματα. Τα παραγόμενα γραφήματα είναι τα ακόλουθα:

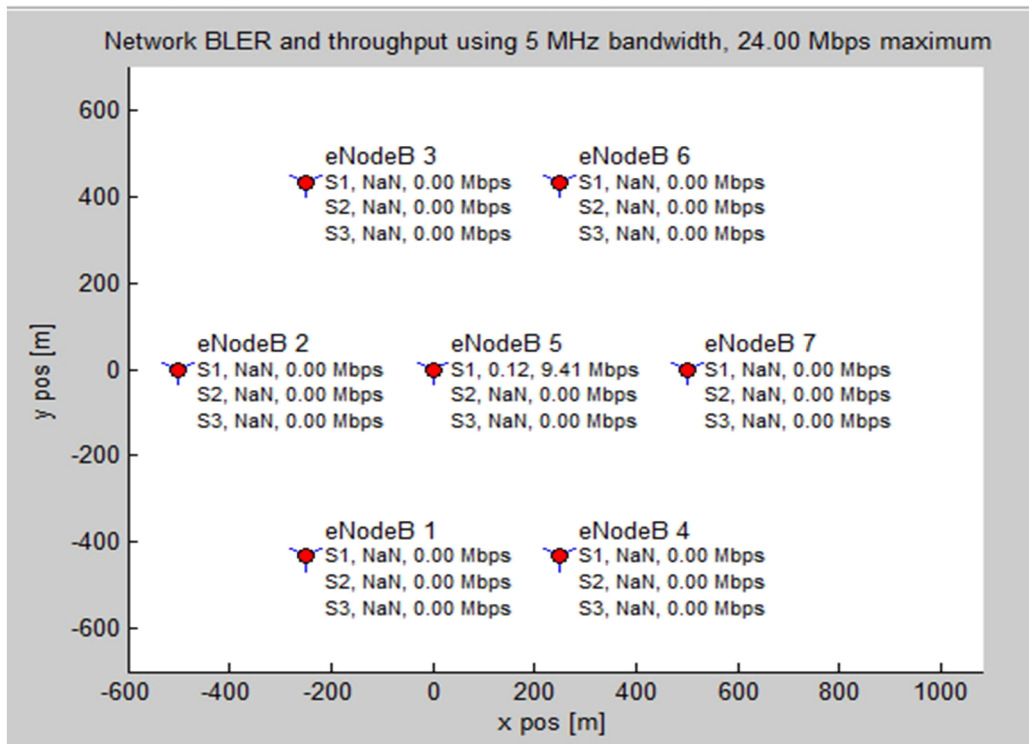
- Θέσεις των eNodeB και των UE, σε 500 TTI (βλέπε σχήμα 6.15).
- **LTE_GUI_pathloss_antenna_info**: Γραφική διεπαφή χρήστη (Graphical User Interface - GUI) που μας δείχνει τα διαθέσιμα macroscopic pathloss μοντέλα και πρότυπα κέρδους της κεραίας (βλέπε σχήμα 6.16).
- Throughput τομέα και BLER: Για κάθε τομέα, δείχνει το μέσο throughput (αθροίζοντας τα δύο ρεύματα, κατά περίπτωση) και το συνολικό BLER. Εάν δεν έχουν εκχωρηθεί χρήστες στον τομέα, 'NaN' εμφανίζεται ως BLER (βλέπε σχήμα 6.17).



Σχήμα 6.15: Θέσεις των eNodeB και των UE, σε 500 TTI



Σχήμα 6.16: LTE_GUI_pathloss_antenna_info GUI



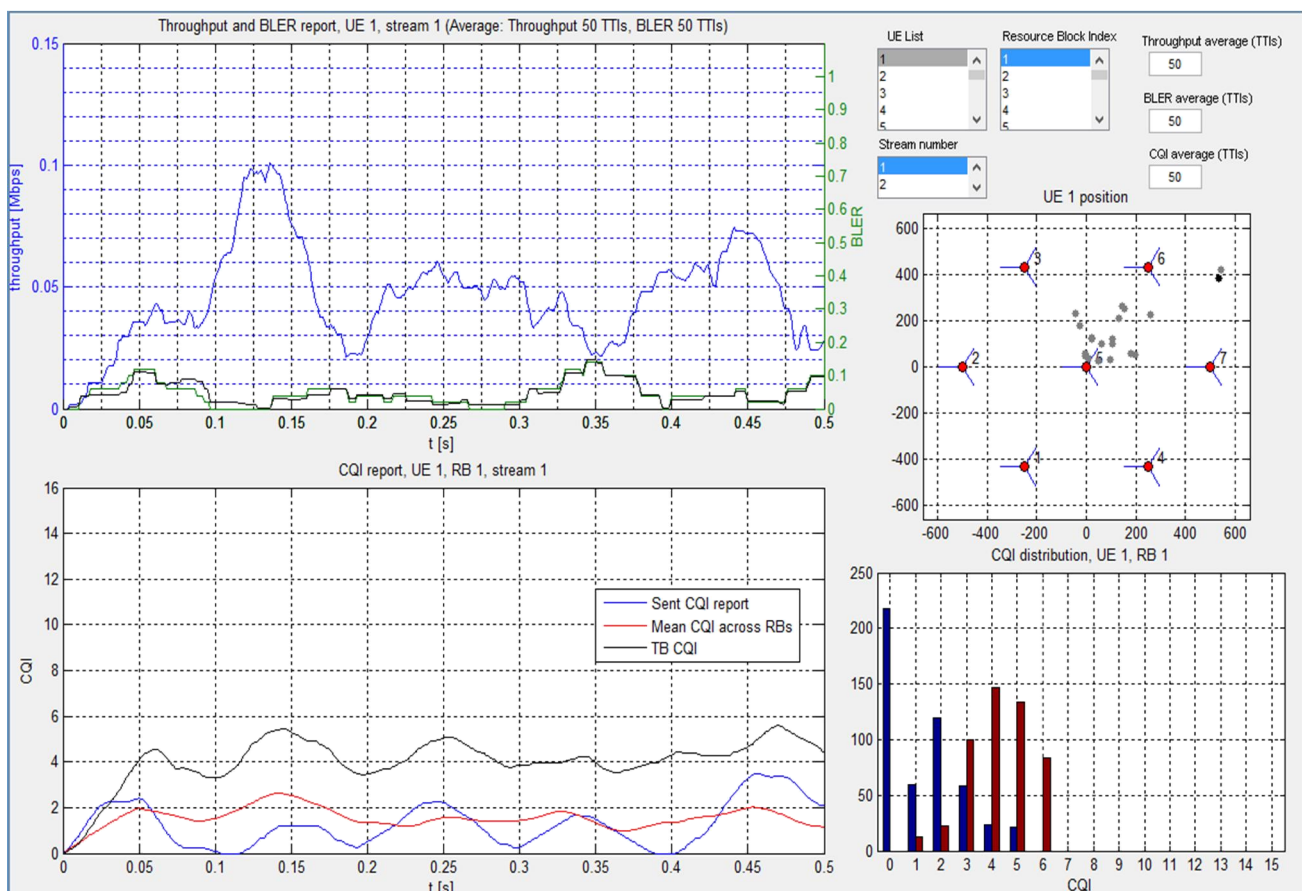
Σχήμα 6.17: Throughput και BLER τομέα

- **LTE_GUI_show_UE_traces:** Στο σχήμα 6.18 απεικονίζονται τα παρακάτω γραφήματα:
 - ✓ Throughput και BLER κατά τη πάροδο του χρόνου. Η μπλε γραμμή απεικονίζει το ρυθμό μετάδοσης του UE σε Mb / s για τα επιλεγμένα ρεύμα και UE, επίσης το BLER, όπως μετριέται από το λόγο ACK/NACK (πράσινη γραμμή) και η τιμή BLER που εφαρμόζεται από το σύνδεσμο πρότυπο ποιότητας. Παρά το γεγονός ότι το σύστημα είναι ρυθμισμένο να δίνει BLERs ≥ 0.1 , τα πραγματικά αποτελέσματα επηρεάζονται από την καθυστέρηση ανερχόμενης ζεύξης και το χρόνο μεταβλητότητας του καναλιού.
 - ✓ Τις θέσεις των UEs στη περιοχή ενδιαφέροντος (ROI).
 - ✓ Στέλνεται η αναφορά CQI για το επιλεγμένο RB και ρεύμα (μπλε γραμμή), το μέσο CQI για ολόκληρη την μπάντα συχνοτήτων

(κόκκινη γραμμή) και CQI από το Transport Block (TB) στέλνεται στον UE, αν προγραμματιστεί.

- ✓ Κατανομή των CQIs για το επιλεγμένο UE και RB (Resource Block) κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης (μπλε), και του TBCQIs (κόκκινο).

Σημειώστε ότι όλα τα χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα είναι κατά μέσω όρο χρησιμοποιώντας ένα ορθογώνιο παράθυρο ρύθμισης μήκους.

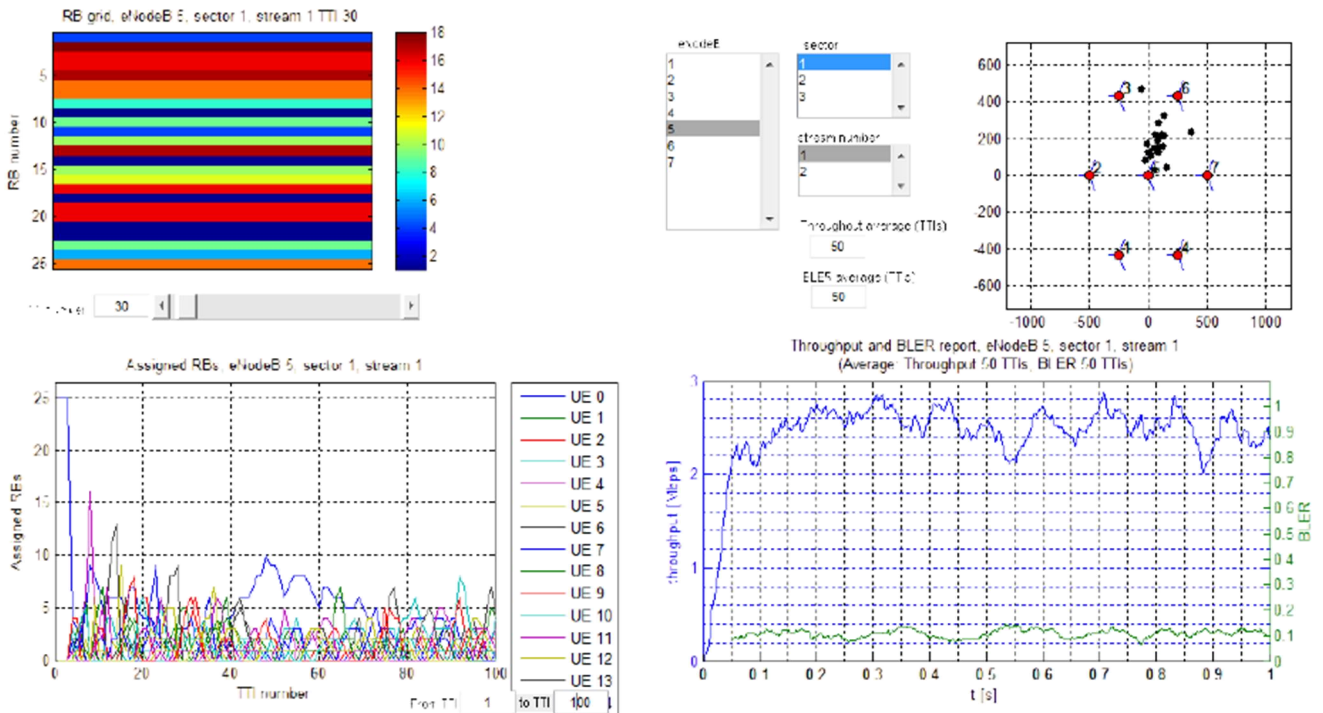


Σχήμα 6.18: LTE_GUI_show_UE_traces GUI

- **LTE_GUI_show_cell_traces:** Η Γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) που απεικονίζει τα ίχνη των κυψελών για το επιλεγμένο ζεύγος eNodeB / τομέα, περιέχει τα ακόλουθα στοιχεία:

- ✓ Γραφική απεικόνιση της κατανομής RB για το επιλεγμένο TTI.

- ✓ Εξέλιξη του αριθμού των εκχωρημένων RBs σε κάθε UE κατά τη διάρκεια της επιλεγμένης περιοχής TTI.
- ✓ Throughput και BLER για τον επιλεγμένο αριθμό ρεύματος.



Σχήμα 6.19: LTE_GUI_show_cell_tracesGUI

6.5 Συμπεράσματα προσομοίωσης

Κινητά συστήματα επικοινωνίας λειτουργούν σε συχνότητες που κυμαίνονται από 800 MHz έως 2600 MHz. Διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων βιώνουν διαφορετικές απώλειες διάδοσης σύμφωνα με το κινητό κυτταρικό περιβάλλον. Υπάρχει περίπου 10 dB απώλεια διάδοσης σε αστικό περιβάλλον και 8 dB σε αγροτικό περιβάλλον, όπως η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται από 800 MHz έως 2 GHz. Καθώς οι απώλειες διάδοσης αυξάνουν, αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους που προαναφέρθηκαν, η κάλυψη του δικτύου μειώνεται. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιώντας χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας εξασφαλίζουμε ευρύτερη κάλυψη. Αυτή η μείωση της περιοχής κάλυψης ενός σταθμού βάσης έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία περισσότερων σταθμών βάσης για την κάλυψη μιας συγκεκριμένης περιοχής. Έτσι, η ανάπτυξη των δικτύων LTE σε υψηλή συχνότητα είναι δαπανηρή, αλλά υπάρχει μία βελτίωση στην χωρητικότητα του συστήματος. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, η χαμηλή συχνότητα λειτουργίας μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές μεταξύ των κυττάρων, αλλά με την κλίση της κεραίας (tilt) του σταθμού βάσης μπορεί να μειώσει την κάλυψη και κατά συνέπεια την παρεμβολή. Έτσι, ανάλογα με τις ανάγκες του διαχειριστή και τη διαθεσιμότητα του φάσματος οι πάροχοι μπορούν να αναπτύξουν συστήματα που λειτουργούν σε υψηλότερες ή χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων.

Βιβλιογραφία-πηγές

[1] AN INTRODUCTION TO LTE

LTE, LTE-ADVANCED, SAE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS

Christopher Cox - Director, Chris Cox Communications Ltd, UK

[2] «ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ LTE LINK LEVEL SIMULATOR ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ»

http://ru6.cti.gr/ru6/system/files/bouras_site/ergasies/diplwmatikes/129_chantzi_0.pdf?language=el

[3] PERFORMANCE EVALUATION OF MULTI ANTENNA TECHNIQUES IN LTE.

<http://airccse.org/journal/ijmnc/papers/2412ijmnc09.pdf>

[4] LTE Quick Guide

http://www.tutorialspoint.com/lte/lte_quick_guide.htm

[5] LTE PERFORMANCE ANALYSIS ON 800 AND 1800 MHz

BANDS <https://dSPACE.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21173/sainju.pdf?sequence=1>

[6] Physical Layer measurements in 3GPP LTE

<http://projekter.aau.dk/projekter/files/60737111/diplom.pdf>

[7] Institute of telecommunications

<http://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vienna-lte-a-simulators/>

[8] MITIGATION OF INTER CELL INTERFERENCE AND FADING IN LTE SYSTEMS

<http://thescipub.com/PDF/jcssp.2014.434.442.pdf>

[9] <http://4g-lte-world.blogspot.gr/2015/05/rsrp-rssi-and-rsrq.html>