



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
**ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 5G LTE ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΣΗΜΑΤΩΝ 5G IOT

Ντούσκα Αλεξάνδρα

A.M: 168

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Αγγέλης

Καθηγητής

Αρτα, Μάιος, 2026

**PERFORMANCE EVALUATION OF LTE
UL NETWORK IN THE PRESENCE OF
UL IoT SIGNALS**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 21/05/2026

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής
Κωνσταντίνος Αγγέλης
Καθηγητής
2. Μέλος επιτροπής
Ανδρέας, Τσορμπατζόγλου
Αναπληρωτής Καθηγητής
3. Μέλος επιτροπής
Ελευθέριος Στεργίου
Καθηγητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον εισηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Αγγέλη, για τη βοήθειά του, την ενθάρρυνση και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών Πανεπιστημίου Ιωαννίνων για τη δυνατότητα να παρακολουθήσω το συγκεκριμένο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της απόδοσης της ζεύξης ανόδου (uplink) ενός δικτύου LTE, παρουσία παρεμβαλλόμενων σημάτων NB-IoT στο φυσικό επίπεδο επικοινωνίας. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώσεων στο περιβάλλον AWR Design Environment (AWRD).

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της συνύπαρξης των δύο τεχνολογιών στην αξιοπιστία της μετάδοσης, χρησιμοποιώντας ως βασική μετρική αξιολόγησης τον ρυθμό σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER). Για το σύστημα LTE επιλέχθηκε η διαμόρφωση QPSK, καθώς οι δοκιμές με QAM (16QAM/64QAM) έδειξαν έντονη ευαισθησία στον θόρυβο.

Οι προσομοιώσεις κάλυψαν συνολικά 36 σενάρια, μεταβάλλοντας παράμετρους του NB-IoT, όπως το SC-Mode (0–8) και τον τύπο διαμόρφωσης ($\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK), ενώ το σήμα NB-IoT τοποθετήθηκε στα άκρα του φάσματος του LTE. Τα αποτελέσματα, οργανωμένα σε τέσσερις ομάδες προσομοιώσεων έδειξαν ότι σε ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB) η απόδοση του συστήματος LTE παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστη από τις παραμέτρους του NB-IoT.

Ωστόσο, η εισαγωγή απωλειών διαδρομής (Path Loss) αναδείχθηκε ως ο καθοριστικός παράγοντας υποβάθμισης της αξιοπιστίας της ζεύξης, με τη διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK να παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε συνθήκες αυξημένης εξασθένησης σε σύγκριση με τη διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η συνύπαρξη συσκευών NB-IoT με δίκτυα LTE είναι εφικτή, χωρίς να προκαλείται σημαντική υποβάθμιση της αξιοπιστίας της μετάδοσης στο σύστημα LTE υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες λειτουργίας, ενώ οι απώλειες καναλιού (Path loss) αποτελούν τον κυρίαρχο παράγοντα υποβάθμισης της απόδοσης της ζεύξης.

Λέξεις-κλειδιά: LTE, Uplink, NB-IoT, Συνύπαρξη LTE–NB-IoT, Ρυθμός Σφαλμάτων Bit (BER), Προσομοίωση AWR Design Environment (AWRD), Απώλειες Διαδρομής (Path Loss), Ψηφιακές Διαμορφώσεις.

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the performance of the uplink of a Long Term Evolution (LTE) network in the presence of interference from Internet of Things devices operating via Narrowband-IoT (NB-IoT) technology at the physical communication layer. The analysis was conducted through simulations in the AWR Design Environment (AWRD).

The primary objective of the study is to investigate the impact of the coexistence of these two technologies on data transmission reliability. The Bit Error Rate (BER) is utilized as the primary evaluation metric. QPSK modulation was selected for the LTE system, as tests conducted with QAM modulations (16QAM and 64QAM) exhibited increased noise sensitivity under the specific simulation conditions.

The simulations included a total of 36 operating scenarios, in which fundamental parameters of the NB-IoT system were varied, such as the SC-Mode (0–8) and the modulation type ($\pi/2$ -BPSK and rotated $\pi/4$ -QPSK). The NB-IoT signal was placed at the edges of the LTE spectrum.

The results of the four parameter sweeps demonstrated that under ideal channel conditions (LOSS = 0 dB), the performance of the LTE system remains virtually unaffected by the NB-IoT operating parameters. Conversely, the introduction of Path Loss emerged as the primary factor degrading the link's performance. Specifically, it was observed that the $\pi/2$ -BPSK modulation exhibits greater resilience under conditions of increased attenuation compared to the rotated $\pi/4$ -QPSK modulation.

In conclusion, the study's results indicate that the coexistence of NB-IoT devices with LTE networks is technically feasible, without causing significant degradation to the transmission reliability of the LTE system under the examined operating conditions.

Keywords: LTE Uplink, NB-IoT, LTE–NB-IoT Coexistence, Bit Error Rate (BER), AWR Design Environment (AWRD) Simulation, Path Loss, Digital Modulations.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
1 Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	11
1.1 Αντικείμενο και Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας.....	11
1.2 Κίνητρο και Ερευνητικό Πρόβλημα.....	12
1.3 Μεθοδολογία Μελέτης	13
1.4 Δομή της Εργασίας.....	14
2 Κεφάλαιο 2 ^ο : Θεωρία.....	16
2.1 Μοντέλο Πομπού – Καναλιού – Δέκτη.....	16
2.1.1 Ο Πομπός	17
2.1.2 Το Κανάλι Μετάδοσης.....	17
2.1.3 Ο Δέκτης	18
2.2 Το Ασύρματο Κανάλι και ο Θόρυβος (AWGN).....	19
2.2.1 Χαρακτηριστικά του Μοντέλου AWGN	19
2.2.2 Μαθηματική Αναπαράσταση	20
2.2.3 Σχέση με το E_b/N_0 και τον Υπολογισμό του BER	21
2.2.4 Η Επίδραση στο Σήμα LTE.....	21
2.3 BER - Bit Error Rate	22
2.4 Απώλειες Διαδρομής (Path Loss).....	22
2.4.1 Μοντέλο SCM (3GPP).....	25
2.4.2 Μοντέλο WINNER και IMT-Advanced	28
2.4.3 Φυσικοί Παράγοντες και Μοντελοποίηση.....	30

2.5	Ψηφιακή Πληροφορία και Σύμβολα	30
2.5.1	Η Διαδικασία της Ψηφιακής Διαμόρφωσης.....	31
2.5.2	Σύμβολα και Χωρητικότητα Καναλιού	37
2.6	Λόγος E_b/N_0 και SNR.....	37
2.6.1	Ο Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR).....	38
2.6.2	Ο Λόγος Ενέργειας ανά Bit προς Θόρυβο (E_b/N_0).....	38
2.6.3	Η Σύνδεση του (E_b/N_0) με τον Ρυθμό Σφαλμάτων Bit (BER).....	39
2.7	Το Σύστημα LTE και η Ζεύξη Ανόδου (Uplink)	40
2.7.1	Γενική Επισκόπηση LTE	40
2.7.2	Αρχιτεκτονική και Στόχοι Σχεδιασμού.....	40
2.7.3	Ο Ρόλος του LTE στο Πλαίσιο της Μελέτης.....	40
2.8	Ο Ρόλος του Φυσικού Επιπέδου στο LTE.....	41
2.8.1	Βασικές Λειτουργίες και Επεξεργασία Σήματος.....	41
2.8.2	Το Φυσικό Επίπεδο ως "Πεδίο Μάχης" των Παρεμβολών.....	42
2.9	Downlink και Uplink στο LTE	43
2.9.1	Ζεύξη Καθόδου (Downlink) και OFDMA.....	44
2.9.2	Ζεύξη Ανόδου (Uplink) και SC-FDMA	44
2.10	Η τεχνική SC-FDMA στο LTE Uplink	45
2.11	Διαμορφώσεις στο LTE Uplink	46
2.11.1	Η Διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)	46
2.11.2	Διαμορφώσεις Ανώτερης Τάξης: QAM (16QAM / 64QAM)	47
2.12	Παράγοντες που επηρεάζουν την Απόδοση Uplink.....	47
2.12.1	Ισχύς Εκπομπής και Απώλειες Διαδρομής (Path Loss).....	48
2.12.2	Παρεμβολή Γειτονικού Καναλιού (ACI) και Φασματική Διαρροή	48
2.12.3	Ο BER ως «Καθρέπτης» των Φυσικών Διεργασιών	48
2.13	Internet of Things και IoT Επικοινωνίες	49
2.13.1	Έννοια και Χαρακτηριστικά IoT Συστημάτων	49

2.13.2	Περιορισμοί IoT Συσκευών	50
2.13.3	NB-IoT: Το Κυψελωτό IoT (Narrowband IoT)	51
2.13.4	Μετάδοση Uplink στο NB-IoT.....	51
2.13.5	Σενάρια Συνύπαρξης (In-band και Guard-band)	52
2.13.6	Επιπτώσεις της Συνύπαρξης LTE και IoT	52
2.13.7	Φασματική Συνύπαρξη σε Κυψελωτικά Δίκτυα	54
2.13.8	Παρεμβολή στη Ζεύξη Ανόδου (Uplink).....	55
2.13.9	Επίδραση Παρεμβολής στη Λήψη Συμβόλων.....	56
2.13.10	Τοποθέτηση NB-IoT σε Guard-band	56
2.13.11	Σχέση Παρεμβολής και BER.....	57
2.13.12	Προκλήσεις Αξιολόγησης της Απόδοσης	57
2.14	Μετρικές Απόδοσης και Εργαλεία Ανάλυσης	58
2.14.1	Ρυθμός Σφαλμάτων Bit (Bit Error Rate – BER)	58
2.14.2	Σχέση Eb/No και Καμπύλη Waterfall	58
2.14.3	Διάγραμμα Αστερισμού και Συνιστώσες I/Q.....	60
2.14.4	Περιορισμοί και Ερμηνεία Μετρικών.....	60
3	Κεφάλαιο 3 ^ο : Πειραματική Διαδικασία.....	61
3.1	Περιγραφή Περιβάλλοντος Προσομοίωσης AWRD.....	61
3.2	Αξιολόγηση Διαμόρφωσης LTE (QPSK).....	61
3.3	Θεωρητικό Πλαίσιο Καναλιού – Path Loss (Rappaport)	62
3.4	Μεθοδολογία προσομοιώσεων.....	62
3.5	Πειραματική Διάταξη	64
3.6	Συνολική Αρχιτεκτονική Κυκλώματος.....	65
3.7	Ανάλυση Βασικών Υποσυστημάτων του Κυκλώματος	65
3.7.1	Πομπός LTE (LTE Transmitter).....	66
3.7.2	Πηγή NB-IoT (NB-IoT Transmitter).....	70
3.7.3	Κανάλι Μετάδοσης (AWGN + LOSS).....	73

3.7.4	Δέκτης LTE (LTE Receiver).....	74
3.7.5	Υπολογισμός BER και Μετρήσεις - BER Measurement και Throughput Estimation.....	79
3.8	Παράμετροι Συστήματος.....	80
3.9	Παράμετροι Προσομοιώσεων.....	83
3.10	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων AWRD.....	84
3.10.1	Πρώτη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB.....	84
3.10.2	Δεύτερη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB...93	93
3.10.3	Τρίτη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT $\pi/2$ -BPSK - LOSS μεταβαλλόμενο.103	103
3.10.4	Τέταρτη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT $\pi/4$ -QPSK - LOSS μεταβαλλόμενο.....	112
3.11	Μεθοδολογία Ανάλυσης.....	124
3.11.1	Ανάλυση 1 ^{ης} ομάδας προσομοιώσεων.....	125
3.11.2	Ανάλυση 2 ^{ης} ομάδας προσομοιώσεων.....	128
3.11.3	Ανάλυση 3 ^{ης} ομάδας προσομοιώσεων.....	130
3.11.4	Ανάλυση 4 ^{ης} ομάδας προσομοιώσεων.....	133
3.12	Συνολικό συμπέρασμα προσομοιώσεων.....	139
4	Κεφάλαιο 4 ^ο : Συμπεράσματα.....	141
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	143

1 Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών τις τελευταίες δεκαετίες υπήρξε ραγδαία, μεταμορφώνοντας τον τρόπο με τον οποίο οι σύγχρονες κοινωνίες παράγουν, διαμοιράζονται και αξιοποιούν την πληροφορία. Από την εμφάνιση των πρώτων αναλογικών δικτύων έως τη μετάβαση από το 4G (LTE) προς την πέμπτη γενιά (5G) [1] και σύντομα προς την έκτη γενιά (6G), ως βασική απαίτηση παραμένει η αποτελεσματική μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Η τάση αυτή οδηγεί στην ενσωμάτωση ενός μεγάλου αριθμού νέων συσκευών στα κυψελωτικά δίκτυα, οι οποίες υποστηρίζουν εφαρμογές όπως έξυπνες πόλεις, έξυπνα ενεργειακά δίκτυα, τηλεϊατρική και συστήματα αυτόνομης οδήγησης, δημιουργώντας αυξημένες απαιτήσεις ως προς την αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.

Στο επίκεντρο αυτής της τεχνολογικής εξέλιξης βρίσκεται το Internet of Things (IoT), το οποίο απαιτεί τη συνύπαρξη εξειδικευμένων στενοζωνικών σημάτων, όπως το Narrowband-IoT (NB-IoT), που σχεδιάστηκε με σκοπό να υποστηρίζει ένα μεγάλο αριθμό συσκευών χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας μέσα στο υφιστάμενο φάσμα των κυψελωτικών δικτύων, όπως το Long Term Evolution (LTE).

Η συνύπαρξη αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στη ζεύξη ανόδου (uplink), όπου πολλαπλές συσκευές μεταδίδουν ταυτόχρονα προς τον σταθμό βάσης. Υπό τις συνθήκες αυτές, η παρουσία στενοζωνικών σημάτων NB-IoT στο ίδιο φασματικό περιβάλλον με το LTE μπορεί να δημιουργήσει παρεμβολές και να επηρεάσει την ποιότητα της λήψης οδηγώντας σε αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η απόδοση της ζεύξης αξιολογείται μέσω του BER ως συνάρτηση του E_b/N_0 .

1.1 Αντικείμενο και Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η συστηματική μελέτη της συμπεριφοράς της ζεύξης ανόδου (uplink) ενός συστήματος LTE σε συνθήκες συνύπαρξης με σήματα Narrowband-IoT (NB-IoT). Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη διασύνδεσης δισεκατομμυρίων συσκευών έχουν οδηγήσει

στην ανάπτυξη τεχνολογιών που επιτρέπουν την ταυτόχρονη λειτουργία διαφορετικών συστημάτων στο ίδιο φασματικό περιβάλλον.

Η μελέτη επικεντρώνεται στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer – Layer 1) των ασύρματων επικοινωνιών, στο οποίο εκδηλώνονται οι βασικοί μηχανισμοί θορύβου, διάδοσης και παρεμβολών που επηρεάζουν την ποιότητα της λήψης. Στο επίπεδο αυτό, η συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών στο ίδιο φάσμα μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα παρεμβολής, τα οποία ενδέχεται να υποβαθμίσουν την αξιοπιστία της μετάδοσης.

Κύριος στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης που ασκούν τα σήματα Narrowband-IoT (NB-IoT) στην απόδοση της ζεύξης ανόδου του LTE. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER), ο οποίος αποτελεί θεμελιώδη δείκτη αξιοπιστίας μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης υπό συνθήκες θορύβου και παρεμβολών.

Ειδικότερα, εξετάζεται η απόδοση του συστήματος μέσω της μέτρησης και αξιολόγησης του BER του LTE ως συνάρτηση βασικών παραμέτρων του παρεμβάλλοντος σήματος NB-IoT, όπως ο τύπος ψηφιακής διαμόρφωσης και οι ρυθμίσεις του SC-Mode. Μέσω της ανάλυσης διερευνάται κατά πόσο η φασματική συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών είναι εφικτή, χωρίς να προκαλείται ουσιαστική υποβάθμιση της απόδοσης της ζεύξης LTE.

1.2 Κίνητρο και Ερευνητικό Πρόβλημα

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών έχει παρουσιάσει σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, με στόχο την αξιόπιστη και αποδοτική μετάδοση δεδομένων. Η εξέλιξη των κυψελωτικών δικτύων προς τα δίκτυα νέας γενιάς (5G και 6G), σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση εφαρμογών Internet of Things (IoT) στα υφιστάμενα δίκτυα, δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις ως προς την αποδοτική αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, το οποίο αποτελεί έναν περιορισμένο και πολύτιμο πόρο για τις ασύρματες επικοινωνίες. [2]

Ένα βασικό ερευνητικό ζήτημα αφορά τη συνύπαρξη συστημάτων διαφορετικών χαρακτηριστικών στο ίδιο φασματικό περιβάλλον. Τα συστήματα Narrowband-IoT (NB-IoT), συχνά λειτουργούν εντός ή σε γειτονικές ζώνες συχνοτήτων που

χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα LTE [4] γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα παρεμβολής μεταξύ των μεταδιδόμενων σημάτων.

Το βασικό πρόβλημα που εξετάζεται αφορά τον βαθμό στον οποίο η συνύπαρξη NB-IoT και LTE επηρεάζει την αξιοπιστία της ζεύξης ανόδου, ιδιαίτερα υπό συνθήκες εξασθένησης του καναλιού.

Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται ένα σενάριο συνύπαρξης, στο οποίο το NB-IoT σήμα τοποθετείται στα άκρα του φάσματος (guard-band) του LTE, ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή του στην αξιοπιστία της ζεύξης ανόδου.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στα ακόλουθα ερωτήματα:

- Σε ποιο βαθμό επηρεάζεται ο ρυθμός σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER) της ζεύξης ανόδου του LTE από την παρουσία του παρεμβάλλοντος σήματος NB-IoT κατά τη φασματική συνύπαρξη;
- Ποια από τις διαμορφώσεις NB-IoT ($\pi/2$ -BPSK ή rotated $\pi/4$ -QPSK) παρουσιάζει ευνοϊκότερη συμπεριφορά ως προς τη συνύπαρξη με το LTE και μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε συνθήκες υποβαθμισμένου καναλιού;
- Πώς επηρεάζουν οι απώλειες διαδρομής (path loss) την αξιοπιστία της συνύπαρξης των δύο τεχνολογιών;

Η διερεύνηση των παραπάνω ζητημάτων είναι σημαντική για την κατανόηση της συμπεριφοράς της ζεύξης σε συνθήκες συνύπαρξης LTE–NB-IoT, καθώς η ενσωμάτωση υπηρεσιών IoT θα πρέπει να πραγματοποιείται χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών. [3]

1.3 Μεθοδολογία Μελέτης

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας ακολουθήθηκε προσομοιωτική προσέγγιση στο περιβάλλον AWR Design Environment (AWRD). Η μεθοδολογία οργανώνεται σε τρία κύρια στάδια:

A. Σχεδιασμός και Παραμετροποίηση

Αναπτύχθηκε ένα πλήρες μοντέλο προσομοίωσης το οποίο περιλαμβάνει πομπό LTE, πηγή παρεμβολής NB-IoT, ασύρματο κανάλι με λευκό γκαουσιανό θόρυβο (Additive

White Gaussian Noise – AWGN) και παράμετρο εξασθένησης του καναλιού (LOSS). Για το LTE επιλέχθηκε η διαμόρφωση QPSK καθώς η αρχική διερεύνηση έδειξε ότι οι διαμορφώσεις 16QAM και 64QAM παρουσιάζουν έντονη ευαισθησία στον θόρυβο.

Β. Εκτέλεση Προσομοιώσεων: Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 36 προσομοιώσεις, οι οποίες οργανώθηκαν σε τέσσερις κύριες ομάδες (scans).

Η 1^η και 2^η ομάδα προσομοιώσεων αφορούν την επίδραση της παραμέτρου SCMode καθώς και του τύπου διαμόρφωσης του NB-IoT ($\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK), σε ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB). Αντίστοιχα, η 3^η και 4^η ομάδα προσομοιώσεων αφορούν τη μελέτη της συμπεριφοράς της ζεύξης υπό την επίδραση αυξανόμενων απωλειών διαδρομής, μέσω της σταδιακής μεταβολής της παραμέτρου LOSS.

Γ. Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω της μέτρησης του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) σε δύο συγκεκριμένα σημεία λειτουργίας, για τιμές E_b/N_0 ίσες με -105 dB και -106 dB, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς για τη συγκριτική ανάλυση και αξιολόγησης της συμπεριφοράς του συστήματος. [6] [7]

1.4 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε τέσσερα κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας και εισάγεται το πρόβλημα της συνύπαρξης LTE και NB-IoT στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer). Επιπλέον, διατυπώνονται το αντικείμενο, το ερευνητικό πρόβλημα και οι στόχοι της εργασίας.

Κεφάλαιο 2: Παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις έννοιες των ψηφιακών επικοινωνιών, το βασικό μοντέλο πομπού – καναλιού – δέκτη, οι αρχές της ψηφιακής διαμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού, όπως ο θόρυβος και οι απώλειες διαδρομής (Path Loss). Στη συνέχεια, αναλύεται το σύστημα Long Term Evolution (LTE) με έμφαση στη ζεύξη ανόδου (uplink) και την τεχνική SC-FDMA, ενώ παρουσιάζονται το Internet of Things (IoT) και η τεχνολογία Narrowband-IoT (NB-IoT). Επιπλέον, εξετάζεται η φασματική συνύπαρξη LTE–NB-IoT και οι βασικοί

μηχανισμοί παρεμβολής, καθώς και οι κύριες μετρικές απόδοσης με έμφαση στον ρυθμό σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER).

Κεφάλαιο 3: Παρουσιάζεται αναλυτικά το περιβάλλον προσομοίωσης AWR Design Environment (AWRD), η παραμετροποίηση των επιμέρους δομικών στοιχείων (blocks) και η μεθοδολογία εκτέλεσης των προσομοιώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα μέσω γραφικών παραστάσεων και πινάκων, ενώ πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των εξεταζόμενων σεναρίων.

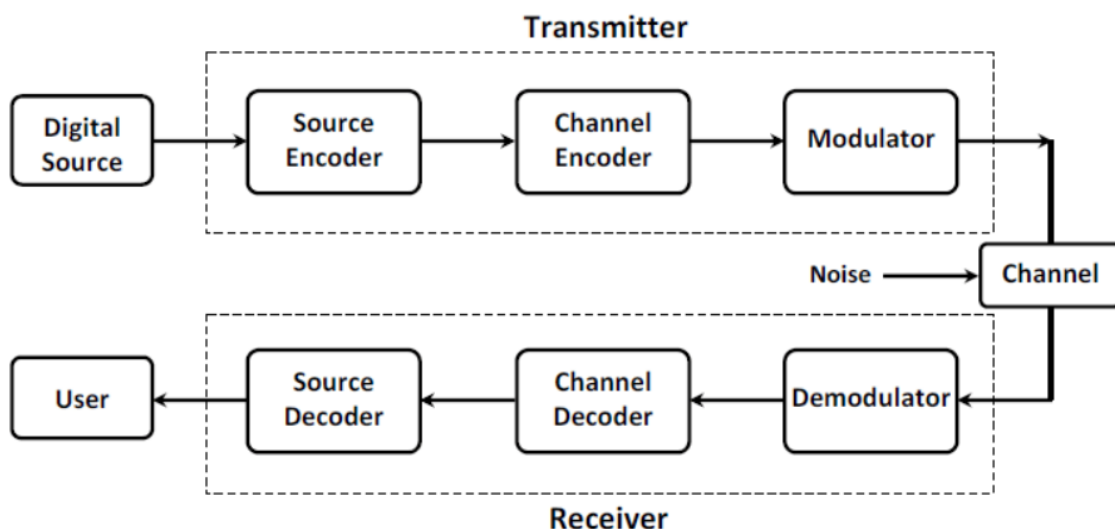
Κεφάλαιο 4: Συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται συνοπτικά προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της συνύπαρξης κυψελωτικών δικτύων και IoT τεχνολογιών.

2 Κεφάλαιο 2^ο: Θεωρία

Οι ψηφιακές επικοινωνίες αποτελούν τη βάση των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων, όπου η μετάδοση πληροφορίας πραγματοποιείται σε περιβάλλοντα με θόρυβο, εξασθένηση και παρεμβολές. Η κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τη διάδοση και την επεξεργασία των σημάτων είναι κρίσιμη για την ανάλυση τεχνολογιών όπως το LTE και το NB-IoT. Στο πλαίσιο αυτό, η συμπεριφορά του ασύρματου καναλιού και η επίδραση των φυσικών φαινομένων στη μετάδοση επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία της επικοινωνίας και την απόδοση του συστήματος.

2.1 Μοντέλο Πομπού - Καναλιού - Δέκτη

Η θεμελιώδης αλυσίδα επικοινωνίας αποτελείται από τρία κύρια μέρη: τον πομπό, το κανάλι μετάδοσης και τον δέκτη. Ο πομπός είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία της ψηφιακής πληροφορίας (κωδικοποίηση, διαμόρφωση) και τη μετατροπή της σε σήμα κατάλληλο για μετάδοση μέσω του φυσικού μέσου. Το κανάλι αποτελεί το μέσο διάδοσης (π.χ. αέρας), το οποίο εισάγει αναπόφευκτα εξασθένηση, θόρυβο και παρεμβολές, αλλοιώνοντας το εκπεμπόμενο σήμα. Τέλος, ο δέκτης αναλαμβάνει την ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας μέσω διαδικασιών αποδιαμόρφωσης και ανίχνευσης σφαλμάτων, αποτελώντας το σημείο όπου αξιολογείται η αξιοπιστία της ζεύξης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους στάδια της αλυσίδας επικοινωνίας.



Σχήμα 2.1 Βασικό μοντέλο ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας [11]

2.1.1 Ο Πομπός

Ο πομπός είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία της ψηφιακής πληροφορίας και τη μετατροπή της σε σήμα κατάλληλο για μετάδοση. Στην παρούσα μελέτη, ο πομπός εκτελεί κρίσιμες διαδικασίες όπως:

Κωδικοποίηση Πηγής και Καναλιού: Η πληροφορία μετατρέπεται σε δυαδική μορφή (bits) και προστίθενται πλεονασματικά bits για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων.

Ψηφιακή Διαμόρφωση: Τα bits χαρτογραφούνται (mapping) σε σύμβολα (π.χ. QPSK για το LTE ή $\pi/2$ -BPSK για το IoT).

Μετατροπή σε Αναλογικό Σήμα: Το σήμα μεταφέρεται από το βασικό επίπεδο (baseband) στην επιθυμητή συχνότητα φέροντος για την εκπομπή του μέσω της κεραίας.

2.1.2 Το Κανάλι Μετάδοσης

Το κανάλι αποτελεί το φυσικό μέσο διάδοσης (π.χ. ατμόσφαιρα), το οποίο εισάγει αναπόφευκτα εξασθένηση, θόρυβο και παρεμβολές. Στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον AWRD, το κανάλι μοντελοποιείται ως ένα σύνθετο περιβάλλον όπου:

- Το κανάλι προσεγγίζεται ως κανάλι προσθετικού λευκού γκαουσιανού θορύβου (AWGN), το οποίο προσομοιώνει τον θερμικό θόρυβο των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.
- Εφαρμόζονται απώλειες διαδρομής (Path Loss), οι οποίες προσεγγίζονται μέσω της παραμέτρου LOSS και επηρεάζουν την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος.
- Εκδηλώνεται παρεμβολή από το σήμα NB-IoT, η οποία λειτουργεί ως επιπλέον παράγοντας αλλοίωσης της κυματομορφής του LTE.

Μαθηματικά, το μοντέλο του καναλιού AWGN εκφράζεται ως:

$$r(t)=s(t)+n(t) \quad (1)$$

όπου:

- $s(t)$ = μεταδιδόμενο σήμα
- $n(t)$ = προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος
- $r(t)$ = λαμβανόμενο σήμα

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι το λαμβανόμενο σήμα διαφέρει από το εκπεμπόμενο, λόγω της επίδρασης του θορύβου και των απωλειών του καναλιού. Η αλλοίωση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη ανάκτηση της πληροφορίας στον δέκτη και, τελικά, σε αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).

Στην περίπτωση συνύπαρξης LTE και NB-IoT, το λαμβανόμενο σήμα επηρεάζεται όχι μόνο από τον θόρυβο, αλλά και από την παρεμβολή του σήματος NB-IoT. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο λήψης μπορεί να γραφεί ως:

$$r(t) = s_{LTE}(t) + i_{NB-IoT}(t) + n(t) \quad (2)$$

όπου $s_{LTE}(t)$ είναι το επιθυμητό σήμα LTE, $i_{NB-IoT}(t)$ η παρεμβολή από το NB-IoT και $n(t)$ ο προσθετικός λευκός γκαουσιανός θόρυβος.

2.1.3 Ο Δέκτης

Ο δέκτης αποτελεί το σημείο όπου πραγματοποιείται η ανάκτηση της αρχικής πληροφορίας. Οι βασικές του λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- Αποδιαμόρφωση: Η αναγνώριση των ληφθέντων συμβόλων και η επιστροφή τους σε μορφή bits.
- Ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων: Η χρήση πλεονασμού για την αποκατάσταση τυχόν αλλοιωμένων δεδομένων.

Υπολογισμός του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER): Στο στάδιο αυτό αξιολογείται η απόδοση του συστήματος μέσω της σύγκρισης των μεταδιδόμενων και των ληφθέντων bit. Όταν το κανάλι προκαλεί σημαντική αλλοίωση στο λαμβανόμενο σήμα, ο δέκτης μπορεί να οδηγηθεί σε λανθασμένη ανάκτηση της πληροφορίας, με αποτέλεσμα την αύξηση του Bit Error Rate, το οποίο αποτελεί βασική μετρική αξιολόγησης της αξιοπιστίας του συστήματος υπό την παρουσία θορύβου και παρεμβολών.

2.2 Το Ασύρματο Κανάλι και ο Θόρυβος (AWGN)

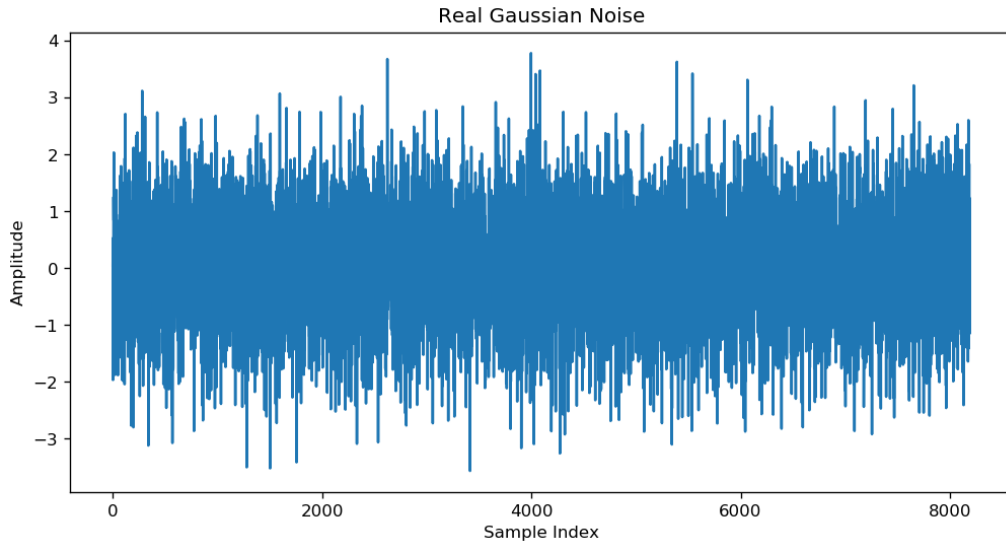
Το ασύρματο κανάλι αποτελεί ένα εγγενώς δυσμενές περιβάλλον για τη μετάδοση δεδομένων, καθώς η πληροφορία εκτίθεται σε πλήθος αλλοιώσεων κατά τη διάρκεια της διάδοσής της. Το κανάλι μοντελοποιείται ως κανάλι προσθετικού λευκού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise – AWGN), το οποίο χρησιμοποιείται ως βασικό μοντέλο αναφοράς για την περιγραφή της επίδρασης του θορύβου.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες για την προσομοίωση της επίδρασης των τυχαίων διεργασιών που παρατηρούνται στη φύση και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

2.2.1 Χαρακτηριστικά του Μοντέλου AWGN

Ο όρος AWGN προκύπτει από τρεις βασικές ιδιότητες που περιγράφουν τη φύση του:

- Προσθετικός (Additive): Ο θόρυβος προστίθεται απευθείας στο επιθυμητό σήμα κατά τη διάρκεια της μετάδοσης $s(t)$, με αποτέλεσμα το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$ να δίνεται από τη σχέση $r(t) = s(t) + n(t)$ και δεν εξαρτάται από το ίδιο το σήμα, αλλά δρα ανεξάρτητα πάνω σε αυτό.
- Λευκός (White): Ο χαρακτηρισμός αυτός προέρχεται από την αναλογία με το λευκό φως και υποδηλώνει ότι ο θόρυβος διαθέτει σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος ($N_0/2$) σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι περιέχει όλες τις συχνότητες με την ίδια ένταση, καθιστώντας τον έναν από τους βασικούς παράγοντες υποβάθμισης του σήματος.
- Γκαουσιανός (Gaussian): Οι τιμές του θορύβου στο πεδίο του χρόνου ακολουθούν την κανονική (Gauss) κατανομή με μέση τιμή μηδέν. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση του θερμικού θορύβου που παράγεται από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων στα αγωγία μέσα και στα εξαρτήματα του δέκτη.**Error! Reference source not found.Error! Reference source not found.Error! Reference source not found.**



Σχήμα 2.2 Χρονική αναπαράσταση προσθετικού λευκού γκαουσιανού θορύβου (AWGN) [6][7][8]

2.2.2 Μαθηματική Αναπαράσταση

Ο θόρυβος AWGN μοντελοποιείται ως μια σύνθετη, κυκλικά συμμετρική, Gaussian τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση σ^2 . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για ένα διάνυσμα θορύβου n σε ένα κανάλι AWGN δίνεται από τη σχέση:

$$p(n) = \left(\frac{1}{(\pi * N_0)^N} \right) \exp \left(- \frac{\| n^2 \|}{N_0} \right) \quad (3)$$

όπου N_0 είναι η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Στον σχεδιασμό των συστημάτων LTE, η πυκνότητα του θερμικού θορύβου (kTB) ορίζεται στα -174 dBm/Hz (όπου k η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία αναφοράς).

Στην ανάλυση των ψηφιακών επικοινωνιών, η ποιότητα της μετάδοσης εκφράζεται συχνά μέσω του λόγου της ενέργειας ανά bit προς την πυκνότητα θορύβου $\left(\frac{E_b}{N_0} \right)$. Σε ένα διακριτό επίπεδο συμβόλων, το μοντέλο του καναλιού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$y = \sqrt{(Eb)} * x + n \quad (4)$$

Όπου y είναι το λαμβανόμενο σύμβολο, x το μεταδιδόμενο σύμβολο και E_b η ενέργεια ανά bit πληροφορίας. Ο λόγος $\frac{E_b}{N_0}$ είναι μια κανονικοποιημένη μορφή του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio - SNR). Ενώ το SNR εξαρτάται από το εύρος ζώνης του συστήματος, το $\frac{E_b}{N_0}$ επιτρέπει τη δίκαιη σύγκριση διαφορετικών σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) ανεξάρτητα από το bandwidth.

2.2.3 Σχέση με το E_b/N_0 και τον Υπολογισμό του BER

Ο ρυθμός σφαλμάτων Bit (BER) υπολογίζεται με βάση την ικανότητα του δέκτη να ανακτά σωστά τα σύμβολα υπό την παρουσία θορύβου, χρησιμοποιώντας το κριτήριο της ελάχιστης ευκλείδειας απόστασης.

Για τη διαμόρφωση QPSK που χρησιμοποιείται στο LTE, η θεωρητική πιθανότητα σφάλματος bit σε κανάλι AWGN δίνεται από τη συνάρτηση συμπληρωματικού σφάλματος:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (5)$$

Καθώς το E_b/N_0 αυξάνεται, ο BER μειώνεται εκθετικά, δημιουργώντας τις χαρακτηριστικές «καμπύλες καταρράκτη» (waterfall curves).

2.2.4 Η Επίδραση στο Σήμα LTE

Στο περιβάλλον προσομοίωσης AWRD, ο θόρυβος AWGN αποτελεί το "κατώφλι" πάνω από το οποίο πρέπει να υπερέχει το σήμα για να αναγνωριστεί σωστά. Στη ζεύξη ανόδου (uplink), όπου οι συσκευές χρήστη (UE) λειτουργούν συχνά με περιορισμένη ισχύ, ο θόρυβος AWGN σε συνδυασμό με τις παρεμβολές από το σήμα NB-IoT καθορίζουν το συνολικό επίπεδο αλλοίωσης του σήματος.

Όταν ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι χαμηλός, ο θόρυβος AWGN "σκεπάζει" τα σύμβολα της διαμόρφωσης QPSK, οδηγώντας σε εσφαλμένες αποφάσεις κατά την αποδιαμόρφωση και, κατά συνέπεια, σε αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).

2.3 BER - Bit Error Rate

Ο υπολογισμός του Ρυθμού Σφαλμάτων Bit (Bit Error Rate - BER) ή του Ρυθμού Σφαλμάτων Μπλοκ (BLER) αποτελεί βασικό μέτρο αξιολόγησης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος σε περιβάλλον AWGN. Ο BER εκφράζει την πιθανότητα λανθασμένης ανίχνευσης ενός bit κατά τη διαδικασία λήψης.

Μαθηματικά, ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των λανθασμένα ληφθέντων bits προς το συνολικό αριθμό μεταδιδόμενων bits:

$$BER = \frac{N_{errors}}{N_{total}} \quad (6)$$

όπου:

- N_{errors} : αριθμός λανθασμένων bits
- N_{total} : συνολικός αριθμός μεταδιδόμενων bits

Σε ένα κανάλι AWGN, η ανίχνευση των συμβόλων στον δέκτη βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του λαμβανόμενου σήματος και των ιδανικών σημείων της διαμόρφωσης. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με το κριτήριο Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood – ML) και οδηγεί στην επιλογή του πιο πιθανού μεταδιδόμενου συμβόλου.

2.4 Απώλειες Διαδρομής (Path Loss)

Το κανάλι μετάδοσης, περιλαμβάνει απώλειες διαδρομής (Path Loss) οι οποίες αποτελούν το σημαντικότερο φαινόμενο εξασθένησης που επηρεάζει ένα σήμα κατά τη διάδοσή του στον ελεύθερο χώρο ή σε περιορισμένα περιβάλλοντα. Ως βασική παράμετρος του καναλιού, οι απώλειες διαδρομής εκφράζουν τη μείωση της ισχύος του σήματος καθώς αυτό διαδίδεται στον χώρο.

Οι απώλειες διαδρομής περιγράφονται μέσω του λογαριθμικού μοντέλου απωλειών, σύμφωνα με το οποίο η εξασθένηση αυξάνεται λογαριθμικά με την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη [Rappaport]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (7)$$

όπου:

- $PL(d)$: απώλειες διαδρομής σε απόσταση d (dB)
- $PL(d_0)$: απώλειες αναφοράς σε απόσταση d_0
- n : εκθέτης απωλειών (path loss exponent)
- d : απόσταση πομπού–δέκτη
- d_0 : απόσταση αναφοράς

Οι απώλειες διαδρομής επηρεάζουν την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος, γεγονός που οδηγεί σε μεταβολή του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) και του λόγου ενέργειας ανά bit προς πυκνότητα θορύβου (E_b/N_0), με αποτέλεσμα τη μεταβολή του BER.

Στην παρούσα προσομοίωση, η επίδραση των απωλειών διαδρομής δεν εκφράζεται μέσω άμεσης αντιστοίχισης με συγκεκριμένη απόσταση d , αλλά προσεγγίζεται μέσω της παραμέτρου LOSS η οποία επιτρέπει τη διαδοχική μεταβολή της εξασθένησης του λαμβανόμενου σήματος, ώστε να μελετηθεί συστηματικά η επίδρασή της στη συμπεριφορά του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).

Εκτός από τις καθарές απώλειες λόγω απόστασης, το σήμα υφίσταται δύο επιπλέον είδη εξασθένησης:

- Εξασθένηση Σκίασης (Shadow Fading): Πρόκειται για αργές μεταβολές («large-scale») στο επίπεδο του σήματος που οφείλονται σε μεγάλα εμπόδια, όπως κτίρια και λόφους. Στα μοντέλα προσομοίωσης, αυτή η εξασθένηση ακολουθεί συνήθως τη λογαριθμοκανονική κατανομή (log-normal distribution).

Ένα σήμα που μεταδίδεται μέσω ενός ασύρματου καναλιού θα έχει τυπικά τυχαία διακύμανση λόγω μπλοκαρίσματος από αντικείμενα στη διαδρομή του, με αποτέλεσμα τυχαίες διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος σε μία δεδομένη απόσταση. Τέτοιες παραλλαγές προκαλούνται επίσης από αλλαγές στην ανάκλαση από επιφάνειες και διεσπαρμένα αντικείμενα στον χώρο. Το πιο κοινό μοντέλο για τον υπολογισμό αυτής της τυχαίας μεταβλητής είναι το μοντέλο σκίασης. Για δίκτυα εξωτερικού αλλά και εσωτερικού χώρου έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά ότι η κατανομή της μεταβλητής

αυτής είναι λογαριθμοκανονική και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function - PDF) [1] είναι:

$$p(\psi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi dB} \psi} \exp \left[-\frac{(10 \log_{10} \psi - \mu_{\psi dB})^2}{2\sigma_{\psi dB}^2} \right], \quad \psi > 0 \quad (8)$$

όπου $\xi = 10/\ln 10$ και μ, σ η μέση και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα της μεταβλητής $\psi = 10 \log(\psi)$. Η τυπική απόκλιση σ λαμβάνει τιμές από 4 έως 13 dB για συστήματα εξωτερικού χώρου και η μέση απόσβεση μ εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης και από την απόσταση.

- Εξασθένιση Πολλαπλών Διαδρομών (Multipath Fading): Μία από τις βασικές παραμορφώσεις που εισάγει το ασύρματο κανάλι (ραδιοδιάυλος) στα μικροκυματικά συστήματα είναι η πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation). Προκύπτει όταν στην κεραία λήψης του δέκτη, μαζί με το εξασθενημένο σήμα του πομπού φτάνουν και πολλαπλά καθυστερημένα αντίγραφα αυτού, από διάφορες κατευθύνσεις και μάλιστα με διαφορετικά πλάτη, φάσεις, συχνότητες και καθυστερήσεις. Αυτά προστίθενται διανυσματικά και προκαλούν φαινόμενα διαλείψεων (fading), δηλαδή μεγάλων κυματώσεων στην περιβάλλουσα (και την ισχύ) του λαμβανόμενου σήματος, της τάξης των 40dB για χωρικές αποστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος. Επιπλέον όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη, το κανάλι αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου (χρονομεταβλητό). Ουσιαστικά το multipath εισάγει διασπορά του σήματος τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα.

Τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το προφίλ multipath ενός καναλιού και προκύπτουν μέσω μετρήσεων είναι:

- Διασπορά καθυστέρησης (delay spread) [τ_d]: Όταν μεταδίδεται ένας κρουστικός παλμός μέσα από το κανάλι, στον δέκτη καταφθάνουν διαφορετικές εξασθενημένες και καθυστερημένες εκδοχές του, με αποτέλεσμα το τελικό σήμα να είναι ένας παλμός με διάρκεια τ_d .
- Εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) [B_c]: Αντίστοιχο στο πεδίο της συχνότητας μέγεθος για το delay spread. Είναι το εύρος ζώνης κατά το οποίο οι φασματικές συνιστώσες έχουν παρόμοιο κέρδος και γραμμική φάση. Είναι ένα

στατιστικό μέτρο του εύρους της περιοχής όπου ο διάυλος θεωρείται επίπεδος (flat). Ένας απλός, εμπειρικός τύπος υπολογισμού του είναι ο $B_c = 1/(\{\tau_d\}RMS)$.

- Εξάπλωση Doppler (Doppler spread) [B_D]: Λόγω της σχετικής κίνησης του δέκτη ως προς τον πομπό ή αντικειμένων του περιβάλλοντος ως προς το δέκτη, παρατηρείται ολίσθηση Doppler στο φάσμα του ληφθέντος σήματος, η οποία εξαρτάται αναλογικά από την ταχύτητα της συνισταμένης των κινήσεων. Το αποτέλεσμα είναι η διασπορά του φάσματος.
- Χρόνος συνοχής (coherence time) [C_T]: Αντίστοιχο στο πεδίο του χρόνου μέγεθος για το Doppler spread. Αποτελεί στατιστικό μέτρο του χρονικού διαστήματος για το οποίο η κρουστική απόκριση παραμένει σταθερή. Προσδιορίζεται εμπειρικά ως $C_T = 1/B_D$.

Για την αξιολόγηση του LTE και του LTE-Advanced, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα μοντέλα όπως το SCM (Spatial Channel Model) και το WINNER.

2.4.1 Μοντέλο SCM (3GPP)

Το μοντέλο αυτό ορίζει τις απώλειες διαδρομής σε dB ως συνάρτηση του λογαρίθμου της απόστασης d (σε μέτρα):

Προαστιακό μακροκύτταρο (Suburban macro):

$$PL=31.5+35\log_{10}(d) \quad (9)$$

Το προαστιακό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από αραιή δόμηση, με κτίρια χαμηλού ύψους (κυρίως μονοκατοικίες ή διπλοκατοικίες των 1 έως 3 ορόφων). Οι δρόμοι είναι συνήθως ευρύτεροι σε σχέση με τα αστικά κέντρα, και υπάρχει έντονη παρουσία βλάστησης (δέντρα, πάρκα, κήποι). Ο Σταθμός Βάσης (BS) τοποθετείται αρκετά ψηλότερα από το μέσο ύψος των κτιρίων (τυπικά στα 25 με 30 μέτρα), προκειμένου να παρέχει κάλυψη σε μια τεράστια περιοχή (μακροκύτταρο), η οποία μπορεί να εκτείνεται σε αρκετά χιλιόμετρα.

- Η σταθερά 31.5: Αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει τη βασική εξασθένηση στην απόσταση αναφοράς. Είναι χαμηλότερη σε σχέση με το αστικό περιβάλλον (34.5), διότι γύρω από την κεραία του πομπού και του δέκτη υπάρχει λιγότερη συγκέντρωση εμποδίων από σκληρά υλικά (π.χ. οπλισμένο σκυρόδεμα). Το

σήμα "δραπετεύει" πιο εύκολα από την περιογή της κεραίας χωρίς να υποστεί άμεση και βαριά εξασθένηση από γειτονικά ψηλά κτίρια.

- Ο συντελεστής 35 ($n=3.5$): Ο εκθέτης απωλειών 3.5 δείχνει ότι το σήμα εξασθενεί αρκετά πιο γρήγορα σε σχέση με τον ελεύθερο χώρο ($n=2$). Αυτό οφείλεται κυρίως στη διάχυση (scattering) και την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τα δέντρα (foliage loss) και τις κεραμοσκεπές. Επειδή η κεραία είναι ψηλά, το σήμα ταξιδεύει πάνω από τις στέγες και φτάνει στον χρήστη μέσω περίθλασης (diffraction) στις ακμές των κτιρίων.
- Κύριος Μηχανισμός: Ο κύριος μηχανισμός διάδοσης εδώ είναι το "Over-the-rooftop propagation", δηλαδή η διάδοση πάνω από τις οροφές, ακολουθούμενη από καθοδική περίθλαση στον δρόμο όπου βρίσκεται ο χρήστης.

Αστικό μακροκύτταρο (Urban macro):

$$PL=34.5+35\log_{10}(d) \quad (10)$$

Το αστικό μακροκύτταρο αντιπροσωπεύει τις τυπικές πυκνοκατοικημένες πόλεις. Το ύψος των κτιρίων είναι ομοιόμορφα υψηλό (π.χ. πολυκατοικίες 5-8 ορόφων) και το οδικό δίκτυο σχηματίζει κάρναβο. Ο Σταθμός Βάσης τοποθετείται και πάλι πάνω από το μέσο ύψος των κτιρίων (π.χ. στην ταράτσα του ψηλότερου κτιρίου της γειτονιάς), για να εξασφαλίσει ευρεία κάλυψη.

- Η σταθερά 34.5: Παρατηρείται αύξηση κατά 3 dB σε σχέση με το προαστιακό μοντέλο ($34.5 - 31.5 = 3$). Σε λογαριθμική κλίμακα, μια αύξηση 3 dB σημαίνει πρακτικά ότι η αρχική ισχύς του σήματος μειώνεται στο μισό (ή απαιτείται διπλάσια ισχύς εκπομπής για το ίδιο αποτέλεσμα). Αυτή η "ποινή" προστίθεται επειδή στο αστικό κέντρο η πυκνότητα των κτιρίων δημιουργεί τεράστια ποσότητα αντανάκλασεων και σκίασης αμέσως μόλις το σήμα εγκαταλείψει την κεραία.
- Ο συντελεστής 35 ($n=3.5$): Παραδόξως, ο ρυθμός μείωσης με την απόσταση παραμένει 35. Αυτό συμβαίνει επειδή, από τη στιγμή που το σήμα βρίσκεται στον αέρα (πάνω από τις ταράτσες), ο τρόπος που "χάνει" ενέργεια καθώς ταξιδεύει σε μεγάλες αποστάσεις είναι παρόμοιος με το προαστιακό. Η μεγάλη

διαφορά είναι το αρχικό εμπόδιο (clutter factor) που προκαλεί την αυξημένη σταθερά 34.5.

- Κύριος Μηχανισμός: Εδώ κυριαρχεί το φαινόμενο των "αστικών φαραγγιών" (urban canyons). Το σήμα, όταν κατέβει στο επίπεδο του δρόμου, υφίσταται έντονη πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation), ανακλώμενο αλληπάλληλες φορές στις προσόψεις των πολυκατοικιών πριν φτάσει στο κινητό του χρήστη.

Αστικό μικροκύτταρο (Urban micro - NLOS):

$$PL=34.53+38\log_{10}(d) \quad (11)$$

Το μικροκύτταρο αλλάζει ριζικά την αρχιτεκτονική του δικτύου. Εδώ, οι κεραίες (Access Points) τοποθετούνται κάτω από το μέσο ύψος των κτιρίων (below-rooftop), συνήθως σε στύλους φωτισμού, φανάρια, ή χαμηλά σε προσόψεις καταστημάτων, σε ύψος περίπου 5 έως 10 μέτρων. Ο στόχος δεν είναι η ευρεία κάλυψη, αλλά η παροχή τεράστιας χωρητικότητας (capacity) σε μικρές, πυκνοκατοικημένες περιοχές (π.χ. εμπορικοί πεζόδρομοι, πλατείες). Η συνθήκη NLOS (Non-Line-of-Sight) υποδηλώνει ότι ο χρήστης έχει στρίψει σε κάποιο στενό και δεν βλέπει την κεραία.

- Ο συντελεστής 38 ($n=3.8$): Αυτή είναι η πιο κρίσιμη διαφοροποίηση. Η τιμή 38 σημαίνει ότι το σήμα εξασθενεί ταχύτατα. Επειδή η κεραία βρίσκεται χαμηλά, το σήμα δεν μπορεί να ταξιδέψει πάνω από τα κτίρια. Εγκλωβίζεται μέσα στους δρόμους (street waveguiding). Όταν ο χρήστης στρίψει σε μια γωνία (NLOS), το σήμα πρέπει να καμφθεί (diffraction) γωνία-γωνία. Κάθε περίθλαση γύρω από τη γωνία ενός κτιρίου "σκοτώνει" ένα τεράστιο μέρος της ισχύος του, εξ ου και ο δραματικά αυξημένος εκθέτης (3.8).
- Η σταθερά 34.53: Παραμένει σε υψηλά επίπεδα (παρόμοια με το Urban Macro), καθώς το περιβάλλον είναι γεμάτο μπετόν, γυαλί (που προκαλεί ανακλάσεις) και οχήματα, δημιουργώντας έντονο αρχικό fading.
- Κύριος Μηχανισμός: Ο κυρίαρχος μηχανισμός είναι η διάδοση επιπέδου δρόμου (street-level propagation). Το σήμα βασίζεται αποκλειστικά στις πολλαπλές ανακλάσεις στους τοίχους (σαν μπάλα του μπιλιάρδου) και την

περίθλαση στις κατακόρυφες ακμές των κτιρίων για να φτάσει στον "κρυμμένο" NLOS δέκτη.

2.4.2 Μοντέλο WINNER και IMT-Advanced

Τα παραδοσιακά εμπειρικά μοντέλα διάδοσης (όπως τα Okumura-Hata ή COST 231) υπολόγιζαν κυρίως τη μέση απώλεια διαδρομής (Path Loss) σε συνάρτηση με την απόσταση. Ωστόσο, με την έλευση των συστημάτων MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), δημιουργήθηκε η ανάγκη για μοντέλα που να περιγράφουν όχι μόνο την εξασθένηση του σήματος, αλλά και τη χωρική (spatial) συμπεριφορά του καναλιού (από ποιες γωνίες έρχεται το σήμα, πώς ανακλάται κ.λπ.).

Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων το μοντέλο WINNER II και η μετεξέλιξή του, το WINNER+. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στο WINNER+ για να δημιουργήσει τις επίσημες προδιαγραφές μοντελοποίησης καναλιού για το IMT-Advanced (το πρότυπο που καθόρισε τις απαιτήσεις των δικτύων 4G).

Τόσο το WINNER όσο και το IMT-Advanced ανήκουν στην κατηγορία των Γεωμετρικά-Στοχαστικών Μοντέλων Καναλιού (Geometry-based Stochastic Channel Models - GSCMs). Αυτό σημαίνει ότι δεν χαρτογραφούν κάθε κτίριο με ακρίβεια (όπως κάνουν τα εργαλεία Ray-Tracing), αλλά αντίθετα "τοποθετούν" τυχαία (στοχαστικά) ομάδες εμποδίων στον χώρο, βασιζόμενα σε στατιστικές κατανομές που έχουν προκύψει από χιλιάδες πειραματικές μετρήσεις. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε τρεις βασικές έννοιες:

- Σκεδαστές (Scatterers): Αντικείμενα στο περιβάλλον (π.χ. δέντρα, κτίρια, οχήματα) που ανακλούν, περιθλούν ή διαχέουν το σήμα.
- Ακτίνες (Rays): Τα επιμέρους ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ταξιδεύουν από τον πομπό στον δέκτη μέσω διαφόρων διαδρομών. Κάθε ακτίνα έχει τον δικό της χρόνο καθυστέρησης (delay), γωνία αναχώρησης (Angle of Departure - AoD) και γωνία άφιξης (Angle of Arrival - AoA).
- Συστάδες (Clusters): Επειδή οι ακτίνες που ανακλώνται από το ίδιο μεγάλο αντικείμενο (π.χ. μια πολυκατοικία) φτάνουν στον δέκτη σχεδόν ταυτόχρονα και

από την ίδια περίπου γωνία, ομαδοποιούνται σε "συστάδες" (clusters). Το μοντέλο WINNER ορίζει το κανάλι ως το άθροισμα αυτών των συστάδων.

Για να παραχθεί η τελική κρουστική απόκριση του καναλιού, τα μοντέλα IMT-Advanced και WINNER χωρίζουν τις παραμέτρους του περιβάλλοντος σε δύο κατηγορίες:

Παράμετροι Μεγάλης Κλίμακας (Large-Scale Parameters - LSPs): Αυτές οι παράμετροι μεταβάλλονται αργά καθώς ο χρήστης κινείται στον χώρο και περιγράφουν τη μακροσκοπική συμπεριφορά του καναλιού.

Περιλαμβάνουν:

- Σκίαση (Shadow Fading): Τυχαίες διακυμάνσεις της ισχύος του σήματος λόγω μεγάλων εμποδίων. Ακολουθεί λογαριθμική-κανονική κατανομή (log-normal distribution).
- Διασπορά Καθυστέρησης (Delay Spread - DS): Δείχνει πόσο "απλώνεται" χρονικά το σήμα λόγω των πολλαπλών διαδρομών (multipath).
- Γωνιακή Διασπορά (Angular Spread): Διακρίνεται σε Γωνιακή Διασπορά Αναχώρησης (ASD) και Άφιξης (ASA). Περιγράφει το εύρος των γωνιών από τις οποίες εκπέμπεται ή λαμβάνεται η ενέργεια του σήματος.

Το καινοτόμο στοιχείο του WINNER είναι ότι αναγνωρίζει πως αυτές οι παράμετροι συσχετίζονται (π.χ. ένα περιβάλλον με μεγάλη διασπορά καθυστέρησης τείνει να έχει και μεγάλη γωνιακή διασπορά). Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιεί έναν πίνακα συσχέτισης (cross-correlation matrix) για την ταυτόχρονη παραγωγή τους.

Παράμετροι Μικρής Κλίμακας (Small-Scale Parameters - SSPs): Αφορούν τις ταχύτερες διακυμάνσεις του σήματος (Fast Fading) σε αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος. Περιλαμβάνουν τα ακριβή χαρακτηριστικά της κάθε ακτίνας (ισχύς, ακριβής γωνία, φάση) μέσα σε κάθε cluster. Εδώ εισάγεται και το φαινόμενο Doppler λόγω της κινητικότητας του χρήστη (UE speed).

Η σημασία του IMT-Advanced και του WINNER έγκειται στην έννοια της Χωρικής Συνέπειας (Spatial Consistency). Σε παλαιότερα μοντέλα, αν ένας χρήστης έκανε ένα βήμα στον χώρο, το μοντέλο υπολόγιζε το κανάλι από την αρχή, παράγοντας εντελώς διαφορετικές γωνίες.

Τα μοντέλα WINNER διατηρούν τη γεωμετρία του χώρου. Αν ο χρήστης κινηθεί ελάχιστα, οι σκεδαστές παραμένουν στις ίδιες θέσεις, και οι γωνίες εξελίσσονται ομαλά. Αυτό είναι απολύτως απαραίτητο για τη σωστή προσομοίωση τεχνικών όπως το Beamforming (κατευθυντική εκπομπή σήματος) και το Multi-User MIMO, που αποτελούν τον πυρήνα των δικτύων από το 4G/LTE-Advanced έως και το σημερινό 5G.

Τα παραπάνω φαινόμενα αποτελούν βασικούς μηχανισμούς εξασθένησης στα ασύρματα κανάλια. Στην παρούσα εργασία, το κανάλι προσεγγίζεται ως AWGN με παράμετρο εξασθένησης LOSS.

2.4.3 Φυσικοί Παράγοντες και Μοντελοποίηση

Η εξασθένηση του σήματος δεν είναι γραμμική αλλά αυξάνεται λογαριθμικά (dB) με την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, όπως το LTE και το NB-IoT, η κατανόηση των απωλειών διαδρομής είναι κρίσιμη για τον καθορισμό της ακτίνας κάλυψης μιας κυψέλης. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες διαδρομής (Path Loss) περιλαμβάνουν:

- Απόσταση (d): Η ισχύς του σήματος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης σε ιδανικές συνθήκες (Free Space Path Loss).
- Συχνότητα Λειτουργίας (f): Υψηλότερες συχνότητες παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξασθένηση, γεγονός που περιορίζει την εμβέλεια των ευρυζωνικών συστημάτων.
- Περιβάλλον Διάδοσης: Εμπόδια όπως κτίρια, δέντρα και η ατμόσφαιρα προκαλούν φαινόμενα ανάκλασης, περίθλασης, σκέδασης και σκίασης (shadowing).

Στο LTE, η τερματική συσκευή (UE) εκτιμά τις απώλειες διαδρομής (PL).

2.5 Ψηφιακή Πληροφορία και Σύμβολα

Στις ψηφιακές επικοινωνίες, η βασική μονάδα πληροφορίας είναι το bit (0 ή 1). Ωστόσο, τα bits δεν μεταδίδονται απευθείας ως ηλεκτρικά σήματα στο φυσικό μέσο. Η μετάδοση πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας χαρτογράφησης (mapping), όπου ομάδες bits ομαδοποιούνται και αντιστοιχίζονται σε σύμβολα. Κάθε σύμβολο αποτελεί μια συγκεκριμένη κατάσταση ενός ημιτονοειδούς σήματος (φέρων κύμα), η οποία καθορίζεται από το πλάτος και τη φάση του σήματος.

Αν ένα σύστημα χρησιμοποιεί M διαφορετικά σύμβολα, τότε κάθε σύμβολο μπορεί να μεταφέρει:

$$\log_2(M) \quad (12)$$

bits πληροφορίας. Για παράδειγμα, στη διαμόρφωση BPSK χρησιμοποιούνται δύο σύμβολα και μεταδίδεται 1 bit ανά σύμβολο, ενώ στη QPSK χρησιμοποιούνται τέσσερα σύμβολα και μεταδίδονται 2 bits ανά σύμβολο. Η έννοια αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή συνδέει τον ρυθμό bit με τον ρυθμό συμβόλων και επηρεάζει άμεσα τόσο τη φασματική απόδοση όσο και την ανθεκτικότητα του συστήματος στον θόρυβο.

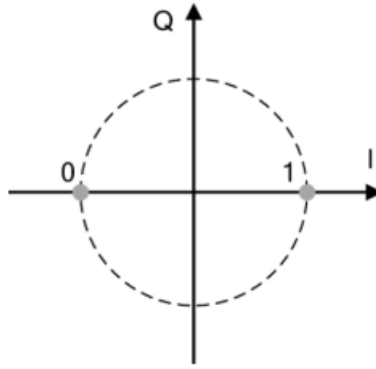
Η αναπαράσταση των συμβόλων γίνεται συχνά στο επίπεδο των συνιστωσών I και Q (In-phase και Quadrature), όπου κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε ένα σημείο στο επίπεδο του αστερισμού. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η γεωμετρική απεικόνιση της διαμόρφωσης και η οπτική κατανόηση της επίδρασης του θορύβου και των παρεμβολών. Η απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού σχετίζεται άμεσα με την πιθανότητα σωστής ή λανθασμένης ανίχνευσης στον δέκτη.

2.5.1 Η Διαδικασία της Ψηφιακής Διαμόρφωσης

Η ανάλυση των ψηφιακών διαμορφώσεων στο πλαίσιο των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων (LTE και NB-IoT) αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του καναλιού και την κατανάλωση ισχύος. Η επιλογή του τύπου διαμόρφωσης καθορίζει τη συμβιβαστική σχέση (trade-off) μεταξύ της ταχύτητας μετάδοσης και της ανθεκτικότητας στον θόρυβο. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν οι ακόλουθες διαμορφώσεις.

2.5.1.1 Διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying)

Στην τεχνική BPSK (ή 2-PSK) χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές φάσεις του φέροντος σήματος (carrier signal) που διαφέρουν κατά 180° . Η διαμόρφωση αυτή μεταδίδει 1 bit ανά σύμβολο και αποτελεί την απλούστερη μορφή ψηφιακής διαμόρφωσης φάσης. Η BPSK παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στον θόρυβο, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για λειτουργία σε συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR). Ωστόσο, επειδή μεταδίδει μόνο 1 bit ανά σύμβολο, προσφέρει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με πιο σύνθετες διαμορφώσεις, και δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης BPSK στο επίπεδο I/Q [26]

Στο διάγραμμα αστερισμού, τα σύμβολα της BPSK αναπαρίστανται ως δύο σημεία στον πραγματικό άξονα, συμμετρικά ως προς την αρχή των αξόνων.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται δύο φάσεις του φέροντος σήματος που διαφέρουν κατά π rad (180°).

Το διαμορφωμένο σήμα εκφράζεται ως:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (13)$$

όπου:

- E_b : ενέργεια ανά bit
- T_b : διάρκεια bit
- f_c : συχνότητα φέροντος
- $\phi = 0$ για bit “1” και $\phi = \pi$ για bit “0”

Σε κανάλι AWGN, η πιθανότητα σφάλματος bit (BER) δίνεται από:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (14)$$

όπου:

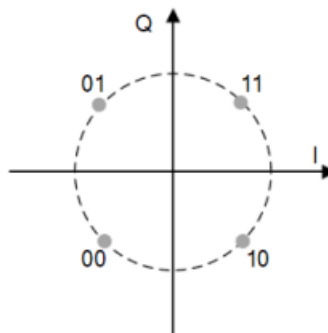
- $Q(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Q
- N_0 η φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου

Λόγω της μέγιστης απόστασης μεταξύ των σημείων του αστερισμού, η BPSK είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στον θόρυβο, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλότερο BER σε σχέση με διαμορφώσεις υψηλότερης τάξης.

Το σήμα BPSK στον χρόνο προκύπτει ως ημιτονοειδής κυματομορφή, της οποίας η φάση μεταβάλλεται κατά 180° ανάλογα με το μεταδιδόμενο bit. Στο πεδίο των συχνοτήτων, το φάσμα της BPSK είναι συγκεντρωμένο γύρω από τη φέρουσα συχνότητα και επηρεάζεται από τον ρυθμό μετάδοσης συμβόλων.

2.5.1.2 Διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

Στην τεχνική QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), γνωστή και ως διαμόρφωση τεσσάρων φάσεων PSK (4-PSK), τα bits των δεδομένων ομαδοποιούνται σε σύμβολα των δύο bits. Σε κάθε σύμβολο αντιστοιχίζεται ένα φέρον σήμα με διαφορετική φάση.



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης QPSK στο επίπεδο I/Q [26]

Η μαθηματική ανάλυση δείχνει ότι με τη διαμόρφωση QPSK, για το ίδιο εύρος ζώνης με τη BPSK, μπορεί να επιτευχθεί διπλάσιος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, ενώ για τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί περίπου το μισό εύρος ζώνης. Η υλοποίηση της QPSK πραγματοποιείται μέσω διαχωρισμού του σήματος σε δύο κλάδους (I και Q), οι οποίοι διαμορφώνουν ορθογώνια φέροντα και συνδυάζονται για την παραγωγή του τελικού σήματος. Τα σύμβολα της QPSK στο διάγραμμα αστερισμού περιγράφονται από τη σχέση [35]:

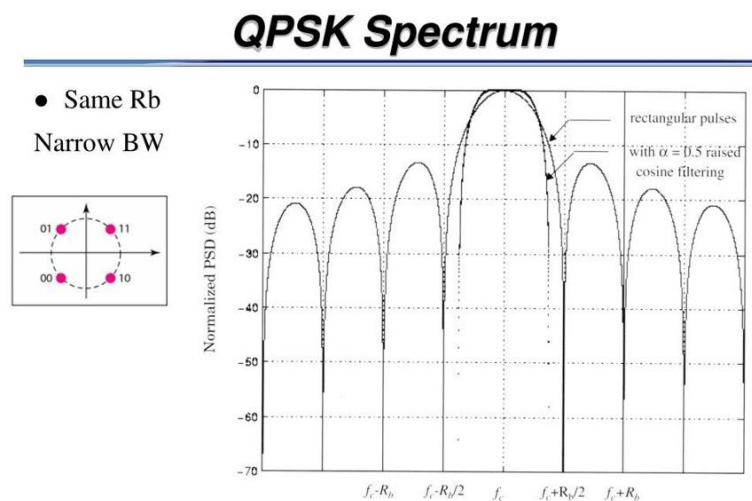
$$s_n(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + (2n-1)\frac{\pi}{4}\right), n = 1,2,3,4 \quad (15)$$

Η QPSK μεταδίδει 2 bits ανά σύμβολο χρησιμοποιώντας τέσσερις διαφορετικές φάσεις στον αστερισμό της. Προσφέρει έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ φασματικής απόδοσης και ανθεκτικότητας στις παρεμβολές.

Σε αντίθεση με τη BPSK που απαιτεί μόνο μία διάσταση, το σήμα της QPSK αναλύεται σε δύο ορθογώνιες συνιστώσες (συναρτήσεις βάσης), δημιουργώντας έναν δισδιάστατο χώρο. Το διάγραμμα αστερισμού απεικονίζει αυτόν ακριβώς τον χώρο:

- Οριζόντιος Άξονας (In-Phase - I): Αντιστοιχεί στη συνιστώσα του συνημιτόνου του φέροντος σήματος.
- Κατακόρυφος Άξονας (Quadrature - Q): Αντιστοιχεί στην ορθογώνια συνιστώσα του ημιτόνου μετατοπισμένη κατά 90°.

Σε αυτό το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, τα τέσσερα σύμβολα της QPSK τοποθετούνται ως σημεία, τα οποία απέχουν την ίδια απόσταση από την αρχή των αξόνων.



Σχήμα 2.5 Ενδεικτική φασματική κατανομή σήματος QPSK ως προς τη φέρουσα συχνότητα [27]

Στο πεδίο των συχνοτήτων, το σήμα QPSK εμφανίζει φασματική κατανομή γύρω από τη φέρουσα συχνότητα. Το φάσμα προκύπτει από τη μεταφορά του βασικού σήματος σε φέρουσα μέσω των συνιστωσών I και Q. Το εύρος ζώνης εξαρτάται από τον ρυθμό

συμβόλων και το φίλτρο παλμών, ενώ η συμμετρική κατανομή γύρω από τη φέρουσα καθιστά τη QPSK αποδοτική ως προς τη χρήση φάσματος.

Η QPSK μπορεί να θεωρηθεί ως ο συνδυασμός δύο ορθογώνιων συνιστωσών BPSK (I και Q).

Σε κανάλι AWGN, η πιθανότητα σφάλματος bit είναι:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (16)$$

Η QPSK επιτυγχάνει διπλάσια φασματική αποδοτικότητα σε σχέση με την BPSK, διατηρώντας παρόμοια απόδοση ως προς τον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) για το ίδιο E_b/N_0 .

2.5.1.3 Διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK

Η $\pi/2$ -BPSK είναι μια παραλλαγή της BPSK, στην οποία κάθε διαδοχικό σύμβολο υφίσταται μια επιπλέον περιστροφή φάσης κατά $\pi/2$. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται στο NB-IoT (Narrowband-IoT) για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους.

Πλεονεκτήματα: Η περιστροφή φάσης μειώνει τις απότομες μεταβολές στην ισχύ του σήματος, επιτρέποντας στους ενισχυτές των συσκευών NB-IoT να λειτουργούν πιο αποδοτικά, κάτι που είναι κρίσιμο για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την κάλυψη σε δύσκολα σημεία.

Το διαμορφωμένο σήμα μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της φάσης του φέροντος, όπου η πληροφορία κωδικοποιείται σε διακριτές μετατοπίσεις φάσης. Το σήμα μπορεί να γραφτεί ως:

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \quad (17)$$

όπου η φάση εξελίσσεται ως:

$$\phi_k = \phi_{k-1} + a_k \cdot \frac{\pi}{2}, a_k \in \{+1, -1\} \quad (18)$$

Η περιστροφή αυτή μειώνει τις απότομες μεταβολές της φάσης και συνεπώς τις διακυμάνσεις ισχύος του σήματος.

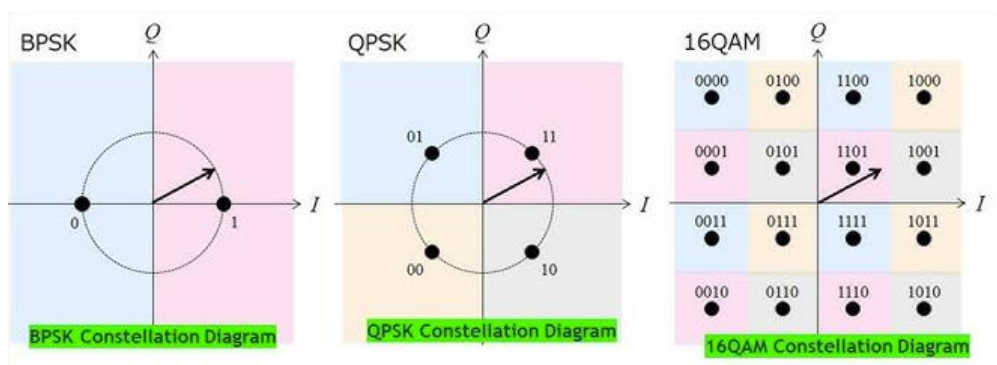
Σε κανάλι AWGN, η απόδοση ως προς BER είναι προσεγγιστικά ίδια με την BPSK:

$$P_e \approx Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (19)$$

2.5.1.4 Διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK

Η διαμόρφωση $\pi/4$ -QPSK (ή rotated $\pi/4$ -QPSK) είναι μια μορφή QPSK όπου ο αστερισμός περιστρέφεται κατά $\pi/4$ σε κάθε σύμβολο. Όπως και η $\pi/2$ -BPSK, βρίσκει εφαρμογή στις τεχνολογίες χαμηλής κατανάλωσης ισχύος.

Λειτουργικότητα: Η περιστροφή αυτή διασφαλίζει ότι το σήμα δεν διέρχεται ποτέ από την αρχή των αξόνων (μηδενική ισχύς), γεγονός που μειώνει σημαντικά τις διακυμάνσεις του φακέλου του σήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ακόμη χαμηλότερο PAPR σε σύγκριση με την κλασική QPSK, διευκολύνοντας τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών και χαμηλού κόστους τερματικών συσκευών. Σε κανάλι AWGN, η απόδοση ως προς BER είναι παρόμοια με αυτή της κλασικής QPSK. **Error! Reference source not found.****Error! Reference source not found.****Error! Reference source not found.**



Σχήμα 2.6 Διαγράμματα αστερισμού διαμορφώσεων BPSK, QPSK και 16QAM στο επίπεδο I/Q, όπου απεικονίζεται η αντιστοίχιση bits σε σύμβολα και η αυξανόμενη πυκνότητα σημείων με την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας [5][9][10]

Το σήμα εκφράζεται ως:

$$s_k(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \phi_k) \quad (20)$$

όπου:

$$\phi_k \in \left\{ \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{3\pi}{4} \right\}$$

και εναλλάσσεται μεταξύ δύο αστερισμών QPSK.

Η περιστροφή αποτρέπει τη διέλευση του σήματος από το μηδέν, μειώνοντας τις διακυμάνσεις του φακέλου και το PAPR.

Σε κανάλι AWGN, η πιθανότητα σφάλματος είναι παρόμοια με την QPSK:

$$P_e \approx Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (21)$$

2.5.2 Σύμβολα και Χωρητικότητα Καναλιού

Η μετάβαση από τα bits στα σύμβολα επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του περιορισμένου ραδιοφάσματος. Όσο περισσότερα bits αντιστοιχίζονται σε κάθε σύμβολο, τόσο αυξάνεται η φασματική αποδοτικότητα. Ωστόσο, η απόσταση μεταξύ των σημείων στο διάγραμμα αστερισμού μειώνεται, καθιστώντας ευκολότερο για τον θόρυβο AWGN ή την παρεμβολή NB-IoT να μετατοπίσουν ένα σύμβολο σε λανθασμένη περιοχή απόφασης, προκαλώντας σφάλματα bit (BER).

2.6 Λόγος E_b/N_0 και SNR

Στην αξιολόγηση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, ειδικότερα στις ψηφιακές ζεύξεις, η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος προσδιορίζεται κυρίως από την ισχύ του επιθυμητού σήματος σε σχέση με την ισχύ του θορύβου και των παρεμβολών. Οι δύο θεμελιώδεις μετρικές που ποσοτικοποιούν αυτή τη σχέση είναι ο Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR) και ο Λόγος Ενέργειας ανά Bit προς τη Φασματική Πυκνότητα Ισχύος Θορύβου (E_b/N_0).

2.6.1 Ο Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR)

Ο λόγος SNR (Signal-to-Noise Ratio) αποτελεί την πιο διαισθητική μετρική για την ποιότητα ενός σήματος. Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ισχύος του λαμβανόμενου επιθυμητού σήματος (P_{signal} ή S) προς τη μέση ισχύ του θορύβου (P_{noise} ή N) εντός του εύρους ζώνης του συστήματος.

Μαθηματικά, εκφράζεται ως:

$$SNR = \frac{S}{N} \quad (22)$$

Επειδή οι τιμές της ισχύος στα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διαφέρουν κατά πολλές τάξεις μεγέθους (λόγω των απωλειών διαδρομής) ο SNR συνήθως εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα (Decibels - dB):

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (23)$$

Αν και ο SNR είναι εξαιρετικά χρήσιμος για τον υπολογισμό της χωρητικότητας του καναλιού (βάσει του θεωρήματος Shannon-Hartley) παρουσιάζει έναν σημαντικό περιορισμό, εξαρτάται άμεσα από το εύρος ζώνης (Bandwidth-B) του δέκτη. Επομένως, ο SNR δεν επιτρέπει τη δίκαιη και άμεση σύγκριση ψηφιακών συστημάτων που λειτουργούν με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης ή διαφορετικά εύρη ζώνης, όπως συμβαίνει κατά τη συνύπαρξη ενός ευρυζωνικού συστήματος, όπως το LTE, και ενός στενοζωνικού, όπως το NB-IoT.

2.6.2 Ο Λόγος Ενέργειας ανά Bit προς Θόρυβο (E_b/N_0)

Συνδυάζοντας τους παραπάνω ορισμούς, η μαθηματική συσχέτιση των δύο μεγεθών δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \cdot \frac{B}{R_b} = SNR * \frac{B}{R_b} \quad (24)$$

Σε λογαριθμική κλίμακα (dB), η σχέση μετασχηματίζεται ως:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{dB} = SNR_{dB} + 10\log_{10}\left(\frac{B}{R_b}\right) \quad (25)$$

Ο όρος R_b/B ονομάζεται Φασματική Αποδοτικότητα (Spectral Efficiency) και μετριέται σε bits/s/Hz. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι, όσο αυξάνεται η φασματική αποδοτικότητα ενός συστήματος (π.χ. με τη χρήση διαμορφώσεων ανώτερης τάξης), τόσο υψηλότερος λόγος SNR απαιτείται ώστε να διατηρηθεί ο ίδιος λόγος E_b/N_0 .

2.6.3 Η Σύνδεση του (E_b/N_0) με τον Ρυθμό Σφαλμάτων Bit (BER)

Ο λόγος E_b/N_0 αποτελεί τη θεμελιώδη ανεξάρτητη μεταβλητή για τον υπολογισμό της πιθανότητας σφάλματος ενός ψηφιακού δέκτη (P_e ή BER). Καθώς ο λόγος E_b/N_0 αυξάνεται, ο ρυθμός BER μειώνεται εκθετικά, δημιουργώντας τις χαρακτηριστικές «καμπύλες καταρράκτη» (waterfall curves).

Για τη διαμόρφωση QPSK που επιλέχθηκε στο σύστημα LTE της παρούσας προσομοίωσης, η θεωρητική πιθανότητα σφάλματος σε κανάλι AWGN δίνεται από τη συνάρτηση συμπληρωματικού σφάλματος (erfc):

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) [11][12] \quad (26)$$

Στις καμπύλες απόδοσης BER, η μεταβολή του E_b/N_0 αποτυπώνει τη μετάβαση του συστήματος από μια περιοχή υψηλής πιθανότητας σφάλματος σε μια περιοχή χαμηλής πιθανότητας σφάλματος. Η απότομη πτώση της καμπύλης, γνωστή και ως περιοχή waterfall, είναι χαρακτηριστική πολλών ψηφιακών συστημάτων και επιτρέπει τον καθορισμό περιοχών λειτουργίας στις οποίες το σύστημα θεωρείται αποδεκτό ή μη αποδεκτό από πλευράς αξιοπιστίας.

2.7 Το Σύστημα LTE και η Ζεύξη Ανόδου (Uplink)

2.7.1 Γενική Επισκόπηση LTE

Το σύστημα LTE (Long Term Evolution) αποτελεί βασική τεχνολογία των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών και αντιπροσωπεύει τη σημαντικότερη εξέλιξη των κυψελοειδών δικτύων προς τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G). Αναπτύχθηκε από τον οργανισμό 3GPP με πρωταρχικό σκοπό να ξεπεράσει τους περιορισμούς των προηγούμενων γενεών, στοχεύοντας στην παροχή σημαντικά υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων (high data rates) και εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (low latency) για τους τελικούς χρήστες.

2.7.2 Αρχιτεκτονική και Στόχοι Σχεδιασμού

Η αρχιτεκτονική του δικτύου LTE σχεδιάστηκε δομικά για να υποστηρίξει την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων και πολυμέσων (όπως streaming, video calls και γρήγορη πλοήγηση). Για να επιτευχθούν αυτοί οι απαιτητικοί στόχοι χωρητικότητας και ταχύτητας, το πρότυπο υιοθέτησε προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer). Η ριζική αυτή αναδιάρθρωση του φυσικού επιπέδου επέτρεψε την καλύτερη διαχείριση του ραδιοφάσματος, την κατακόρυφη αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας και την ευελιξία στη χρήση διαφορετικών ευρών ζώνης (από 1.4 MHz έως 20 MHz).

2.7.3 Ο Ρόλος του LTE στο Πλαίσιο της Μελέτης

Στο ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το δίκτυο LTE τοποθετείται στο επίκεντρο της ανάλυσης, αποτελεί το κύριο σύστημα (primary system) επικοινωνίας που εξετάζεται. Καθώς το διαθέσιμο ραδιοφάσμα αποτελεί έναν περιορισμένο και

πολύτιμο πόρο, το LTE καλείται πλέον να υποστηρίξει στις ίδιες ή γειτονικές συχνοτικές ζώνες, νέες αναδυόμενες τεχνολογίες.

Υπό το πρίσμα αυτό, η αξιοπιστία και η απρόσκοπτη λειτουργία του LTE αποτελούν το βασικό ζητούμενο, το οποίο ενδέχεται να επηρεαστεί από τη συνύπαρξη με πλήθος νέων συσκευών Internet of Things (IoT). Το ευρυζωνικό σήμα του LTE πρέπει να παραμείνει ανθεκτικό, καθώς καλείται να λειτουργήσει σε ένα κοινό φασματικό περιβάλλον όπου τα στενοζωνικά σήματα, όπως το NB-IoT, μπορούν να λειτουργήσουν ως πηγές παρεμβολής, επηρεάζοντας την ποιότητα της ζεύξης. Συνεπώς, η κατανόηση της δομής του LTE είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της αντοχής του στις συνθήκες συνύπαρξης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη ζεύξη ανόδου (uplink) του συστήματος LTE, καθώς η αξιολόγηση της αξιοπιστίας της επικοινωνίας πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) σε συνθήκες συνύπαρξης με συστήματα NB-IoT.

2.8 Ο Ρόλος του Φυσικού Επιπέδου στο LTE

Το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer – Layer 1) αποτελεί το θεμέλιο της αρχιτεκτονικής του συστήματος LTE και τη γέφυρα μεταξύ του ψηφιακού κόσμου των δεδομένων και του αναλογικού κόσμου των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Είναι το χαμηλότερο επίπεδο στο μοντέλο αναφοράς OSI (Open Systems Interconnection) και είναι αποκλειστικά υπεύθυνο για τη μετάδοση και λήψη των ακατέργαστων δεδομένων (bitstreams) μέσω της ραδιοδιεπαφής (air interface).

2.8.1 Βασικές Λειτουργίες και Επεξεργασία Σήματος

Στο LTE, το φυσικό επίπεδο καλείται να διαχειριστεί υψηλούς ρυθμούς δεδομένων υπό αντίξοες συνθήκες διάδοσης. Για να το επιτύχει αυτό, εκτελεί μια αλυσίδα πολύπλοκων διαδικασιών επεξεργασίας σήματος, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- Κωδικοποίηση Καναλιού (Channel Coding): Πριν τη μετάδοση, εισάγεται πλεονασμός στα δεδομένα μέσω ισχυρών αλγορίθμων διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction - FEC), όπως οι Turbo κώδικες για τα δεδομένα χρήστη. Αυτό επιτρέπει στον δέκτη να ανιχνεύει και να διορθώνει σφάλματα που προκαλούνται από το ασύρματο κανάλι χωρίς να απαιτείται επανεκπομπή.
- Ψηφιακή Διαμόρφωση (Digital Modulation): Τα κωδικοποιημένα bits ομαδοποιούνται και χαρτογραφούνται σε μιγαδικά σύμβολα. Το σύστημα

προσαρμόζει τον τύπο διαμόρφωσης (π.χ. QPSK, 16QAM, 64QAM) ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού.

- Χαρτογράφηση σε Φυσικούς Πόρους (Resource Mapping): Τα διαμορφωμένα σύμβολα δεν μεταδίδονται τυχαία, αλλά τοποθετούνται σε ένα αυστηρά καθορισμένο πλέγμα χρόνου και συχνότητας. Η βασική μονάδα κατανομής πόρων στο LTE είναι το Physical Resource Block (PRB).

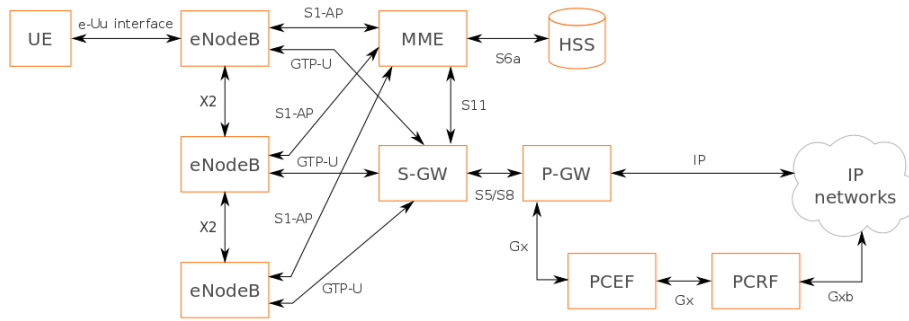
2.8.2 Το Φυσικό Επίπεδο ως "Πεδίο Μάχης" των Παρεμβολών

Η σημασία του φυσικού επιπέδου στην παρούσα εργασία είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς σε αυτό ακριβώς το σημείο εκδηλώνονται όλες οι φυσικές αλλοιώσεις του σήματος. Η ιδανική μαθηματική κυματομορφή που παράγεται από τον πομπό υποβαθμίζεται συνεχώς μέχρι να φτάσει στον δέκτη λόγω:

- Του προσθετικού λευκού γκαουσιανού Θορύβου (AWGN) ο οποίος εισάγεται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα.
- Των απωλειών διαδρομής (Path Loss) που αποδυναμώνουν την ισχύ λήψης όσο αυξάνεται η απόσταση.
- Των παρεμβολών από άλλα συστήματα: Εδώ εντοπίζεται και ο πυρήνας του προβλήματος με το IoT. Το παρεμβαλλόμενο σήμα του NB-IoT αθροίζεται απευθείας πάνω στην ηλεκτρομαγνητική κυματομορφή του LTE στο φυσικό επίπεδο.

Όταν η συνολική αλλοίωση ξεπεράσει ένα κρίσιμο όριο, το διάγραμμα αστερισμού στον δέκτη παραμορφώνεται, οδηγώντας σε λανθασμένη αποδιαμόρφωση των συμβόλων και, κατά συνέπεια, στην εμφάνιση σφαλμάτων bit (BER).

Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer - Layer 1) είναι υπεύθυνο για την πραγματική μετάδοση των δεδομένων μέσω της ραδιοδιεπαφής. Περιλαμβάνει κρίσιμες διαδικασίες όπως η κωδικοποίηση καναλιού, η ψηφιακή διαμόρφωση και η χαρτογράφηση των σημάτων στις διαθέσιμες συχνότητες. Στο επίπεδο αυτό εκδηλώνονται οι επιδράσεις του θορύβου καναλιού (AWGN) και των παρεμβολών από άλλα σήματα, οι οποίες αλλοιώνουν την κυματομορφή του λαμβανόμενου σήματος και οδηγούν στην εμφάνιση σφαλμάτων bit (BER). Το δίκτυο LTE αποτελείται από το τμήμα πρόσβασης E-UTRAN και τον πυρήνα EPC (Evolved Packet Core).

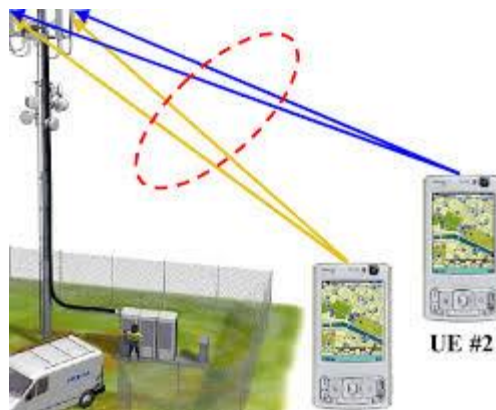


Σχήμα 2.7 Αρχιτεκτονική LTE/EPC [28]

2.9 Downlink και Uplink στο LTE

Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες κατά τον σχεδιασμό του φυσικού επιπέδου του LTE ήταν η απόφαση να χρησιμοποιηθούν δύο ριζικά διαφορετικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης για τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης. Η επιλογή αυτή δεν έγινε τυχαία, αλλά υπαγορεύτηκε από τις ασύμμετρες δυνατότητες και τους περιορισμούς που παρουσιάζει ο τερματικός εξοπλισμός χρήστη (User Equipment – UE) σε σύγκριση με τον σταθμό βάσης (eNodeB).

Το LTE χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνικές πρόσβασης για τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης.



Σχήμα 2.8 ζεύξη καθόδου και ανόδου στο LTE και κατεύθυνση μετάδοσης των σημάτων [29]

- Downlink (Ζεύξη Καθόδου): Η μετάδοση από τον σταθμό βάσης (eNodeB) προς την κινητή συσκευή (UE) χρησιμοποιεί την τεχνική OFDMA.
- Uplink (Ζεύξη Ανόδου): Η μετάδοση από την κινητή συσκευή προς τον σταθμό βάσης —που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης— χρησιμοποιεί την τεχνική SC-FDMA. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, καθώς η ζεύξη ανόδου έχει

αυστηρότερους περιορισμούς όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής του χρήστη. [5]

2.9.1 Ζεύξη Καθόδου (Downlink) και OFDMA

Η ζεύξη καθόδου αφορά τη μετάδοση δεδομένων από τον σταθμό βάσης προς την κινητή συσκευή. Για αυτή την κατεύθυνση, το LTE χρησιμοποιεί την τεχνική OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

Στο OFDMA, το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε πλήθος στενών, ορθογώνιων υποφορέων (subcarriers). Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών με τεράστια ευελιξία και ανθεκτικότητα στις πολυοδικές διαλείψεις (multipath fading).

Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η δημιουργία σημάτων με μεγάλες απότομες διακυμάνσεις ισχύος (υψηλό PAPR - Peak-to-Average Power Ratio). Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για τον σταθμό βάσης, καθώς διαθέτει συνεχή τροφοδοσία ρεύματος από το δίκτυο ηλεκτροδότησης και μπορεί να χρησιμοποιήσει ενισχυτές ισχύος υψηλής απόδοσης.

2.9.2 Ζεύξη Ανόδου (Uplink) και SC-FDMA

Αντίθετα, η ζεύξη ανόδου αφορά τη μετάδοση από την κινητή συσκευή προς τον σταθμό βάσης. Σε αυτή την περίπτωση, η συσκευή του χρήστη λειτουργεί με μπαταρία, γεγονός που επιβάλλει αυστηρότερους περιορισμούς όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Εάν χρησιμοποιούνταν το OFDMA και στο Uplink, η κινητή συσκευή θα χρειαζόταν εξαιρετικά ενεργοβόρους ενισχυτές για να διαχειριστεί το υψηλό PAPR, αδειάζοντας την μπαταρία της σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Για τον λόγο αυτό, ο οργανισμός 3GPP επέλεξε για το Uplink την τεχνική SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). Η τεχνική αυτή διατηρεί τα πλεονεκτήματα του OFDMA (όπως η ανθεκτικότητα στο κανάλι), αλλά παράγει ένα σήμα χαμηλότερου PAPR με χαρακτηριστικά "μονού φορέα". Έτσι επιτυγχάνεται χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας μειώνοντας τις απαιτήσεις ισχύος εκπομπής της κινητής συσκευής.

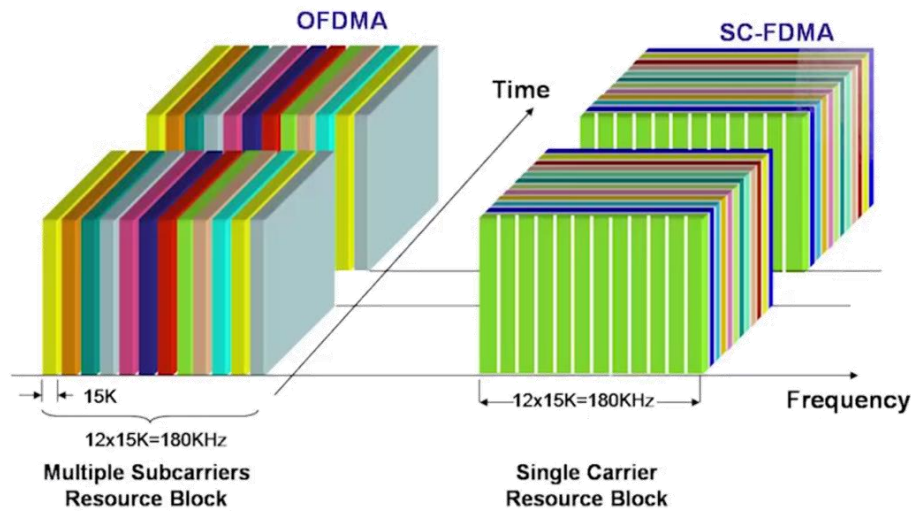
2.10 Η τεχνική SC-FDMA στο LTE Uplink

Αντίθετα με τη ζεύξη καθόδου, η ζεύξη ανόδου αφορά τη μετάδοση δεδομένων από την κινητή συσκευή προς τον σταθμό βάσης. Σε αυτή την περίπτωση, η συσκευή του χρήστη λειτουργεί με μπαταρία, γεγονός που επιβάλλει αυστηρότερους περιορισμούς όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Εάν χρησιμοποιούνταν η τεχνική OFDMA και στη ζεύξη ανόδου, η κινητή συσκευή θα χρειαζόταν εξαιρετικά ενεργοβόρους ενισχυτές για να διαχειριστεί το υψηλό PAPR, οδηγώντας σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και εξάντληση της μπαταρίας σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Για τον λόγο αυτό, το πρότυπο LTE του οργανισμού 3GPP υιοθετεί στη ζεύξη ανόδου (Uplink) την τεχνική SC-FDMA, η οποία διατηρεί τα πλεονεκτήματα του OFDMA με χαμηλότερο PAPR και χαρακτηριστικά "μονού φορέα". Συγκεκριμένα, λόγω του χαμηλού λόγου κορυφής προς μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio – PAPR), οι ενισχυτές ισχύος των κινητών συσκευών μπορούν να λειτουργούν πιο αποδοτικά, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μειωμένες απαιτήσεις ισχύος εκπομπής της κινητής συσκευής.

Ως προς τη δομή του σήματος, αν και μοιάζει με το OFDM, η SC-FDMA εκτελεί μια επιπλέον λειτουργία DFT (DFT spreading), πριν από το IFFT. Μέσω αυτής της διαδικασίας, η πληροφορία των συμβόλων κατανέμεται σε όλους τους εκχωρημένους υποφορείς, με αποτέλεσμα το παραγόμενο σήμα να παρουσιάζει χαρακτηριστικά μονού φορέα. Η ιδιότητα αυτή καθιστά το σήμα πιο ομαλό, μειώνοντας τις διακυμάνσεις της ισχύος και καθιστώντας το πιο ανθεκτικό στις μη γραμμικότητες των ενισχυτών ισχύος.



Σχήμα 2.9 Σύγκριση OFDMA και SC-FDMA στο πεδίο χρόνου–συχνότητας [30]

2.11 Διαμορφώσεις στο LTE Uplink

Η ψηφιακή διαμόρφωση (Digital Modulation) αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες διαδικασίες στο φυσικό επίπεδο του LTE, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα ψηφιακά δεδομένα (bits) ομαδοποιούνται και χαρτογραφούνται (mapping) σε μιγαδικά σύμβολα πριν από την εκπομπή τους. Το σύστημα LTE έχει σχεδιαστεί με ευελιξία, ώστε να υποστηρίζει διάφορους τύπους ψηφιακής διαμόρφωσης. Η τελική επιλογή της διαμόρφωσης αποτελεί έναν διαρκή συμβιβασμό (trade-off) μεταξύ της επιθυμητής ταχύτητας μετάδοσης και της αξιοπιστίας, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τον παρατηρούμενο ρυθμό σφαλμάτων bit (BER). Στην παρούσα ενότητα οι διαμορφώσεις εξετάζονται υπό το πρίσμα της λειτουργίας του LTE uplink και της επίδρασής τους στη συμπεριφορά του BER.

2.11.1 Η Διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)

Η διαμόρφωση QPSK αποτελεί τον κεντρικό άξονα της προσομοίωσης για το σύστημα LTE στη συγκεκριμένη μελέτη. Στην QPSK, κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο μεταφέρει πληροφορία 2 bits (π.χ. 00, 01, 10, 11), διαχωρίζοντας τη φάση του σήματος σε τέσσερις διακριτές καταστάσεις.

Υψηλή Ανθεκτικότητα: Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι η μεγάλη της ανθεκτικότητα σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο και έντονες παρεμβολές. Επειδή τα σημεία στο διάγραμμα αστερισμού (constellation diagram)

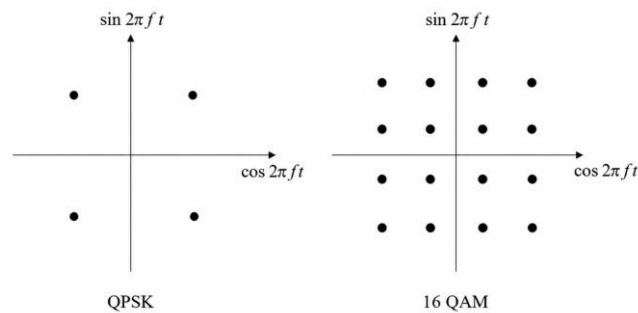
απέχουν αρκετά μεταξύ τους, απαιτείται σημαντικά υψηλή ισχύς θορύβου ώστε ο δέκτης να ερμηνεύσει λάθος ένα ληφθέν σύμβολο (λάθος απόφαση).

2.11.2 Διαμορφώσεις Ανώτερης Τάξης: QAM (16QAM / 64QAM)

Προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες για μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (high data rates), το πρότυπο LTE υποστηρίζει και διαμορφώσεις πλάτους-φάσης (Quadrature Amplitude Modulation), γνωστές ως 16QAM (4 bits ανά σύμβολο) και 64QAM (6 bits ανά σύμβολο).

Ευαισθησία στις αλλοιώσεις: Παρ' όλο που οι διαμορφώσεις QAM προσφέρουν πολλαπλάσιες ταχύτητες μετάδοσης σε σχέση με την QPSK, η μικρή απόσταση των συμβόλων στο διάγραμμα αστερισμού τις καθιστά εξαιρετικά ευάλωτες. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν έντονη ευαισθησία στον προσθετικό θόρυβο (AWGN).

Επίδραση στη Ζεύξη: Οι διαμορφώσεις QAM (16QAM/64QAM), παρουσιάζουν έντονη ευαισθησία στον θόρυβο. Σε συνθήκες χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) ή έντονης παρεμβολής, η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο ρυθμό σφαλμάτων και υποβάθμιση της ποιότητας της ζεύξης ανόδου (uplink). Συνεπώς, καθίστανται λιγότερο κατάλληλες για δυσμενείς συνθήκες καναλιού.



Σχήμα 2.10 Διαγράμματα αστερισμού QPSK και 16QAM στο επίπεδο I/Q [31]

2.12 Παράγοντες που επηρεάζουν την Απόδοση Uplink

Η αξιοπιστία της ζεύξης ανόδου (uplink) σε ένα δίκτυο LTE δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από μια ευαίσθητη ισορροπία πολλαπλών φυσικών και τεχνολογικών παραμέτρων. Σε αντίθεση με τη ζεύξη καθόδου (downlink), όπου ο σταθμός βάσης διαθέτει άφθονη ισχύ, η μετάδοση στο uplink περιορίζεται από τις δυνατότητες της

κινητής συσκευής (User Equipment – UE). Συγκεκριμένα, η τελική απόδοση καθορίζεται από τη σχέση μεταξύ της ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος και των απωλειών που εισάγει το ασύρματο κανάλι κατά τη διάδοση.

2.12.1 Ισχύς Εκπομπής και Απώλειες Διαδρομής (Path Loss)

Όπως αναφέρθηκε, το σήμα που εκπέμπεται από το UE εξασθενεί λογαριθμικά καθώς ταξιδεύει προς τον σταθμό βάσης (eNodeB). Όταν οι απώλειες διαδρομής αυξάνονται (π.χ. λόγω απόστασης ή εμποδίων), η ισχύς λήψης μειώνεται σημαντικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το επιθυμητό σήμα LTE να πλησιάζει επικίνδυνα το επίπεδο (AWGN) του καναλιού, το οποίο στον δέκτη εκδηλώνεται ως noise floor.

2.12.2 Παρεμβολή Γειτονικού Καναλιού (ACI) και Φασματική Διαρροή

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα προκύπτει όταν στο ίδιο φασματικό περιβάλλον προστίθεται η εκπομπή συσκευών IoT. Η παρουσία ενός παρεμβολέα NB-IoT στα άκρα του φάσματος του LTE (guard-band) δεν είναι απολύτως ακίνδυνη. Ακόμη και με τον διαχωρισμό των συχνοτήτων, η φασματική διαρροή (out-of-band emissions) του στενοζωνικού σήματος IoT επηρεάζει τους γειτονικούς υποφορείς του ευρυζωνικού LTE.

Η παρουσία ενός παρεμβολέα IoT στα άκρα του φάσματος LTE εκφράζεται ως παρεμβολή γειτονικού καναλιού (Adjacent Channel Interference – ACI), η οποία επηρεάζει κυρίως τους ακραίους υποφορείς και αυξάνει τον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) της ζεύξης. Ο BER αποτελεί βασικό δείκτη της συνολικής υποβάθμισης της ζεύξης.

Ως αποτέλεσμα, τα λαμβανόμενα σύμβολα αλλοιώνονται, με συνέπεια η διαδικασία λήψης απόφασης στον δέκτη να καθίσταται λιγότερο αξιόπιστη και να αυξάνεται ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) κατά την αποδιαμόρφωση.

2.12.3 Ο BER ως «Καθρέπτης» των Φυσικών Διεργασιών

Όλες οι παραπάνω υποβαθμίσεις –δηλαδή η απώλεια ισχύος λόγω απόστασης, ο θερμικός θόρυβος των κυκλωμάτων και η παρεμβολή από τις συσκευές NB-IoT– αθροίζονται μαθηματικά στο επίπεδο της ραδιοδιεπαφής, επηρεάζοντας άμεσα την αξιοπιστία της λήψης. Η θεωρητική ανάλυση της ζεύξης καταλήγει στο συμπέρασμα ότι **Error! Reference source not found.** ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) αποτελεί βασική μετρική αξιολόγησης της απόδοσης της ζεύξης, καθώς αποτυπώνει τη συνολική

επίδραση του θορύβου, των απωλειών διαδρομής και των παρεμβολών κατά τη μετάδοση από το UE προς τον eNodeB.

Η αύξηση του BER αποτελεί άμεση ένδειξη υποβάθμισης της ποιότητας της ζεύξης λόγω θορύβου ή παρεμβολής. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας της ζεύξης στο φυσικό επίπεδο μέσω του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER). Συνεπώς, ο BER αποτελεί κατ' ουσίαν τον "καθρέφτη" των φυσικών διεργασιών και υποβαθμίσεων που συμβαίνουν κατά τη μετάδοση από το UE στον eNodeB. **Error! Reference source not found.**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των επικοινωνιών IoT και της τεχνολογίας NB-IoT, προκειμένου να εξεταστεί η συνύπαρξή τους με το σύστημα LTE.

2.13 Internet of Things και IoT Επικοινωνίες

Η εξέλιξη των σύγχρονων ασύρματων δικτύων δεν περιορίζεται πλέον μόνο στην επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης, αλλά επεκτείνεται στην υποστήριξη ενός αυξανόμενου αριθμού ετερογενών συσκευών και υπηρεσιών. Στο πλαίσιο αυτό, τα δίκτυα καλούνται να εξυπηρετήσουν όχι μόνο επικοινωνίες ανθρώπου προς άνθρωπο, αλλά και επικοινωνίες μηχανής προς μηχανή (Machine-to-Machine – M2M), καθώς και πλήθος έξυπνων τερματικών χαμηλής κατανάλωσης.

Τα παραδοσιακά κυψελωτικά συστήματα, όπως το Long Term Evolution (LTE), έχουν σχεδιαστεί κυρίως για ευρυζωνικές υπηρεσίες και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Ωστόσο, οι απαιτήσεις των εφαρμογών IoT διαφοροποιούνται σημαντικά, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη εξειδικευμένων τεχνολογιών επικοινωνίας.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε το Narrowband-IoT (NB-IoT), ένα στενοζωνικό κυψελωτικό πρότυπο που στοχεύει στην αποδοτική υποστήριξη συσκευών χαμηλής κατανάλωσης και περιορισμένων απαιτήσεων μετάδοσης, με έμφαση στην εκτεταμένη κάλυψη και στη μαζική συνδεσιμότητα.

2.13.1 Έννοια και Χαρακτηριστικά IoT Συστημάτων

Το Internet of Things (IoT) αποτελεί ένα δίκτυο δισεκατομμυρίων φυσικών συσκευών, οι οποίες είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες, λογισμικό και τεχνολογίες επικοινωνίας, επιτρέποντάς τους να συνδέονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα. Οι εφαρμογές του

IoT εκτείνονται από τα έξυπνα σπίτια και τις έξυπνες πόλεις έως τη βιομηχανική παραγωγή και την έξυπνη γεωργία.

Βασικό χαρακτηριστικό των IoT συστημάτων είναι η δυνατότητα υποστήριξης μαζικού αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, οι οποίες μεταδίδουν μικρό όγκο δεδομένων σε αραιά χρονικά διαστήματα. Το γεγονός αυτό διαφοροποιεί τις IoT επικοινωνίες από τα κλασικά ευρυζωνικά συστήματα, όπου η έμφαση δίνεται σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.



Σχήμα 2.11 Ενδεικτικές συσκευές και εφαρμογές IoT

2.13.2 Περιορισμοί IoT Συσκευών

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές ευρυζωνικές συσκευές (όπως τα smartphones), οι συσκευές IoT λειτουργούν υπό αυστηρούς περιορισμούς:

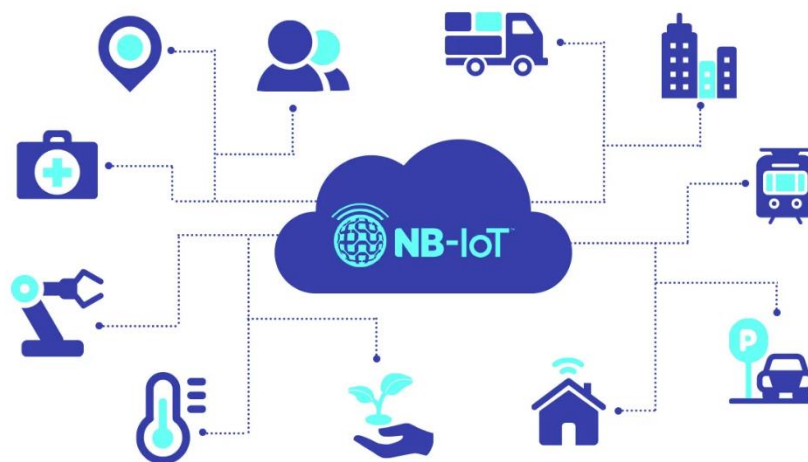
- **Χαμηλή Κατανάλωση Ενέργειας:** Πολλές συσκευές τροφοδοτούνται από μπαταρίες που πρέπει να διαρκούν χρόνια.
- **Χαμηλό Κόστος:** Η μαζική παραγωγή απαιτεί απλές και οικονομικές υλοποιήσεις υλικού.
- **Χαμηλός Ρυθμός Μετάδοσης:** Η φύση της πληροφορίας (π.χ. μετρήσεις αισθητήρων) δεν απαιτεί υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.

- **Περιορισμένες Απαιτήσεις Επεξεργαστικής Ισχύος:** Οι συσκευές διαθέτουν ελάχιστους πόρους για σύνθετους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος.

2.13.3 NB-IoT: Το Κυψελωτό IoT (Narrowband IoT)

Το NB-IoT είναι ένα στενοζωνικό ραδιοπρότυπο που αναπτύχθηκε από τον οργανισμό 3GPP (Release 13), με στόχο να παρέχει βελτιστοποιημένη κάλυψη σε συσκευές IoT μέσω των υφιστάμενων κυψελωτών δικτύων LTE. Χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 180 kHz, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα Physical Resource Block (PRB) του LTE.

Το NB-IoT έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει αυξημένη κάλυψη (π.χ. σε εσωτερικούς χώρους ή υπόγεια) και να υποστηρίζει τεράστιο αριθμό συσκευών ανά κυψέλη, καλύπτοντας τις απαιτήσεις μαζικής συνδεσιμότητας των IoT εφαρμογών. **Error! Reference source not found.**



Σχήμα 2.12 Ενδεικτικές εφαρμογές NB-IoT

2.13.4 Μετάδοση Uplink στο NB-IoT

Στη ζεύξη ανόδου του NB-IoT (NPUSCH), χρησιμοποιείται η τεχνική SC-FDMA, παρόμοια με το LTE, για τη διατήρηση χαμηλής PAPR και την εξοικονόμηση ενέργειας. Η μετάδοση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

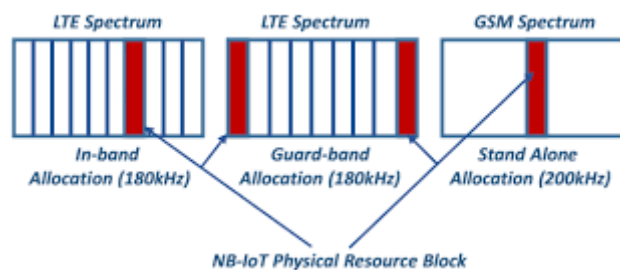
- **Single-tone:** Χρήση ενός μόνο υποφορέα (3.75 kHz ή 15 kHz), που επιτρέπει τη συγκέντρωση της ισχύος σε πολύ στενό εύρος για καλύτερη κάλυψη.

- Multi-tone: Χρήση πολλαπλών υποφορέων των 15 kHz (3, 6 ή 12 υποφορείς), προσφέροντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Οι διαμορφώσεις που υποστηρίζονται είναι η $\pi/2$ -BPSK και η rotated $\pi/4$ -QPSK, οι οποίες προσφέρουν την απαραίτητη ανθεκτικότητα σε συνθήκες χαμηλού SNR.

2.13.5 Σενάρια Συνύπαρξης (In-band και Guard-band)

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του NB-IoT είναι η ευελιξία στην τοποθέτηση του σήματος εντός του φάσματος [13]:

- **In-band:** Το σήμα IoT τοποθετείται μέσα στους πόρους που χρησιμοποιεί το LTE.
- **Guard-band:** Το σήμα τοποθετείται στα «άκρα» του φάσματος, στις ζώνες προστασίας μεταξύ των καναλιών LTE.



Σχήμα 2.13 Τρόποι τοποθέτησης του NB-IoT στο φάσμα [32]

Το NB-IoT μπορεί να λειτουργήσει είτε εντός του φάσματος LTE (in-band), είτε στα άκρα αυτού (guard-band), είτε αυτόνομα (standalone). Στην παρούσα εργασία, μελετάται η λειτουργία guard-band, καθώς η τοποθέτηση στα άκρα του φάσματος LTE μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη παρεμβολή, επιτρέποντας τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της ζεύξης LTE σε οριακές συνθήκες λειτουργίας.

2.13.6 Επιπτώσεις της Συνύπαρξης LTE και IoT

Η συνύπαρξη στο ίδιο φάσμα αναδεικνύει τις διαφορές στα χαρακτηριστικά των χρηστών: οι χρήστες LTE απαιτούν υψηλό throughput και αξιοπιστία για εφαρμογές πολυμέσων, ενώ οι χρήστες IoT απαιτούν αποδοτική πρόσβαση με ελάχιστους πόρους. Η διαχείριση της παρεμβολής μεταξύ αυτών των δύο διαφορετικών προφίλ είναι κρίσιμη για την εύρυθμη λειτουργία του συνολικού δικτύου.

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πρόβλημα της φασματικής συνύπαρξης στο σενάριο guard-band. Το σήμα NB-IoT τοποθετείται στα άκρα του φάσματος LTE ώστε να ελαχιστοποιηθεί η άμεση επικάλυψη με το LTE. Ωστόσο, η φασματική γειτνίαση των σημάτων δημιουργεί σύνθετες προκλήσεις παρεμβολών στη ζεύξη ανόδου (uplink), οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της ζεύξης LTE.

2.13.6.1 Μηχανισμοί Παρεμβολής στη Ζεύξη Ανόδου (Uplink)

Στη ζεύξη ανόδου, η παρεμβολή εκδηλώνεται όταν τα σήματα από τις συσκευές χρήστη (UE) του LTE και τις συσκευές NB-IoT φτάνουν ταυτόχρονα στον σταθμό βάσης (eNodeB). Λόγω της περιορισμένης ισχύος εκπομπής των κινητών συσκευών, η παρουσία ενός παρεμβολέα μπορεί να μειώσει δραστικά τον λόγο SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio).

Η φασματική διαρροή (out-of-band emissions) από το σήμα NB-IoT μπορεί να επηρεάσει τους γειτονικούς υποφορείς του LTE, προκαλώντας το φαινόμενο της παρεμβολής μεταξύ υποφορέων (Inter-Carrier Interference - ICI). Αυτό οδηγεί σε:

- Αλλοίωση του Αστερισμού: Μετατόπιση των συμβόλων από τις ιδανικές τους θέσεις στο επίπεδο I/Q.
- Διασπορά Σημείων: Όσο εντονότερη είναι η παρεμβολή, τόσο δυσκολότερη γίνεται η ορθή αναγνώριση των συμβόλων από τον δέκτη κατά τη διαδικασία αποδιαμόρφωσης .
- Αύξηση του BER: Ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) λειτουργεί ως ο βασικός «καθρέπτης» αυτών των αλλοιώσεων, αποτυπώνοντας την υποβάθμιση της αξιοπιστίας της ζεύξης.

2.13.6.2 Η Επίδραση των Ψηφιακών Διαμορφώσεων

Η επιλογή διαμόρφωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανθεκτικότητα του συστήματος LTE απέναντι στο NB-IoT. Στο LTE, η διαμόρφωση QPSK παρουσιάζει αυξημένη ανθεκτικότητα σε σχέση με διαμορφώσεις ανώτερης τάξης, καθώς η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού επιτρέπει πιο αξιόπιστη αναγνώριση των συμβόλων ακόμη και υπό παρουσία θορύβου και παρεμβολών. Αντίθετα, διαμορφώσεις όπως οι 16QAM και 64QAM, παρόλο που προσφέρουν

υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, εμφανίζουν αυξημένη ευαισθησία, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων υπό δυσμενείς συνθήκες. Από την πλευρά του IoT, χρησιμοποιούνται ειδικά σχήματα διαμόρφωσης όπως η $\pi/2$ -BPSK και η rotated $\pi/4$ -QPSK. Αυτές οι τεχνικές μειώνουν τις διακυμάνσεις του φακέλου του σήματος (χαμηλό PAPR), επιτρέποντας επιτρέποντας στους ενισχυτές των συσκευών IoT να λειτουργούν πιο αποδοτικά.

2.13.6.30 Ρόλος των Απωλειών Διαδρομής (Path Loss) και του Θορύβου

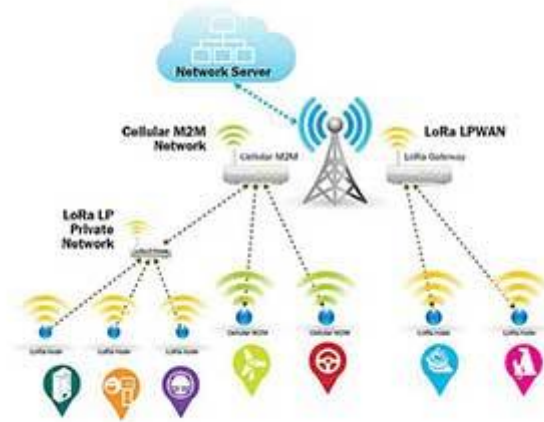
Ο πλέον καθοριστικός παράγοντας υποβάθμισης της απόδοσης σε σενάρια συνύπαρξης είναι οι απώλειες διαδρομής (Path Loss). Όταν η ισχύς του σήματος LTE μειώνεται λόγω απόστασης ή εμποδίων, το σήμα πλησιάζει το επίπεδο του θερμικού θορύβου (noise floor) του δέκτη και η επίδραση της παρεμβολής NB-IoT μπορεί να γίνει καταστροφική.

Σε επίπεδο δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα επηρεάζεται τόσο από τον προσθετικό θόρυβο AWGN όσο και από το παρεμβαλλόμενο σήμα NB-IoT. Η ποιότητα της μετάδοσης αξιολογείται μέσω του λόγου E_b/N_0 (ενέργεια ανά bit προς πυκνότητα θορύβου). Η μετατόπιση της καμπύλης BER ως προς υψηλότερες τιμές E_b/N_0 αποτελεί ένδειξη υποβάθμισης της απόδοσης της ζεύξης.

2.13.7 Φασματική Συνύπαρξη σε Κυψελωτικά Δίκτυα

Η έννοια της συνύπαρξης (coexistence) αναφέρεται στην ικανότητα διαφορετικών συστημάτων επικοινωνίας να λειτουργούν ταυτόχρονα στο ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων χωρίς να προκαλούν μη αποδεκτή υποβάθμιση το ένα στο άλλο. Λόγω της στενότητας του διαθέσιμου ραδιοφάσματος, το NB-IoT σχεδιάστηκε από το 3GPP ώστε να ενσωματώνεται στις υφιστάμενες μπάντες (frequency band) του LTE. Η συνύπαρξη αυτή επιτρέπει την αξιοποίηση της υποδομής των κυψελωτών δικτύων για τη διασύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών NB-IoT, δημιουργώντας ωστόσο ένα σύνθετο περιβάλλον παρεμβολών στο φυσικό επίπεδο.

Cellular IoT



Σχήμα 2.14 Φασματική συνύπαρξη τεχνολογιών IoT

2.13.8 Παρεμβολή στη Ζεύξη Ανόδου (Uplink)

Στη ζεύξη ανόδου (uplink), η παρεμβολή εκδηλώνεται όταν τα σήματα που εκπέμπονται από τις συσκευές χρήστη (UE) του LTE και τις συσκευές NB-IoT φτάνουν ταυτόχρονα στον σταθμό βάσης (eNodeB). Λόγω της γειννίαςσης των φασματικών πόρων, η ισχύς από το σήμα IoT μπορεί να «διαρρεύσει» στους υποφορείς που χρησιμοποιούνται από το LTE. Η παρεμβολή αυτή στη ζεύξη ανόδου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς οι κινητές συσκευές έχουν περιορισμένη ισχύ εκπομπής και η παρουσία ενός παρεμβολέα μπορεί να μειώσει δραματικά τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR).

Ο λόγος SINR ορίζεται ως:

$$SINR = \frac{S}{I + N} \quad (27)$$

- ο όπου:

S = ισχύς σήματος LTE

I = ισχύς παρεμβολής IoT

N = ισχύς θορύβου AWGN

Η επίδραση της παρεμβολής γίνεται ακόμη πιο έντονη όταν η ισχύς του σήματος LTE μειώνεται λόγω απωλειών διαδρομής (path loss), γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του SINR και αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).

2.13.9 Επίδραση Παρεμβολής στη Λήψη Συμβόλων

Στο φυσικό επίπεδο, η παρουσία του σήματος NB-IoT λειτουργεί ως ένας πρόσθετος παράγοντας αλλοίωσης της κυματομορφής του LTE. Όταν ο δέκτης λαμβάνει το σήμα, η συνολική πληροφορία που επεξεργάζεται αποτελείται από το επιθυμητό σήμα LTE, τον προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN) και το παρεμβαλλόμενο σήμα NB-IoT. Η επίδραση της παρεμβολής αποτυπώνεται στον αστερισμό του σήματος και εκδηλώνεται ως εξής:

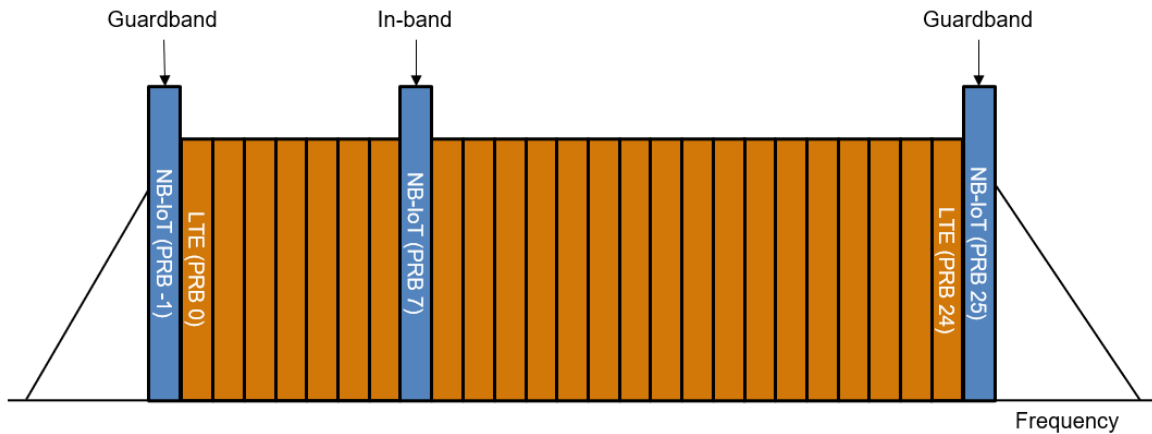
- Αλλοίωση Αστερισμού: Η παρεμβολή προκαλεί μετατόπιση των συμβόλων (π.χ. της QPSK) από τις ιδανικές τους θέσεις στο επίπεδο I/Q.
- Διασπορά Σημείων: Όσο εντονότερη είναι η παρεμβολή, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των σημείων γύρω από τις θεωρητικές θέσεις των συμβόλων, καθιστώντας δυσκολότερη την ορθή αναγνώρισή τους από τον δέκτη.

2.13.10 Τοποθέτηση NB-IoT σε Guard-band

Η επιλογή της τοποθέτησης του σήματος NB-IoT στις ζώνες guard-band του LTE αποτελεί μια στρατηγική προσέγγιση για τη μείωση της άμεσης παρεμβολής στα μπλοκ πόρων (PRBs) που μεταφέρουν δεδομένα χρηστών.

Ωστόσο, η φασματική γεινίαση των σημάτων μπορεί να οδηγήσει σε φασματική διαρροή (out-of-band emissions) και παρεμβολή γειτονικών καναλιών (Adjacent Channel Interference – ACI), επηρεάζοντας την απόδοση της ζεύξης LTE. Σε συνθήκες ισχυρής παρεμβολής, ενδέχεται δευτερογενώς να επηρεαστεί η λήψη των υποφορέων και να εκδηλωθεί φαινόμενο διαμόρφωσης μεταξύ υποφορέων (Inter-Carrier Interference – ICI).

Η μελέτη της συνύπαρξης στα άκρα του φάσματος επιτρέπει τη διερεύνηση της ανθεκτικότητας του συστήματος σε οριακές συνθήκες, όπου οι φιλτραρισμένες ζώνες προστασίας πρέπει να διατηρήσουν τον διαχωρισμό των σημάτων.



Σχήμα 2.15 Τοποθέτηση NB-IoT σε guard-band και in-band LTE [33]

2.13.11 Σχέση Παρεμβολής και BER

Ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) αποτελεί τον καθρέφτη όλων των μηχανισμών υποβάθμισης που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο. Κάθε εσφαλμένη αναγνώριση συμβόλου λόγω της παρεμβολής NB-IoT μεταφράζεται σε σφάλμα bit.

- Υποβάθμιση αξιοπιστίας: Η παρουσία του παρεμβολέα NB-IoT αυξάνει την πιθανότητα σφάλματος, οδηγώντας σε αύξηση του BER.
- Επίδραση παραμέτρων: Διαφορετικές ρυθμίσεις του NB-IoT, όπως ο τύπος διαμόρφωσης ($\pi/2$ -BPSK έναντι rotated $\pi/4$ -QPSK), επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την ένταση της παρεμβολής και, συνεπώς, την τιμή του BER.

2.13.12 Προκλήσεις Αξιολόγησης της Απόδοσης

Η κύρια πρόκληση στη μελέτη της συνύπαρξης είναι η εύρεση της ισορροπίας μεταξύ της ανάγκης για συνδεσιμότητα NB-IoT και της διατήρησης της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) για τους χρήστες LTE. Η αξιολόγηση απαιτεί τη μελέτη του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες καναλιού, καθώς παράγοντες όπως οι απώλειες διαδρομής (Path Loss) μπορούν να εντείνουν την ευαισθησία της ζεύξης στην παρουσία παρεμβολών. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων, το LTE ενσωματώνει μηχανισμούς διαχείρισης παρεμβολών και προσαρμογής ζεύξης.

2.13.12.1 Μηχανισμοί Αντιμετώπισης Παρεμβολής στο LTE

Η διαχείριση της παρεμβολής στο LTE μπορεί να γίνει σε διαφορετικά επίπεδα. Για τον μετριασμό των επιπτώσεων σε επίπεδο δικτύου, το LTE-Advanced εισάγει τεχνικές ενισχυμένου συντονισμού παρεμβολών (eICIC), κυρίως σε ετερογενή δίκτυα (macro-rico), όπου η συνύπαρξη κυψελών διαφορετικής ισχύος οδηγεί σε αυξημένα επίπεδα παρεμβολής. Παράλληλα, στο LTE εφαρμόζονται μηχανισμοί προσαρμογής ζεύξης (Link Adaptation) –οι οποίοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί σε σενάρια συνύπαρξης όπως αυτά που εξετάζονται (LTE uplink με SC-FDMA)– με στόχο να διατηρείται καλή ποιότητα μετάδοσης σε μεταβαλλόμενες συνθήκες καναλιού. Ο σταθμός βάσης eNodeB επιλέγει δυναμικά το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) με βάση τον δείκτη ποιότητας καναλιού CQI (Channel Quality Indicator) που αναφέρει η συσκευή. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα προσαρμόζεται στις συνθήκες θορύβου και παρεμβολής, επιτυγχάνοντας ισορροπία μεταξύ αξιοπιστίας και απόδοσης, ώστε ο δέκτης LTE να ανακτά την πληροφορία με αποδεκτό ρυθμό σφαλμάτων bit (BER).

2.14 Μετρικές Απόδοσης και Εργαλεία Ανάλυσης

2.14.1 Ρυθμός Σφαλμάτων Bit (Bit Error Rate – BER)

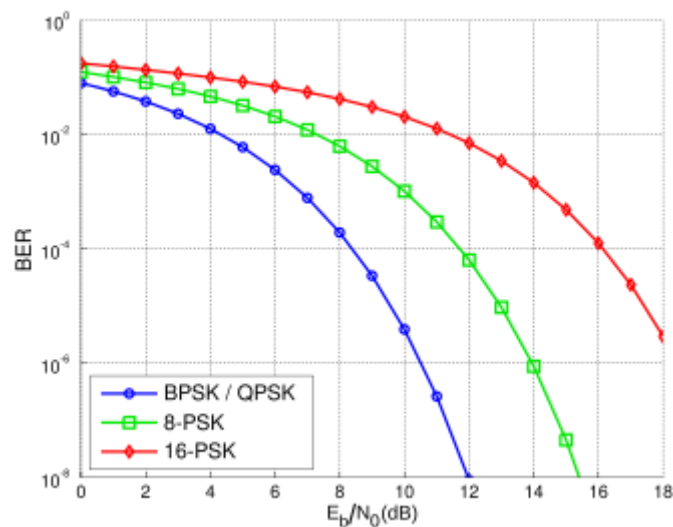
Ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER) αποτελεί τη θεμελιώδη μετρική αξιολόγησης της αξιοπιστίας ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος και ορίζεται ως ο λόγος των εσφαλμένων bits προς τον συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων bits σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως βασικός δείκτης απόδοσης, καθώς αποτυπώνει την αθροιστική επίδραση του θορύβου AWGN, των απωλειών διαδρομής και της παρεμβολής από το σήμα NB-IoT στην ποιότητα της ζεύξης.

$$BER = \frac{N_{errors}}{N_{total}} \quad (28)$$

2.14.2 Σχέση E_b/N_0 και Καμπύλη Waterfall

Η απόδοση του συστήματος LTE στην παρούσα μελέτη αναλύεται μέσω της καμπύλης BER ως συνάρτηση του λόγου της ενέργειας ανά bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (E_b/N_0).

- Η Καμπύλη Αναφοράς (Reference): Αντιπροσωπεύει την ιδανική συμπεριφορά του συστήματος LTE χωρίς εξωτερικές παρεμβολές.
- Η Καμπύλη Waterfall: Η χαρακτηριστική μορφή των καμπυλών BER περιλαμβάνει την περιοχή “waterfall”, όπου παρατηρείται απότομη μείωση του BER καθώς το E_b/N_0 αυξάνεται, σηματοδοτώντας τη μετάβαση από περιοχή μη αξιόπιστης λειτουργίας (υψηλό BER) σε περιοχή αξιόπιστης επικοινωνίας (χαμηλό BER).



Σχήμα 2. 16 Καμπύλες BER ως συνάρτηση του E_b/N_0 για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης[34]

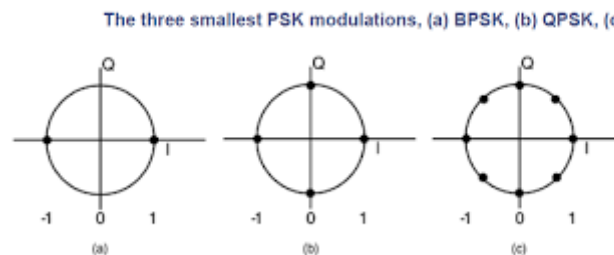
Η μετατόπιση της καμπύλης BER προς υψηλότερες τιμές E_b/N_0 αποτελεί ένδειξη υποβάθμισης της απόδοσης του συστήματος λόγω θορύβου ή παρεμβολών.

Για τη συστηματική αξιολόγηση της απόδοσης, η καμπύλη BER– E_b/N_0 αναλύεται σε χαρακτηριστικές περιοχές λειτουργίας. Σε χαμηλές τιμές E_b/N_0 , όπου το σύστημα παρουσιάζει υψηλό ρυθμό σφαλμάτων, γεγονός που δυσχεραίνει την αξιόπιστη ανάκτηση της πληροφορίας. Και στο κατώφλι μετάβασης προς την αξιόπιστη λειτουργία και υψηλότερες τιμές E_b/N_0 , όπου ο BER μειώνεται δραστικά. Η σύγκριση μεταξύ αυτών των περιοχών επιτρέπει την παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο η παρεμβολή NB-IoT ή οι απώλειες διαδρομής μετατοπίζουν το κατώφλι, υποβαθμίζοντας την ανθεκτικότητα του LTE.

2.14.3 Διάγραμμα Αστερισμού και Συνιστώσες I/Q

Το διάγραμμα αστερισμού αποτελεί γραφική αναπαράσταση των διαμορφωμένων συμβόλων στο επίπεδο των συνιστωσών In-phase (I) και Quadrature (Q).

- **Οπτική ερμηνεία:** Δεν αποτελεί αριθμητική μετρική απόδοσης, αλλά χρησιμοποιείται ως εργαλείο ποιοτικής ανάλυσης της συμπεριφοράς του σήματος.
- **Διασπορά σημείων:** Η παρουσία θορύβου και παρεμβολής προκαλεί διασπορά των σημείων γύρω από τις ιδανικές θέσεις των συμβόλων (π.χ. των τεσσάρων σημείων αστερισμού της QPSK). Όσο αυξάνεται η διασπορά, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα λανθασμένης απόφασης στον δέκτη, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).



Σχήμα 2. 17 Διαγράμματα αστερισμού BPSK, QPSK και 8-PSK στο επίπεδο I/Q [25]

2.14.4 Περιορισμοί και Ερμηνεία Μετρικών

Η θεωρητική ανάλυση εστιάζει στους μηχανισμούς του φυσικού επιπέδου και βασίζεται στον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER), ο οποίος αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο δείκτη για τη μελέτη της συνύπαρξης LTE–NB-IoT. Ο δείκτης Ber αποτυπώνει άμεσα την επίδραση του θορύβου, των απωλειών διαδρομής και της παρεμβολής στην ποιότητα της ζεύξης, επιτρέποντας τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της σχέσης BER–Eb/No.

3 Κεφάλαιο 3^ο: Πειραματική Διαδικασία

Στο στάδιο αυτό διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων του παρεμβάλλοντος NB-IoT στη λειτουργία της ζεύξης ανόδου (uplink) του LTE, το οποίο λειτουργεί με διαμόρφωση QPSK, καθώς επιλέγεται ως η πλέον κατάλληλη διαμόρφωση για λειτουργία σε συνθήκες αυξημένου θορύβου. Συγκεκριμένα, εξετάζεται κατά πόσο η καμπύλη BER του LTE, για διαφορετικές παραμετροποιήσεις του NB-IoT, διαφοροποιείται σε σχέση με την καμπύλη αναφοράς του συστήματος, η οποία αντιστοιχεί στη βασική συμπεριφορά του LTE χωρίς παρεμβολή.

3.1 Περιγραφή Περιβάλλοντος Προσομοίωσης AWRD

Η παρούσα πειραματική μελέτη υλοποιήθηκε στο AWR Design Environment (AWRD), στο οποίο αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης τύπου test bench για τη μελέτη της συνύπαρξης (co-existence) μεταξύ LTE και NB-IoT στο φυσικό επίπεδο.

Το μοντέλο περιλαμβάνει πομπό LTE (LTE Transmitter), κανάλι μετάδοσης με λευκό γκαουσιανό θόρυβο (AWGN) και παράμετρο απωλειών διαδρομής (LOSS) η οποία επιτρέπει τη μεταβολή της συνολικής εξασθένησης του σήματος, πηγή NB-IoT που λειτουργεί ως παρεμβάλλον σήμα, καθώς και δέκτη LTE (LTE Receiver) με δυνατότητα υπολογισμού και απεικόνισης του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER). Συγκεκριμένα, το LTE λειτουργεί με διαμόρφωση QPSK, ενώ το NB-IoT υποστηρίζει διαμορφώσεις $\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK, ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο. Το κανάλι προσομοιώνεται ως AWGN, ενώ η παράμετρος LOSS χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της εξασθένησης του λαμβανόμενου σήματος, μεταβάλλοντας την ισχύ του.

Η απόδοση του συστήματος αξιολογείται μέσω της μέτρησης του BER στον δέκτη LTE, με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της παρουσίας NB-IoT στη συμπεριφορά της ζεύξης. Οι τιμές BER εξάγονται για τα επιλεγμένα σημεία του λόγου E_b/N_0 .

3.2 Αξιολόγηση Διαμόρφωσης LTE (QPSK)

Στο περιβάλλον προσομοίωσης του LTE εξετάστηκαν διαμορφώσεις QPSK και QAM (16QAM και 64QAM) αντίστοιχα. Από τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι, υπό τις συγκεκριμένες παραμετροποιήσεις του μοντέλου, οι διαμορφώσεις 16-QAM και 64-QAM παρουσιάζουν έντονη ευαισθησία στον θόρυβο. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η

διαμόρφωση QPSK, η οποία εξασφαλίζει σταθερότερη και πιο αξιόπιστη λειτουργία της ζεύξης LTE στις εξεταζόμενες συνθήκες.

3.3 Θεωρητικό Πλαίσιο Καναλιού – Path Loss (Rappaport)

Το ασύρματο κανάλι μετάδοσης χαρακτηρίζεται από απώλειες διαδρομής (Path Loss), οι οποίες αποτελούν βασικό παράγοντα εξασθένησης του σήματος. Στην παρούσα προσομοίωση, η επίδραση των απωλειών διαδρομής προσεγγίζεται μέσω της παραμέτρου LOSS η οποία προσομοιώνει την εξασθένηση του λαμβανόμενου σήματος. Η μεταβολή της παραμέτρου LOSS επηρεάζει τον λόγο E_b/N_0 , μέσω της μεταβολής της λαμβανόμενης ισχύος, γεγονός που οδηγεί σε αντίστοιχη μεταβολή του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER).

3.4 Μεθοδολογία προσομοιώσεων

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση επικεντρώνεται στη ζεύξη ανόδου (uplink) του συστήματος LTE, όπου η αξιολόγηση της απόδοσης πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER) υπό την παρουσία παρεμβολών από σήματα NB-IoT. Συγκεκριμένα, διερευνάται ο βαθμός επίδρασης της παρουσίας NB-IoT στη λειτουργία του LTE με βάση το BER στον δέκτη, ο οποίος αποτυπώνει τη συνολική συμπεριφορά της ζεύξης LTE (πομπού – καναλιού – δέκτη). Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσω προσομοιώσεων στο περιβάλλον AWRD, όπου για κάθε εξεταζόμενη παραμετροποίηση υπολογίζεται το BER.

Στο εξεταζόμενο σενάριο, η πηγή NB-IoT τοποθετείται στα άκρα του φάσματος (guard-band) του LTE, ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά της ζεύξης σε συνθήκες φασματικής γειννίας.

Για το δίκτυο LTE επιλέγεται η διαμόρφωση QPSK ενώ για το NB-IoT χρησιμοποιούνται οι παράμετροι SCMode και Mod Type. Η παράμετρος SCMode (Subcarrier Mode) στο NB-IoT καθορίζει τον τρόπο αξιοποίησης των υποφερόντων (tones) στη ζεύξη ανόδου, επηρεάζοντας τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων υποφερόντων και το αντίστοιχο εύρος ζώνης εκπομπής. Μέσω της μεταβολής της παραμέτρου αυτής μεταβάλλεται η φασματική κατανομή του σήματος NB-IoT, γεγονός που δύναται να επηρεάσει το επίπεδο παρεμβολής προς το LTE σύστημα σε συνθήκες φασματικής συνύπαρξης. Η παράμετρος SCMode, λαμβάνει εννέα διαφορετικές τιμές,

(0, 1, ..., 8), οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίας, single-tone και multi-tone του NB-IoT uplink.

Η παράμετρος Mod Type καθορίζει τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται από το δίκτυο NB-IoT και λαμβάνει τις τιμές 0 και 1, που αντιστοιχούν στις διαμορφώσεις $\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK αντίστοιχα. Σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις το κανάλι θεωρείται AWGN.

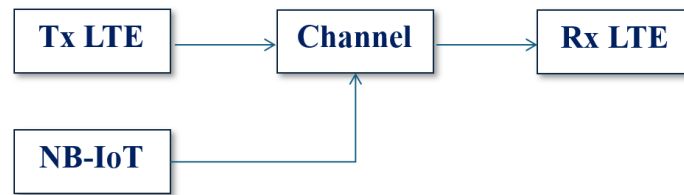
Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με τις εξής παραμέτρους:

- Διαμόρφωση LTE: QPSK
- Διαμόρφωση NB-IoT: $\pi/2$ -BPSK ή rotated $\pi/4$ -QPSK
- Παράμετρος SCMODE: ρυθμίσεις λειτουργίας (0-8)
- Κανάλι: AWGN (σταθερό)
- Παράμετρος LOSS: μεταβλητή (όπου απαιτείται)

Πραγματοποιούνται συνολικά 36 προσομοιώσεις, οργανωμένες σε τέσσερις ομάδες. Κάθε εκτέλεση (run) αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων. Από κάθε εκτέλεση προσομοίωσης εξάγονται τρεις γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αφορούν τον ρυθμό σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER), τη φασματική κατανομή του σήματος (Spectrum) και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (Throughput). Η ανάλυση βασίζεται κυρίως στις καμπύλες Bit Error Rate (BER), καθώς αυτό αποτελεί το βασικό μέτρο αξιοπιστίας της ζεύξης. Τα διαγράμματα Throughput και Spectrum παρουσιάζονται συμπληρωματικά, για την πληρέστερη κατανόηση της συνολικής λειτουργίας του συστήματος.

Κάθε γραφική παράσταση BER αποτυπώνει τη συμπεριφορά του συστήματος για τις αντίστοιχες ρυθμίσεις των παραμέτρων SCMode και Mod Type της NB-IoT πηγής. Στο πλαίσιο της ανάλυσης, η καμπύλη BER απεικονίζεται ως συνάρτηση του λόγου της ενέργειας ανά bit προς τον θόρυβο (E_b/N_0).

3.5 Πειραματική Διάταξη



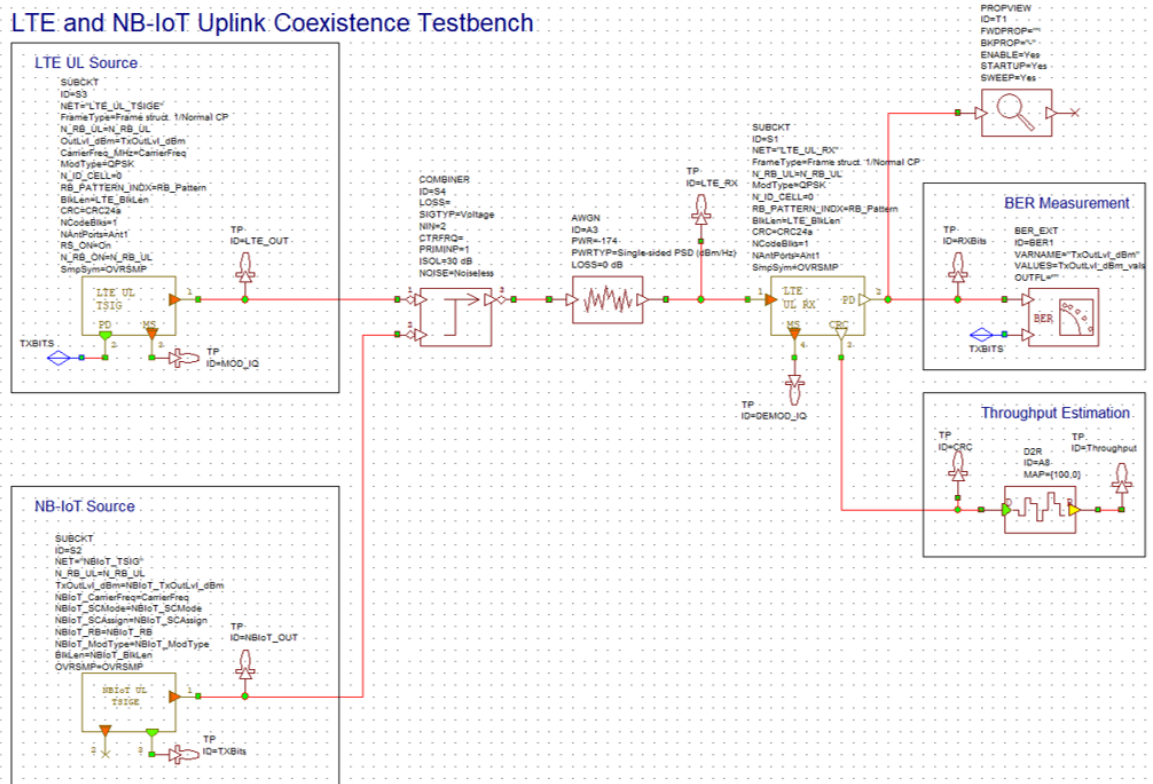
Σχήμα 3.1 Βασικό μοντέλο συνύπαρξης UL-LTE και UL NB-IoT στο ασύρματο κανάλι

Η συνολική διάταξη βασίζεται σε μία αλυσίδα μετάδοσης και περιλαμβάνει : τον πομπό LTE, την πηγή NB-IoT, το κανάλι μετάδοσης και τον δέκτη LTE, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το σήμα του LTE παράγεται στον πομπό και οδηγείται προς το κανάλι, ενώ ταυτόχρονα εισάγεται στο ίδιο σημείο σήμα NB-IoT, που λειτουργεί ως παρεμβολή.

Το κανάλι μετάδοσης μοντελοποιείται ως κανάλι προσθετικού λευκού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise – AWGN) ενώ παράλληλα εισάγεται εξασθένιση μέσω της παραμέτρου LOSS, η οποία επηρεάζει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Στην έξοδο του καναλιού, το συνολικό σήμα (LTE και NB-IoT) οδηγείται στον δέκτη LTE, όπου πραγματοποιείται η αποδιαμόρφωση και ο υπολογισμός του BER.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει τη συστηματική διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του NB-IoT και των συνθηκών του καναλιού στη συμπεριφορά της ζεύξης LTE.

3.6 Συνολική Αρχιτεκτονική Κυκλώματος



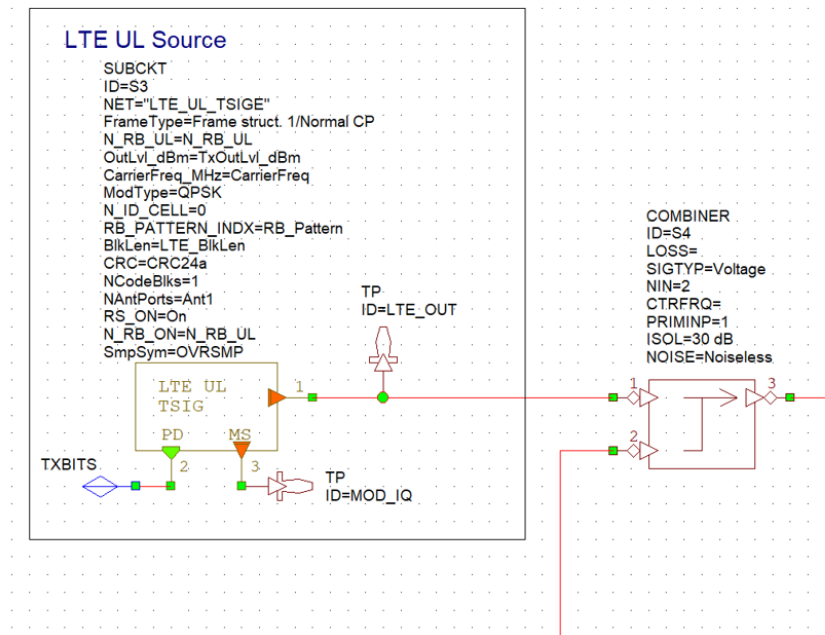
Σχήμα 3.2 Συνολικό κύκλωμα πειραματικής διάταξης

3.7 Ανάλυση Βασικών Υποσυστημάτων του Κυκλώματος

Το συνολικό κύκλωμα αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία υλοποιούν τις βασικές λειτουργίες πομπού, καναλιού και δέκτη. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια blocks της πειραματικής διάταξης, καθώς και ο ρόλος τους στη διαδικασία προσομοίωσης.

3.7.1 Πομπός LTE (LTE Transmitter)

LTE and NB-IoT Uplink Coexistence Testbench

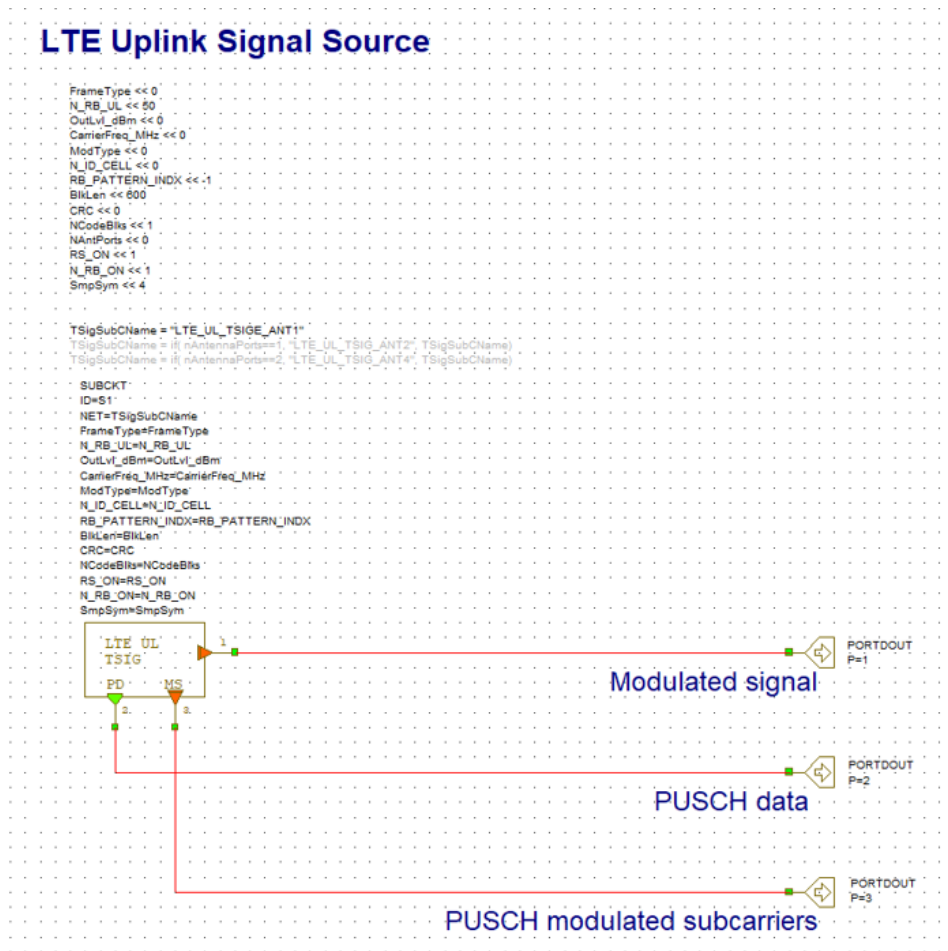


Σχήμα 3.3 Πομπός LTE uplink με διαμόρφωση QPSK

Ο πομπός LTE είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία του σήματος που μεταδίδεται στο κανάλι. Περιλαμβάνει επιμέρους στάδια επεξεργασίας, όπως η κωδικοποίηση καναλιού, η χαρτογράφηση συμβόλων και η διαμόρφωση, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του LTE.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, επιλέγεται διαμόρφωση QPSK για το LTE, καθώς από τις αρχικές προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε θόρυβο σε σχέση με τις διαμορφώσεις όπως 16-QAM και 64-QAM, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία.

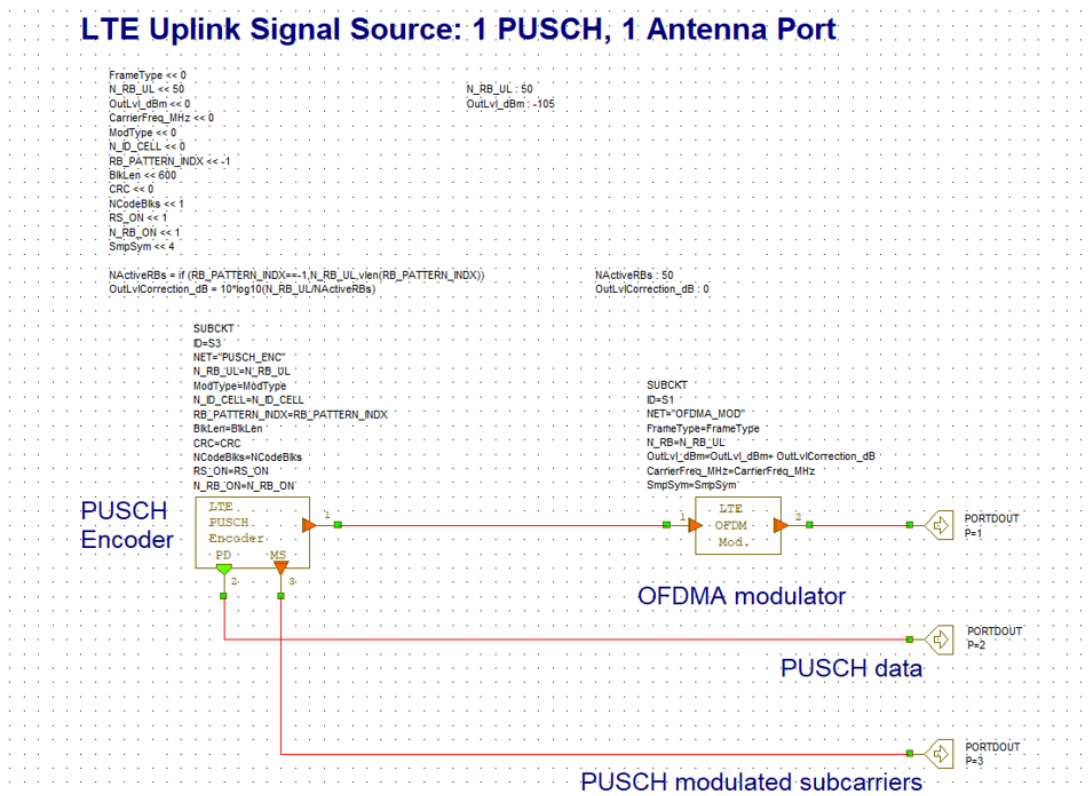
3.7.1.1 PUSCH Encoder



Σχήμα 3.4 LTE Uplink Signal Source – παραγωγή διαμορφωμένου σήματος LTE uplink και εξόδων PUSCH

Το υποκύκλωμα PUSCH Encoder αποτελεί βασικό τμήμα του πομπού LTE uplink και είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των δεδομένων πριν τη διαμόρφωση.

3.7.1.1.1 Αναλυτική δομή του υποκυκλώματος PUSCH Encoder στο LTE uplink



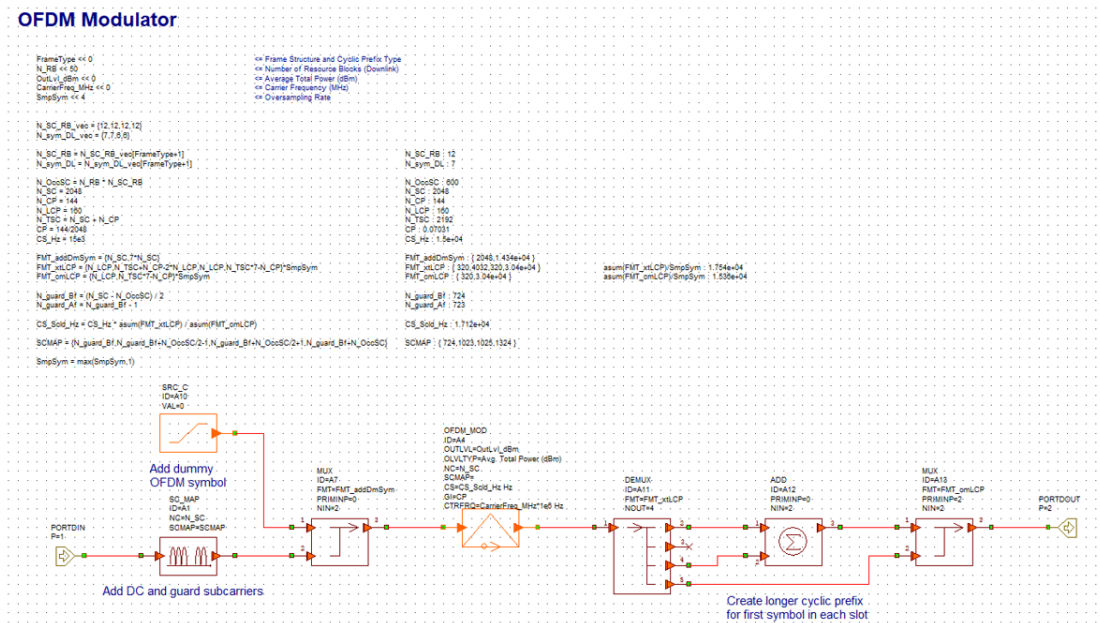
Σχήμα 3.5 Υποκύκλωμα PUSCH Encoder και στάδιο διαμόρφωσης του LTE uplink

Το υποκύκλωμα PUSCH Encoder αποτελεί το βασικό στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων στον πομπό LTE uplink. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιούνται διαδοχικά λειτουργίες όπως, όπως η προσθήκη ελέγχου σφαλμάτων (CRC), η κωδικοποίηση καναλιού μέσω Turbo Encoding, η προσαρμογή ρυθμού (Rate Matching) και η τυχαιοποίηση (Scrambling).

Στη συνέχεια, τα δεδομένα οδηγούνται στο block Modulation Mapper, όπου αντιστοιχίζονται σε σύμβολα με τη διαμόρφωση QPSK. Ακολουθεί το στάδιο Transform Precoding, το οποίο αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας SC-FDMA του LTE uplink και εφαρμόζεται πριν τη χαρτογράφηση πόρων.

Ακολουθείται στάδιο χαρτογράφησης πόρων (Resource Element Mapping), μέσω των οποίων τα σύμβολα τοποθετούνται στα κατάλληλα υποφέροντα (resource elements) του πλαισίου LTE, για μετάδοση μέσω του καναλιού PUSCH.

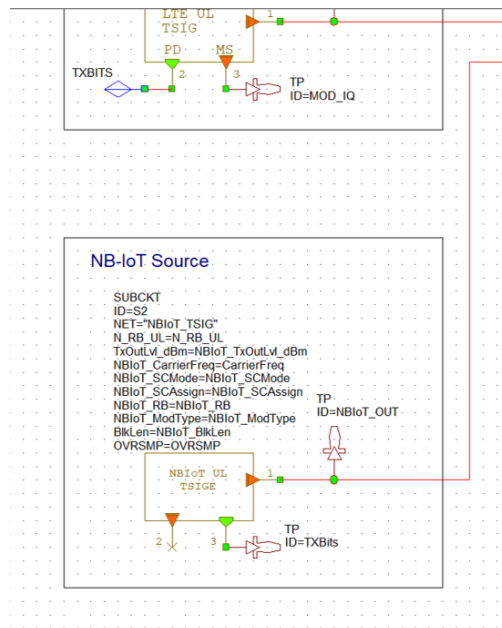
3.7.1.2 OFDM Modulator



Σχήμα 3.6 Στάδιο διαμόρφωσης (OFDM/SC-FDMA) του LTE uplink με δημιουργία OFDM συμβόλων και προσθήκη κυκλικού προθέματος

Στο επόμενο στάδιο, το σήμα οδηγείται στο block OFDM Modulator, το οποίο υλοποιεί το τελικό στάδιο της διαμόρφωσης SC-FDMA του LTE uplink. Το υποκύκλωμα OFDM Modulator αποτελεί το στάδιο μετατροπής των επεξεργασμένων δεδομένων σε σήμα κατάλληλο για μετάδοση μέσω του φυσικού καναλιού. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία OFDM συμβόλων μέσω μετασχηματισμού IFFT, ενώ ακολουθεί η προσθήκη κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix), το οποίο συμβάλλει στη μείωση των επιδράσεων της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Το παραγόμενο σήμα αποτελεί το τελικό σήμα εκπομπής του πομπού LTE και οδηγείται στο κανάλι μετάδοσης.

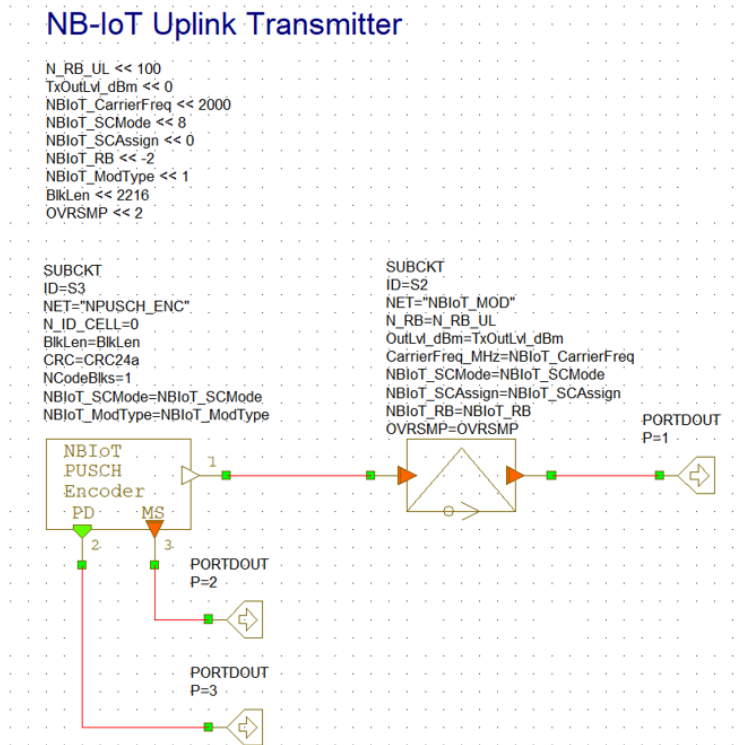
3.7.2 Πηγή NB-IoT (NB-IoT Transmitter)



Σχήμα 3.7 NB-IoT Source – εισαγωγή παρεμβάλλοντος σήματος NB-IoT στη ζεύξη LTE

Η πηγή NB-IoT εισάγεται στο σύστημα ως παρεμβάλλον σήμα, το οποίο συνυπάρχει φασματικά με το LTE και χρησιμοποιείται για τη μελέτη της επίδρασής του στη ζεύξη. Η λειτουργία της καθορίζεται από τον τύπο διαμόρφωσης και την παράμετρο SCMODE, οι οποίες επηρεάζουν τη μορφή και τη φασματική κατανομή του σήματος. Αναλυτικότερα το παραγόμενο σήμα επεξεργάζεται μέσω των επιμέρους υποκυκλωμάτων κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, πριν την εισαγωγή του στο κανάλι.

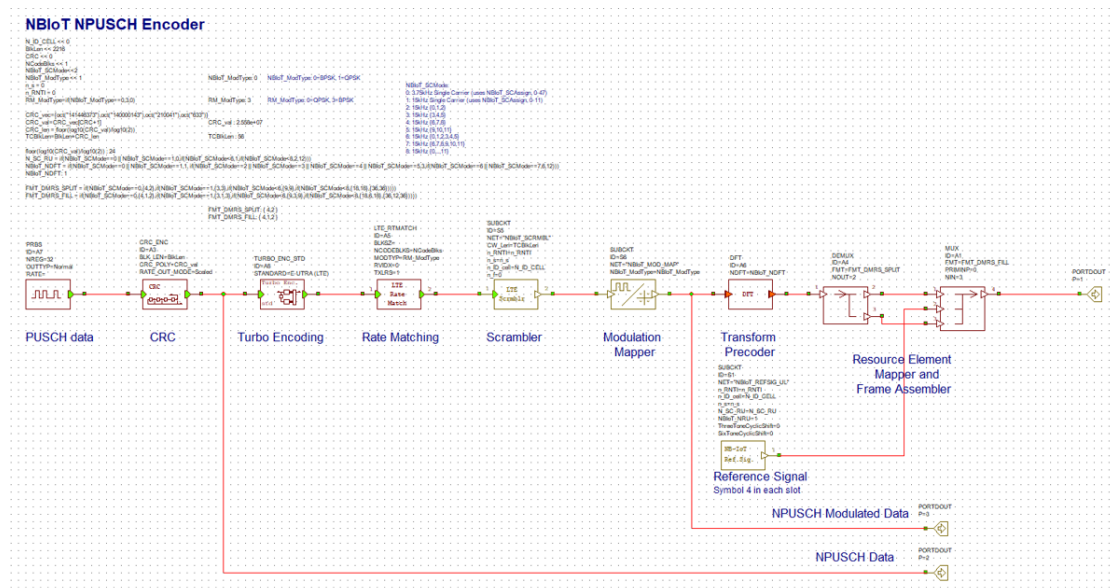
3.7.2.1 UPLINK Transmitter



Σχήμα 3.8 Παραγωγή σήματος εκπομπής NB-IoT (NPUSCH)

Το υποσύστημα NB-IoT uplink transmitter περιλαμβάνει το υποκύκλωμα NPUSCH Encoder, το οποίο επεξεργάζεται τα δεδομένα προς μετάδοση, καθώς και τα επόμενα στάδια διαμόρφωσης, μέσω των οποίων παράγεται το τελικό σήμα εκπομπής.

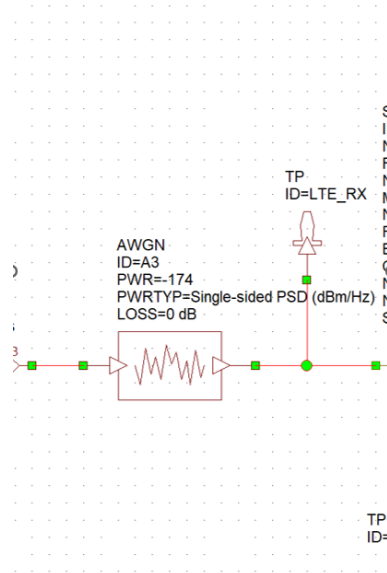
3.7.2.2 NPUSCH Encoder



Σχήμα 3.9 NPUSCH Encoder και στάδια διαμόρφωσης του σήματος NB-IoT

του σήματος πριν την έξοδό του. Το τελικό σήμα εισάγεται στο κανάλι και λειτουργεί ως παρεμβολή προς το LTE.

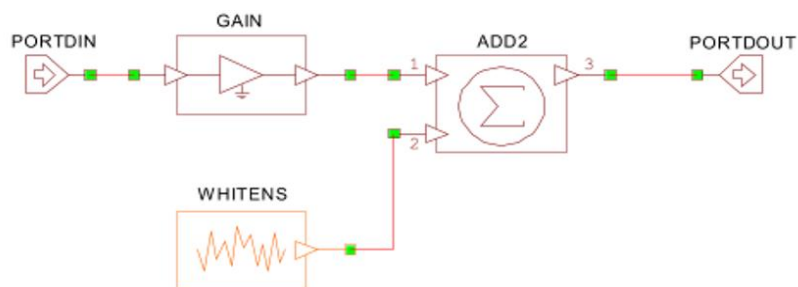
3.7.3 Κανάλι Μετάδοσης (AWGN + LOSS)



Σχήμα 3.11 Κανάλι μετάδοσης AWGN με εισαγωγή απωλειών (LOSS)

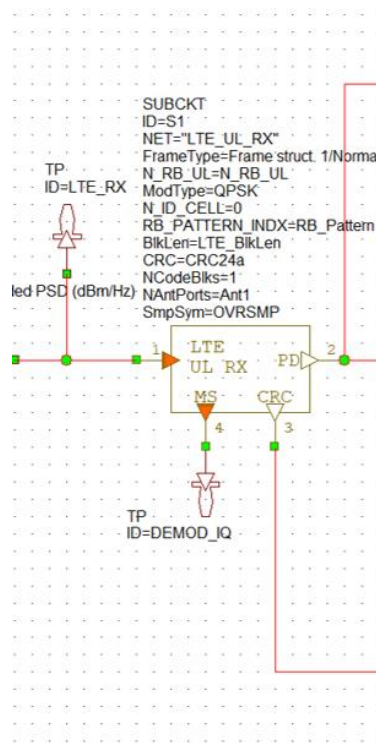
Το κανάλι μετάδοσης μοντελοποιείται ως κανάλι λευκού γκαουσιανού θορύβου μέσω του block Additive White Gaussian Noise channel και προσθέτει ανεξάρτητα δείγματα γκαουσιανού θορύβου στο σήμα εισόδου προκαλώντας αλλοίωση της κυματομορφής. Παράλληλα, εισάγεται η παράμετρος LOSS, η οποία προσομοιώνει τις απώλειες διαδρομής και επηρεάζει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος

Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς της ζεύξης, υπό διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Το μοντέλο AWGN είναι ισοδύναμο με ένα απλό υποκύκλωμα προσθήκης θορύβου, όπως φαίνεται στο αντίστοιχο σχήμα, παρέχοντας επιπλέον δυνατότητες καθορισμού της ισχύος του θορύβου:



Εικόνα Σχήμα 3.12 Κανάλι Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN)

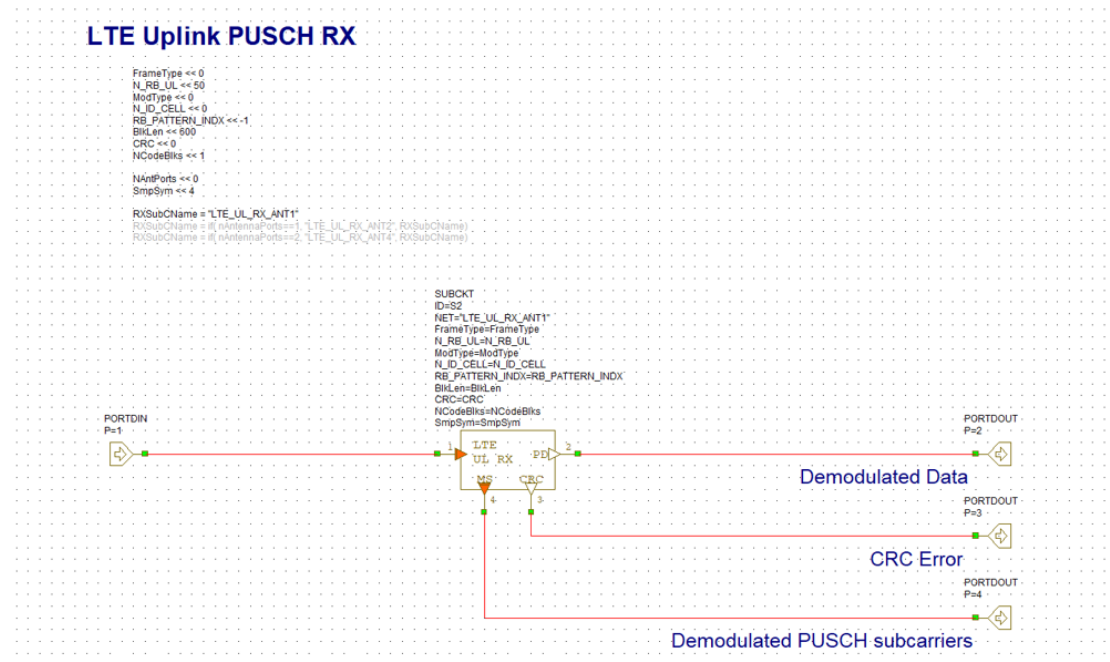
3.7.4 Δέκτης LTE (LTE Receiver)



Σχήμα 3.13 Δέκτης LTE για αποδιαμόρφωση και υπολογισμό BER

Ο δέκτης LTE λαμβάνει το συνολικό σήμα που προκύπτει από τη συνύπαρξη LTE και NB-IoT και εκτελεί τις απαραίτητες διαδικασίες για την ανάκτηση των δεδομένων. Το σήμα αποδιαμορφώνεται, αποκωδικοποιείται και συγκρίνεται με τα αρχικό σήμα ώστε να υπολογιστεί ο ρυθμός σφαλμάτων bit (BER), ο οποίος αποτελεί τη βασική μετρική αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος.

3.7.4.1 LTE Uplink PUSCH RX

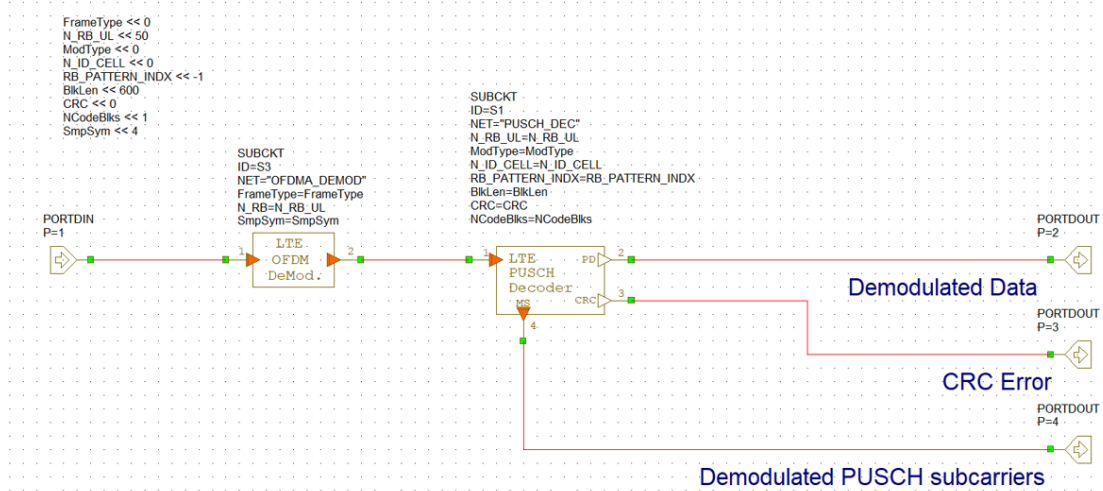


Σχήμα 3.14 LTE Uplink PUSCH RX – αποδιαμόρφωση και εξαγωγή δεδομένων

Το υποκύκλωμα LTE Uplink PUSCH RX αποτελεί βασικό τμήμα του δέκτη LTE uplink και είναι υπεύθυνο για τη λήψη του σήματος μετά το κανάλι και την εξαγωγή των αντίστοιχων δεδομένων στην πλευρά του δέκτη. Σύμφωνα με τη δομή του συγκεκριμένου block, το λαμβανόμενο σήμα οδηγείται σε επιμέρους στάδια επεξεργασίας, από τα οποία προκύπτουν ως έξοδοι τα αποδιαμορφωμένα δεδομένα (Demodulated Data), η ένδειξη σφάλματος CRC (CRC Error) και τα αποδιαμορφωμένα υποφέροντα του PUSCH (Demodulated PUSCH subcarriers). Με τον τρόπο αυτό, το block λειτουργεί ως το βασικό σημείο μετάβασης από το λαμβανόμενο κυματομορφικό σήμα προς τα δεδομένα που θα αξιοποιηθούν στα επόμενα στάδια αποκωδικοποίησης και αξιολόγησης.

3.7.4.2 Υποκύκλωμα LTE Uplink RX: 1 PUSCH, 1 Antenna Port

LTE Uplink RX: 1 PUSCH, 1 Antenna Port



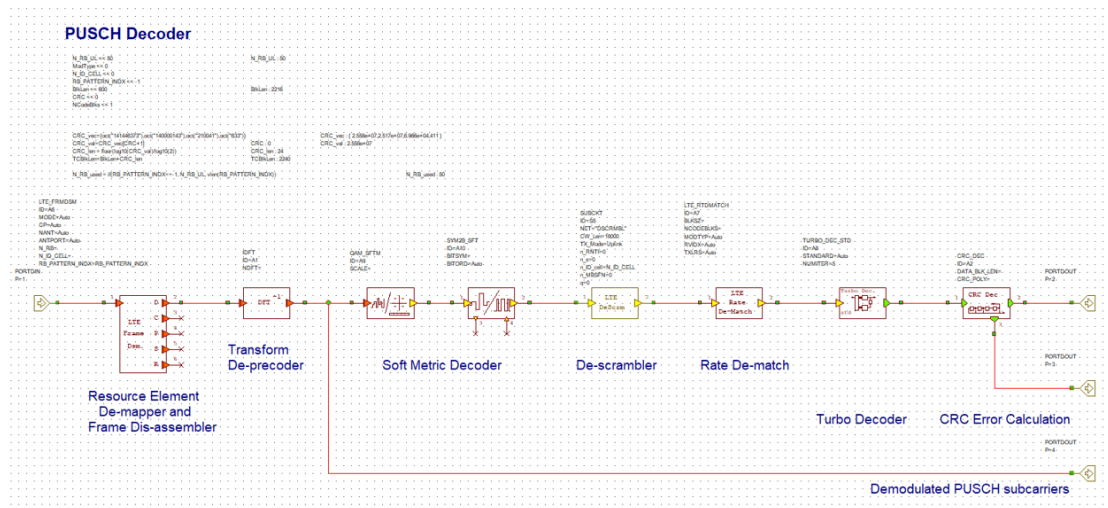
Σχήμα 3.15 LTE Uplink RX (1 PUSCH, 1 Antenna Port)

Το υποκύκλωμα LTE Uplink RX αποτελεί τμήμα του δέκτη LTE και είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία του λαμβανόμενου σήματος για μία ροή PUSCH και μία θύρα κεραίας. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η βασική αποδιαμόρφωση του σήματος και η προετοιμασία του για την αποκωδικοποίηση, οδηγώντας στην εξαγωγή των αποδιαμορφωμένων δεδομένων και της πληροφορίας σφάλματος CRC.

Συγκεκριμένα, το σήμα εισόδου οδηγείται αρχικά σε στάδιο OFDM αποδιαμόρφωσης (OFDM Demodulation), όπου πραγματοποιείται η αφαίρεση του κυκλικού προθέματος και η μετατροπή στο πεδίο της συχνότητας μέσω FFT.

Στη συνέχεια, το σήμα οδηγείται στο block PUSCH Decoder, όπου πραγματοποιείται η περαιτέρω επεξεργασία και αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Από την έξοδο του υποκυκλώματος προκύπτουν τα αποδιαμορφωμένα δεδομένα (Demodulated Data), η ένδειξη σφάλματος CRC (CRC Error) και τα αποδιαμορφωμένα υποφέροντα (Demodulated PUSCH subcarriers).

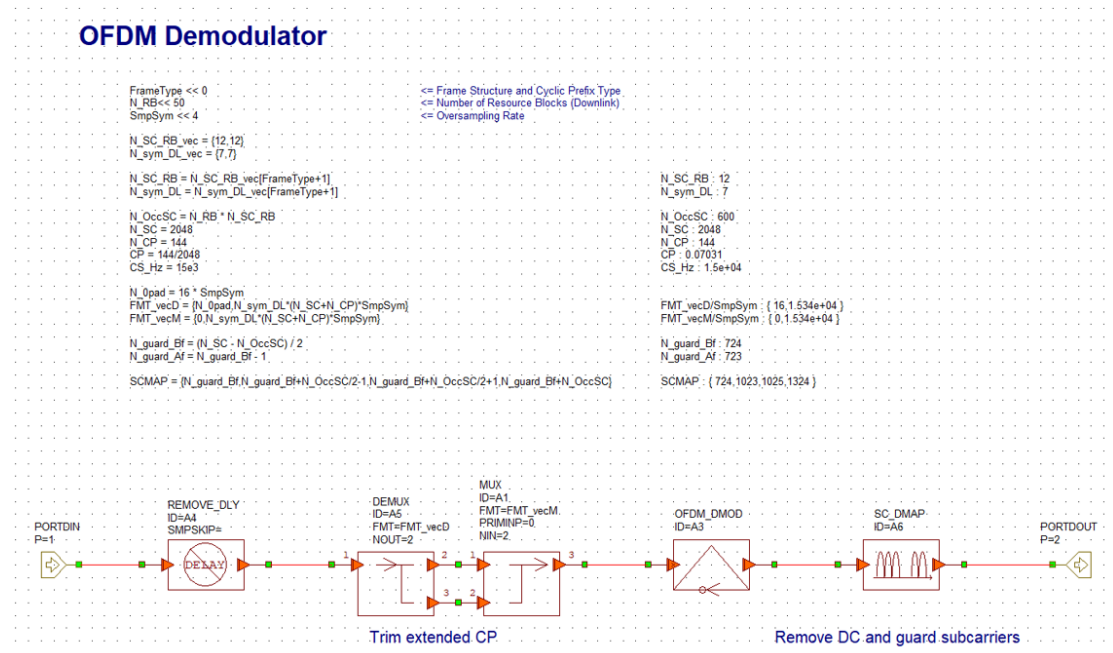
3.7.4.3 Αναλυτική δομή του υποκυκλώματος PUSCH Decoder στο LTE uplink



Σχήμα 3.16 Δομή και στάδια αποκωδικοποίησης σήματος LTE uplink

Το υποκύκλωμα PUSCH Decoder αποτελεί βασικό στάδιο του δέκτη LTE uplink και είναι υπεύθυνο για την αποκωδικοποίηση των δεδομένων που προκύπτουν μετά την αποδιαμόρφωση του σήματος. Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται η επεξεργασία των ληφθέντων συμβόλων με στόχο την ανάκτηση της αρχικής ακολουθίας bit, καθώς και ο έλεγχος σφαλμάτων μέσω CRC. Η διαδικασία περιλαμβάνει επιμέρους στάδια επεξεργασίας, όπως αποχαρτογράφηση πόρων, αντιστροφή της διαδικασίας SC-FDMA και τελική αποκωδικοποίηση των δεδομένων. Πριν από το στάδιο αποκωδικοποίησης του PUSCH Decoder, το λαμβανόμενο σήμα οδηγείται στο υποκύκλωμα OFDM Demodulator.

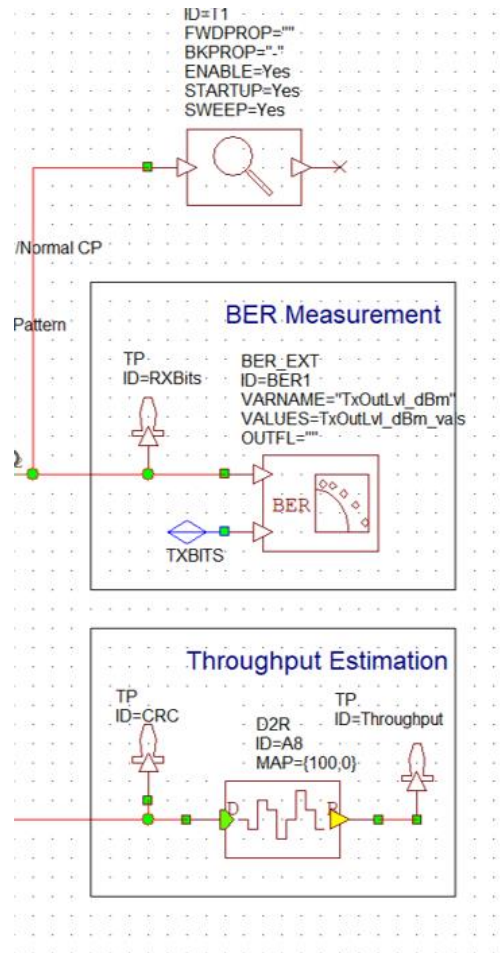
3.7.4.4 Εσωτερική δομή του OFDM Demodulator στο LTE uplink



Σχήμα 3.17 Εσωτερική δομή του OFDM Demodulator στο LTE uplink

Το υποκύκλωμα OFDM Demodulator αποτελεί στάδιο του δέκτη LTE uplink και είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή του λαμβανόμενου σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Σύμφωνα με τη δομή του block, αρχικά πραγματοποιείται η αφαίρεση του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix removal), ενώ στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός FFT, μέσω του οποίου το σήμα μεταφέρεται στο πεδίο της συχνότητας. Ακολουθεί η απομάκρυνση των μη χρήσιμων υποφερόντων (DC και guard subcarriers), ώστε να διατηρηθούν μόνο τα χρήσιμα υποφέροντα πληροφορίας. Η έξοδος του block οδηγείται στα επόμενα στάδια αποδιαμόρφωσης και αποκωδικοποίησης του δέκτη LTE, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του BER και την εκτίμηση της απόδοσης της ζεύξης

3.7.5 Υπολογισμός BER και Μετρήσεις - BER Measurement και Throughput Estimation



Σχήμα 3.18 Υπολογισμός BER και εκτίμηση ρυθμού μετάδοσης (Throughput Estimation)

Το υποκύκλωμα BER Measurement χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) μέσω της σύγκρισης των μεταδιδόμενων και των ληφθέντων δεδομένων.

Συγκεκριμένα, το block λαμβάνει ως είσοδο τα αρχικά δεδομένα (TXBITS) και τα αντίστοιχα ληφθέντα δεδομένα (RXBITS), και υπολογίζει το πλήθος των σφαλμάτων καθώς και την αντίστοιχη τιμή BER. Στο πλαίσιο της προσομοίωσης, η υλοποίηση πραγματοποιείται μέσω του block BER_EXT, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό του BER και την εξαγωγή των αντίστοιχων τιμών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο υπολογισμός του BER βασίζεται στη συλλογή επαρκούς αριθμού σφαλμάτων ή συμβόλων, ώστε τα αποτελέσματα να είναι στατιστικά αξιόπιστα.

Παράλληλα, το block Throughput Estimation χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος ως προς τον ρυθμό επιτυχούς μετάδοσης δεδομένων. Το block αυτό υπολογίζει τον ρυθμό επιτυχούς λήψης δεδομένων με βάση τα σωστά αποκωδικοποιημένα bits, παρέχοντας μια συμπληρωματική μετρική αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος.

3.8 Παράμετροι Συστήματος

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος, μεταβάλλεται ένα σύνολο επιλεγμένων παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι βασικές παραμέτροι του συστήματος, εκ των οποίων ορισμένες παραμένουν σταθερές, ενώ άλλες μεταβάλλονται.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία βασίζεται σε ένα ολοκληρωμένο test bench συνύπαρξης LTE και NB-IoT στην ανοδική ζεύξη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του 3GPP Release 13. Σκοπός της διάταξης είναι η αξιολόγηση της επίδρασης του σήματος NB-IoT στην απόδοση της ζεύξης ανόδου του LTE υπό ελεγχόμενες συνθήκες καναλιού. Το σύστημα επιτρέπει τη ρύθμιση βασικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία του NB-IoT. Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τη λειτουργία της πειραματικής διάταξης συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Παράμετροι Συστήματος LTE–NB-IoT (Uplink Coexistence Test Bench)

Παράμετρος	Περιγραφή
Carrier Frequency (MHz)	Συχνότητα φέροντος του συστήματος, κοινή για τα σήματα LTE και NB-IoT.
NB-IoT_TxOutLvl_dBm	Συνολική ισχύς εκπομπής του σήματος NB-IoT.
NB-IoT-TSIG Enable/Disable	Παράμετρος ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης του σήματος NB-IoT για σύγκριση της απόδοσης του LTE με και χωρίς παρεμβολή.
NB-IoT_SCMODE	Τρόπος λειτουργίας υποφερόντων NB-IoT, που καθορίζει τη φασματική κατανομή του σήματος (single-tone ή multi-tone λειτουργία).
NB-IoT_RB	Θέση του Resource Block του NB-IoT στο φάσμα LTE (έχει οριστεί στην περιοχή guard-band).
NB-IoT_ModType	Τύπος διαμόρφωσης NB-IoT ($\pi/2$ -BPSK ή rotated $\pi/4$ -QPSK).

Το κανάλι μετάδοσης του συστήματος προσομοιώνεται ως κανάλι Additive White Gaussian Noise (AWGN), στο οποίο προστίθενται ανεξάρτητα δείγματα θορύβου στο σήμα εισόδου. Η παράμετρος PWRΤYP ρυθμίζεται ώστε να εκφράζει τον λόγο E_b/N_0 , ο οποίος χρησιμοποιείται ως βασικός άξονας αναφοράς για τις καμπύλες BER. Παράλληλα, μέσω της παραμέτρου LOSS εισάγεται ελεγχόμενη εξασθένηση στο σήμα, για τη μελέτη της επίδρασης των απωλειών διαδρομής στη συμπεριφορά της ζεύξης LTE υπό συνθήκες συνύπαρξης με NB-IoT. Οι βασικές παράμετροι του καναλιού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι Καναλιού AWGN

Παράμετρος	Περιγραφή
ID	Μοναδικός αναγνωριστικός κωδικός του block καναλιού στο περιβάλλον προσομοίωσης.
PWR	Καθορίζει το επίπεδο του προστιθέμενου θορύβου. Η ερμηνεία του εξαρτάται από την παράμετρο PWRΤYP.
PWRΤYP	Καθορίζει τον τρόπο ορισμού του θορύβου (π.χ. ως E_b/N_0 , E_s/N_0 ή SNR).
LOSS	Παράμετρος απωλειών διαδρομής (path loss), εκφρασμένη σε dB, η οποία προσομοιώνει την εξασθένηση του σήματος κατά τη διάδοση στο κανάλι.
NORMF	Παράγοντας κανονικοποίησης που χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση της ισχύος θορύβου με το εύρος ζώνης ή τον ρυθμό δειγματοληψίας.
RSEED	Αρχική τιμή της γεννήτριας τυχαίων αριθμών για την παραγωγή του θορύβου.
RNG	Επιλογή του αλγορίθμου παραγωγής τυχαίων αριθμών.

Η συμπεριφορά του σήματος NB-IoT καθορίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων που σχετίζονται με τη φασματική του κατανομή και τη διαμόρφωση. Οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν άμεσα τον τρόπο συνύπαρξης με το LTE uplink, ιδιαίτερα ως προς την παρεμβολή που εισάγεται στο σύστημα. Οι βασικές παράμετροι προσομοίωσης του NB-IoT συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3 Παράμετροι προσομοίωσης σήματος NB-IoT

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμές / Ρύθμιση
NB-IoT_SCMODE	Καθορίζει τον τρόπο κατανομής των υποφερόντων στο NB-IoT uplink, επηρεάζοντας τη φασματική κατανομή του σήματος.	0: 3.75 kHz single-tone, 1: 15 kHz single-tone, 2–5: 3-tone, 6–7: 6-tone, 8: 12-tone
NB-IoT_SCAssign	Καθορίζει τη συγκεκριμένη θέση υποφερόντος σε περίπτωση single-tone λειτουργίας.	0–47 ή 0–11
NB-IoT_RB	Καθορίζει τη φασματική θέση του NB-IoT σε σχέση με το LTE, επιτρέποντας λειτουργία εντός φάσματος ή στην περιοχή guard-band.	guard-band(σταθερό)
NB-IoT_ModType	Καθορίζει τη διαμόρφωση του NB-IoT σήματος που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις.	0: $\pi/2$ -BPSK, 1: rotated $\pi/4$ -QPSK

Η αξιολόγηση της απόδοσης της ζεύξης ανόδου του LTE βασίζεται στις συνθήκες λειτουργίας του καναλιού και στις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος. Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά του LTE επηρεάζεται από την παρουσία λευκού γκαουσιανού θορύβου μέσω του λόγου E_b/N_0 , καθώς και από την εισαγωγή απωλειών διαδρομής μέσω της παραμέτρου LOSS. Η αξιολόγηση της απόδοσης πραγματοποιείται κυρίως μέσω του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER), ο οποίος αποτελεί τη βασική μετρική αξιολόγησης της ζεύξης. Οι βασικές παράμετροι προσομοίωσης της ζεύξης LTE uplink συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4 Παράμετροι προσομοίωσης ζεύξης LTE uplink

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή / Ρύθμιση
Carrier Frequency	Καθορίζει τη συχνότητα φέροντος λειτουργίας του συστήματος, κοινή για LTE και NB-IoT.	MHz
LTE Modulation	Καθορίζει τη διαμόρφωση του LTE uplink σήματος που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις.	QPSK
E_b/N_0	Καθορίζει τον λόγο ενέργειας ανά bit προς τον θόρυβο, ο οποίος χρησιμοποιείται ως βασικός άξονας αναφοράς στις καμπύλες BER.	dB
LOSS	Καθορίζει την εξασθένηση του σήματος κατά τη μετάδοση, προσομοιώνοντας απώλειες διαδρομής.	0 – 0.40
Reference LTE Case	Καθορίζει τη λειτουργία αναφοράς του LTE χωρίς παρουσία NB-IoT για σκοπούς σύγκρισης.	NB-IoT OFF

3.9 Παράμετροι Προσομοιώσεων

Σε όλες τις προσομοιώσεις το LTE λειτουργεί με διαμόρφωση QPSK, ενώ το κανάλι θεωρείται AWGN.

Πίνακας 3.5 Μεταβαλλόμενες Παράμετροι Προσομοιώσεων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή/Εύρος
NB-IoT_ModType	Καθορίζει τον τύπο διαμόρφωσης του σήματος NB-IoT.	0: $\pi/2$ -BPSK, 1: rotated $\pi/4$ -QPSK
NB-IoT_SCMMode	Καθορίζει τη λειτουργία κατανομής υποφερόντων στο NB-IoT uplink.	0: 3.75 kHz single-tone, 1: 15 kHz single-tone, 2–5: 3-tone, 6–7: 6-tone, 8: 12-tone
LOSS	Παράμετρος εξασθένησης καναλιού (path loss) που επηρεάζει τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος.	0 – 0.40

Οι τιμές της παραμέτρου NB-IoT_SCMMode αντιστοιχούν σε διαφορετικές λειτουργίες κατανομής υποφερόντων (tones) στη ζεύξη ανόδου του NB-IoT, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6 Αντιστοίχιση τιμών της παραμέτρου NB-IoT_SCMMode

SCMode	Περιγραφή Λειτουργίας	Εύρος και κατανομή υποφερόντων
0	Single-carrier λειτουργία	3.75 kHz, {0–47}
1	Single-carrier λειτουργία	15 kHz, {0–11}
2	Multi-tone λειτουργία τριών υποφερόντων	15 kHz, {0,1,2}
3	Multi-tone λειτουργία τριών υποφερόντων	15 kHz, {3,4,5}
4	Multi-tone λειτουργία τριών υποφερόντων	15 kHz, {6,7,8}
5	Multi-tone λειτουργία τριών υποφερόντων	15 kHz, {9,10,11}
6	Multi-tone λειτουργία έξι υποφερόντων	15 kHz, {0,1,2,3,4,5}
7	Multi-tone λειτουργία έξι υποφερόντων	15 kHz, {6,7,8,9,10,11}
8	Multi-tone λειτουργία δώδεκα υποφερόντων	15 kHz, {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}

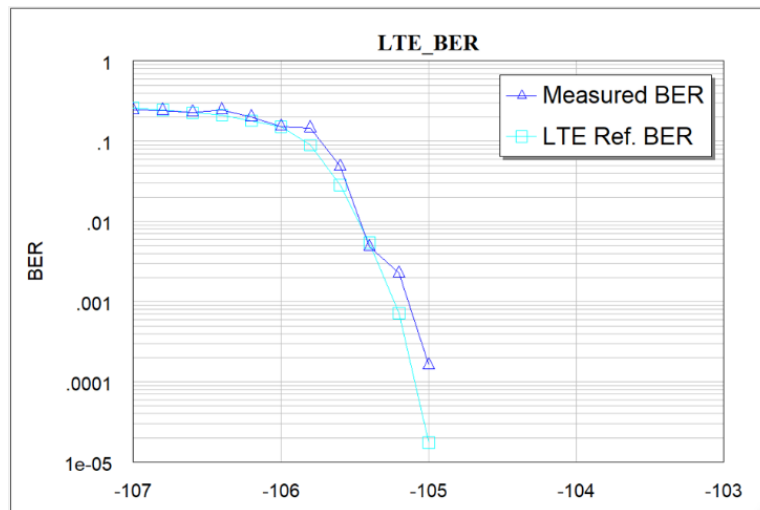
3.10 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων AWRD

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στο περιβάλλον AWRD. Τα αποτελέσματα έχουν οργανωθεί σε τέσσερις βασικές ομάδες, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό παραμέτρων του συστήματος.

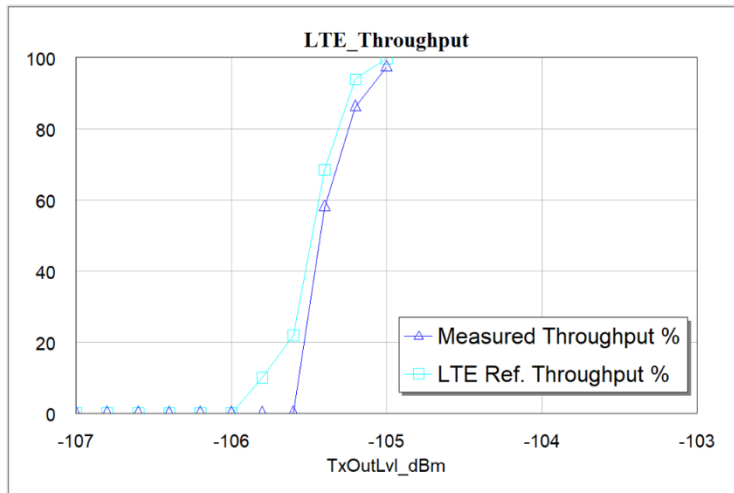
3.10.1 Πρώτη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB.

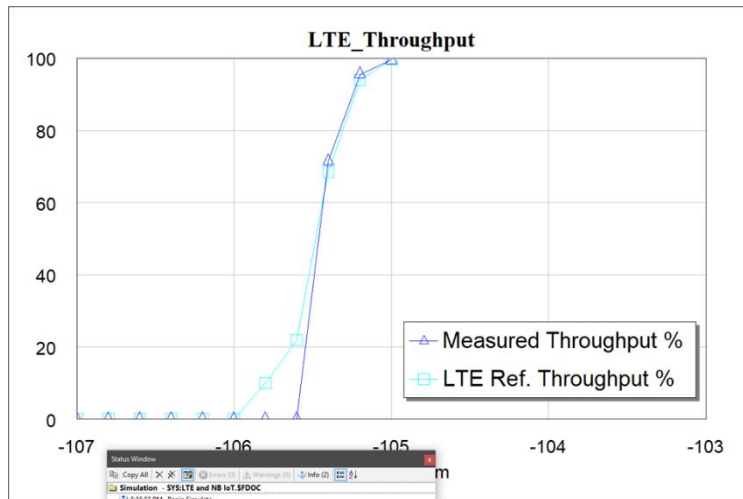
Στην πρώτη ομάδα προσομοιώσεων το σύστημα LTE λειτουργεί με διαμόρφωση QPSK, ενώ το NB-IoT χρησιμοποιεί διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK (Mod Type 0). Το κανάλι θεωρείται χωρίς απώλειες (LOSS = 0 dB). Στο πλαίσιο αυτό, μεταβάλλεται η παράμετρος SCMode (0, 1, ..., 8), ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή της στη συμπεριφορά του BER.

Run 1 – SCMode = 0 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)

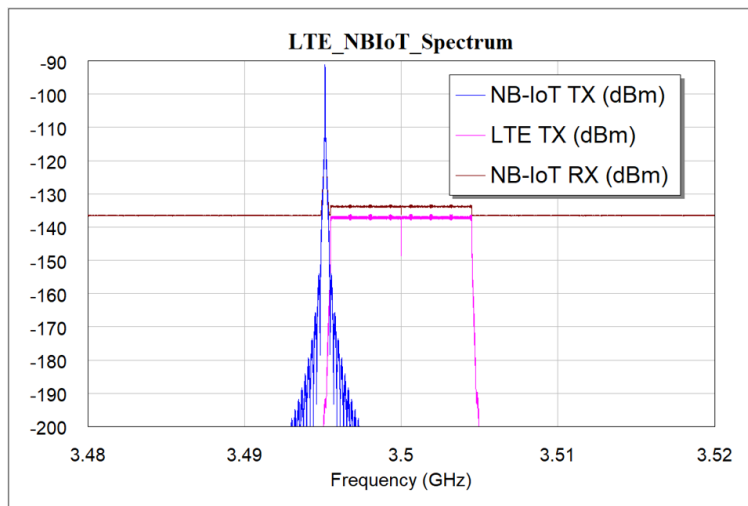


Σχήμα 3.19 BER για SCMode = 0



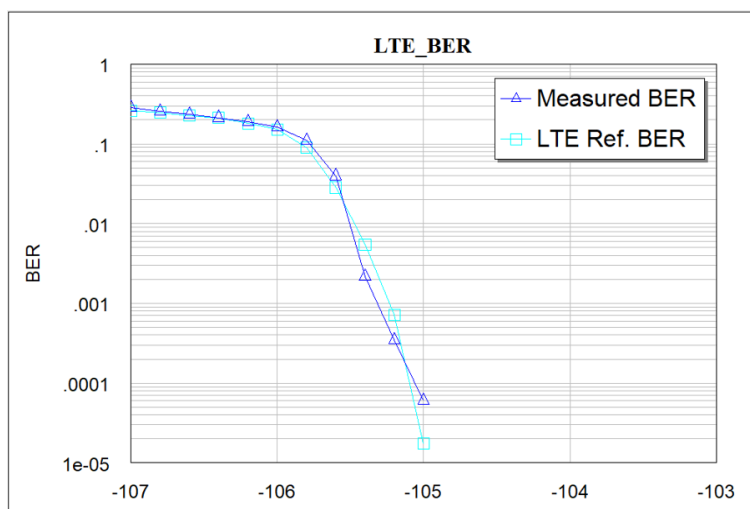


Σχήμα 3.23 Throughput για SCMode = 1

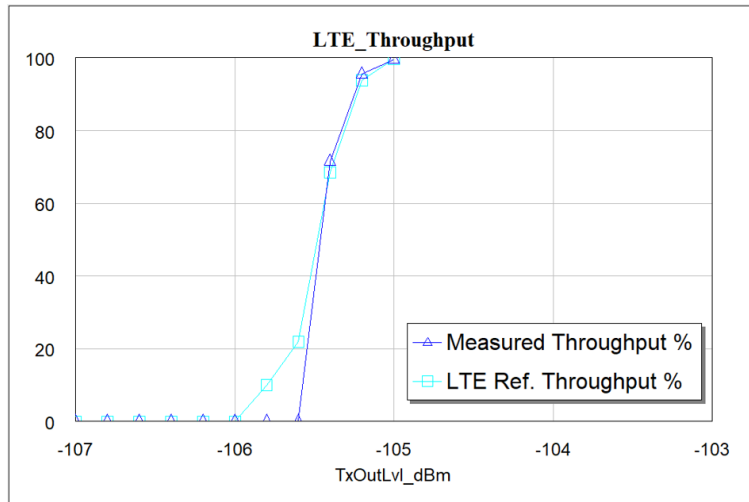


Σχήμα 3.24 Spectrum για SCMode = 1

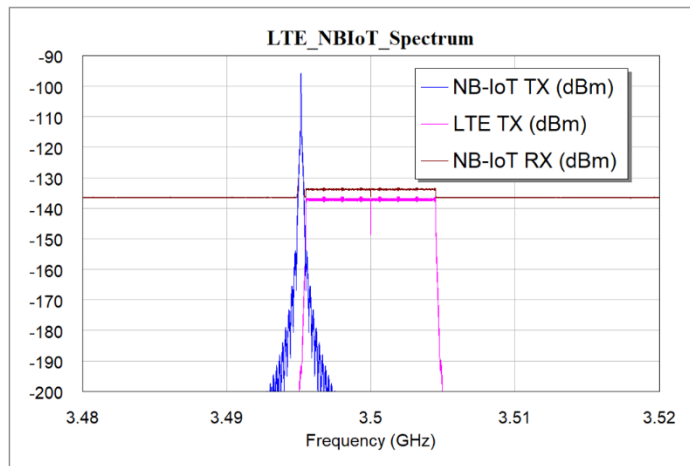
Run 3 – SCMode = 2 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.25 BER για SCMode = 2

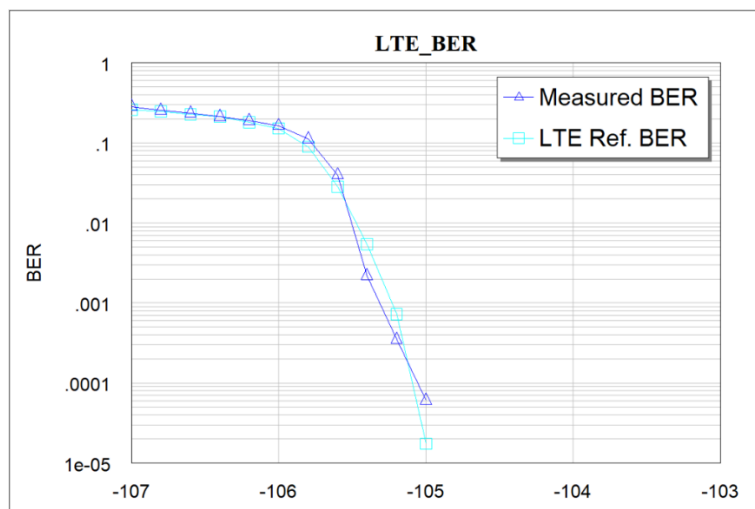


Σχήμα 3.26 Throughput για SCMode = 2

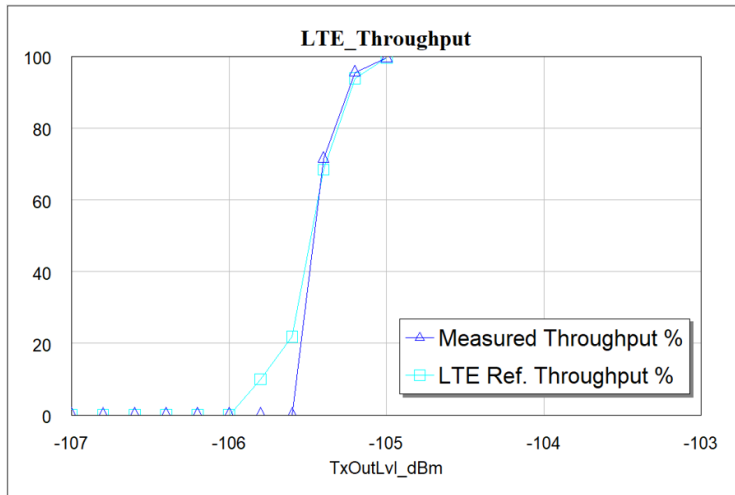


Σχήμα 3.27 Spectrum για SCMode = 2

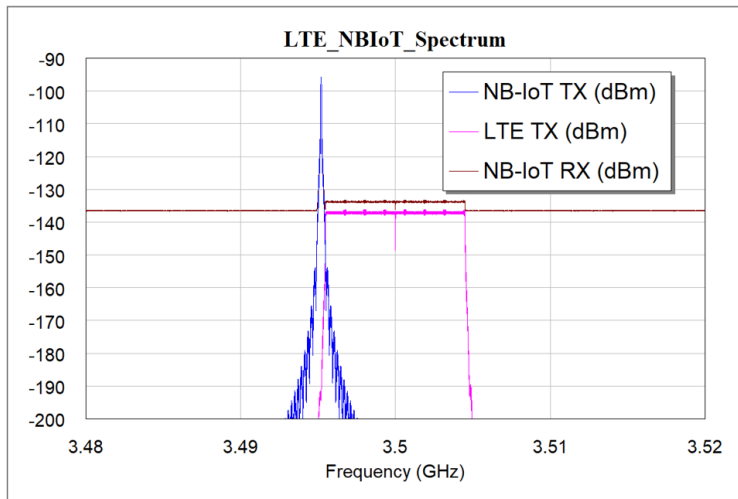
Run 4 – SCMode = 3 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.28 BER για SCMode = 3

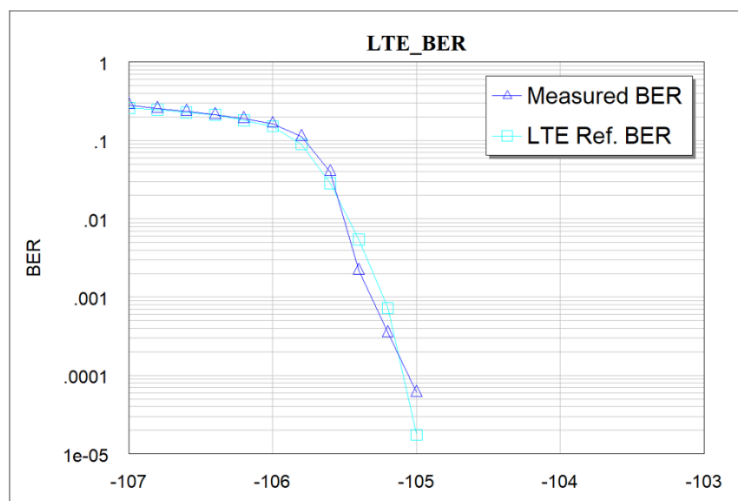


Σχήμα 3.29 Throughput για SCMode = 3

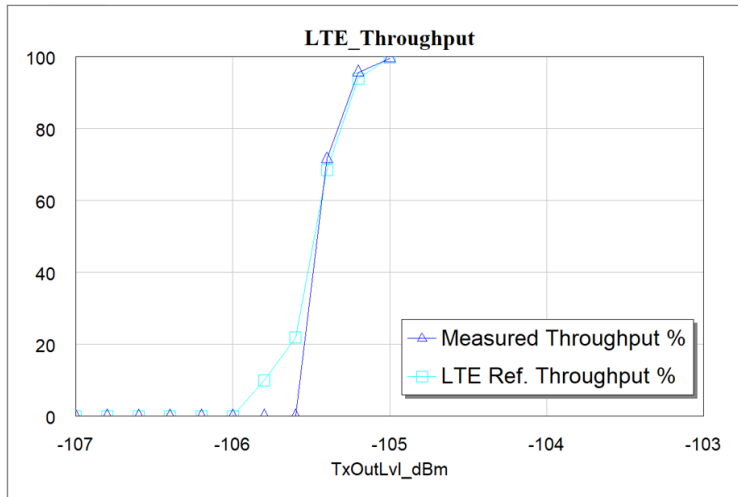


Σχήμα 3.30 Spectrum για SCMode = 4

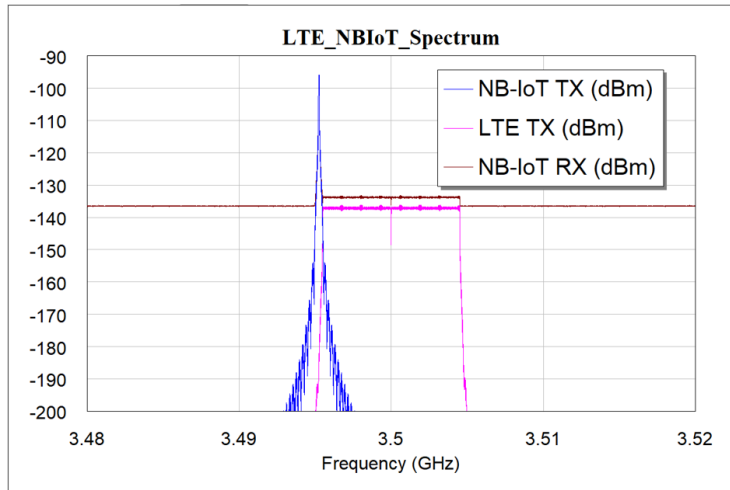
Run 5 – SCMode = 4 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.31 BER για SCMode = 4

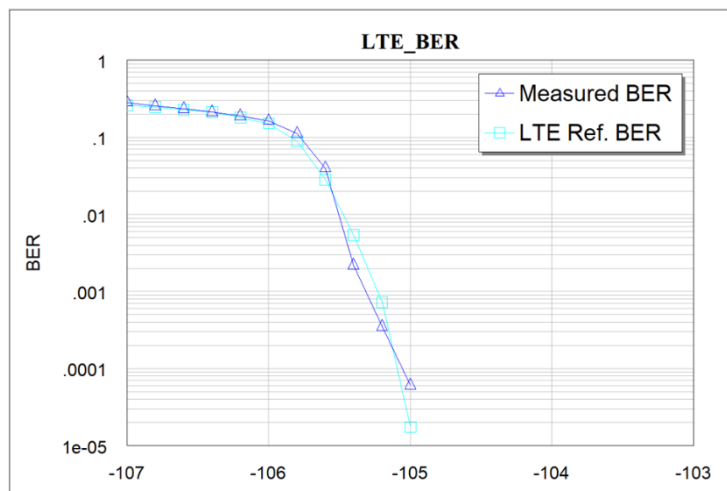


Σχήμα 3.32 Throughput για SCMode = 4

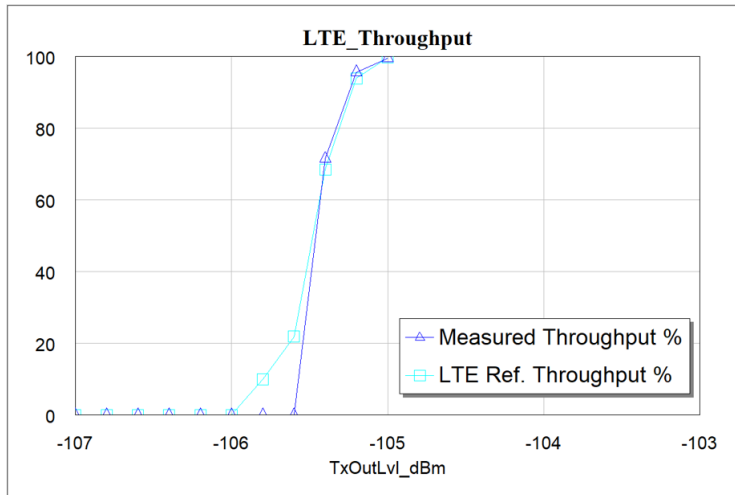


Σχήμα 3.33 Spectrum για SCMode = 4

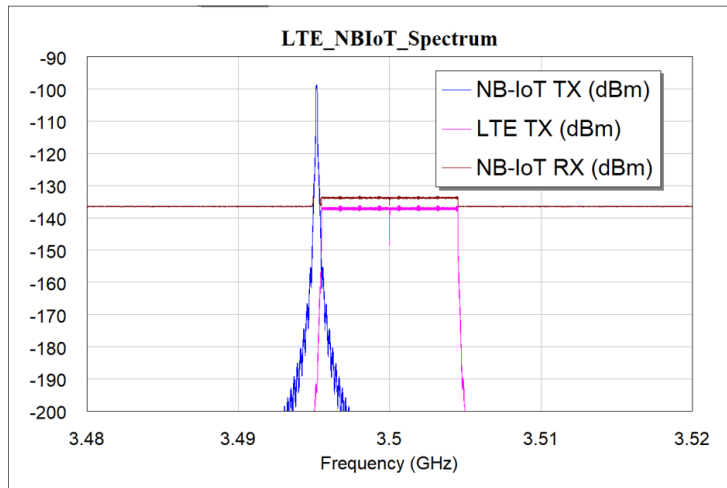
Run 6 – SCMode = 5 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.34 BER για SCMode = 5

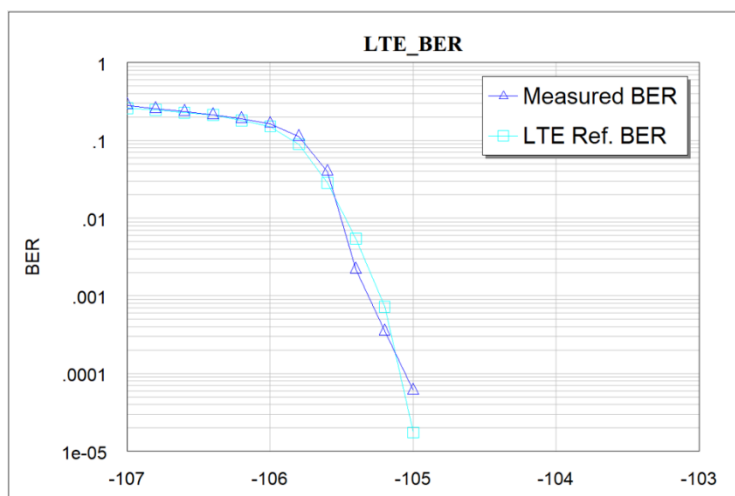


Σχήμα 3.38 Throughput για SCMode = 6

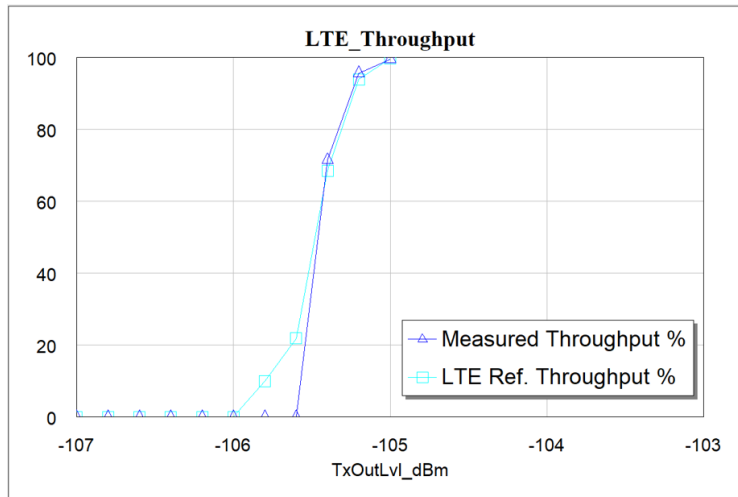


Σχήμα 3.39 Spectrum για SCMode = 6

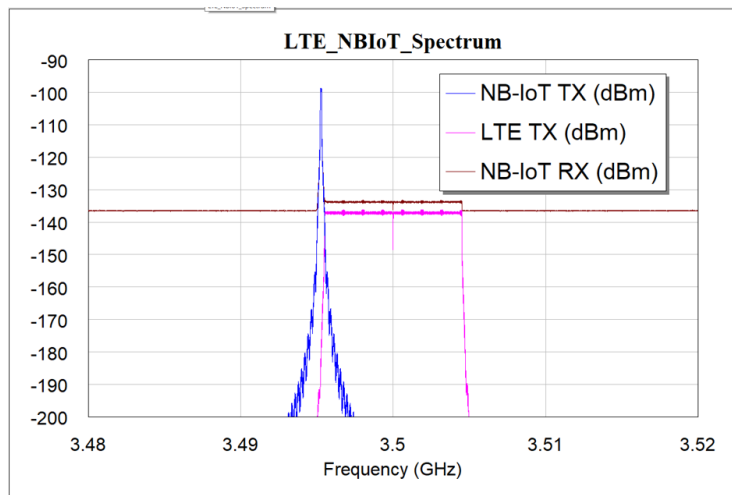
Run 8 – SCMode = 7 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.40 BER για SCMode = 7

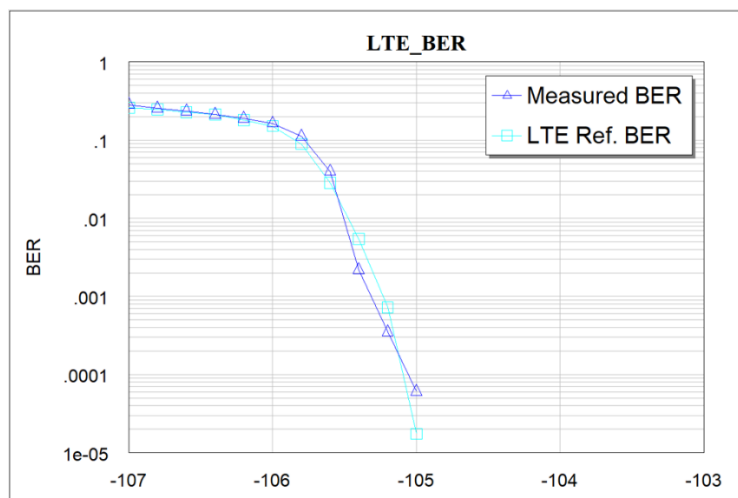


Σχήμα 3.41 Throughput για SCMode = 7

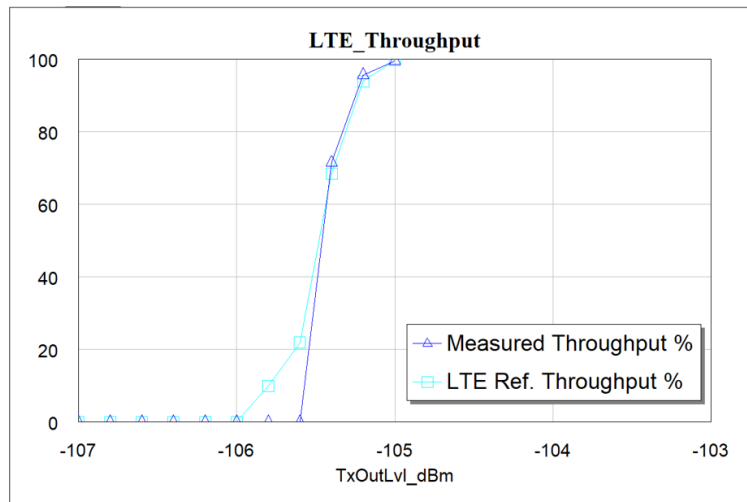


Σχήμα 3.42 Spectrum για SCMode = 7

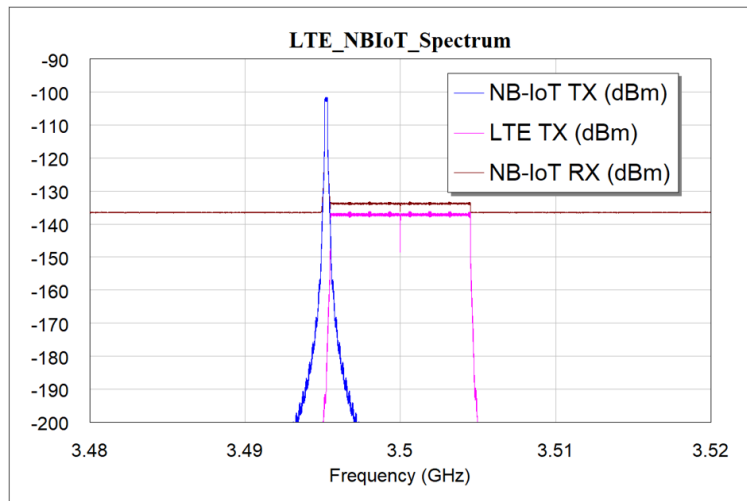
Run 9 – SCMode = 8 (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.43 BER για SCMode = 8



Σχήμα 3.44 Throughput για SCMode = 8

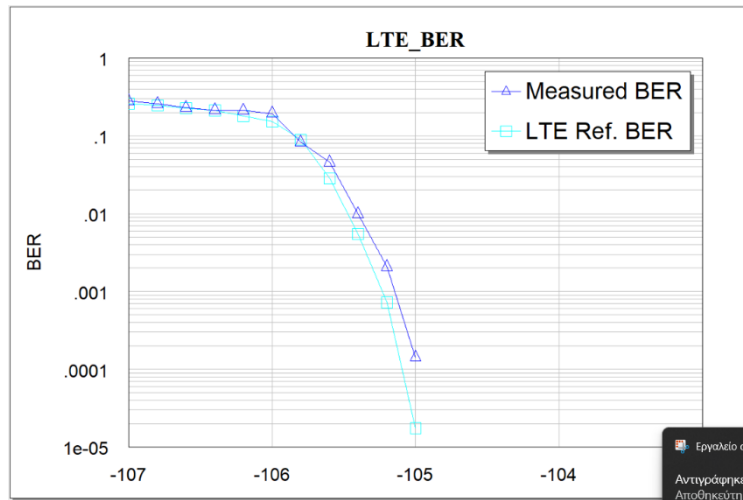


Σχήμα 3.45 Spectrum για SCMode = 8

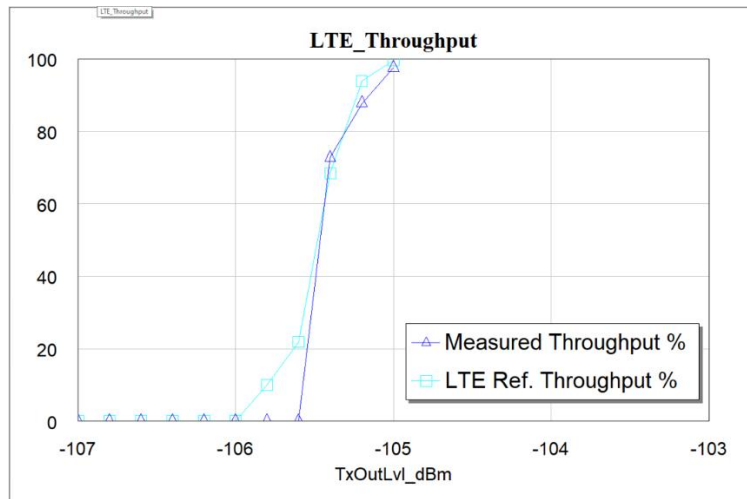
3.10.2 Δεύτερη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB

Στη δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων εξετάζεται η περίπτωση όπου το NB-IoT χρησιμοποιεί διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK (Mod Type 1). Το κανάλι θεωρείται χωρίς απώλειες (LOSS = 0 dB). Στο πλαίσιο αυτό, μεταβάλλεται η παράμετρος SCMode (0, 1, ..., 8), ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή της στη συμπεριφορά του BER.

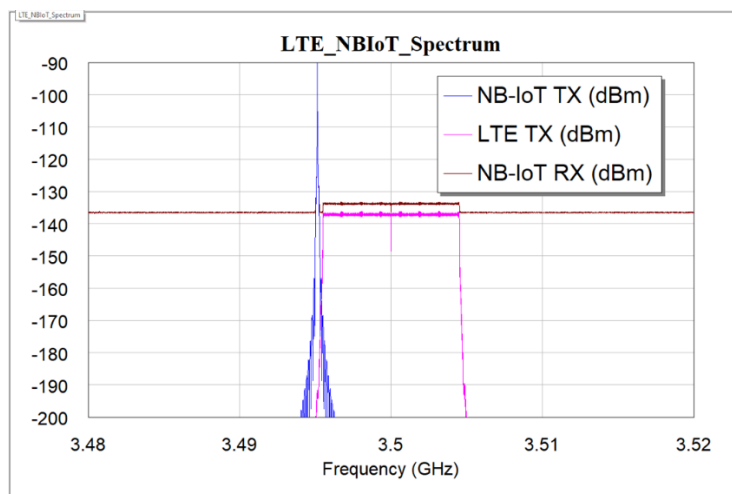
Run 1 – SCMode = 0 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.46 BER για SCMode = 0

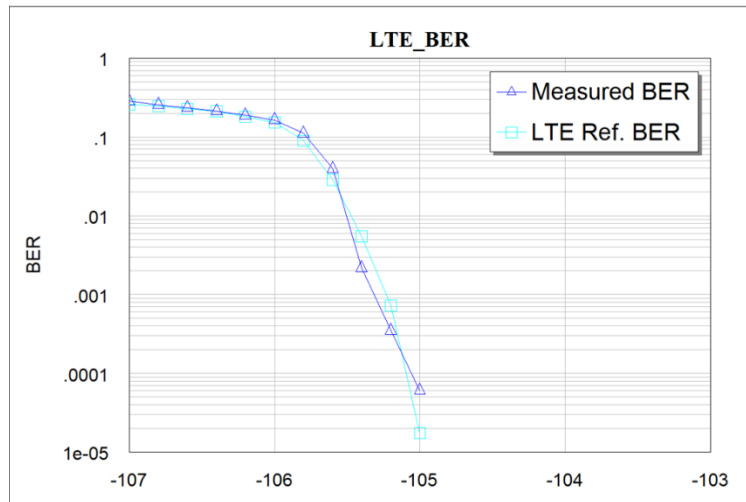


Σχήμα 3.47 Throughput για SCMode = 0

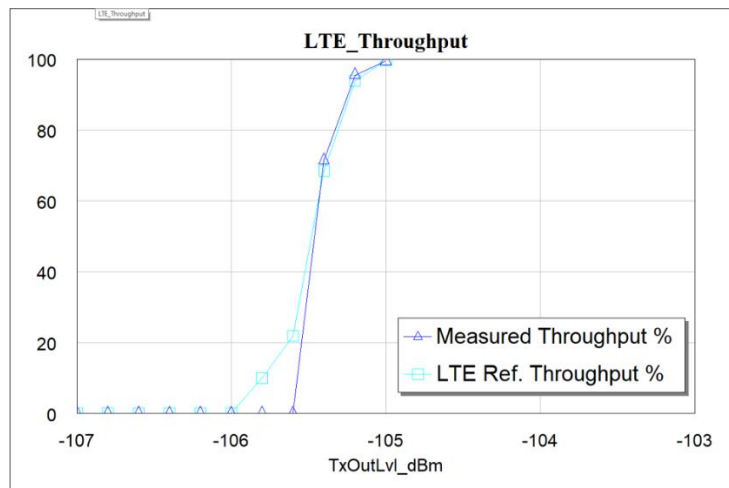


Σχήμα 3.48 Spectrum για SCMode = 0

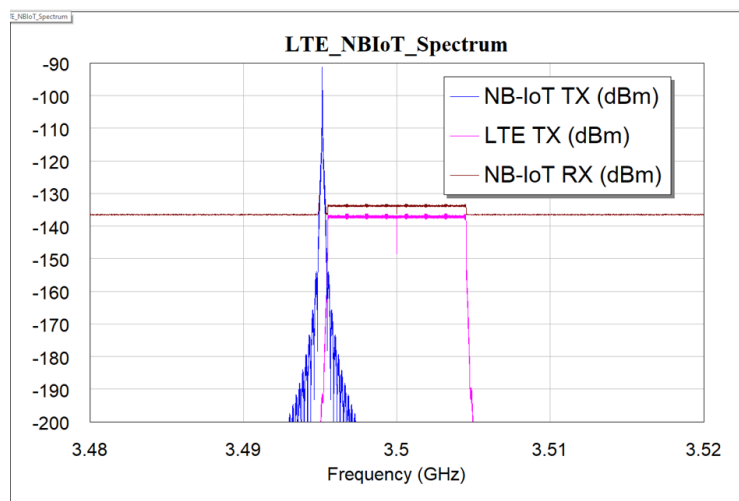
Run 2 – SCMode = 1 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.49 BER για SCMode = 1

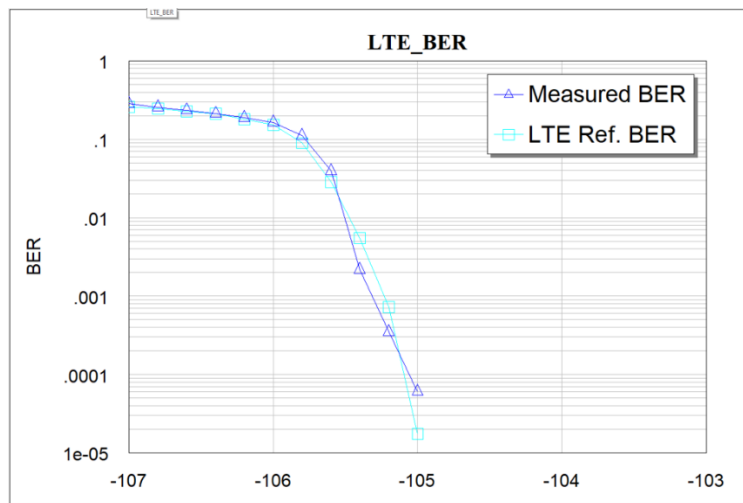


Σχήμα 3.50 Throughput για SCMode = 1

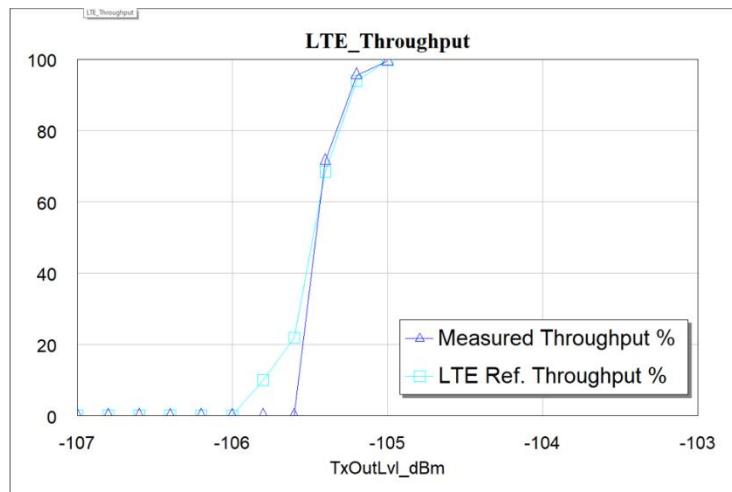


Σχήμα 3.51 Spectrum για SCMode = 1

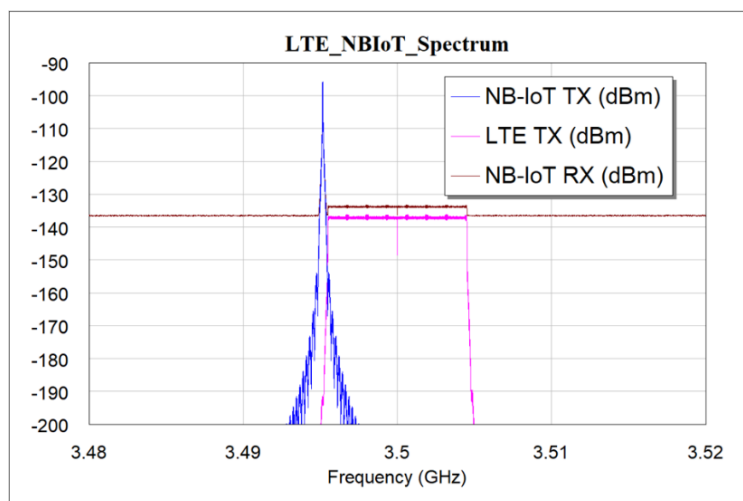
Run 3 – SCMode = 2 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.52 BER για SCMode = 2

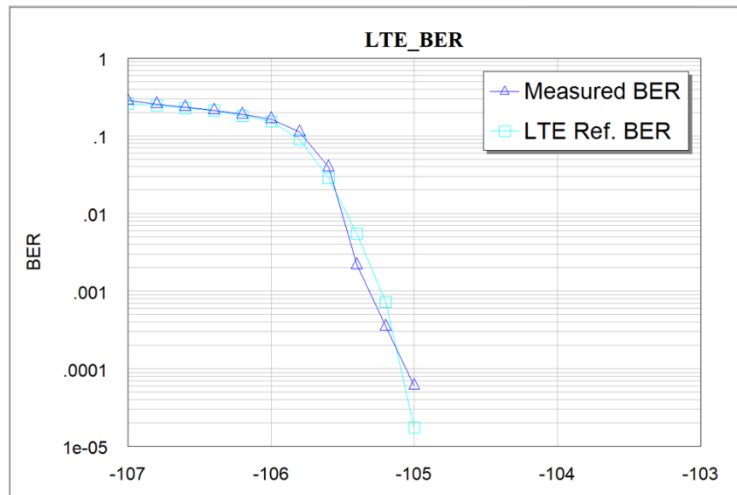


Σχήμα 3.53 Throughput για SCMode = 2

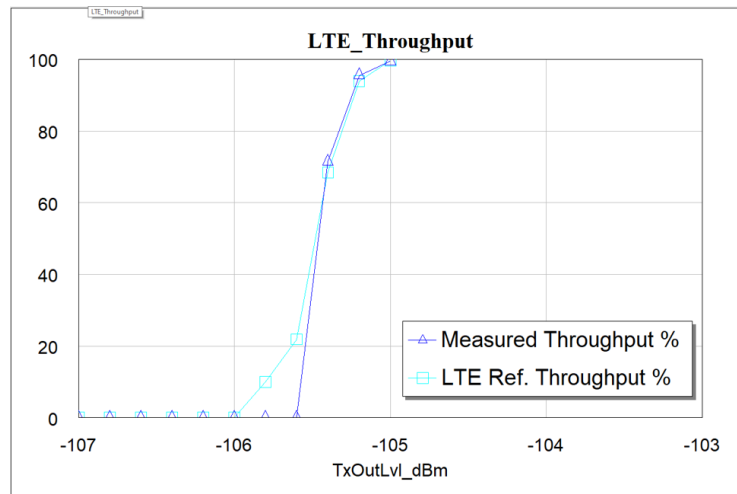


Σχήμα 3.54 Spectrum για SCMode = 2

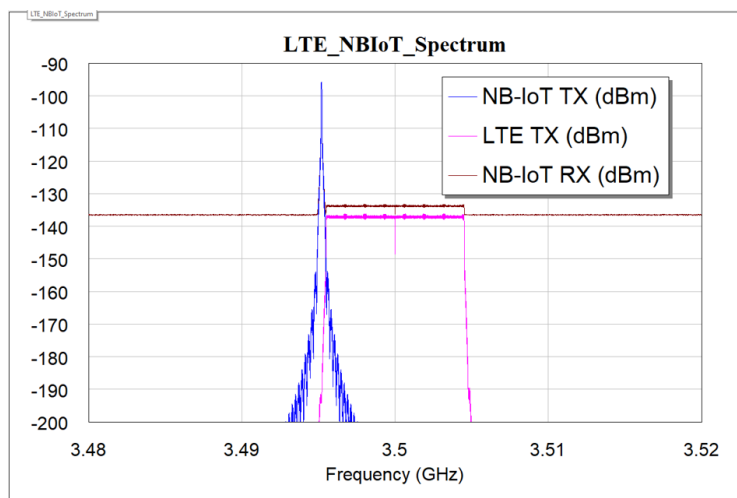
Run 4 – SCMode = 3 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.55 BER για SCMode = 3

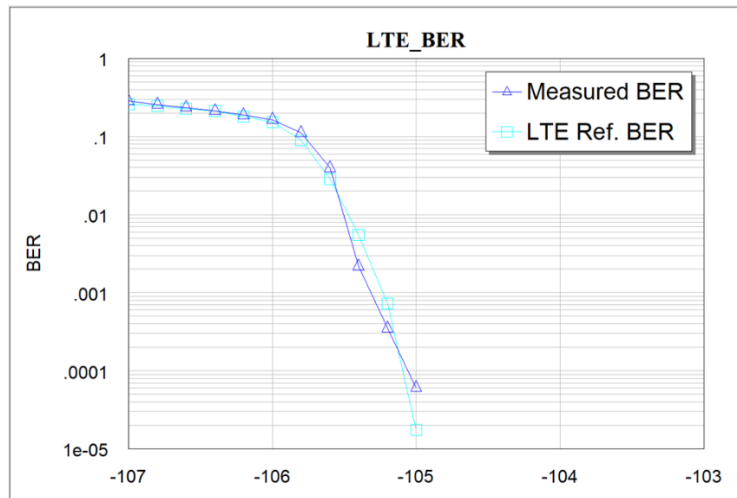


Σχήμα 3.56 Throughput για SCMode = 3

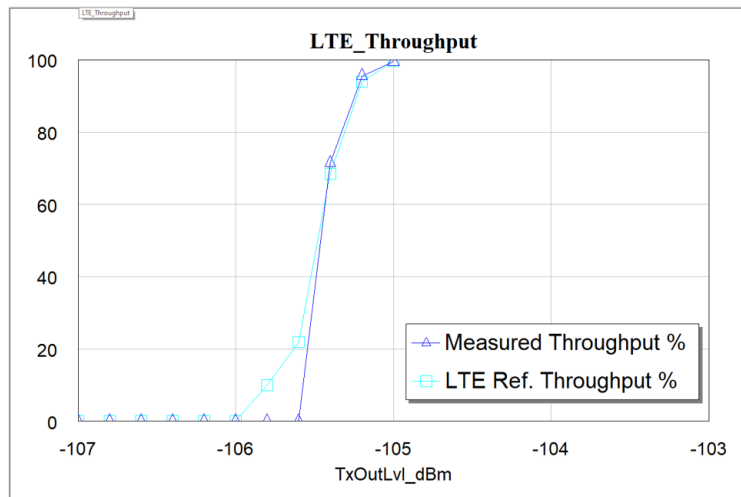


Σχήμα 3.57 Spectrum για SCMode = 3

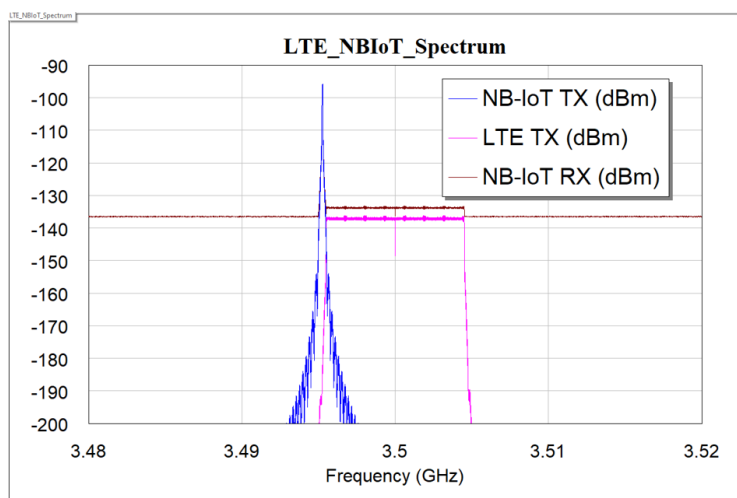
Run 5 – SCMode = 4 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.58 BER για SCMode = 4

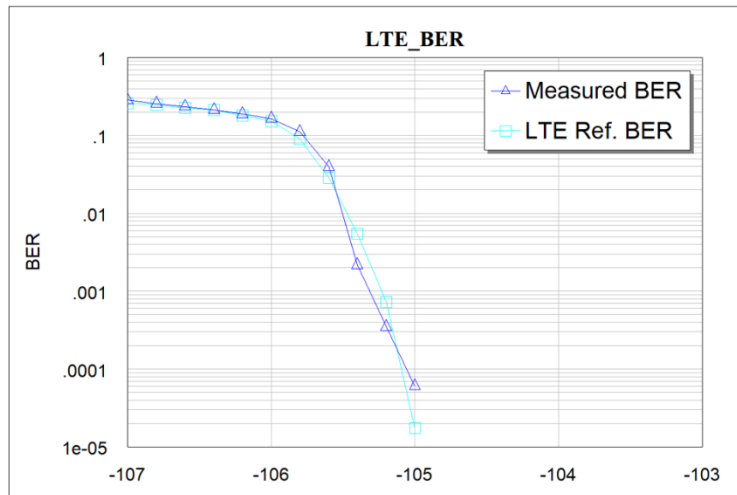


Σχήμα 3.59 Throughput για SCMode = 4

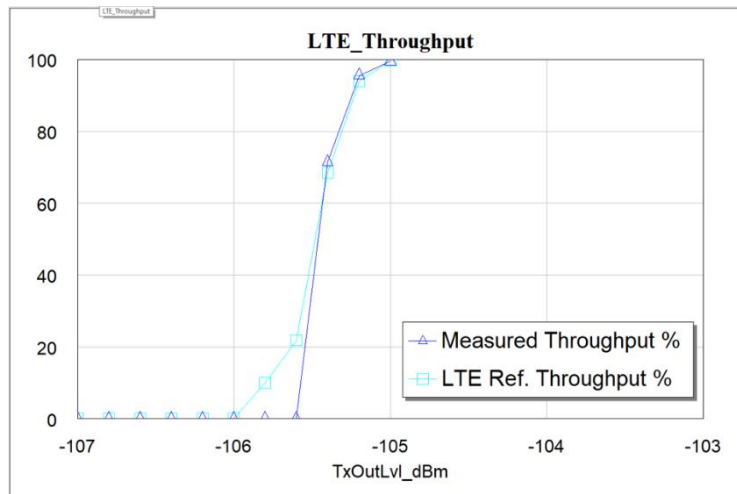


Σχήμα 3.60 Spectrum για SCMode = 4

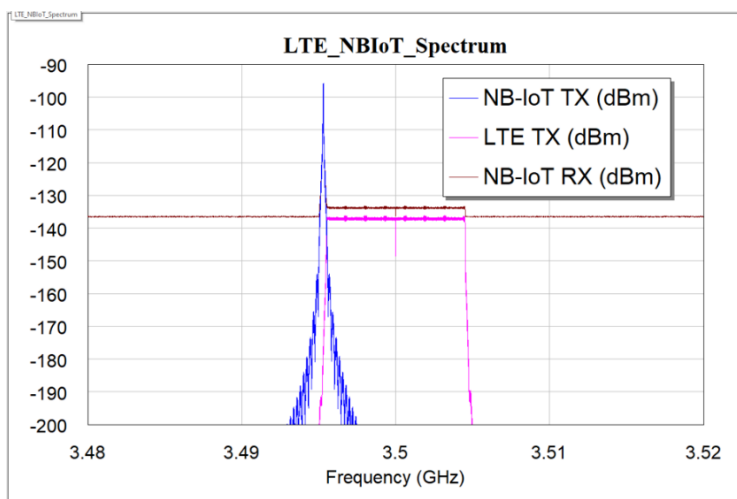
Run 6 – SCMode = 5 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.61 BER για SCMode = 5

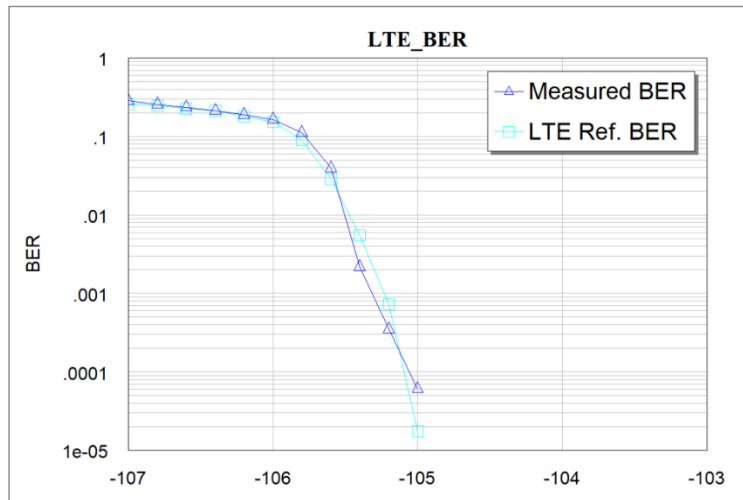


Σχήμα 3.62 Throughput για SCMode = 5

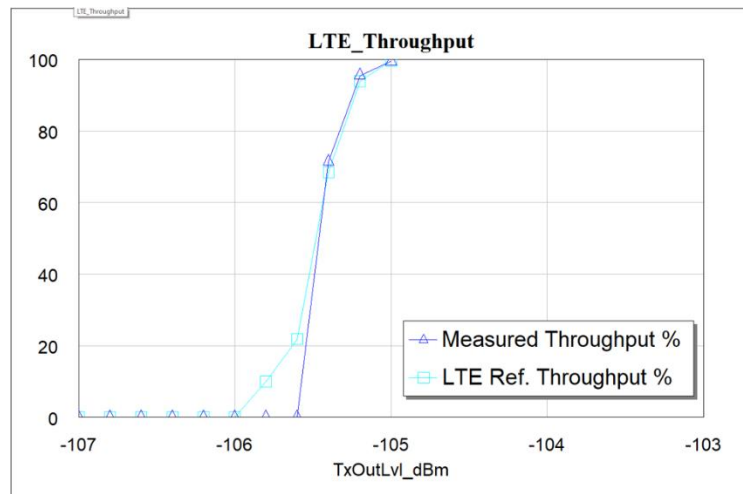


Σχήμα 3.63 Spectrum για SCMode = 5

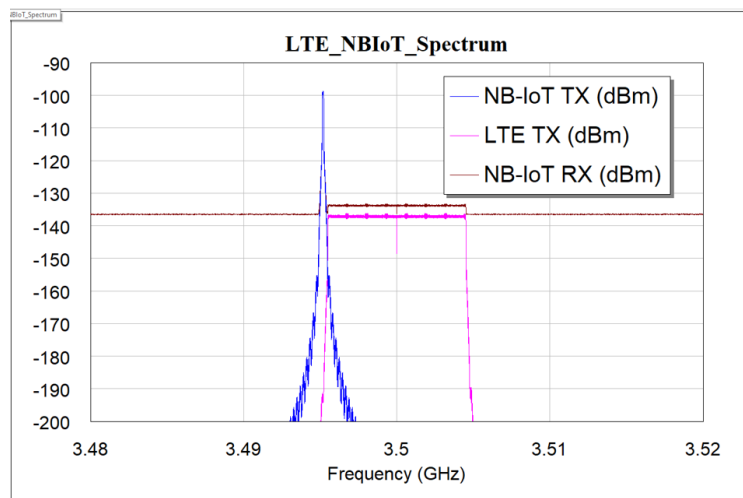
Run 7– SCMode = 6 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.64 BER για SCMode = 6

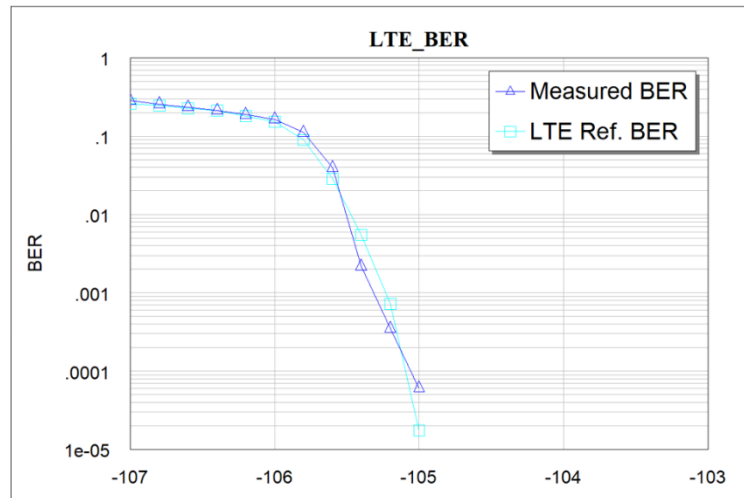


Σχήμα 3.65 Throughput για SCMode = 5

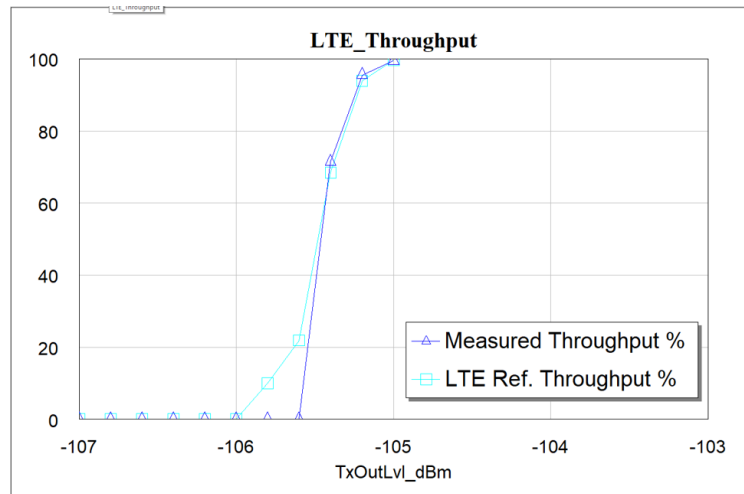


Σχήμα 3.66 Spectrum για SCMode = 6

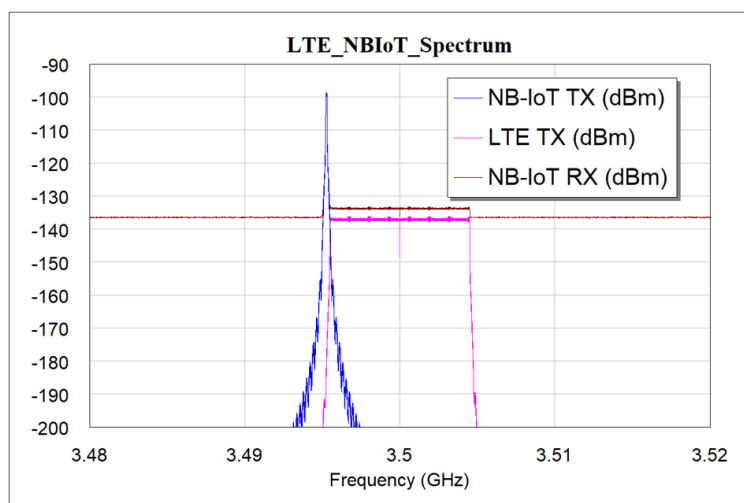
Run 8 – SCMode = 7 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.67 BER για SCMode = 7

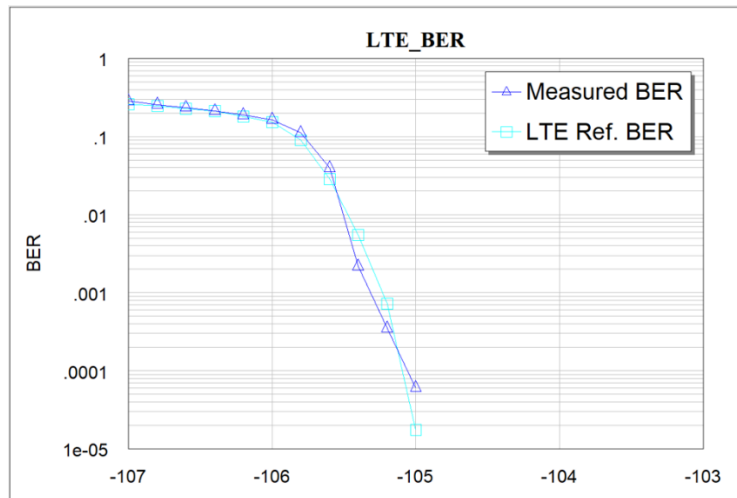


Σχήμα 3.68 Throughput για SCMode = 6

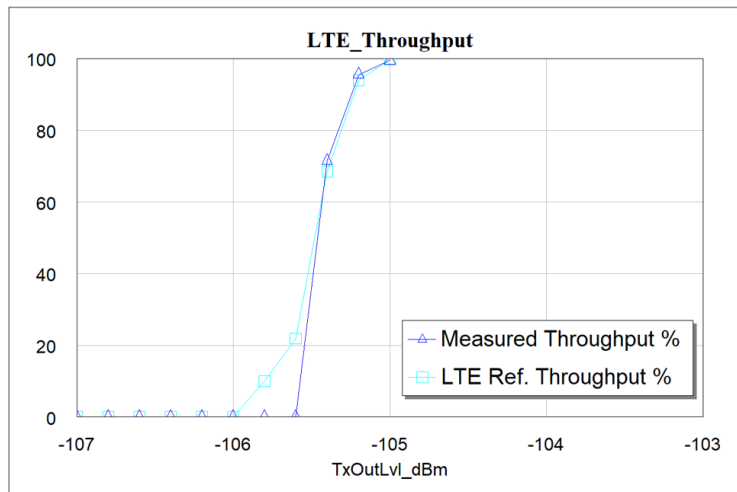


Σχήμα 3.69 Spectrum για SCMode = 7

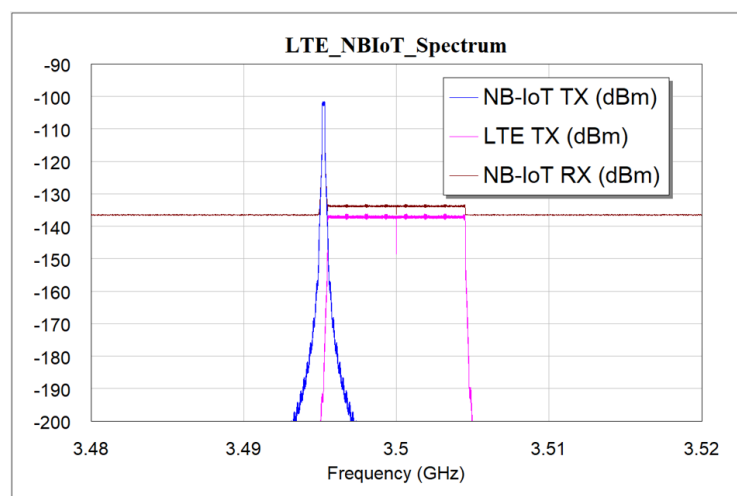
Run 9 – SCMode = 8 (LTE QPSK, NB-IoT, rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)



Σχήμα 3.70 BER για SCMode = 8



Σχήμα 3.71 Throughput για SCMode = 8

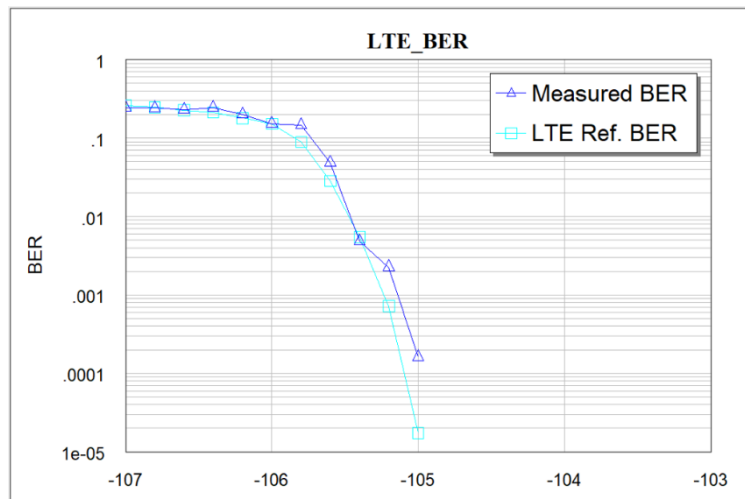


Σχήμα 3.72 Spectrum για SCMode = 8

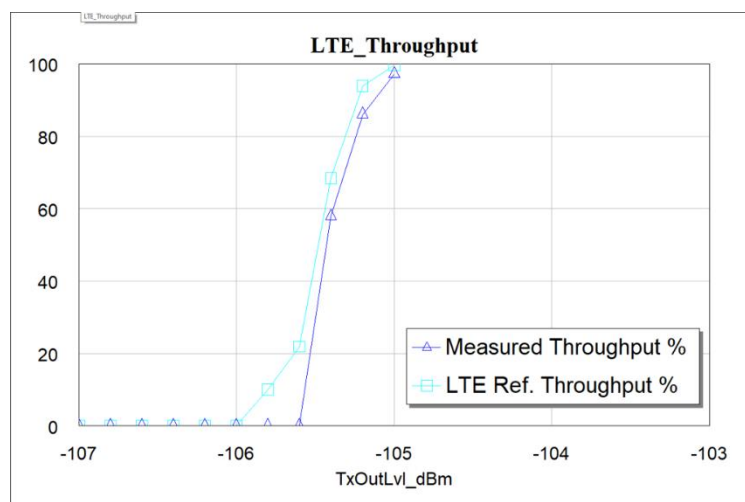
3.10.3 Τρίτη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT $\pi/2$ -BPSK - LOSS μεταβαλλόμενο

Στην τρίτη ομάδα προσομοιώσεων το σύστημα LTE λειτουργεί με διαμόρφωση QPSK, ενώ το NB-IoT χρησιμοποιεί διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK (Mod Type 0). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες ομάδες, όπου εξετάστηκε η επίδραση της παραμέτρου SCMode, στο στάδιο αυτό εισάγονται απώλειες διαδρομής μέσω της παραμέτρου LOSS, η οποία μεταβάλλεται στο εύρος (0–0,40). Στόχος είναι να διερευνηθεί πως η αύξηση του LOSS επηρεάζει τη συμπεριφορά του BER.

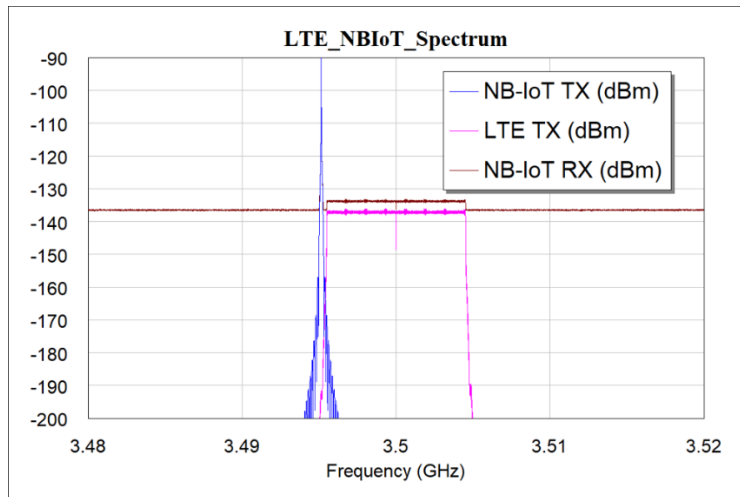
Run 1 – LOSS = 0 dB (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)



Σχήμα 3.73 BER για LOSS = 0 dB

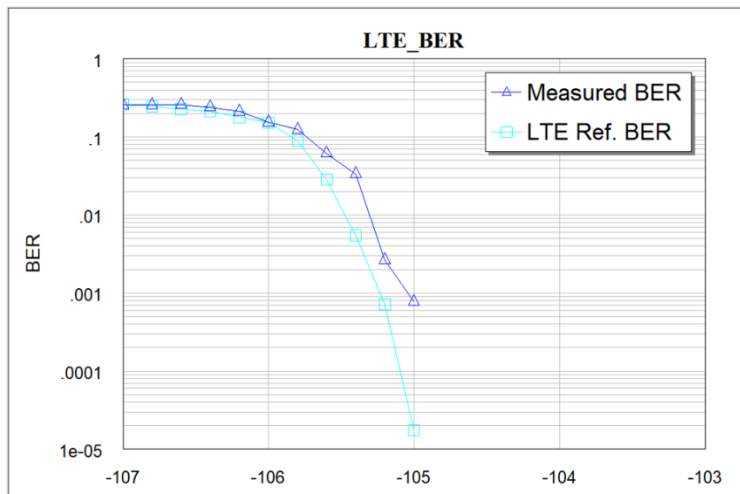


Σχήμα 3.74 Throughput για LOSS = 0 dB

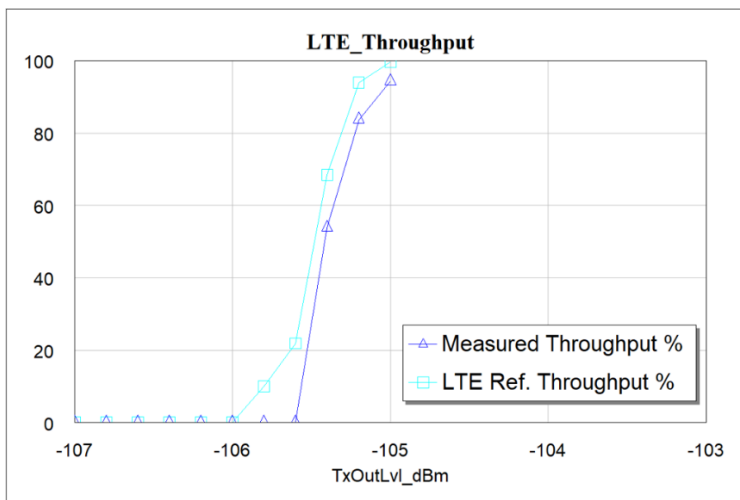


Σχήμα 3.75 Spectrum για LOSS = 0 dB

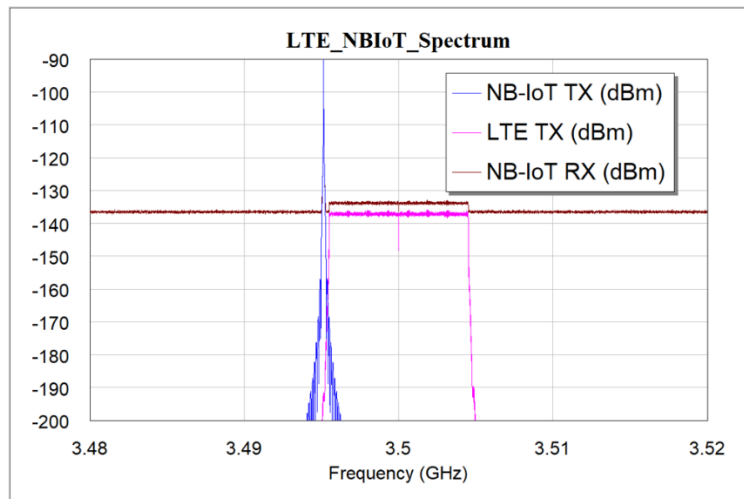
Run 2 – LOSS = 0,05 dB (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)



Σχήμα 3.76 BER για LOSS = 0,05 dB

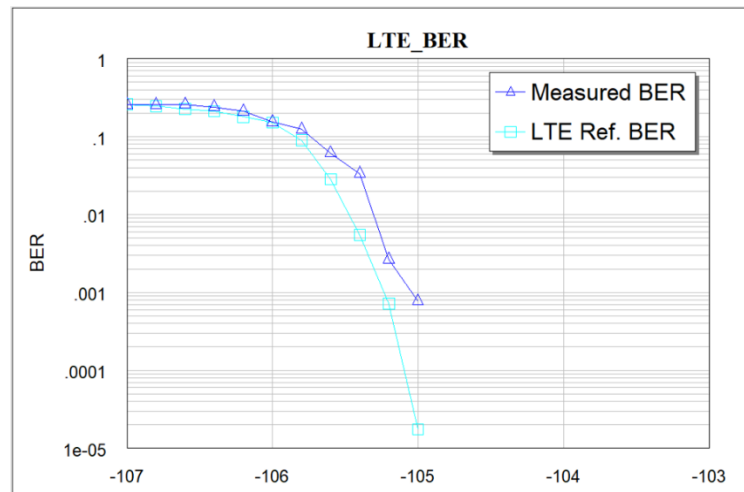


Σχήμα 3.77 Throughput για LOSS = 0,05 dB

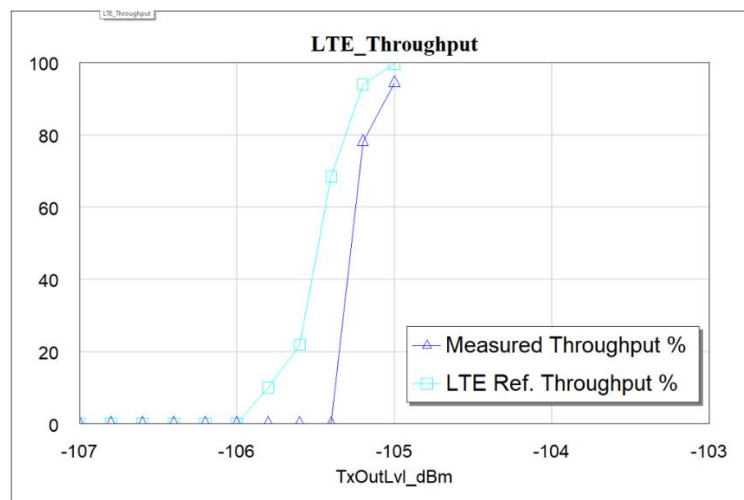


Σχήμα 3.78 Spectrum για LOSS = 0,05 dB

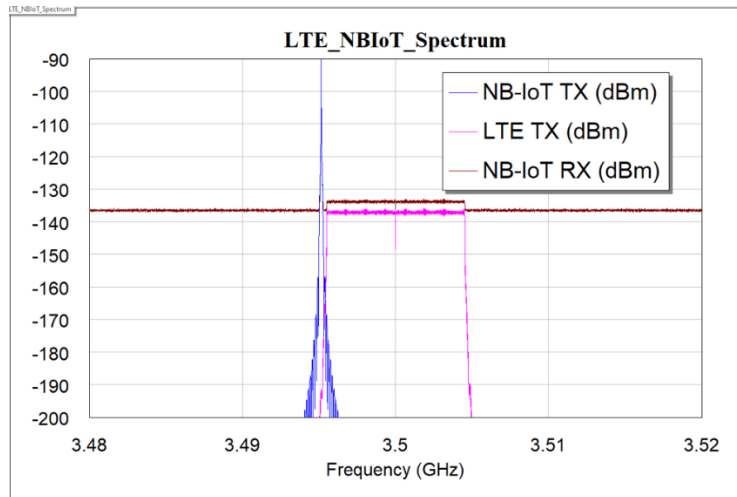
Run 3 – LOSS = 0,1 dB (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)



Σχήμα 3.79 BER για LOSS = 0, 1 dB

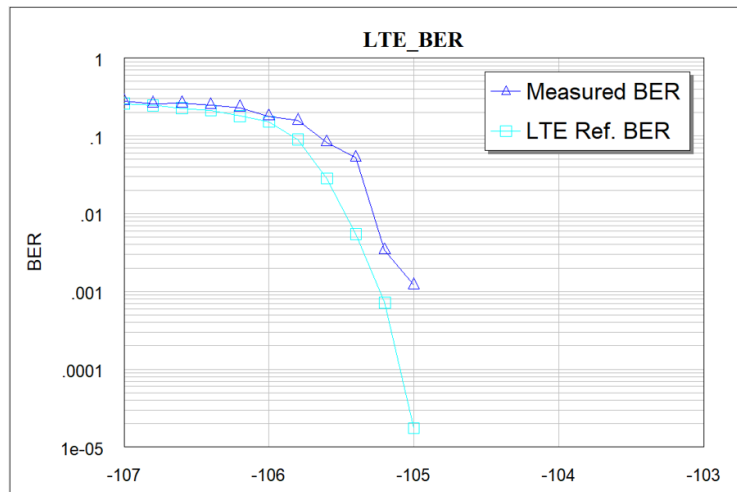


Σχήμα 3.80 Throughput για LOSS = 0,1 dB

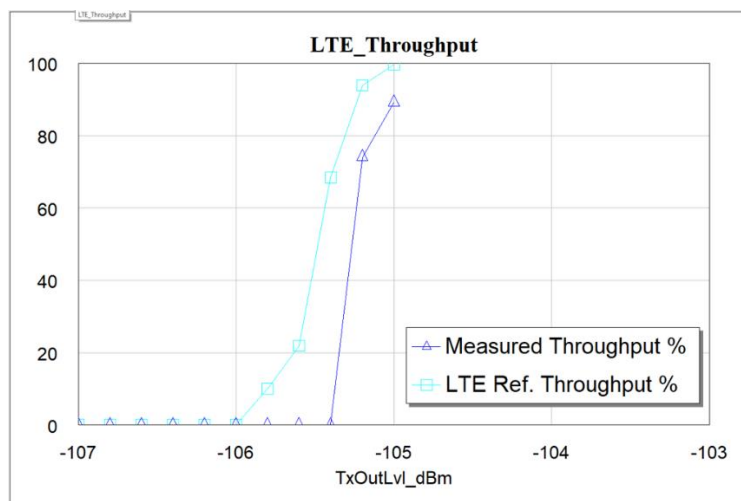


Σχήμα 3.81 Spectrum για LOSS = 0,1 dB

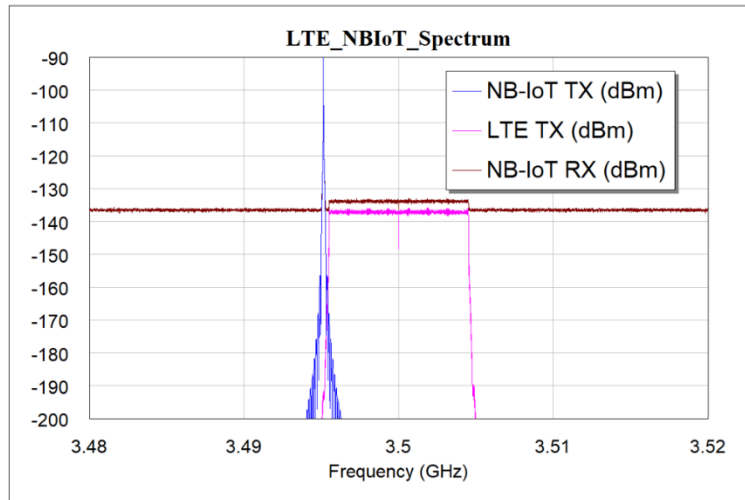
Run 4 – LOSS = 0,15 dB (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)



Σχήμα 3.82 BER για Loss = 0,15 dB

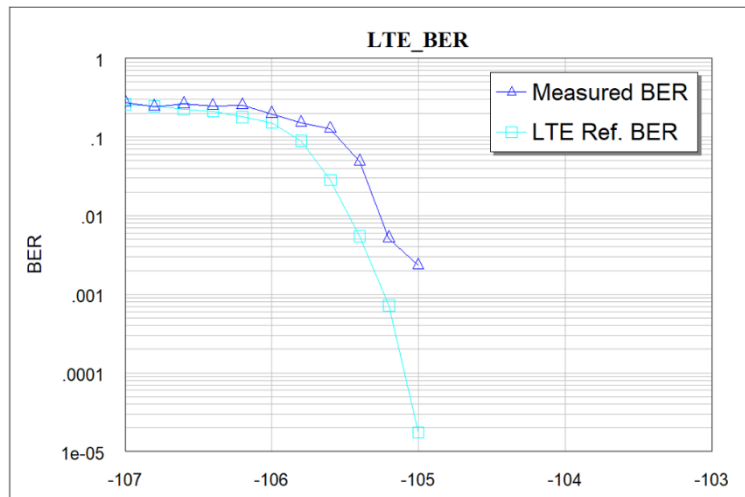


Σχήμα 3.83 Throughput για LOSS = 0,15 dB

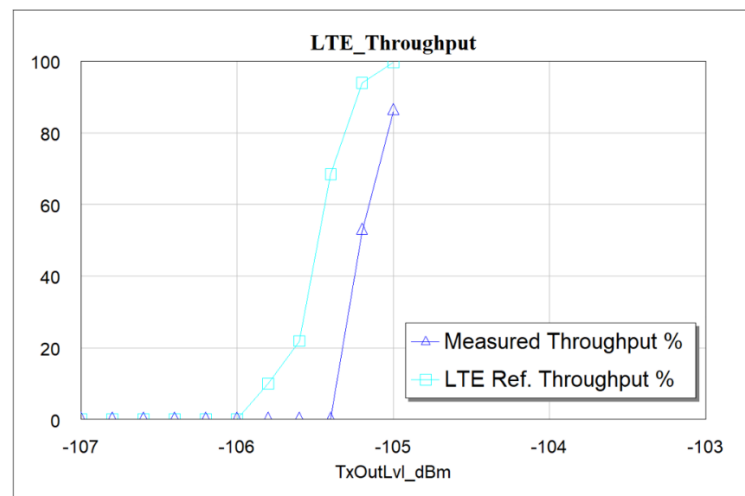


Σχήμα 3.84 Spectrum για LOSS = 0,15 dB

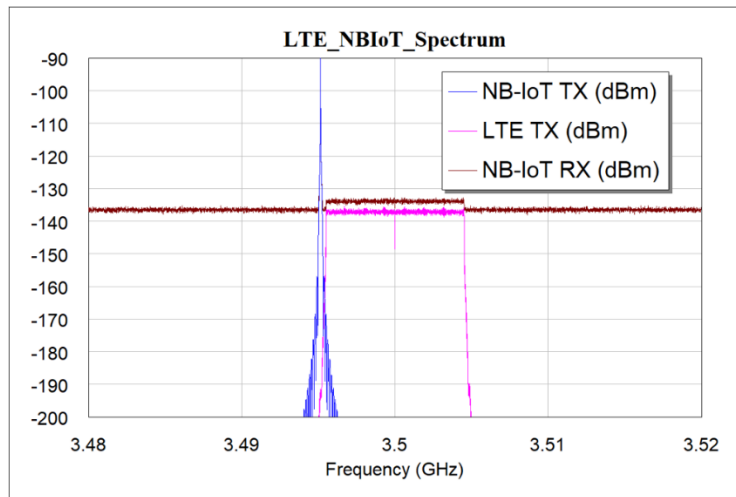
Run 5 – LOSS = 0,20 dB (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)



Σχήμα 3.85 BER για LOSS = 0,20 dB

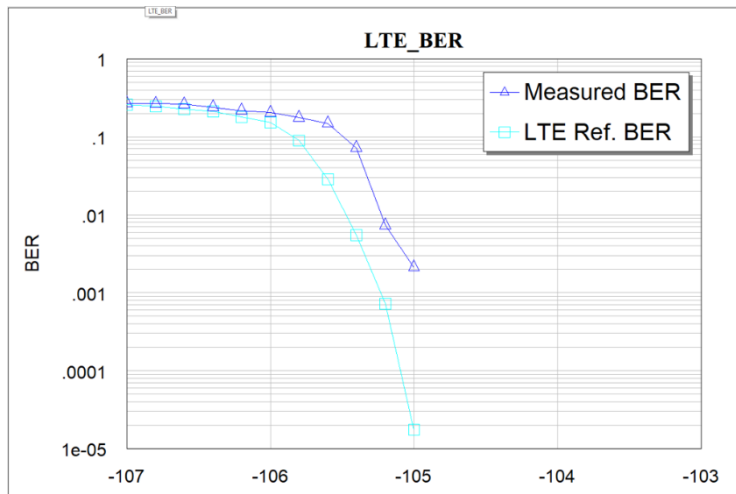


Σχήμα 3.86 Throughput για LOSS = 0,20 dB

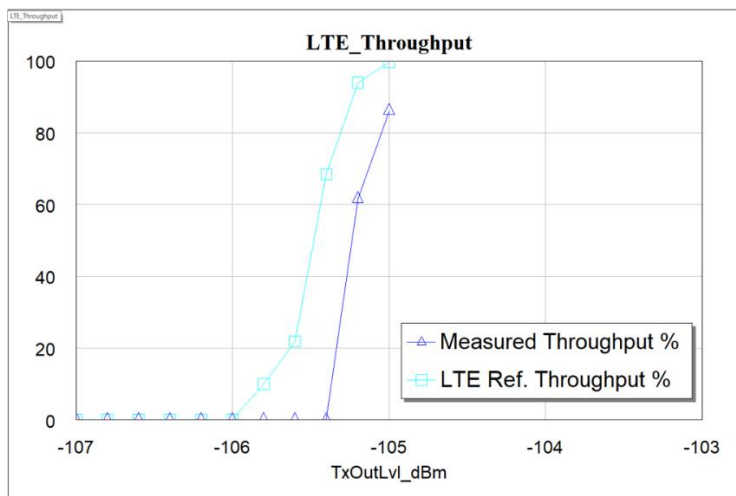


Σχήμα 3.87 Spectrum για LOSS = 0,20 dB

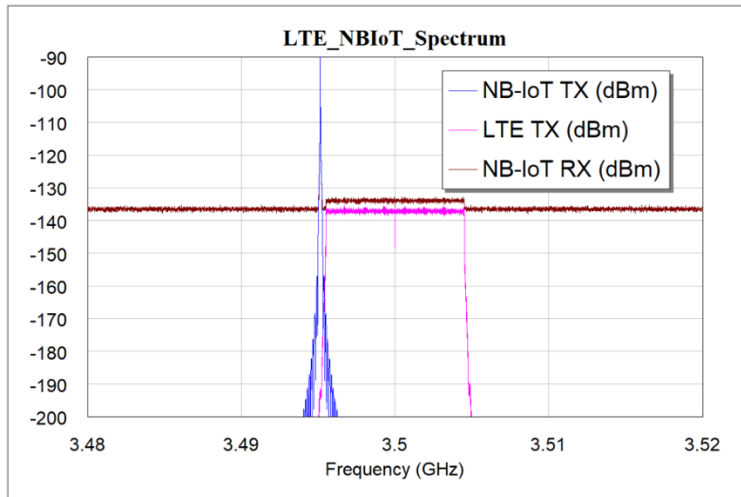
Run 6 – LOSS = 0,25 dB (LTE QPSK, NB-IoT π/2-BPSK)



Σχήμα 3.88 BER για LOSS = 0, 25 dB

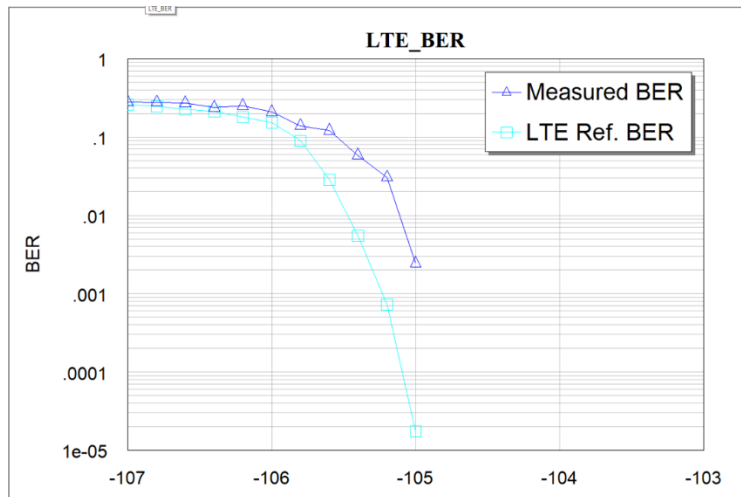


Σχήμα 3.89 Throughput για LOSS = 0,25 dB

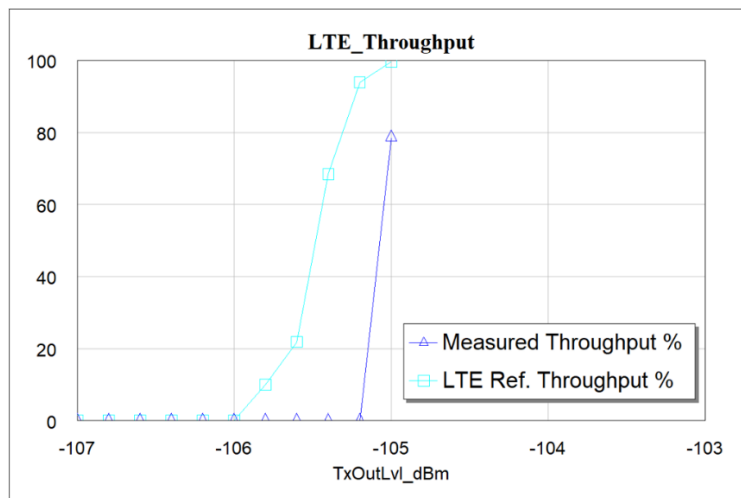


Σχήμα 3.90 Spectrum για LOSS = 0,25 dB

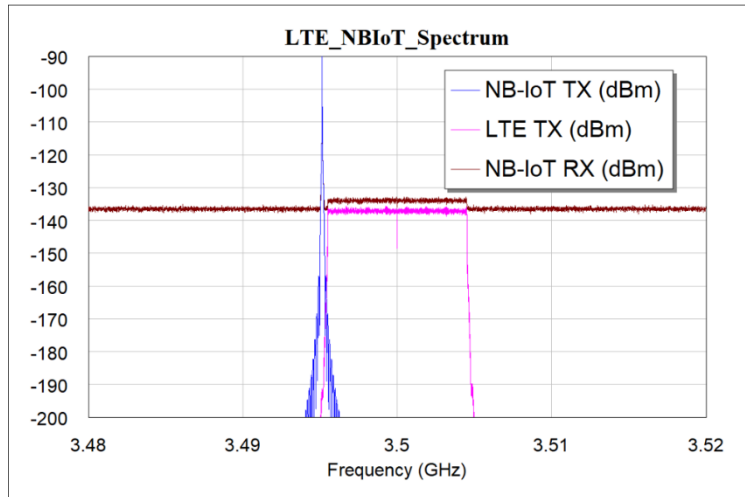
Run 7 – LOSS = 0,30 dB (LTE QPSK, NB-IoT π/2-BPSK)



Σχήμα 3.91 BER για LOSS = 0,30 dB

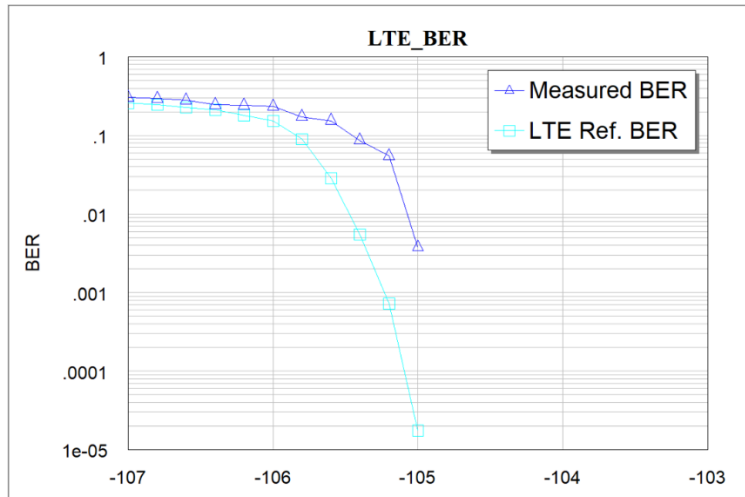


Σχήμα 3.92 Throughput για LOSS = 0,30 dB

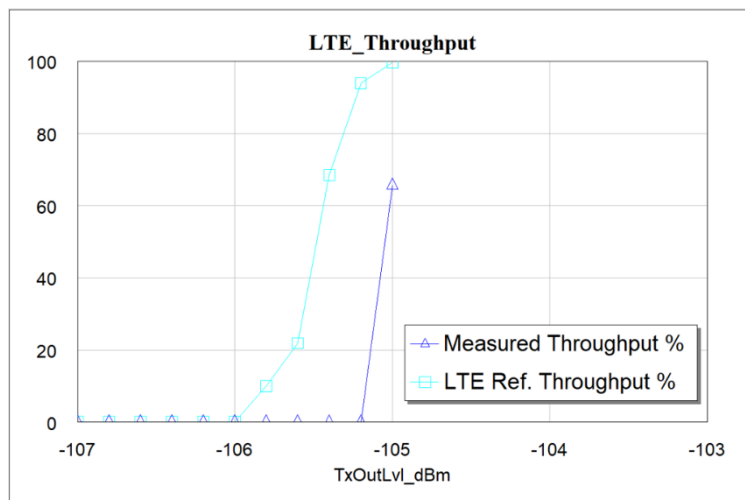


Σχήμα 3.93 Spectrum για LOSS = 0,30 dB

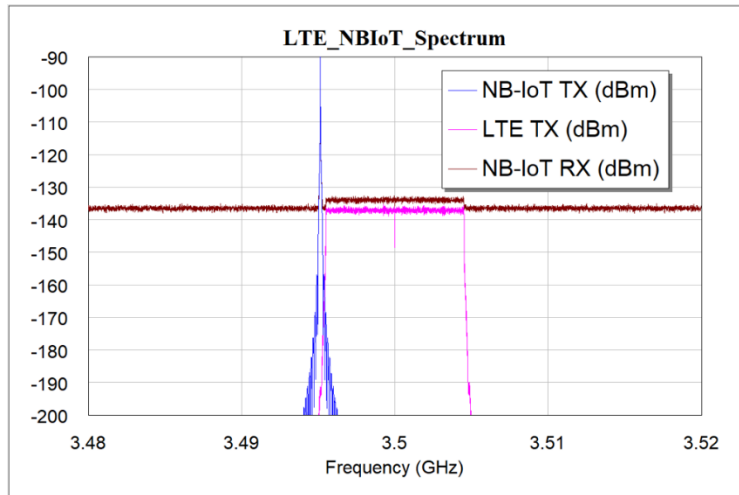
Run 8 – LOSS = 0,35 dB (LTE QPSK, NB-IoT π/2-BPSK)



Σχήμα 3.94 BER για LOSS = 0, 35 dB

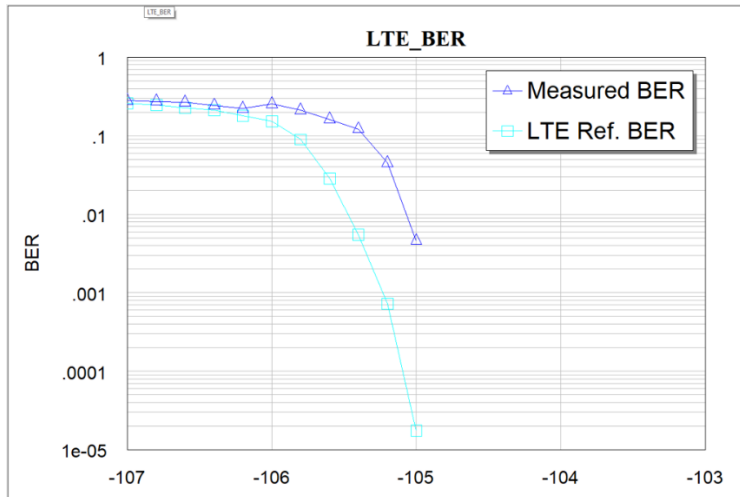


Σχήμα 3.95 Throughput για LOSS = 0,35 dB

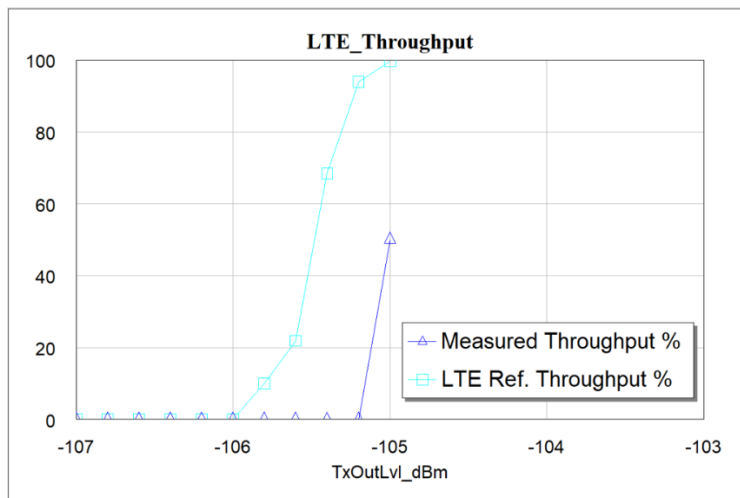


Σχήμα 3.96 Spectrum για LOSS = 0,35 dB

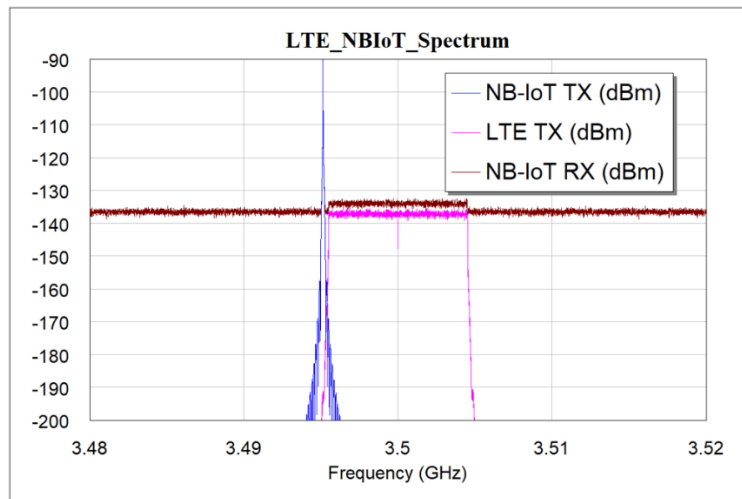
Run 9 – LOSS = 0,40 dB (LTE QPSK, NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)



Σχήμα 3.97 BER για LOSS = 0, 40 dB



Σχήμα 3.98 Throughput για LOSS = 0,40 dB

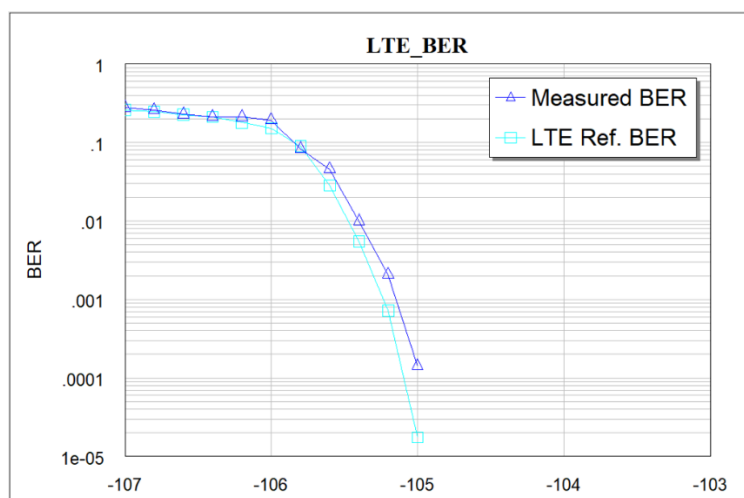


Σχήμα 3.99 Spectrum για LOSS = 0,40 dB

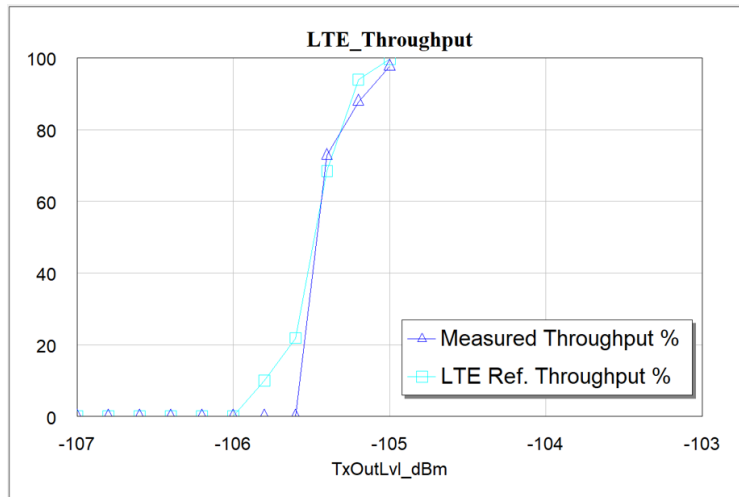
3.10.4 Τέταρτη ομάδα: LTE QPSK - NB-IoT $\pi/4$ -QPSK - LOSS μεταβαλλόμενο

Στην τέταρτη ομάδα προσομοιώσεων το σύστημα LTE λειτουργεί με διαμόρφωση QPSK, ενώ το NB-IoT χρησιμοποιεί διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK (Mod Type 1). Όπως και στην προηγούμενη ομάδα, στο στάδιο αυτό εισάγονται απώλειες διαδρομής μέσω της παραμέτρου LOSS, η οποία μεταβάλλεται στο εύρος (0–0,40). Στόχος είναι να διερευνηθεί πώς η αύξηση του LOSS επηρεάζει τη συμπεριφορά του BER, καθώς και να συγκριθεί η επίδραση της διαφορετικής διαμόρφωσης του NB-IoT σε συνθήκες εξασθένησης.

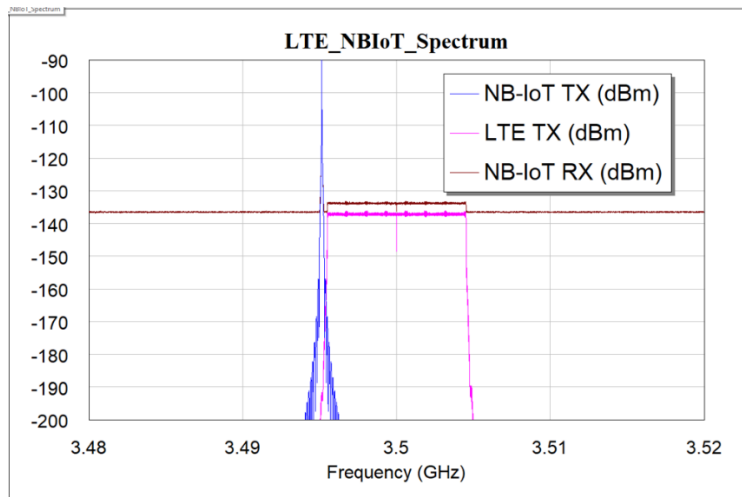
Run 1 – LOSS = 0 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.100 BER για LOSS = 0 dB

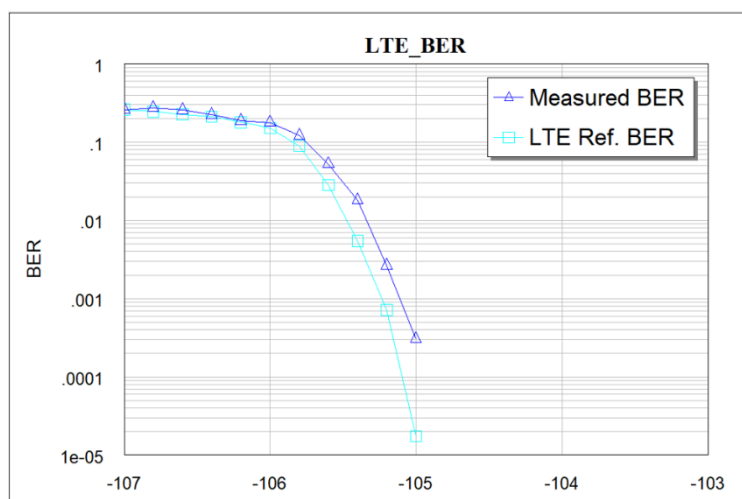


Σχήμα 3.101 Throughput για LOSS = 0 dB

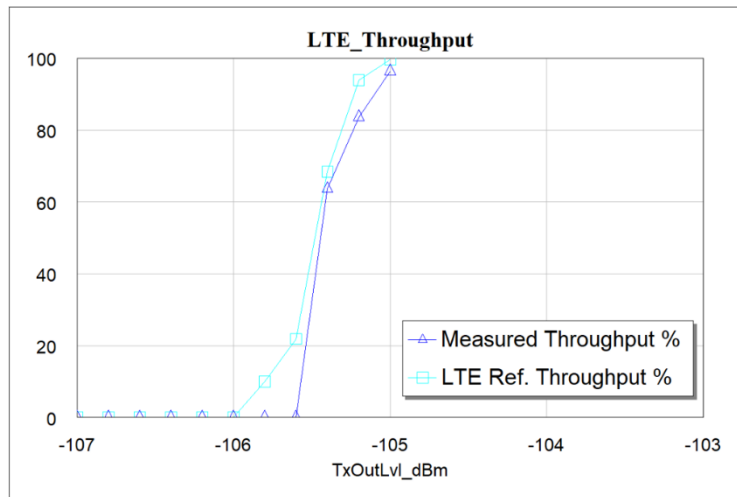


Σχήμα 3.102 Spectrum για LOSS = 0 dB

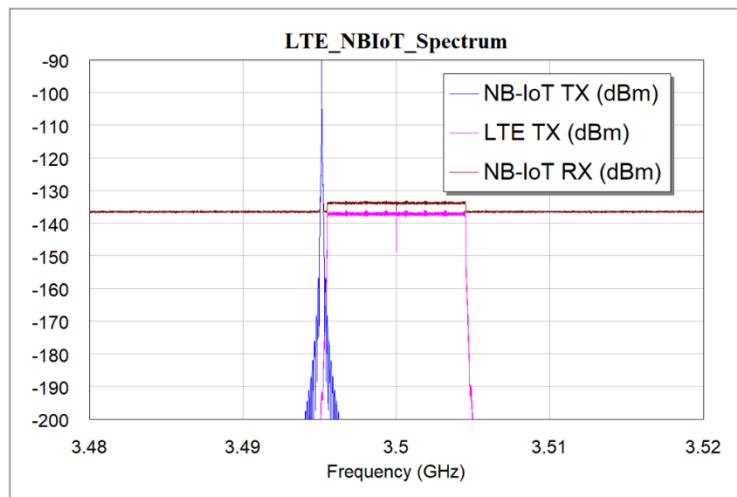
Run 2 – LOSS = 0,05 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.103 BER για LOSS = 0,05 dB

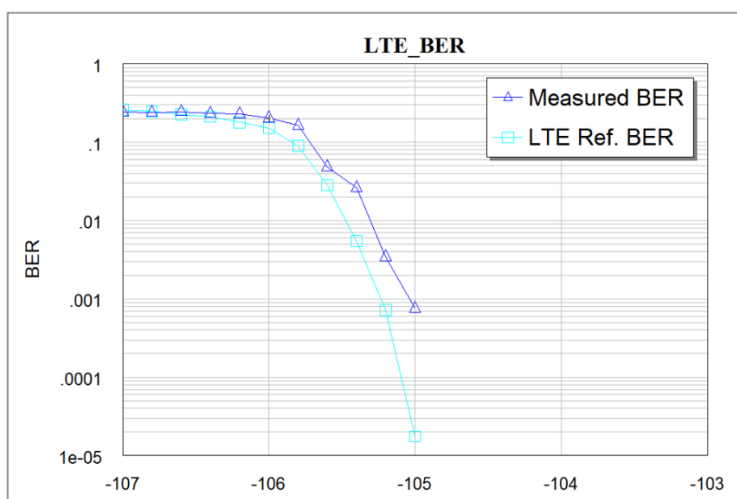


Σχήμα 3.104 Throughput για LOSS = 0,05 dB

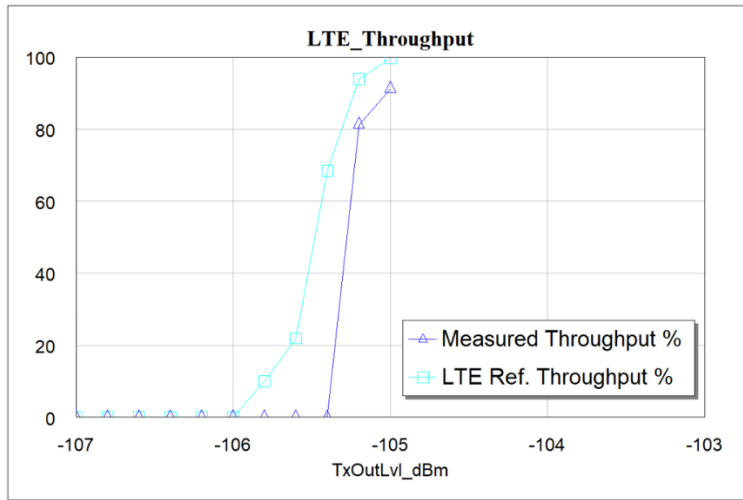


Σχήμα 3.105 Spectrum για LOSS = 0,05 dB

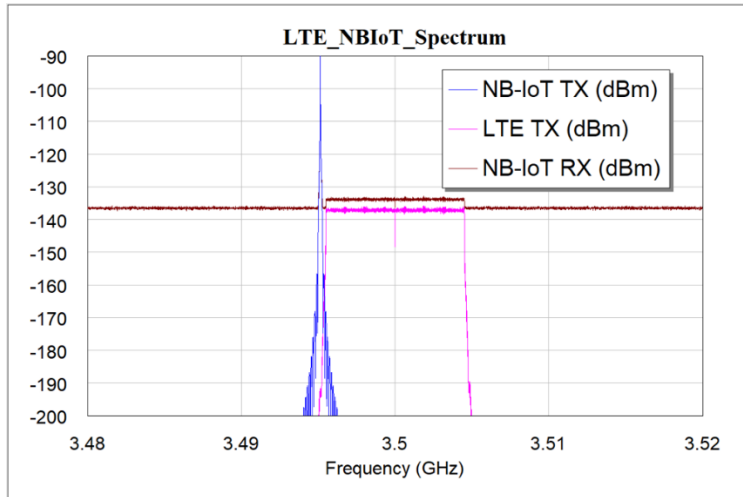
Run 3 – LOSS = 0,1 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.106 BER για LOSS = 0,1 dB

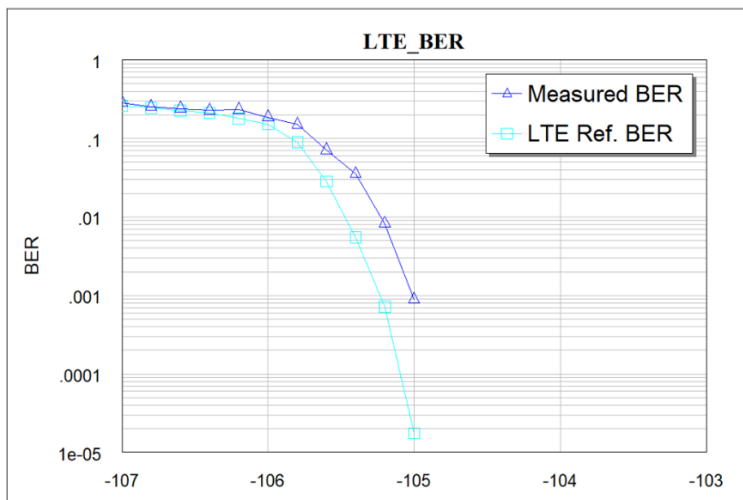


Σχήμα 3.107 Throughput για LOSS = 0,1 dB

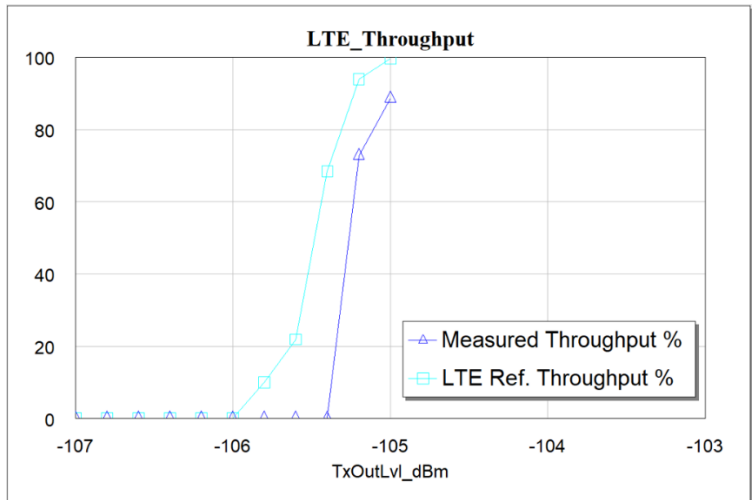


Σχήμα 3.108 Spectrum για LOSS = 0,10 dB

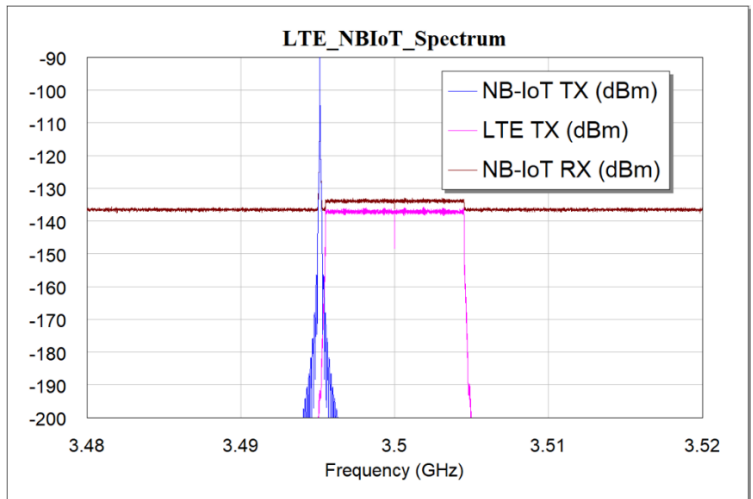
Run 4 – LOSS = 0,15 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.109 BER για LOSS = 0,15 dB

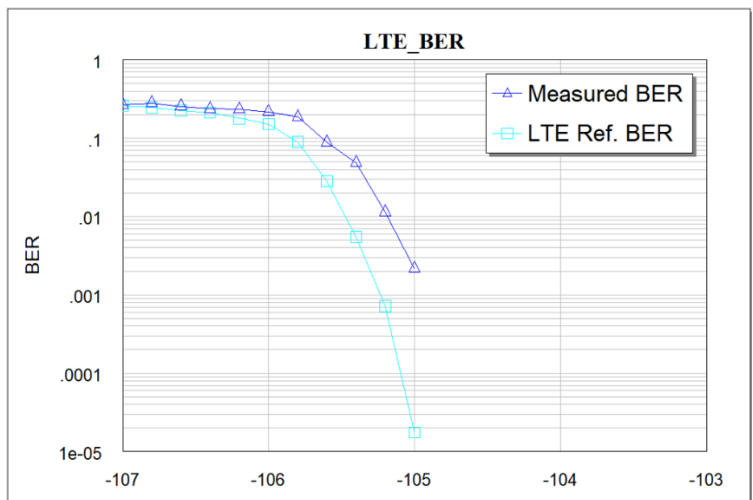


Σχήμα 3.110 Throughput για LOSS = 0,15 dB

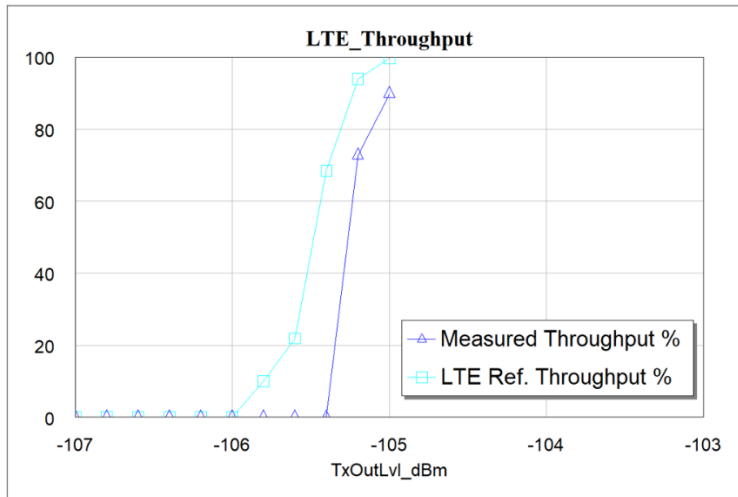


Σχήμα 3.111 Spectrum για LOSS = 0,15 dB

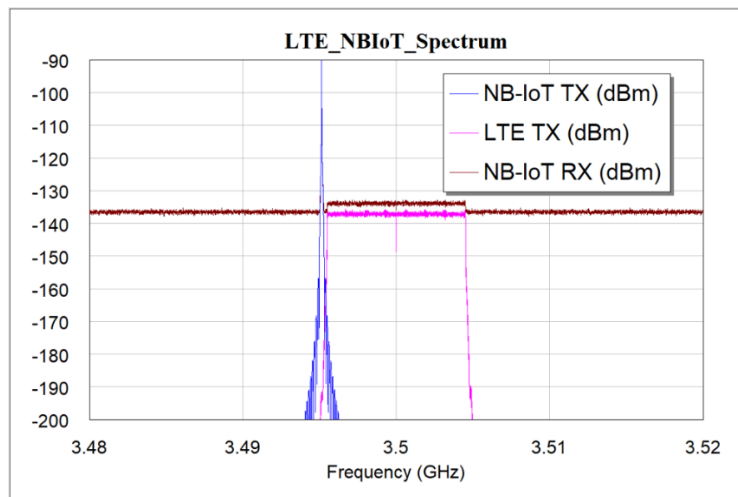
Run 5 – LOSS = 0,20 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.112 BER για LOSS = 0,20 dB

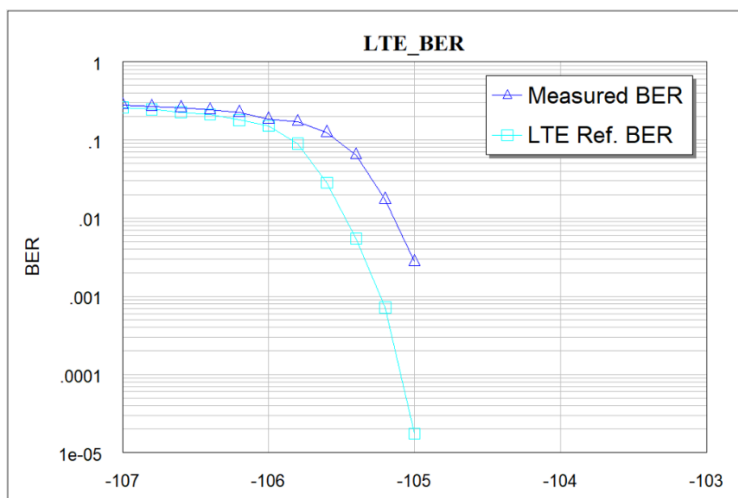


Σχήμα 3.113 Throughput για LOSS = 0,20 dB

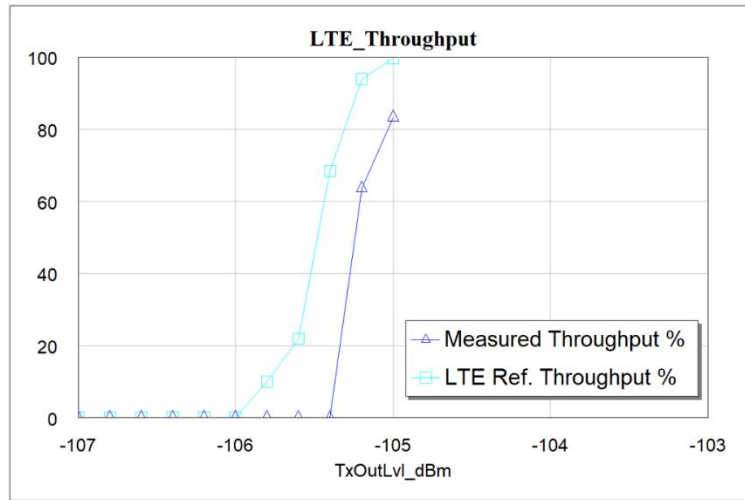


Σχήμα 3.114 Spectrum για LOSS = 0,20 dB

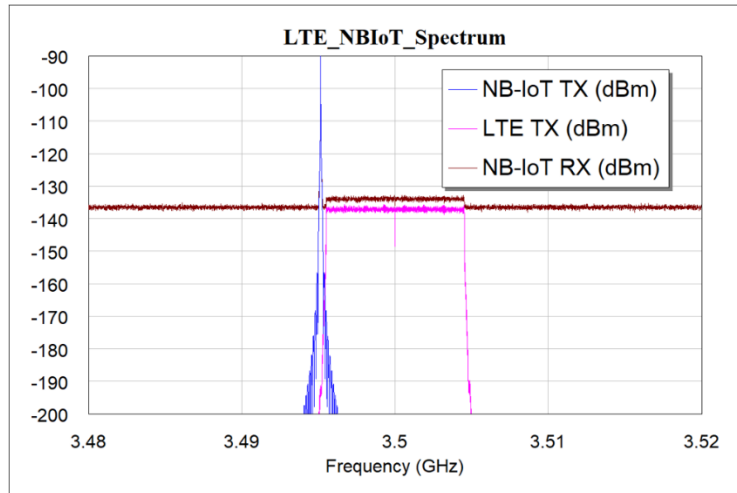
Run 6 – LOSS = 0,25 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.115 BER για LOSS = 0,25 dB

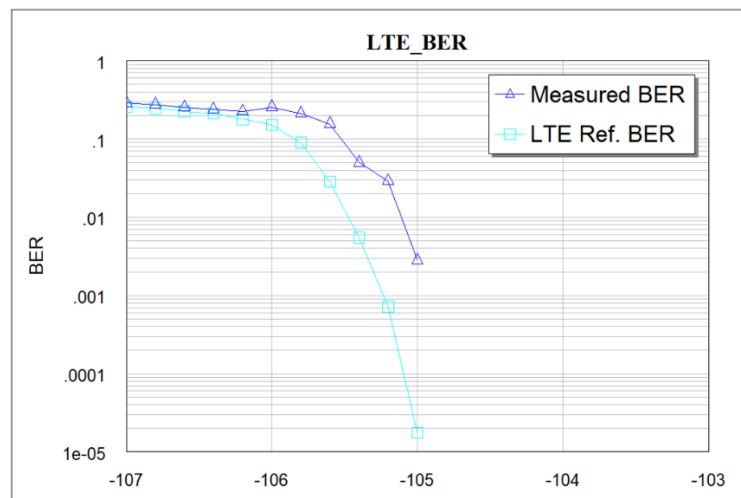


Σχήμα 3.116 Throughput για LOSS = 0,25 dB

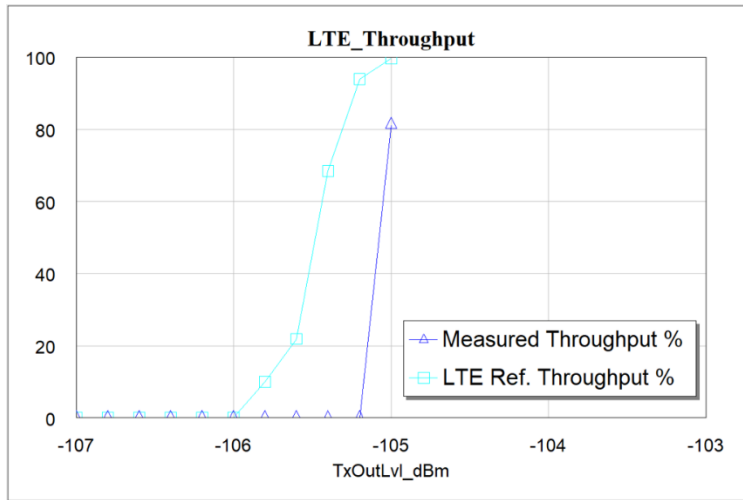


Σχήμα 3.117 Spectrum για LOSS = 0,25 dB

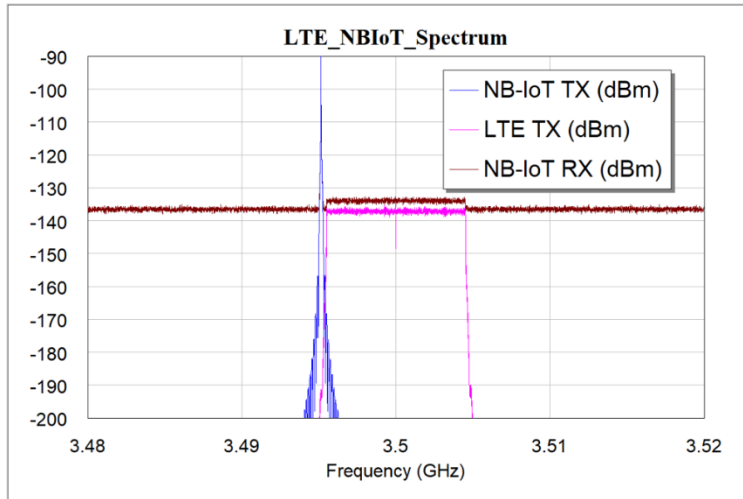
Run 7 – LOSS = 0,30 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.118 BER για LOSS = 0,30 dB

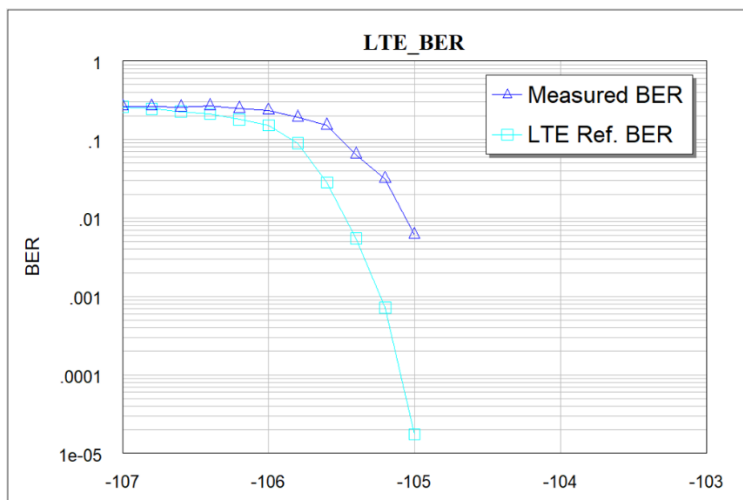


Σχήμα 3.119 Throughput για LOSS = 0,30 dB

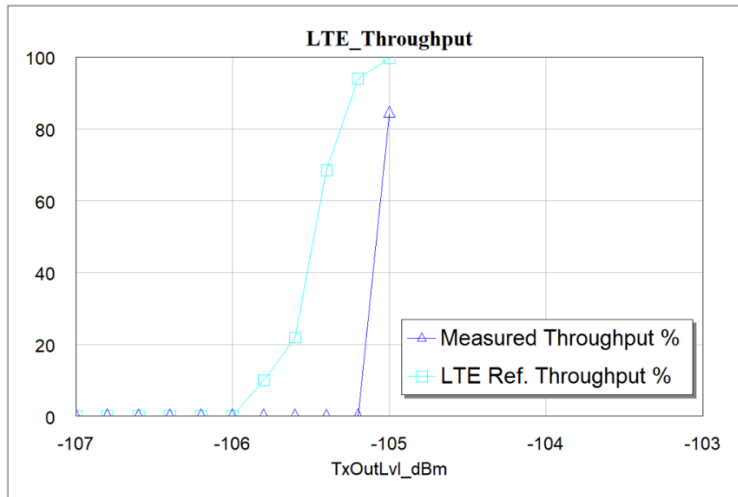


Σχήμα 3.120 Spectrum για LOSS = 0,30 dB

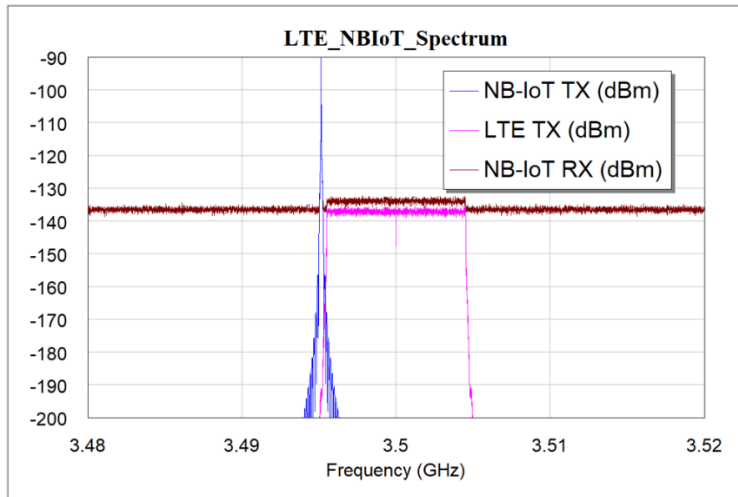
Run 8 – LOSS = 0,35 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.121 BER για LOSS = 0,35 dB

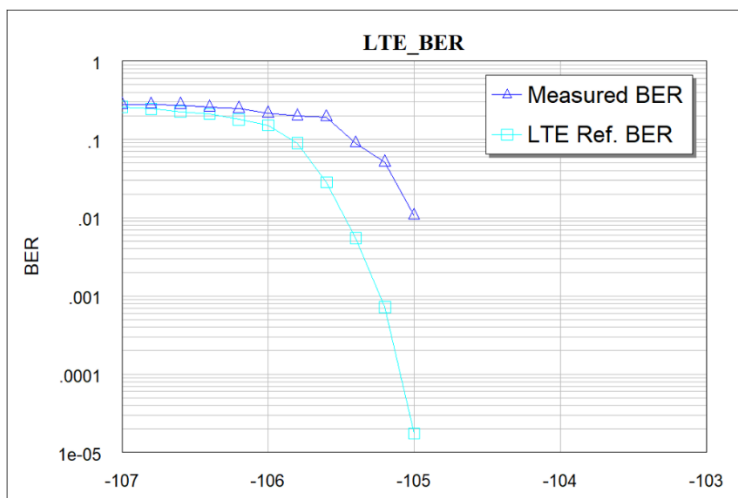


Σχήμα 3.122 Throughput για LOSS = 0,35 dB

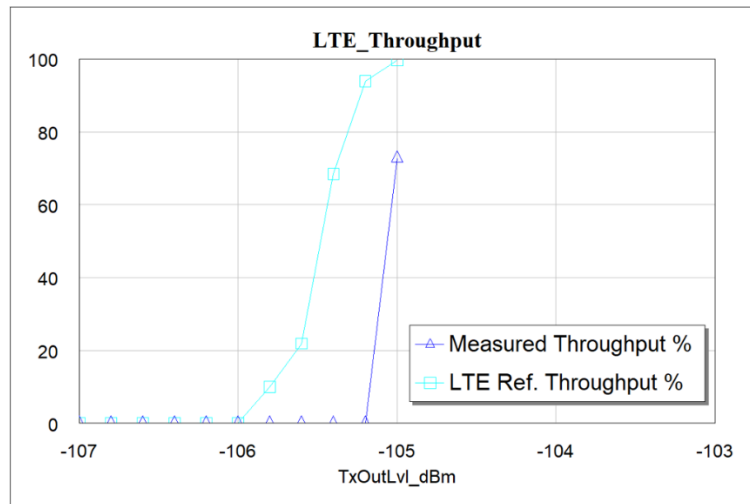


Σχήμα 3.123 Spectrum για LOSS = 0,35 dB

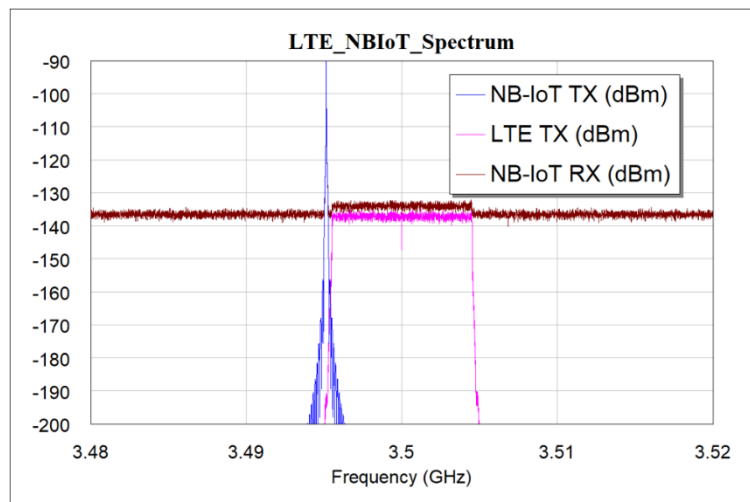
Run 9 – LOSS = 0,40 dB (LTE QPSK, NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)



Σχήμα 3.124 BER για LOSS = 0,40 dB



Σχήμα 3.125 Throughput για LOSS = 0,40 dB



Σχήμα 3.126 Spectrum για LOSS = 0,40 dB

Η ανάλυση της 1^{ης} ομάδας προσομοιώσεων δείχνει ότι η μεταβολή της παραμέτρου SCMode του NB-IoT με διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK υπό συνθήκες καναλιού χωρίς απώλειες (LOSS = 0 dB), δεν επιφέρει ουσιαστική διαφοροποίηση στη συμπεριφορά της καμπύλης BER του LTE. Οι τιμές BER στα επιλεγμένα σημεία αναφοράς παραμένουν στο ίδιο εύρος μεγέθους για όλες τις ρυθμίσεις της παραμέτρου SCMode, ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες συμπίπτουν με την καμπύλη αναφοράς. Συνεπώς, η λειτουργία της ζεύξης LTE παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστη από τη μεταβολή της παραμέτρου SCMode.

Η ανάλυση της 2^{ης} ομάδας προσομοιώσεων, όπου το NB-IoT λειτουργεί με διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK και με (LOSS = 0 dB), δείχνει ότι για τις περισσότερες

επιλογές της παραμέτρου SCMode η συμπεριφορά της καμπύλης BER του LTE παραμένει παρόμοια με την καμπύλη αναφοράς του συστήματος, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αλλαγή της διαμόρφωσης του NB-IoT δεν επιφέρει διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά του LTE.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της 1^{ης} και 2^{ης} ομάδας προσομοιώσεων υποδεικνύουν ότι, υπό ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB), οι μεταβολές στην κατανομή υποφερόντων (SCMode) και στον τύπο διαμόρφωσης του NB-IoT (από $\pi/2$ -BPSK σε rotated $\pi/4$ -QPSK), δεν μεταβάλλουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά BER του LTE, το οποίο διατηρεί την καμπύλη αναφοράς του. Η συνολική εικόνα δείχνει ότι η συνύπαρξη δεν επηρεάζει ουσιαστικά την αξιοπιστία της ζεύξης LTE.

Η ανάλυση της 3^{ης} ομάδας προσομοιώσεων επικεντρώνεται στην επίδραση της αύξησης της παραμέτρου LOSS, με το NB-IoT να λειτουργεί με διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK. Παρατηρείται ότι η εισαγωγή απωλειών διαδρομής οδηγεί σε προοδευτική μετατόπιση της καμπύλης BER του LTE προς υψηλότερες τιμές BER, χωρίς ουσιαστική μεταβολή της συνολικής μορφής της, σε σχέση με την καμπύλη αναφοράς και τις αντίστοιχες καμπύλες των προηγούμενων ομάδων προσομοιώσεων.

Καθώς η καμπύλη BER μετατοπίζεται προς υψηλότερες τιμές, αυξάνεται ο ρυθμός σφαλμάτων bit, δείχνοντας υποβάθμιση της αξιοπιστίας της ζεύξης υπό την επίδραση των απωλειών διαδρομής. Η λειτουργία του συστήματος υπό συνθήκες εντονότερης εξασθένησης του σήματος συνδέεται με μεγαλύτερο ρυθμό σφαλμάτων, επηρεάζοντας την απόδοση του LTE.

Συνεπώς, η παράμετρος LOSS λειτουργεί ως ο καθοριστικός παράγοντας μετατόπισης της καμπύλης BER προς υψηλότερες τιμές BER. Πρακτικά, για το ίδιο σημείο E_b/N_0 , η αύξηση του LOSS οδηγεί σε υψηλότερες τιμές BER. Συνολικά, η εισαγωγή απωλειών διαδρομής μέσω της παραμέτρου LOSS επιφέρει ουσιαστικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της καμπύλης BER του LTE, σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, όπου η μεταβολή του SCMode και της διαμόρφωσης δεν είχε αντίστοιχη επίδραση.

Η 4^η ομάδα προσομοιώσεων περιγράφει τη λειτουργία του συστήματος υπό συνθήκες αυξημένων απωλειών διαδρομής (LOSS), με χρήση διαμόρφωσης rotated $\pi/4$ -QPSK. Παρατηρείται ότι η αύξηση του LOSS οδηγεί σε προοδευτική μετατόπιση της καμπύλης BER του LTE. Σε σχέση με την 3^η ομάδα προσομοιώσεων, η χρήση της διαμόρφωσης rotated $\pi/4$ -QPSK οδηγεί σε μεγαλύτερη μετατόπιση της καμπύλης BER του LTE προς υψηλότερες τιμές E_b/N_0 για αντίστοιχα επίπεδα BER, γεγονός που δείχνει αυξημένη ευαισθησία της συγκεκριμένης διαμόρφωσης στις απώλειες διαδρομής.

Στο σύνολό τους, τα αποτελέσματα της 4^{ης} ομάδας προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν ότι η αύξηση του LOSS αποτελεί καθοριστικό παράγοντα μετατόπισης της καμπύλης BER και συνδέεται με υποβάθμιση της αξιοπιστίας της ζεύξης LTE.

Με βάση τα αποτελέσματα των τεσσάρων ομάδων προσομοιώσεων προκύπτει ότι σε ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB), η παρουσία του NB-IoT και η μεταβολή των παραμέτρων του δεν επιφέρουν ουσιαστική μεταβολή στη συμπεριφορά της καμπύλης BER του LTE, το οποίο διατηρεί τη μορφή της καμπύλης αναφοράς. Αυτό υποδηλώνει ότι για τις συγκεκριμένες συνθήκες, η συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών δεν επηρεάζει την αξιοπιστία της ζεύξης LTE.

Αντίθετα για αυξανόμενες τιμές της παραμέτρου LOSS, παρατηρείται συστηματική μετατόπιση της καμπύλης BER προς υψηλότερες τιμές που σημαίνει ότι η ζεύξη λειτουργεί σε δυσμενέστερες συνθήκες. Επιπλέον, η διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK οδηγεί σε συνολικά μεγαλύτερη μετατόπιση της καμπύλης BER σε σχέση με τη διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με μεγαλύτερη ευαισθησία της συγκεκριμένης διαμόρφωσης στις απώλειες διαδρομής.

Με βάση τα αποτελέσματα των τεσσάρων ομάδων προσομοιώσεων προκύπτει ότι, σε ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB), η παρουσία του NB-IoT και η μεταβολή των παραμέτρων του δεν επιφέρουν ουσιαστική μεταβολή στη συμπεριφορά της καμπύλης BER του LTE, το οποίο διατηρεί τη μορφή της καμπύλης αναφοράς. Για τις συγκεκριμένες συνθήκες, η συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών δεν επηρεάζει την αξιοπιστία της ζεύξης LTE.

Αντίθετα, για αυξανόμενες τιμές της παραμέτρου LOSS, παρατηρείται συστηματική μετατόπιση της καμπύλης BER προς υψηλότερες τιμές, γεγονός που δείχνει ότι η ζεύξη

λειτουργεί σε δυσμενέστερες συνθήκες. Επιπλέον, η διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK οδηγεί σε συνολικά μεγαλύτερη μετατόπιση της καμπύλης BER σε σχέση με τη διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει μεγαλύτερη ευαισθησία της διαμόρφωσης rotated $\pi/4$ -QPSK στις απώλειες διαδρομής.

Συνολικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναδεικνύουν σαφή κλιμάκωση της επίδρασης των απωλειών διαδρομής στη συμπεριφορά της καμπύλης BER, υποδηλώνοντας ότι η αυξανόμενη εξασθένηση του καναλιού μέσω της παραμέτρου LOSS επηρεάζει ουσιαστικά την αξιοπιστία μετάδοσης, ενώ η επίδρασή της είναι σημαντικότερη σε σχέση με με την παρουσία του σήματος NB-IoT.

3.11 Μεθοδολογία Ανάλυσης

Για λόγους ενιαίας και συστηματικής καταγραφής των αποτελεσμάτων, επιλέγονται από κάθε καμπύλη BER δύο αντιπροσωπευτικά σημεία αναφοράς, τα οποία αντιστοιχούν σε $E_b/N_0 = -106$ dB (σημείο A) και $E_b/N_0 = -105$ dB (σημείο B). Μετά από κάθε εκτέλεση προσομοίωσης (run), εξάγονται οι αντίστοιχες τιμές του BER στα συγκεκριμένα σημεία και καταγράφονται σε πίνακες. Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται για τον σχολιασμό των γραφικών παραστάσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια, καθώς και για τη συγκριτική ανάλυση που οδηγεί στην εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, οι προσομοιώσεις οργανώνονται σε τέσσερις ομάδες, οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εξετάζεται η απόδοση του συστήματος υπό ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB). Στην 1^η ομάδα προσομοιώσεων με χρήση διαμόρφωσης $\pi/2$ BPSK, διερευνάται αρχικά η επίδραση των διαφορετικών λειτουργιών της παραμέτρου SCMode στη συμπεριφορά του BER, καθώς οι διαφορετικές ρυθμίσεις SCMode επηρεάζουν τη φασματική κατανομή του παρεμβάλλοντος σήματος. Στη 2^η ομάδα εξετάζεται η επίδραση της διαμόρφωσης rotated $\pi/4$ -QPSK στη συμπεριφορά του BER, για διαφορετικές ρυθμίσεις υποφερόντων του NB-IoT μέσω του SCMode, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος. Στόχος είναι να αξιολογηθεί κατά πόσο η αλλαγή της διαμόρφωσης του NB-IoT επηρεάζει την απόδοση του LTE ως προς τον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER).

Στη δεύτερη κατηγορία εξετάζεται η επίδραση των απωλειών διαδρομής (Path Loss) στην αξιοπιστία μετάδοσης του συστήματος, όπως αυτή αποτυπώνεται μέσω του BER.

Η παράμετρος LOSS λαμβάνει εννέα διακριτές τιμές στο εύρος 0–0,40, για την παρατήρηση της συμπεριφοράς της καμπύλης BER του LTE σε διαφορετικά επίπεδα εξασθένησης του σήματος. Σε αυτό το στάδιο μέσω της εξέτασης της επίδρασης της παραμέτρου LOSS στις καμπύλες BER, για διαφορετικές διαμορφώσεις NB-IoT, αξιολογείται η ανθεκτικότητά τους σε συνθήκες υποβάθμισης καναλιού λόγω αυξανόμενης εξασθένησης. Παράλληλα, διερευνάται η αξιοπιστία μετάδοσης του συστήματος.

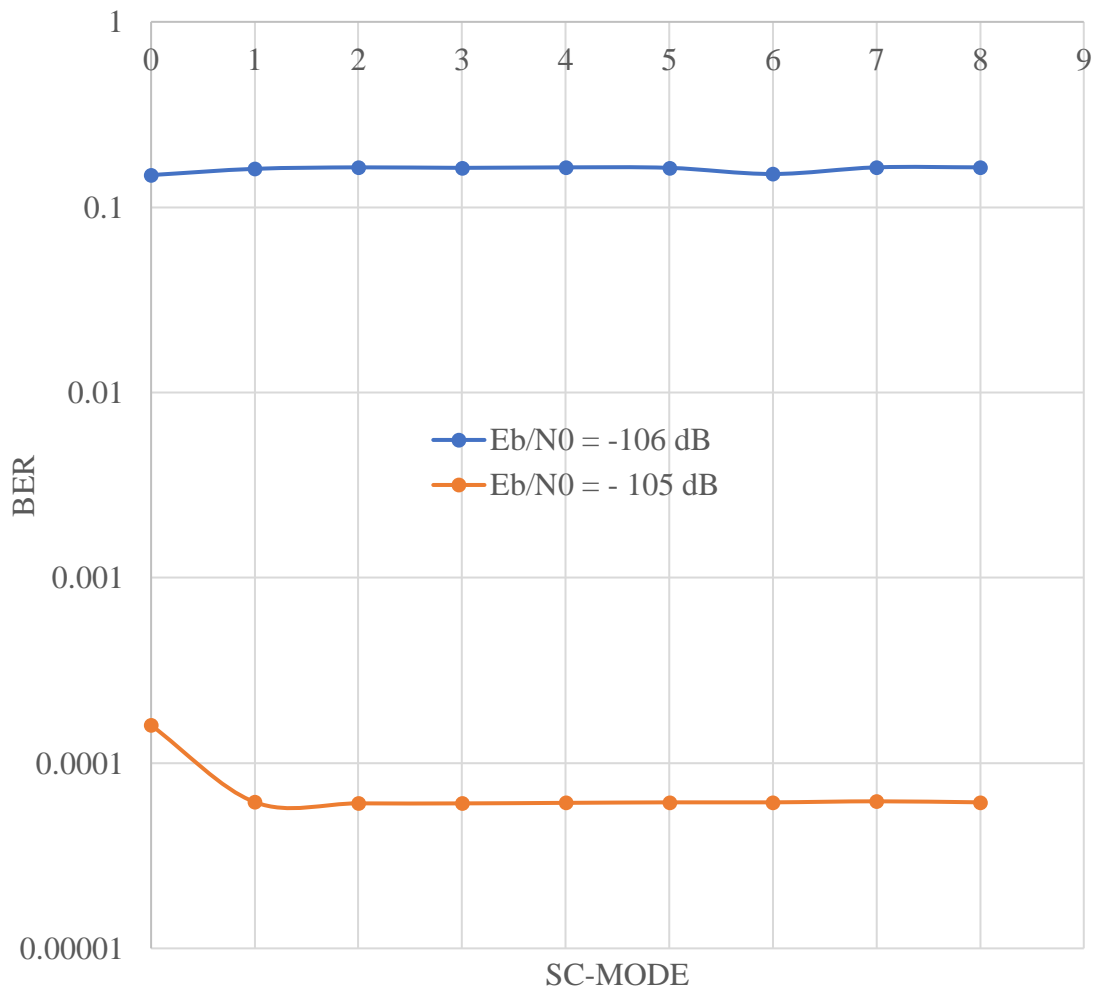
Συγκεκριμένα, στην 3^η ομάδα προσομοιώσεων εξετάζεται η επίδραση των απωλειών διαδρομής στη συμπεριφορά της καμπύλης BER, με χρήση διαμόρφωσης NB-IoT $\pi/2$ -BPSK. Στην 4^η ομάδα προσομοιώσεων ακολουθείται η ίδια διαδικασία, με χρήση διαμόρφωσης rotated $\pi/4$ -QPSK, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αξιοποιούνται σε επόμενο στάδιο για τη συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των δύο διαμορφώσεων ως προς τις απώλειες διαδρομής.

3.11.1 Ανάλυση 1^{ης} ομάδας προσομοιώσεων

SCMode	$E_b/N_0 = -106$ dB	$E_b/N_0 = -105$ Db
0	0,149	1,60E-04
1	0,161	6,16E-05
2	0,164	6,06E-05
3	0,163	6,06E-05
4	0,164	6,10E-05
5	0,163	6,14E-05
6	0,151	6,14E-05
7	0,164	6,22E-05
8	0,164	6,14E-05

Πίνακας 3.7 BER ως προς SCMode για $E_b/N_0 = -106$, -105 για (NB-IoT $\pi/2$ - BPSK)

Στην 1^η ομάδα προσομοιώσεων διερευνάται η επίδραση της παραμέτρου SCMode του NB-IoT στη συμπεριφορά του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) του συστήματος LTE, διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους (LTE: QPSK, NB-IoT: $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB, κανάλι AWGN). Οι διαφορετικές επιλογές SCMode (0–8) αντιστοιχούν σε διαφορετικές single-tone και multi-tone ρυθμίσεις του NB-IoT uplink, μεταβάλλοντας τον αριθμό και την κατανομή των υποφερόντων του NB-IoT σήματος. Για κάθε επιλογή SCMode (0-8) υπολογίστηκε η καμπύλη BER και επιλέχθηκαν δύο αντιπροσωπευτικά σημεία αναφοράς, για $E_b/N_0 = -106$ dB και $E_b/N_0 = -105$ dB.

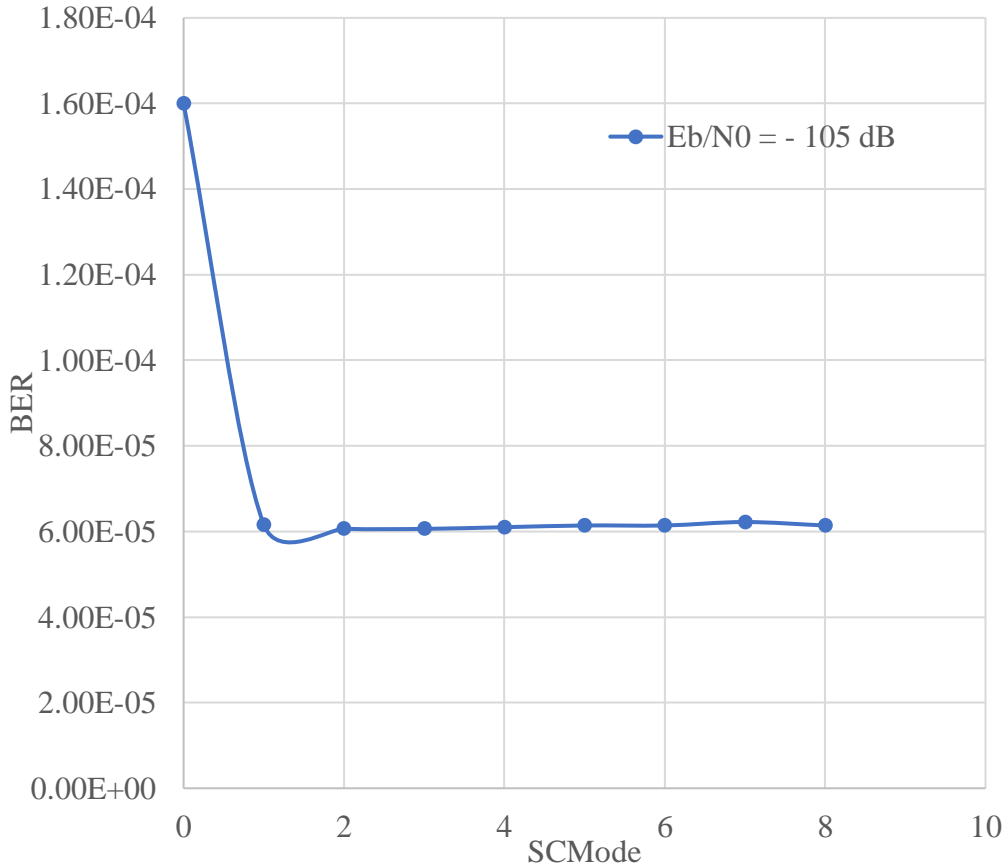


Σχήμα 3.127 BER ως προς SC-MODE για NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB

Γραφική Παράσταση (λογαριθμική κλίμακα)

Η συγκεντρωτική απεικόνιση των τιμών BER σε λογαριθμική κλίμακα δείχνει ότι, ως προς τον άξονα SCMode, η συμπεριφορά του BER παραμένει ουσιαστικά σταθερή και για τα δύο σημεία αναφοράς του E_b/N_0 . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι, υπό συνθήκες μηδενικών απωλειών διαδρομής (LOSS = 0 dB), οι διαφορετικές ρυθμίσεις κατανομής υποφερόντων του NB-IoT δεν επιφέρουν ουσιαστική μεταβολή στη συμπεριφορά του BER του LTE. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι στο σημείο $E_b/N_0 = -106$ dB, οι τιμές BER κυμαίνονται σε στενό εύρος ($\approx 0,149 - 0,164$). Αντίστοιχα, στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB, οι τιμές BER συγκεντρώνονται στην τάξη μεγέθους $10^{-5} - 10^{-4}$, χωρίς να εμφανίζεται συστηματική μεταβολή ως προς το SCMode. Η μετάβαση από $E_b/N_0 = -106$ dB σε -105 dB συνοδεύεται από μεταβολή του BER κατά πολλαπλές τάξεις μεγέθους (από επίπεδα της τάξης 10^{-1} σε 10^{-5}),

γεγονός που αποδίδεται αποκλειστικά στη μεταβολή του E_b/N_0 και όχι στην παράμετρο SCMode. Η σημαντική μείωση του BER κατά τη μετάβαση από $E_b/N_0 = -106$ dB σε -105 dB υποδηλώνει ότι το σύστημα λειτουργεί κοντά στην περιοχή απότομης πτώσης της καμπύλης BER, όπου μικρή βελτίωση του E_b/N_0 οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της αξιοπιστίας της ζεύξης.



Σχήμα 3.128 BER ως προς SC-MODE για NB-IoT $\pi/2$ -BPSK, LOSS = 0 dB

Γραφική Παράσταση (zoom)

Η μεγέθυνση των τιμών στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB επιβεβαιώνει ότι για τα SCMode 0–8, οι τιμές BER συγκεντρώνονται σε ιδιαίτερα στενό εύρος γύρω από 6×10^{-5} , παρουσιάζοντας πρακτικά αμελητέα διαφοροποίηση. Παρατηρείται μεμονωμένη υψηλότερη τιμή για SCMode 0 ($1,60 \times 10^{-4}$), χωρίς όμως να διαμορφώνεται συνολική τάση εξάρτησης από την παράμετρο SCMode. Παρά τις διαφορετικές ρυθμίσεις αξιοποίησης των υποφερόντων του NB-IoT uplink σήματος, η συνολική συμπεριφορά του BER παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Συνεπώς, στο εξεταζόμενο σενάριο και υπό συνθήκες μηδενικών απωλειών διαδρομής, δεν τεκμηριώνεται ουσιαστική

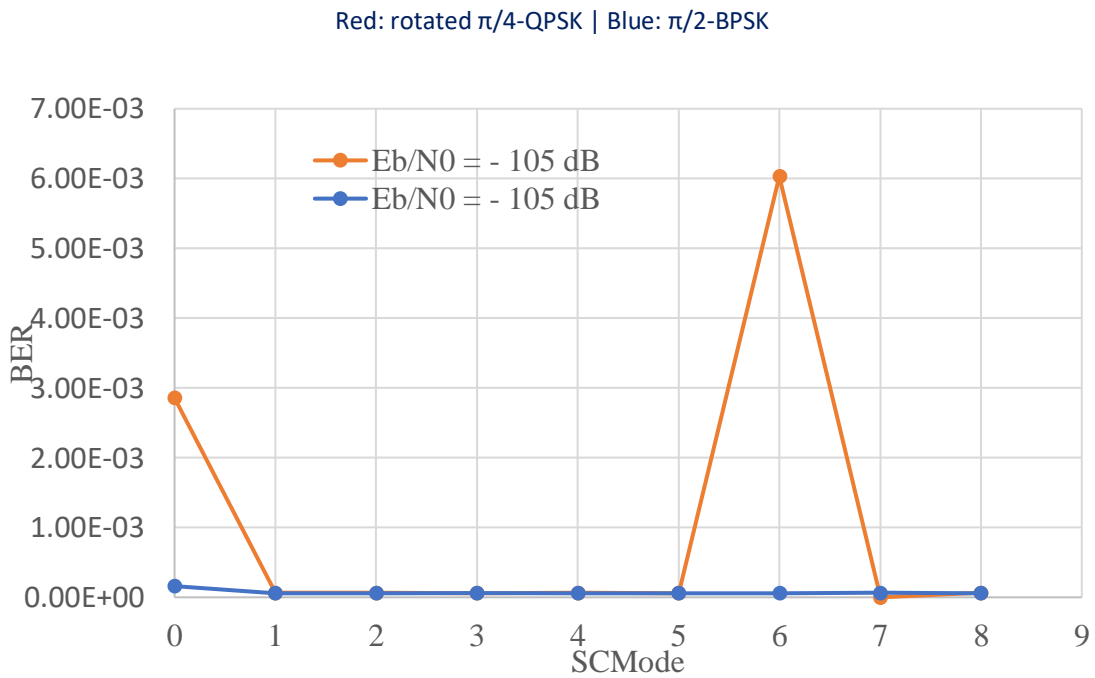
εξάρτηση της απόδοσης της ζεύξης LTE από την παραμετροποίηση SCMode του παρεμβάλλοντος NB-IoT σήματος.

3.11.2 Ανάλυση 2^{ης} ομάδας προσομοιώσεων

SCMode	$E_b/N_0 = -106 \text{ dB}$	$E_b/N_0 = -105 \text{ dB}$
0	0,202	2,86E-03
1	0,164	6,20E-05
2	0,163	6,24E-05
3	0,164	6,16E-05
4	0,162	6,28E-05
5	0,164	6,03E-05
6	0,164	6,03E-03
7	0,163	6,15E-05
8	0,164	6,36E-05

Πίνακας 3.8 BER ως προς SCMode για NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK

Στη 2^η ομάδα εξετάζεται η επίδραση της διαμόρφωσης NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK στη συμπεριφορά του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) για LTE: QPSK, LOSS= 0 dB, AWGN.

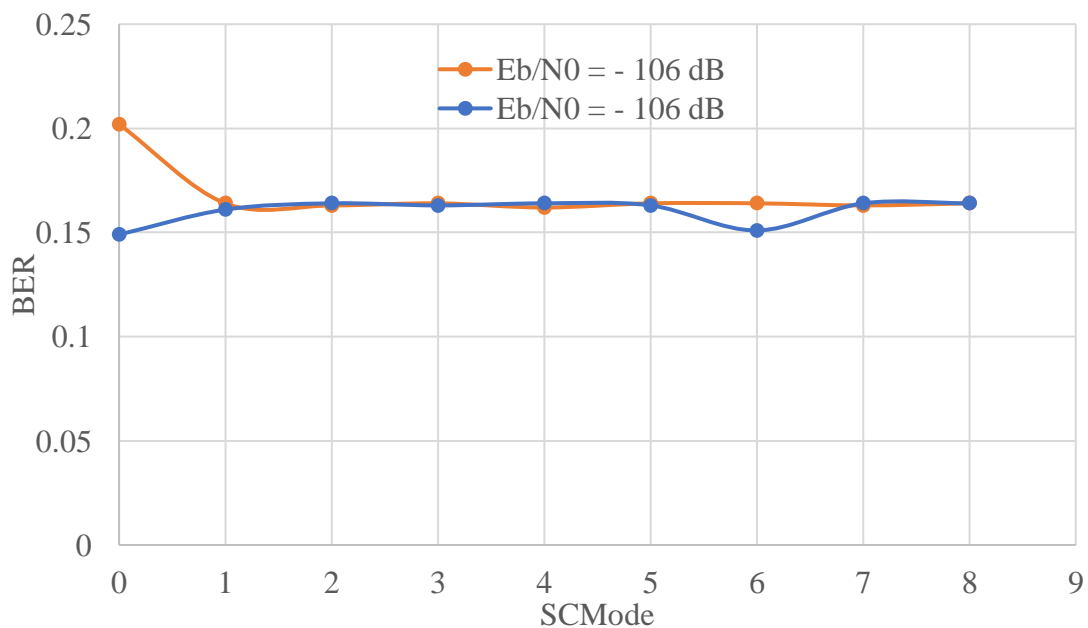


Σχήμα 3.129 BER ως προς SC-MODE για $E_b/N_0 = -105 \text{ dB}$ (rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)

Σημείο B: $E_b/N_0 = -105$ dB

Η συγκριτική ανάλυση στο $E_b/N_0 = -105$ dB δείχνει ότι για τα περισσότερα SCMode (1–5, 7, 8) οι δύο διαμορφώσεις παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση (με τιμές BER της τάξης 10^{-5}). Ωστόσο, στα SCMode 0 και 6 παρατηρούνται έντονες αποκλίσεις (αιχμές), κατά τη χρήση της διαμόρφωσης rotated $\pi/4$ -QPSK, όπου το BER αυξάνεται κατά 1–2 τάξεις μεγέθους σε σχέση με την $\pi/2$ -BPSK. Συγκεκριμένα, στο SCMode 6 το BER αυξάνεται από 6×10^{-5} ($\pi/2$ -BPSK) σε 6×10^{-3} (rotated $\pi/4$ -QPSK), δηλαδή κατά περίπου δύο τάξεις μεγέθους. Αντίστοιχη τάση, μικρότερης έντασης, παρατηρείται και στο SCMode 0, όπου καταγράφεται υψηλότερη τιμή BER σε σχέση με τις υπόλοιπες ρυθμίσεις, γεγονός που οδηγεί σε επιδείνωση της απόδοσης της ζεύξης.

Ωστόσο, δεν προκύπτει γενικευμένη και συστηματική τάση εξάρτησης από τη διαμόρφωση στο σύνολο των επιλογών SCMode. Η εμφάνιση των αποκλίσεων υποδηλώνει ότι η διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK παρουσιάζει αυξημένη ευαισθησία για συγκεκριμένες ρυθμίσεις του NB-IoT, οι οποίες μεταβάλλουν τη φασματική κατανομή του παρεμβάλλοντος σήματος, χωρίς όμως να μεταβάλλεται η συνολική τάση της απόδοσης. Συνεπώς, στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB δεν τεκμηριώνεται συνολική διαφοροποίηση της απόδοσης του LTE λόγω αλλαγής της διαμόρφωσης NB-IoT, παρά την εμφάνιση μεμονωμένων, έντονων αποκλίσεων.



Σχήμα 3.130 BER ως προς SC-MODE για $E_b/N_0 = -106$ dB (rotated $\pi/4$ -QPSK, LOSS = 0 dB)

Σημείο A: $E_b/N_0 = -106$ dB

Η συγκριτική γραφική παράσταση στο $E_b/N_0 = -106$ dB δείχνει ότι, για τα περισσότερα SCMode (1–5,7,8), οι δύο διαμορφώσεις NB-IoT ($\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK) παρουσιάζουν ταυτόσημη συμπεριφορά, με τιμές BER συγκεντρωμένες γύρω από το 0,160 γεγονός που αντιστοιχεί σε λειτουργία της ζεύξης σε δυσμενή περιοχή. Παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση στο SCMode 0, όπου η χρήση rotated $\pi/4$ -QPSK οδηγεί σε αύξηση του BER από 0,149 σε 0,202. Παρότι η διαφορά αυτή είναι αριθμητικά εμφανής, δεν συνοδεύεται από συστηματική μεταβολή σε όλο το εύρος των επιλογών SCMode. Συνεπώς, στο $E_b/N_0 = -106$ dB δεν τεκμηριώνεται γενικευμένη διαφοροποίηση της απόδοσης του LTE λόγω αλλαγής της διαμόρφωσης NB-IoT.

Τελικό συμπέρασμα για την 2^η ομάδα προσομοιώσεων

Συνοψίζοντας, για τη 2η ομάδα προσομοιώσεων, η συγκριτική αξιολόγηση των δύο γραφικών παραστάσεων δείχνει ότι, για $E_b/N_0 = -106$ dB και -105 dB, η μετάβαση της διαμόρφωσης NB-IoT από $\pi/2$ -BPSK σε rotated $\pi/4$ -QPSK δεν επιφέρει συνολικά ουσιαστική διαφοροποίηση στη συμπεριφορά BER του LTE για LOSS = 0 dB.

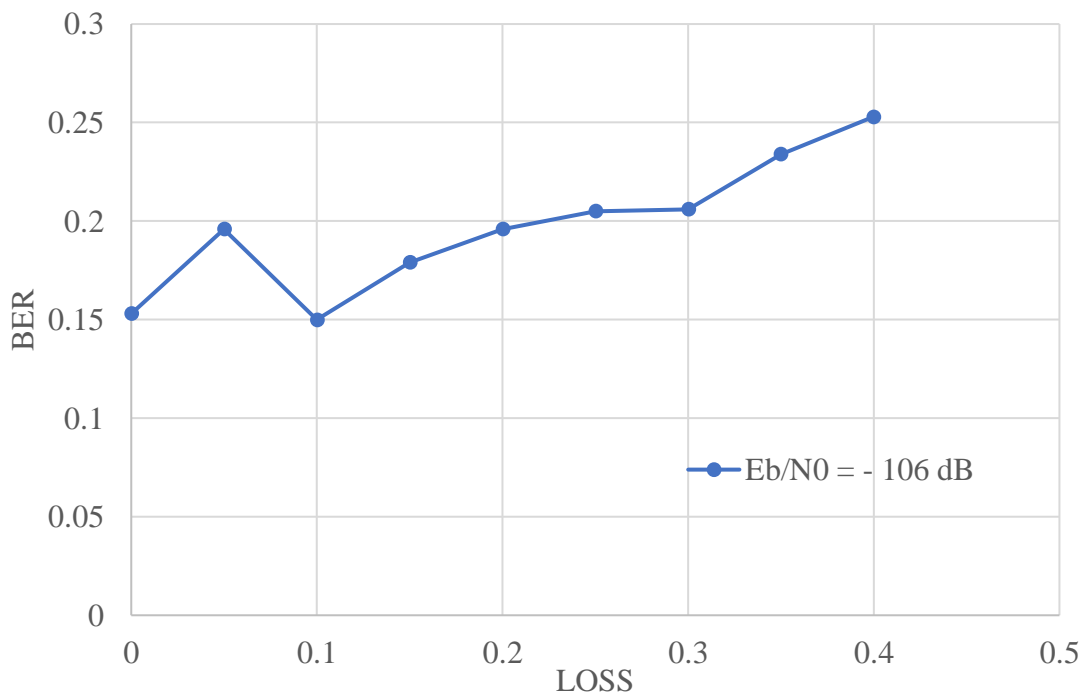
Παρά τις μεμονωμένες αποκλίσεις σε συγκεκριμένα SCMode, δεν προκύπτει συνολική τάση συστηματικής βελτίωσης ή επιδείνωσης της απόδοσης. Συνεπώς, υπό συνθήκες καναλιού χωρίς απώλειες (LOSS=0 dB), η επιλογή διαμόρφωσης NB-IoT δεν επηρεάζει ουσιαστικά την αξιοπιστία μετάδοσης του LTE.

3.11.3 Ανάλυση 3^{ης} ομάδας προσομοιώσεων

LOSS(dB)	$E_b/N_0 = -106$ dB	$E_b/N_0 = -105$ dB
0	0,153	1,61E-04
0,05	0,196	6,97E-04
0,1	0,150	7,82E-04
0,15	0,179	1,22E-03
0,2	0,196	2,34E-03
0,25	0,205	2,10E-03
0,3	0,206	2,40E-03
0,35	0,234	3,90E-03
0,4	0,253	4,70E-03

Πίνακας 3.9 BER ως προς LOSS για $E_b/N_0 = -106, -105$ (NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)

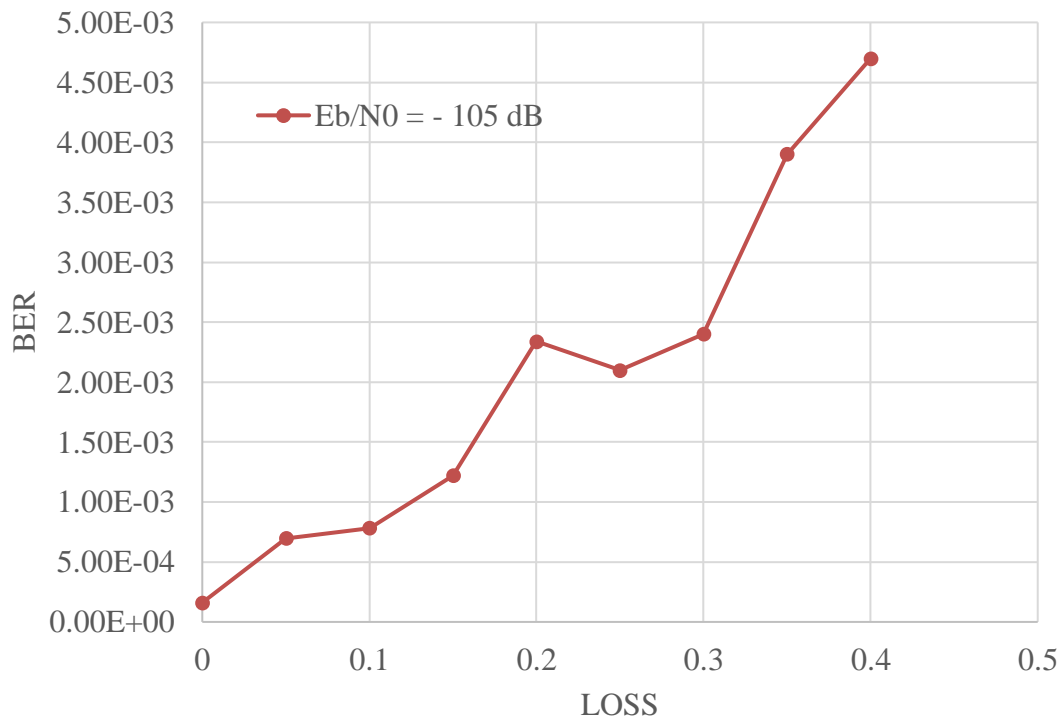
Στην 3^η ομάδα προσομοιώσεων διερευνάται η επίδραση των απωλειών διαδρομής (LOSS) στη συμπεριφορά του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) του συστήματος LTE, σε συνθήκες συνύπαρξης με NB-IoT που χρησιμοποιεί διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK. Η παράμετρος LOSS μεταβάλλεται στο εύρος 0 έως 0,40 με βήμα 0,05. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, επιλέγονται δύο αντιπροσωπευτικά σημεία αναφοράς της καμπύλης BER (A και B), τα οποία αντιστοιχούν στις τιμές $E_b/N_0 = -106$ dB και $E_b/N_0 = -105$ dB.



Σχήμα 3.131 Μεταβολή BER ως προς LOSS για $E_b/N_0 = -106$ dB (NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)

Σημείο A: $E_b/N_0 = -106$ dB

Παρατηρείται η μεταβολή του BER στο σημείο A καθώς αυξάνονται οι απώλειες διαδρομής (LOSS). Συγκεκριμένα, στο $E_b/N_0 = -106$ το BER αυξάνεται συνολικά από 0,153 σε 0,253. Η συμπεριφορά δεν είναι αυστηρά μονοτονική στα πρώτα βήματα, καθώς παρατηρείται αρχικά αύξηση ($0 \rightarrow 0,05$) και στη συνέχεια μικρή μείωση στο 0,10. Ωστόσο, από $LOSS \geq 0,15$ κι έπειτα διαμορφώνεται σαφής ανοδική τάση. Συνολικά, από $LOSS = 0$ έως $LOSS = 0,40$ το BER αυξάνεται κατά + 0,10 (μεταβολή + 0,100). Παρουσιάζονται μικρές τοπικές διακυμάνσεις, χωρίς να αναιρείται η συνολική ανοδική τάση του BER με την αύξηση του LOSS.



Σχήμα 3.132 Μεταβολή BER ως προς LOSS για $E_b/N_0 = -105$ dB (NB-IoT $\pi/2$ -BPSK)

Σημείο B: $E_b/N_0 = -105$ dB

Στο σημείο αυτό, η επίδραση του LOSS είναι σαφώς εντονότερη. Η αύξηση του BER καθώς αυξάνεται το LOSS είναι σχεδόν συνεχής, με μια μικρή μη-μονοτονική μεταβολή στο $LOSS = 0,25$. Συγκεκριμένα, η μεταβολή από $1,61 \times 10^{-4}$ ($LOSS = 0$) σε $4,70 \times 10^{-3}$ ($LOSS=0,40$) αντιστοιχεί σε περίπου 29πλάσια αύξηση του BER, γεγονός που συνιστά σαφή επιδείνωση της απόδοσης της ζεύξης καθώς αυξάνονται οι απώλειες διαδρομής. Σε σύγκριση με το σημείο A ($0,153 \rightarrow 0,253$, μεταβολή $+0,100$), το σημείο B παρουσιάζει εντονότερη πολλαπλασιαστική μεταβολή του BER, ενώ το σημείο A μεταβάλλεται αριθμητικά και παραμένει σε επίπεδα της τάξης του 10^{-1} . Συνεπώς, στην περιοχή $E_b/N_0 = -105$ dB το BER εμφανίζει μεγαλύτερη μεταβολή με την αύξηση του LOSS.

Συνοψίζοντας, για τη 3η ομάδα προσομοιώσεων παρατηρείται ότι η αύξηση της παραμέτρου LOSS οδηγεί σε συστηματική επιδείνωση της απόδοσης της ζεύξης LTE, καθώς το BER αυξάνεται και στα δύο σημεία αναφοράς ($E_b/N_0 = -106$ dB και -105 dB). Παρά τις μικρές τοπικές διακυμάνσεις σε χαμηλές τιμές LOSS, η συνολική τάση είναι ανοδική, με την επίδραση των απωλειών διαδρομής στο BER να είναι αναλογικά

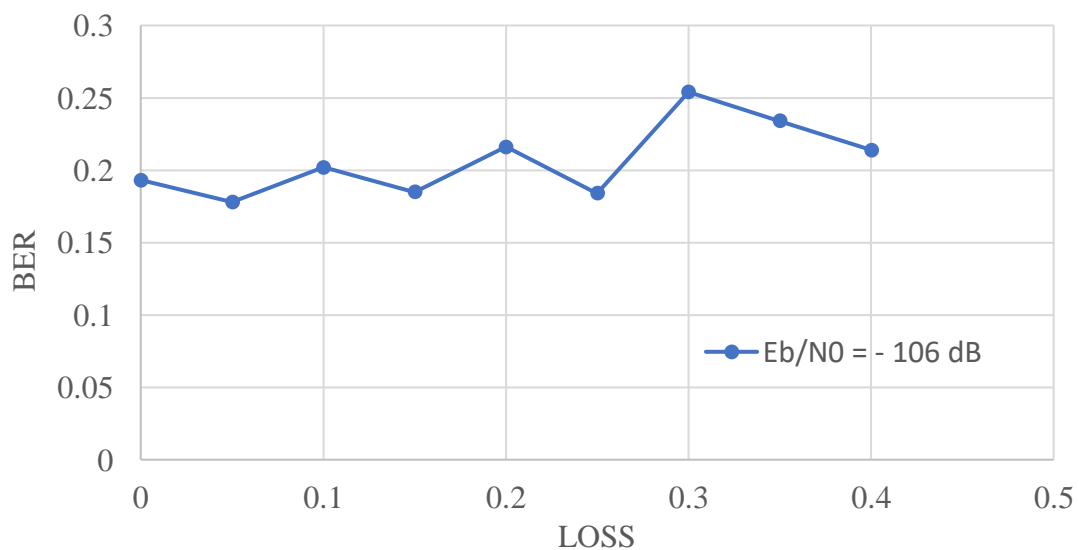
εντονότερη στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB. Συνεπώς, οι απώλειες διαδρομής αποτελούν τον κυρίαρχο παράγοντα υποβάθμισης της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις χωρίς απώλειες.

3.11.4 Ανάλυση 4^{ης} ομάδας προσομοιώσεων

LOSS	$E_b/N_0 = -106$ dB	$E_b/N_0 = -105$ dB
0	0,193	1,40E-04
0,05	0,178	3,10E-04
0,1	0,202	7,50E-04
0,15	0,185	9,20E-04
0,2	0,216	2,25E-03
0,25	0,184	2,83E-03
0,3	0,254	2,92E-03
0,35	0,234	6,29E-03
0,4	0,214	1,06E-02

Πίνακας 3.10 BER ως προς LOSS για $E_b/N_0 = -106, -105$ (NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)

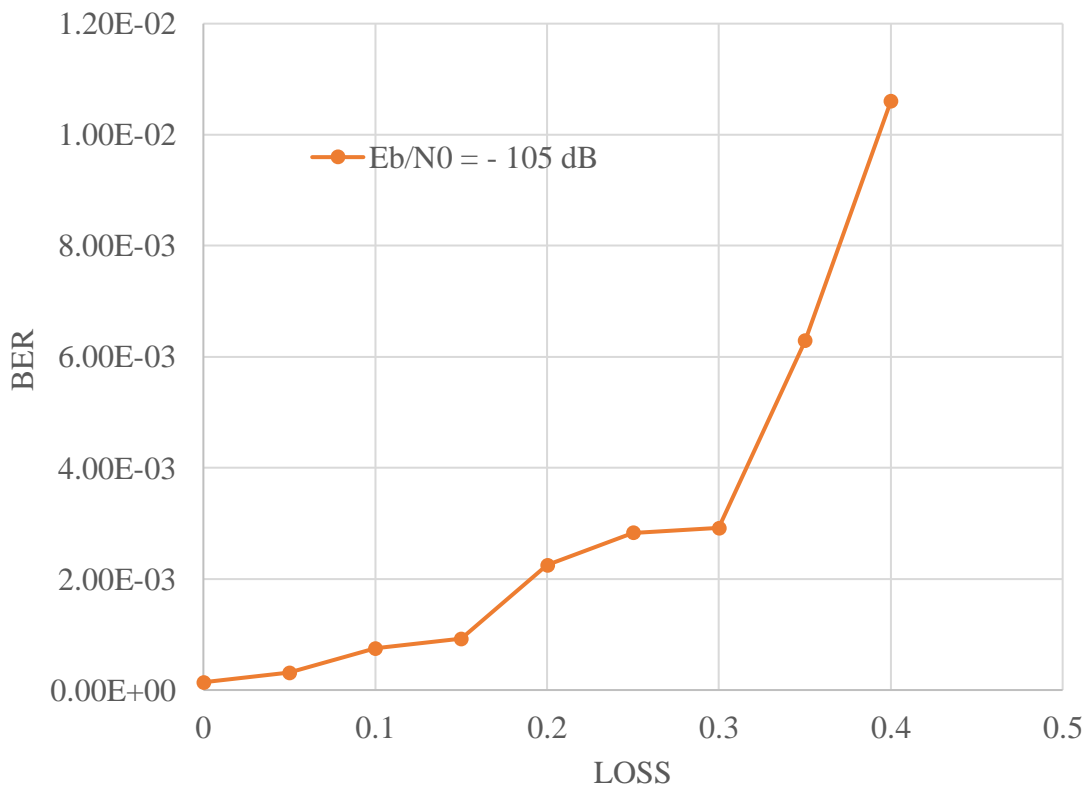
Στην 4^η ομάδα προσομοιώσεων εξετάζεται εκ νέου η επίδραση των απωλειών διαδρομής (LOSS) στη συμπεριφορά του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) του συστήματος LTE, υπό συνθήκες συνύπαρξης με NB-IoT που χρησιμοποιεί διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK. Στη συνέχεια πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των δύο διαμορφώσεων NB-IoT ($\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK) υπό αυξανόμενες απώλειες διαδρομής, στα δύο σημεία λειτουργίας $E_b/N_0 = -106$ dB και -105 dB, ώστε να διερευνηθεί αν η επιλογή διαμόρφωσης του NB-IoT επηρεάζει τον βαθμό υποβάθμισης της ζεύξης υπό αυξανόμενες απώλειες διαδρομής.



Σχήμα 3.133 BER ως προς LOSS στο $E_b/N_0 = -106$ dB (NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK)

Σημείο A: $E_b/N_0 = -106$ dB

Παρατηρείται ότι η αύξηση των απωλειών διαδρομής από $LOSS = 0$ έως $LOSS = 0,40$ οδηγεί σε γενική αύξηση του BER, με σαφέστερη επιβάρυνση για $LOSS \geq 0,20$. Η μεταβολή δεν είναι αυστηρά μονοτονική και παραμένει εντός της ίδιας τάξης μεγέθους σε όλο το εξεταζόμενο εύρος τιμών, ενώ η καμπύλη BER ως προς το $LOSS$ εμφανίζει ομαλή μεταβολή με ήπιες τοπικές διακυμάνσεις, χωρίς να παρατηρείται εκθετική αύξηση. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει προοδευτική υποβάθμιση της αξιοπιστίας μετάδοσης λόγω αύξησης των απωλειών διαδρομής. Συνεπώς, η διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK δεν εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένη ευαισθησία στις απώλειες διαδρομής στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 3.134 BER ως προς $LOSS$ στο $E_b/N_0 = -105$ dB για NB-IoT rotated $\pi/4$ -QPSK

Σημείο B: $E_b/N_0 = -105$ dB

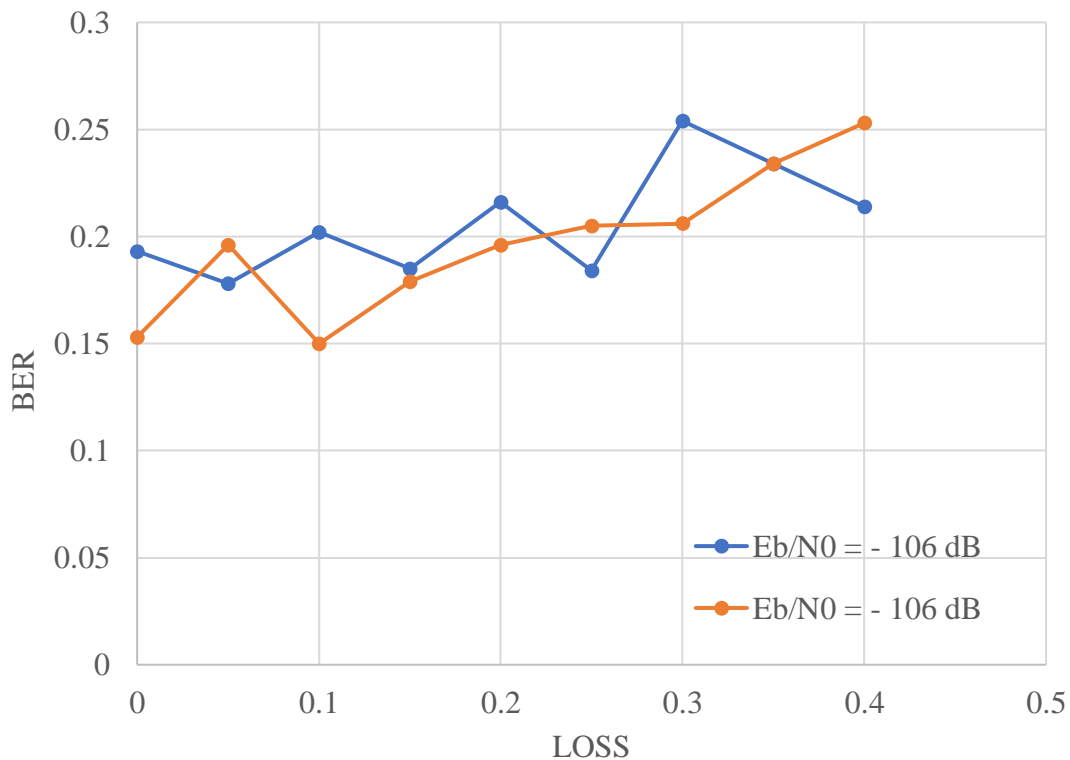
Παρατηρείται ότι οι τιμές BER αυξάνονται αισθητά με την αύξηση του $LOSS$, από $1,40 \times 10^{-4}$ σε $1,06 \times 10^{-2}$, δηλαδή περίπου κατά 75 φορές. Για μικρές τιμές $LOSS$ (0–

0,10), το BER παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, της τάξης του 10^{-4} . Από $LOSS = 0,15$ παρατηρείται σαφής επιτάχυνση της αύξησης, ενώ για $LOSS \geq 0,30$ η καμπύλη BER εμφανίζει εντονότερη ανοδική κλίση. Ειδικότερα για $LOSS = 0,35$ και κυρίως $LOSS = 0,40$ καταγράφεται απότομη ανύψωση της καμπύλης.

Σε αντίθεση με το σημείο -106 dB, όπου η μεταβολή είναι ηπιότερη και παραμένει εντός της ίδιας τάξης μεγέθους, στο -105 dB, η καμπύλη BER παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά με εμφανώς εντονότερη αύξηση για υψηλές τιμές $LOSS$. Συγκεκριμένα, για $LOSS \geq 0,30$, και ιδίως καθώς προσεγγίζει το $0,40$, το BER μεταβαίνει από τάξη μεγέθους 10^{-4} σε τάξη 10^{-2} , γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη ευαισθησία της ζεύξης στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας.

Συνοψίζοντας, η αύξηση των απωλειών διαδρομής στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB οδηγεί σε έντονη αύξηση του BER, για υψηλές τιμές $LOSS$. Συνεπώς, το σύστημα εμφανίζει αυξημένη ευαισθησία στις απώλειες σε σύγκριση με το σημείο -106 dB στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας.

Red: $\pi/2$ -BPSK | Blue: rotated $\pi/4$ QPSK



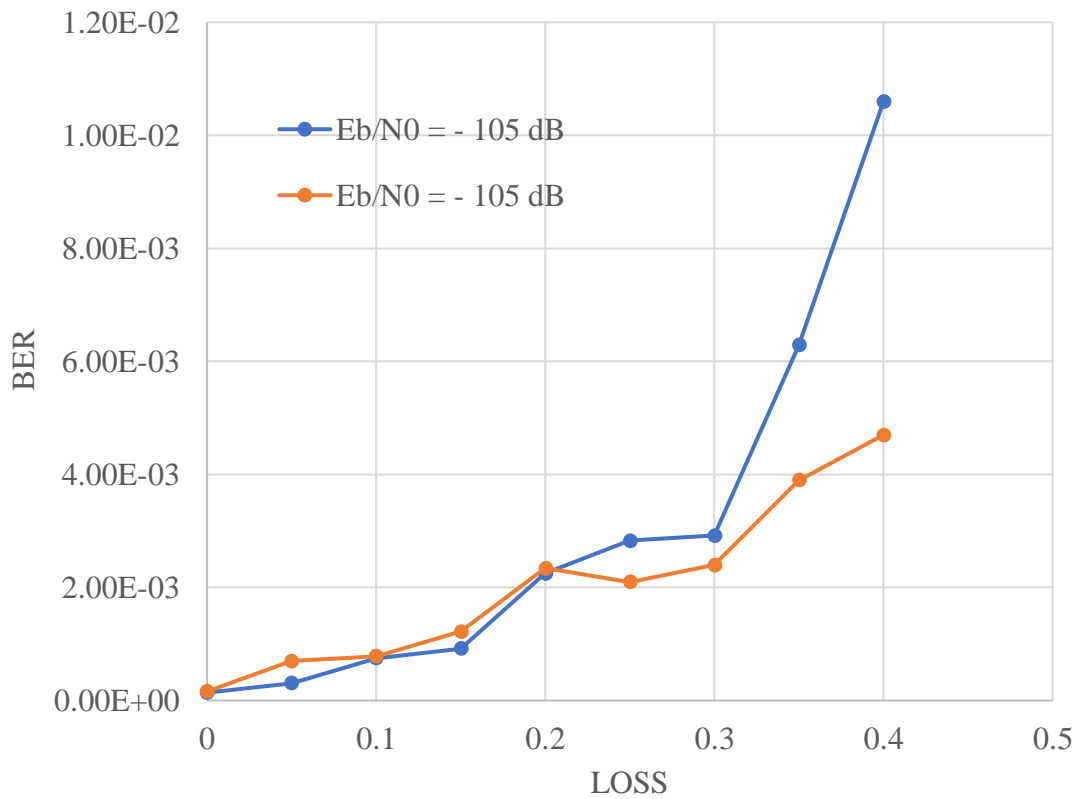
Σχήμα 3.135 BER ως προς $LOSS$ στο $E_b/N_0 = -106$ dB για NB-IoT $\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK

Η γραφική παράσταση απεικονίζει τη μεταβολή του BER για τις δύο διαμορφώσεις NB-IoT, $\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK, ως συνάρτηση της παραμέτρου LOSS στο σημείο $E_b/N_0 = -106$ dB. Και στις δύο περιπτώσεις, οι καμπύλες παρουσιάζουν μικρές τοπικές διακυμάνσεις και δεν είναι αυστηρά μονοτονικές, ωστόσο εμφανίζουν συνολικά ανοδική τάση με την αύξηση του LOSS. Δεν παρατηρείται απότομη ή εκθετική απόκλιση, ενώ οι τιμές BER παραμένουν σε επίπεδα της τάξης του 10^{-1} . Για τον λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η επιμέρους και συστηματικότερη ανάλυση της συμπεριφοράς τους.

Για υψηλό $LOSS = 0,40$ καταγράφονται τιμές ίσες με 0,253 για την $\pi/2$ -BPSK και 0,214 για την rotated $\pi/4$ -QPSK. Η διαφορά δεν είναι σημαντικές σε όλο το εύρος LOSS, συνεπώς δεν τεκμηριώνεται σαφής υπεροχή κάποιας διαμόρφωσης. Εξετάζοντας τη συνολική μεταβολή BER στο εύρος LOSS από 0 έως 0,40, προκύπτει ότι για την $\pi/2$ -BPSK (πίνακας τιμών 3^{ης} ομάδας προσομοιώσεων) η αύξηση είναι 0,100 ενώ για την rotated $\pi/4$ -QPSK (πίνακας τιμών 2^{ης} ομάδας προσομοιώσεων) η αύξηση είναι 0,021. Ο ρυθμός μεταβολής $\Delta BER/\Delta LOSS$ είναι 0,25 και 0,0525 αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει ότι η αύξηση του BER είναι περίπου 4,8 φορές μεγαλύτερη στην περίπτωση της $\pi/2$ -BPSK. Συνεπώς, στο εξεταζόμενο εύρος τιμών LOSS για $E_b/N_0 = -106$ dB, η rotated $\pi/4$ -QPSK παρουσιάζει μικρότερη επιβάρυνση του BER ως προς την αύξηση των απωλειών διαδρομής. Ωστόσο, η ανάλυση μεταβολής του BER δείχνει ότι η 4^η ομάδα προσομοιώσεων (rotated $\pi/4$ -QPSK) εμφανίζει μη μονοτονική μεταβολή με εντονότερες τοπικές αυξομειώσεις και έντονη αιχμή γύρω στο $LOSS = 0,30$, ενώ η 3^η ομάδα προσομοιώσεων ($\pi/2$ -BPSK) παρουσιάζει πιο ομαλή και σταδιακή μεταβολή, ιδιαίτερα για υψηλότερες τιμές (0,30–0,40).

Συνολικά, στο σημείο $E_b/N_0 = -106$ dB, η διαμόρφωση rotated $\pi/4$ -QPSK παρουσιάζει μικρότερη συνολική μεταβολή του BER ως προς την αύξηση του LOSS σε σύγκριση με την $\pi/2$ -BPSK. Ωστόσο, η διαφοροποίηση αυτή είναι περιορισμένη και δεν μεταβάλλει την τάξη μεγέθους του BER, το οποίο παραμένει σε επίπεδα της τάξης του 10^{-1} και για τις δύο περιπτώσεις. Δεδομένου ότι το σύστημα λειτουργεί σε ήδη υποβαθμισμένη περιοχή, η μεταξύ τους αριθμητική διαφορά δεν καθίσταται σημαντική. Ως εκ τούτου δεν τεκμηριώνεται σαφής υπεροχή ή αυξημένη ανθεκτικότητα κάποιας διαμόρφωσης στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Η επιλογή διαμόρφωσης δεν διαφοροποιεί

ουσιαστικά τη συμπεριφορά του BER υπό αυξανόμενες απώλειες διαδρομής στο $E_b/N_0 = -106$ dB.



Σχήμα 3.136 BER ως προς LOSS στο $E_b/N_0 = -105$ dB για NB-IoT $\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK

Η γραφική παράσταση απεικονίζει τη συγκριτική μεταβολή του BER ως προς το LOSS για τις δύο διαμορφώσεις NB-IoT, $\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK, στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB. Για το σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται σαφής ανοδική τάση του BER με την αύξηση του LOSS, γεγονός που αντιστοιχεί σε μείωση της αξιοπιστίας μετάδοσης καθώς το κανάλι καθίσταται δυσμενέστερο. Για χαμηλές τιμές απωλειών ($LOSS = 0$ έως $0,20$), οι δύο καμπύλες παρουσιάζουν συγκρίσιμη συμπεριφορά, με πολύ κοντινές τιμές BER που παραμένουν στην ίδια τάξη μεγέθους (10^{-4} έως 10^{-3}).

Ωστόσο, για υψηλές τιμές ($LOSS \geq 0,30$), η rotated $\pi/4$ -QPSK εμφανίζει εντονότερη επιδείνωση σε σχέση με την $\pi/2$ -BPSK. Ειδικότερα, στο $LOSS = 0,40$ η τιμή του BER για την $\pi/4$ -QPSK ανέρχεται σε $1,06 \times 10^{-2}$, ενώ για την $\pi/2$ -BPSK σε $4,70 \times 10^{-3}$. Η

διαφοροποίηση αυτή υποδηλώνει μεγαλύτερη επιβάρυνση της απόδοσης στην περίπτωση της $\pi/4$ -QPSK υπό συνθήκες έντονης εξασθένησης.

Η συνολική μεταβολή στο εύρος $\text{LOSS} = 0$ έως $0,40$ επιβεβαιώνει τη διαφοροποίηση που παρατηρείται. Συγκεκριμένα, στην 3^η ομάδα προσομοιώσεων το BER μεταβάλλεται από $1,61 \times 10^{-4}$ σε $4,70 \times 10^{-3}$ (περίπου 29πλάσια αύξηση), ενώ η 4^η ομάδα από $1,40 \times 10^{-4}$ σε $1,06 \times 10^{-2}$ (περίπου 76πλάσια αύξηση). Η σαφώς μεγαλύτερη πολλαπλασιαστική αύξηση στην 4^η ομάδα προσομοιώσεων καταδεικνύει αυξημένη ευαισθησία της rotated $\pi/4$ -QPSK στις απώλειες διαδρομής στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB. Συνολικά, στο $E_b/N_0 = -105$ dB οι δύο διαμορφώσεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά σε χαμηλές απώλειες, ενώ για υψηλό LOSS η rotated $\pi/4$ -QPSK οδηγεί σε εντονότερη αύξηση του BER και τελικά σε χειρότερη επίδοση σε σχέση με την $\pi/2$ -BPSK.

Τελικό συμπέρασμα: Στο σημείο $E_b/N_0 = -106$ dB οι διαφορές είναι ηπιότερες. Η rotated $\pi/4$ -QPSK εμφανίζει ελαφρώς μικρότερη αριθμητική μεταβολή, όμως δεν μεταβάλλεται η τάξη μεγέθους του BER. Δεν προκύπτει ουσιαστική διαφοροποίηση της συμπεριφοράς, καθώς το σημείο αυτό βρίσκεται ήδη σε υποβαθμισμένη περιοχή λειτουργίας, όπου το BER είναι υψηλό και για τις δύο περιπτώσεις.

Στο κρίσιμο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB, η διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK εμφανίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε υψηλές τιμές LOSS . Συγκεκριμένα, η συνολική αύξηση του BER από $\text{LOSS} = 0$ έως $0,40$ είναι $29 \times$ για την $\pi/2$ -BPSK και $76 \times$ για την rotated $\pi/4$ -QPSK. Στην περιοχή $\text{LOSS} \geq 0,30$, η $\pi/4$ -QPSK παρουσιάζει εντονότερη και μη γραμμική αύξηση του BER. Άρα, σε συνθήκες αυξημένης εξασθένησης καναλιού, η $\pi/2$ -BPSK διατηρεί χαμηλότερο ρυθμό επιδείνωσης της απόδοσης. Συνεπώς, στο σημείο -105 dB, η $\pi/2$ -BPSK αναδεικνύεται ως η καταλληλότερη επιλογή διαμόρφωσης υπό απώλειες διαδρομής.

Η σύγκριση των δύο διαμορφώσεων δείχνει ότι η $\pi/2$ -BPSK παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε συνθήκες αυξημένων απωλειών διαδρομής, ιδιαίτερα στο λειτουργικό σημείο -105 dB, ενώ η rotated $\pi/4$ -QPSK εμφανίζει εντονότερη μη γραμμική αύξηση του BER για υψηλές τιμές LOSS . Συνεπώς, για περιβάλλοντα με αυξημένη εξασθένηση καναλιού, η $\pi/2$ -BPSK αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή διαμόρφωσης NB-IoT.

Συνολικά, η επιλογή διαμόρφωσης NB-IoT δεν μεταβάλλει γενικευμένα τη συμπεριφορά του LTE ως προς τον ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) συναρτήσει των απωλειών διαδρομής. Ωστόσο, μπορεί να επηρεάζει τον ρυθμό επιδείνωσης της απόδοσης για υψηλές τιμές LOSS. Υπό συνθήκες έντονης εξασθένησης καναλιού, η $\pi/2$ -BPSK εμφανίζει συγκριτικά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, ιδιαίτερα στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB και αποτελεί καταλληλότερη επιλογή διαμόρφωσης.

3.12 Συνολικό συμπέρασμα προσομοιώσεων

Ανακεφαλαιώνοντας, η ανάλυση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων ομάδων προσομοιώσεων, μέσω των συγκεντρωτικών γραφικών παραστάσεων BER, οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων SCMode, της διαμόρφωσης του NB-IoT και των απωλειών διαδρομής (LOSS) στη συμπεριφορά της ζεύξης ανόδου LTE (uplink).

Αρχικά, από την 1^η και 2^η ομάδα προσομοιώσεων προκύπτει ότι, σε συνθήκες ιδανικού καναλιού (LOSS = 0 dB), η μεταβολή της παραμέτρου SCMode καθώς και η αλλαγή της διαμόρφωσης του NB-IoT ($\pi/2$ -BPSK ή rotated $\pi/4$ -QPSK) δεν επιφέρουν ουσιαστική διαφοροποίηση στη συμπεριφορά BER του LTE. Οι καμπύλες BER παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες, καταδεικνύοντας ότι η επίδραση του NB-IoT είναι περιορισμένη υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες. Παρά τις μεμονωμένες αποκλίσεις που παρατηρούνται σε συγκεκριμένες τιμές SCMode (π.χ. SCMode 6), δεν διαμορφώνεται συνολική και συστηματική τάση μεταβολής της απόδοσης του συστήματος. Οι διαφορετικές single-tone και multi-tone SCMode ρυθμίσεις του NB-IoT, καθώς και η διαφορετική αξιοποίηση των υποφερόντων του uplink σήματος, επιφέρουν διαφοροποιήσεις στη φασματική κατανομή του NB-IoT σήματος, χωρίς όμως να οδηγούν σε ουσιαστική διαφοροποίηση της συνολικής συμπεριφοράς του BER.

Στη συνέχεια, για την 3^η ομάδα προσομοιώσεων, η παράμετρος LOSS αποτελεί καθοριστικό παράγοντα υποβάθμισης της απόδοσης της ζεύξης. Η αύξηση των απωλειών διαδρομής οδηγεί σε γενική αύξηση του BER και στα δύο σημεία λειτουργίας ($E_b/N_0 = -106$ dB και -105 dB), επιβεβαιώνοντας ότι η εξασθένηση του καναλιού επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία μετάδοσης. Η επίδραση αυτή είναι εντονότερη στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB, όπου παρατηρείται σημαντική πολλαπλασιαστική αύξηση του BER, γεγονός που καταδεικνύει αυξημένη ευαισθησία της ζεύξης στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας.

Τέλος, μέσω της 4^{ης} ομάδας προσομοιώσεων πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση των δύο διαμορφώσεων NB-IoT υπό συνθήκες αυξανόμενων απωλειών διαδρομής. Στο σημείο $E_b/N_0 = -106$ dB, και οι δύο διαμορφώσεις λειτουργούν σε περιοχή υψηλού BER (τάξης 10^{-1}), με αποτέλεσμα οι διαφορές να είναι κυρίως αριθμητικές και να μην οδηγούν σε ουσιαστική διαφοροποίηση της συνολικής απόδοσης της ζεύξης. Αντιθέτως, στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB, παρατηρείται σαφέστερη διαφοροποίηση για υψηλές τιμές LOSS ($LOSS \geq 0,30$), όπου η rotated $\pi/4$ -QPSK παρουσιάζει εντονότερη αύξηση του BER σε σχέση με την $\pi/2$ -BPSK. Η συμπεριφορά αυτή καταδεικνύει μεγαλύτερη ευαισθησία της rotated $\pi/4$ -QPSK στις απώλειες διαδρομής και, κατ' επέκταση, μειωμένη ανθεκτικότητα σε συνθήκες έντονης εξασθένησης στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, σε απουσία απωλειών διαδρομής, η επιλογή διαμόρφωσης και η παραμετροποίηση του NB-IoT δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά του BER του LTE. Ωστόσο, σε συνθήκες υποβάθμισης του καναλιού, η παράμετρος LOSS αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα που καθορίζει την αξιοπιστία της ζεύξης, ενώ η επιλογή διαμόρφωσης επηρεάζει τον ρυθμό αύξησης του BER, ιδιαίτερα σε κρίσιμα σημεία λειτουργίας. Υπό τις συνθήκες αυτές, η διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK εμφανίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε υψηλές τιμές LOSS συγκριτικά με τη rotated $\pi/4$ -QPSK.

4 Κεφάλαιο 4^ο: Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της απόδοσης της ζεύξης ανόδου ενός συστήματος LTE υπό συνθήκες συνύπαρξης με πηγές Narrowband-IoT (NB-IoT) στο ίδιο φασματικό περιβάλλον. Ειδικότερα, διερευνήθηκε η επίδραση του παρεμβάλλοντος σήματος NB-IoT στην αξιοπιστία της ζεύξης LTE μέσω της αξιολόγησης του ρυθμού σφαλμάτων bit (Bit Error Rate – BER) ως συνάρτηση του E_b/N_0 .

Για την επίτευξη του στόχου αυτού, υλοποιήθηκε στο περιβάλλον AWR Design Environment (AWRD) ένα προσομοιωτικό test bench συνύπαρξης LTE – NB-IoT, μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε η μελέτη της συμπεριφοράς της ζεύξης ανόδου του LTE υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε συστηματικές προσομοιώσεις και μετρήσεις του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER), εξετάζοντας την επίδραση βασικών παραμέτρων του παρεμβάλλοντος σήματος NB-IoT, όπως η διαμόρφωση ($\pi/2$ -BPSK και rotated $\pi/4$ -QPSK), οι ρυθμίσεις SCMode και οι απώλειες διαδρομής (LOSS).

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι, σε ιδανικές συνθήκες καναλιού (LOSS = 0 dB), η παρουσία και η μεταβολή των παραμέτρων του, όπως το SCMode και ο τύπος διαμόρφωσης, δεν προκαλούν ουσιαστική διαφοροποίηση στη συμπεριφορά BER του LTE. Οι καμπύλες BER παραμένουν κοντά στην καμπύλη αναφοράς του συστήματος, γεγονός που δείχνει ότι η συνύπαρξη LTE – NB-IoT δεν επιβαρύνει ουσιαστικά τη ζεύξη στις συγκεκριμένες συνθήκες. Αντιθέτως, η αύξηση της παραμέτρου LOSS οδηγεί σε σαφή αύξηση του BER και αναδεικνύεται ως ο κυρίαρχος παράγοντας υποβάθμισης της αξιοπιστίας της ζεύξης. Επιπλέον, από τη σύγκριση των δύο διαμορφώσεων προκύπτει ότι η διαμόρφωση $\pi/2$ -BPSK εμφανίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε συνθήκες αυξημένων απωλειών διαδρομής, ιδιαίτερα στο σημείο $E_b/N_0 = -105$ dB, ενώ η rotated $\pi/4$ -QPSK παρουσιάζει εντονότερη αύξηση του BER για υψηλές τιμές LOSS.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η παρεμβολή από το NB-IoT δεν επηρεάζει ουσιαστικά την απόδοση της ζεύξης LTE στο εξεταζόμενο πλαίσιο, γεγονός που τεκμηριώνει τη δυνατότητα συνύπαρξης των δύο τεχνολογιών στο ίδιο φασματικό περιβάλλον. Η συνύπαρξη LTE και NB-IoT κρίθηκε εφικτή χωρίς ουσιαστική υποβάθμιση της λειτουργίας του LTE υπό τις εξεταζόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Η παρούσα μελέτη αναδεικνύει τη δυνατότητα πρακτικής αξιοποίησης της συνύπαρξης LTE και NB-IoT, καθώς η ενσωμάτωση συσκευών NB-IoT σε υφιστάμενα LTE δίκτυα είναι εφικτή χωρίς κρίσιμη επιβάρυνση της απόδοσης της ζεύξης. Συνεπώς, η χρήση συσκευών NB-IoT στο ίδιο φασματικό περιβάλλον με το LTE, επιβεβαιώνει την αποδοτική και αξιόπιστη συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών. Η περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε πιο σύνθετα μοντέλα καναλιού και σενάρια συνύπαρξης (π.χ. 5G NR coexistence) με εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης, θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης. Η διασφάλιση της αποδοτικής συνύπαρξης των δύο τεχνολογιών παραμένει σημαντική για την εξέλιξη των σύγχρονων κυψελωτικών δικτύων IoT.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Beard, C., & Stallings, W. (2015). *Wireless Communications Networks and Systems*. Pearson.
- [2] Rodriguez, J. (2015). *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons.
- [3] Nordrum, A., & Clark, K. (2017). "Everything you need to know about 5G". *IEEE Spectrum*
- [4] Rattey, S., et al. (2013/2016). *3GPP Technical Specifications, Release 13*.
- [5] Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (2011). *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*.
- [6] Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*. New York: Prentice Hall.
- [7] Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley.
- [8] Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications*. Cambridge University Press.
- [9] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communications (5th ed.)*. McGraw-Hill.
- [10] Haykin, S. (2008). *Communication Systems*. Wiley.
- [11] Sklar, B. (2001). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall.
- [12] Lathi, B. P., & Ding, Z. (2009). *Modern Digital and Analog Communication Systems*. Oxford University Press.
- [13] Petropoulos, I. (2012). "Phased Array Antenna Receives 4G Networks". *Microwaves & RF*.
- [14] Κολιάτσης, Α. (2022). "Σχεδίαση και Προσομοίωση Ασύρματων Δικτύων 5G". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [15] Τζίφρας, Κ. (2013). "Προσδιορισμός Βέλτιστης Θέσης Αναμεταδοτών Σε Συστήματα LTE". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [16] Χατζηδάκης, Α. (2015). "Κατανομή Πόρων και Επαναχρησιμοποίηση Φάσματος σε Δίκτυα LTE". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [17] Κουτσιμανής, Α. (2017). "Προσομοίωση και Μελέτη του Συστήματος LTE-Advanced σε Περιβάλλον Multipath Fading". Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ).
- [18] Τσακμακίδης, Σ. (2011). "Βασικές αρχές OFDM και διαμόρφωση

- OFDM/OQAM". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [19] Γεωργίτζα, Ε. (2012). "Πιθανότητα Διακοπής Λειτουργίας Σύνδεσης σε Κυψελωτά Δίκτυα". Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς (ΠΑΠΕΙ).
- [20] Καλογερόπουλος, Θ. (2015). "Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Ασύρματων Διαύλων σε Περιβάλλοντα Macrocell". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [21] Θεοδωράκης, Ι. (2015). "Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Ραδιοκάλυψης σε Δίκτυα LTE-Advanced". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [22] Παπαδόπουλος, Ν. (2009). "Μελέτη της Επίδρασης της Βλάστησης στη Διάδοση Ραδιοκυμάτων". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [23] Θεοδώρου, Κ. (2014). "Μελέτη Μοντέλων Διάδοσης σε Ασύρματα Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G)". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [24] Παπαδημητρίου, Χ. (2014). "Ανάλυση και Προσομοίωση της Επίδοσης Συστημάτων MIMO σε Διαύλους με Εξασθένιση". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [25] Βασιλόπουλος, Ν. (2014). "Εκτίμηση Απωλειών Διάδοσης και Σχεδίαση Ραδιοκάλυψης σε Συστήματα LTE". Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ).
- [26] R, Sangeetha & M, Hema & Nagavel, Vidhya & Ramesh, Parameswaran & Bhuvanewari, P.T.V.. (2026). Implications of SDR based LEO satellite doppler emulation on IoT signals.
- [27] Zhu Han, ECE 4371, Fall, 2009
- [28] Abdulaal, Alaa & Dheyaa, Nooruldeen & Abdulwahhab, Ali & Riyam, Ali & Yassin, & Valizadeh, Morteza & Albaker, Baraa & Mustaf, Ammar. (2024). Deep Learning-based Signal Identification in Wireless Communication Systems: A Comparative Analysis on 3G, LTE, and 5G Standards. Al-Iraqia Journal of Scientific Engineering Research. 3. 60-70. 10.58564/IJSER.3.3.2024.224.
- [29] Lunttila, Timo & Lindholm, Jari & Pajukoski, Kari & Tiirola, E. & Toskala, Antti. (2007). EUTRAN uplink performance. 10.1109/ISWPC.2007.342658.
- [30] 4G - LTE/LTE. A. (n.d.). https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2014_2/rafaelreis/ofdma_scdma.html
- [31] Leung, Chi-Sing & Chan, Herbert & Mow, Wai Ho. (2006). Soft-decoding SOM for VQ over wireless channels. Neural Processing Letters. 24. 179-192. 10.1007/s11063-006-9020-y.
- [32] Muteba, Franck & Djouani, Karim & Olwal, Thomas. (2020). Opportunistic

Resource Allocation for Narrowband Internet of Things: A Literature Review.

- [33]NB-IOT downlink in-band and Guardband Waveform Generation and analysis. MATLAB & Simulink. (n.d.). <https://ww2.mathworks.cn/help/lte/ug/nb-iot-in-band-guardband-waveform-generation-analysis.html>
- [34]UIHaque, Anwar & Saeed, Muhammad & Siddiqui, Farhan Ahmed. (2012). Comparative Study of BPSK and QPSK for Wireless Networks over NS2. International Journal of Computer Applications. 41. 8-12. 10.5120/5647-7809.
- [35]Priya, A. & Rajesh, N. & Muthaiah, Rajath. (2013). Carrier synchronization in software defined radio for 8PSK. 5. 81-87.

