



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
**Π.Μ.Σ. «ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ
ΔΙΚΤΥΑ»**

**Βελτιστοποίηση Επιδόσεων Ασύρματων Ψηφιακών
Συστημάτων με Χρήση Τεχνικών Διαφορισμού**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δήμος Ε. Λιάκος

Επιβλέπων : Νικόλαος Σαγιάς
Επίκουρος Καθηγητής

Τρίπολη, Σεπτέμβριος 2011

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών "Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα" του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και το θέμα της αφορά στο επιστημονικό πεδίο των ασύρματων ψηφιακών συστημάτων τηλεπικοινωνιών. Συγκεκριμένα ο στόχος της εργασίας είναι η μελέτη και η εφαρμογή τεχνικών διαφορισμού σε σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως το WiFi και το WiMax, με στόχο την βελτίωση της απόδοσης τους.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Νικόλαο Σαγιά, Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, για την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και για την καθοδήγηση του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην συμφοιτήτρια μου Ευαγγελία Κάβουρα για την εμπύχωση και συμπαράσταση όλο το διάστημα της φοίτησης μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, και ιδιαίτερα τη σύζυγο μου Ελένη, για την απλόχερη ηθική συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος - Ευχαριστίες	1
Περιεχόμενα	2
Κατάλογος σχημάτων	5
Περίληψη	7
Περίληψη στην Αγγλική Γλώσσα	9
1 Κανάλια Διαλείψεων	11
1.1 Μελέτη ασύρματων συστημάτων σε περιβάλλον με διαλείψεις.....	11
1.1.1 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.....	12
1.1.2 Διαλείψεις μικρής κλίμακας.....	12
1.2 Κανάλια επιλεκτικών και μη επιλεκτικών συχνοτήτων.....	15
1.2.1 Κανάλια μη επιλεκτικών συχνοτήτων.....	16
1.2.2 Κανάλια επιλεκτικών συχνοτήτων.....	16
1.3 Κανάλια ταχέων και βραδέων διαλείψεων.....	17
1.3.1 Κανάλια ταχέων διαλείψεων.....	18
1.3.2 Κανάλια βραδέων διαλείψεων.....	18
2 Στατιστικά Μοντέλα Διαλείψεων	21
2.1 Μοντέλο διαλείψεων Rayleigh.....	21
2.2 Μοντέλο διαλείψεων Rice.....	25
3 Διαφορισμός και Δέκτες Διαφορισμού	27
3.1 Διαφορισμός.....	27
3.2 Τεχνικές διαφορισμού.....	28
3.3 Δέκτες διαφορισμού.....	30
3.3.1 Δέκτες συνδυασμού μέγιστου λόγου.....	31
3.3.2 Δέκτες συνδυασμού ίσης απολαβής.....	33
3.3.3 Δέκτες συνδυασμού επιλογής.....	34
3.3.4 Δέκτες συνδυασμού μεταγωγής και παραμονής.....	34
4 Μελέτη Επιδόσεων Ασύρματων Συστημάτων	36
4.1 Παρουσίαση του λογισμικού Matlab/Simulink.....	36

4.2 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση QPSK σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh.....	39
4.2.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος.....	39
4.2.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος.....	42
4.3 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση BDPSK σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh.....	45
4.3.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος.....	45
4.3.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος.....	47
4.4 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση QPSK σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC.....	49
4.4.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος.....	49
4.4.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος.....	52
4.5 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση BDPSK σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC.....	55
4.5.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος.....	55
4.5.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος.....	57
4.6 Βελτιστοποίηση απόδοσης ασύρματων συστημάτων με χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC.....	59
5 Συμπεράσματα	63
Παραρτήματα	64
Π.1 Ανάλυση επιμέρους τμημάτων του λογισμικού Matlab/Simulink.....	64
Π.1.1 Ανάλυση των blocks του λογισμικού Matlab/Simulink.....	64
Π.1.2 Ανάλυση του Bit Error Rate Analysis Tool.....	70
Π.2 Κώδικας απόδοσης Matlab για τον υπολογισμό της πιθανότητας σφάλματος.	73
Π.2.1 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh και διαμόρφωση QPSK.....	73
Π.2.2 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh και διαμόρφωση BDPSK.....	73
Π.2.3 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh με διαμόρφωση QPSK και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC.....	74

Π.2.4 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh με διαμόρφωση BDPSK και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC.....	74
---	----

Βιβλιογραφία

75

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 : Ασύρματη επικοινωνία σε περιβάλλον με διαλείψεις.....	12
Σχήμα 1.2 : Απόκριση καναλιού σε περιβάλλον διαλείψεων μικρής κλίμακας.....	14
Σχήμα 1.3 : Είδη διαλείψεων μικρής κλίμακας συναρτήσει διασποράς καθυστέρησης και διασποράς Doppler.....	17
Σχήμα 1.4 : Τύποι διαλείψεων ανάλογα με : α) την διάρκεια του συμβόλου και β) το εύρος ζώνης του σήματος.....	19
Σχήμα 2.1 : Lord Rayleigh (1842 – 1919).....	22
Σχήμα 2.2 : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομών Rayleigh.....	23
Σχήμα 2.3 : Παράδειγμα διαλείψεων Rayleigh.....	24
Σχήμα 2.4 : Stephen O. Rice (1907 – 1986).....	25
Σχήμα 2.5 : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομών Rice.....	26
Σχήμα 3.1 : Τηλεπικοινωνιακό σύστημα με δέκτη διαφορισμού.....	29
Σχήμα 3.2 : Δέκτης συνδυασμού μέγιστου λόγου.....	32
Σχήμα 3.3 : Δέκτης συνδυασμού ίσης απολαβής.....	33
Σχήμα 3.4 : Δέκτης συνδυασμού επιλογής.....	34
Σχήμα 3.5 : Δέκτης συνδυασμού μεταγωγής και παραμονής.....	35
Σχήμα 4.1 : Λογισμικό Matlab/Simulink.....	38
Σχήμα 4.2 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση QPSK.....	40
Σχήμα 4.3 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b / N_0 για διαμόρφωση QPSK.....	41
Σχήμα 4.4 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση QPSK....	44
Σχήμα 4.5 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση BDPSK.....	46
Σχήμα 4.6 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b / N_0 για διαμόρφωση BDPSK.....	47
Σχήμα 4.7 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση BDPSK...	49
Σχήμα 4.8 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση QPSK και δέκτη MRC.....	51
Σχήμα 4.9 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b / N_0 για διαμόρφωση QPSK και δέκτη MRC....	52
Σχήμα 4.10 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση QPSK και δέκτη MRC.....	54
Σχήμα 4.11 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση BDPSK και δέκτη MRC.....	56

Σχήμα 4.12 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b / N_0 για διαμόρφωση BDPSK και δέκτη MRC..	57
Σχήμα 4.13 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση BDPSK και δέκτη MRC.....	59
Σχήμα 4.14 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση QPSK με δέκτη MRC και χωρίς.....	60
Σχήμα 4.15 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση BDPSK με δέκτη MRC και χωρίς	60
Σχήμα 4.16 : Σύγκριση P_{be} για διαμόρφωση QPSK σε περιβάλλον θορύβου AWGN και διαλείψεων Rayleigh με δέκτη MRC και χωρίς.....	61
Σχήμα 4.17 : Σύγκριση P_{be} για διαμόρφωση BDPSK σε περιβάλλον θορύβου AWGN και διαλείψεων Rayleigh με δέκτη MRC και χωρίς.....	62
Σχήμα Π.1.1 : Block γεννήτριας τυχαίων δυαδικών ψηφίων.....	64
Σχήμα Π.1.2 : Block διαμορφωτή PSK.....	65
Σχήμα Π.1.3 : Block διαμορφωτή DPSK.....	65
Σχήμα Π.1.4 : Block γεννήτριας θορύβου κατανομής Rayleigh.....	66
Σχήμα Π.1.5 : Block καναλιού προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου.....	66
Σχήμα Π.1.6 : Block αποδιαμορφωτή PSK.....	67
Σχήμα Π.1.7 : Block αποδιαμορφωτή PSK.....	68
Σχήμα Π.1.8 : Block υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων.....	68
Σχήμα Π.1.9 : Block οθόνης απεικόνισης.....	68
Σχήμα Π.1.10 : Block εγγραφής δεδομένων σήματος στο Matlab.....	69
Σχήμα Π.1.11 : Block υπολογιστή διακύμανσης.....	69
Σχήμα Π.1.12 : Block πολλαπλασιαστή.....	70
Σχήμα Π.1.13 : Block αθροιστή.....	70
Σχήμα Π.1.14 : Πλαίσιο ‘Theoretical’ του Bit error rate analysis tool.....	71
Σχήμα Π.1.15 : Πλαίσιο ‘Monte Carlo’ του Bit error rate analysis tool.....	72

Περίληψη

Η σχεδίαση των σύγχρονων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων απαιτεί τον ακριβή χαρακτηρισμό του καναλιού διάδοσης και συγκεκριμένα των διαλείψεων στις οποίες το κανάλι υπόκειται. Η ανάγκη βελτιστοποίησης της επίδοσης των συστημάτων μας ωθεί, μέσω της γνώσης του καναλιού, στην εξεύρεση τεχνικών αντιστάθμισης των διαλείψεων. Η χρήση διαφορισμού είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική αντιστάθμισης των διαλείψεων που παρατηρούνται στο ασύρματο περιβάλλον.

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσης διπλωματικής εργασίας συνοψίζεται σε τρεις βασικές ενότητες : α) την ανάλυση και μοντελοποίηση των διαλείψεων, β) την ανάπτυξη των τεχνικών διαφορισμού και των δεκτών που κάνουν χρήση τους, και γ) τη βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων τόσο μέσω της θεωρητικής ανάλυσης, όσο και μέσω της προσομοίωσης.

Στα πρώτα δύο κεφάλαια γίνεται αρχικά ανάλυση των διαλείψεων στις οποίες υπόκειται τα ασύρματα συστήματα και στη συνέχεια μοντελοποίηση τους. Για την μοντελοποίηση του καναλιού χρησιμοποιείται πιθανοθεωρητική περιγραφή. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην κατανομή Rayleigh, η οποία προσομοιώνει την επίδραση του καναλιού σε σήμα που μεταδίδεται με διάδοση πολλαπλής διαδρομής και δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσονται η βασική έννοια του διαφορισμού και οι τεχνικές του, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα για την βελτίωση της απόδοσης τους. Επίσης γίνεται αναφορά σε διάφορους τύπους δεκτών που κάνουν χρήση διαφορισμού, αναλύοντας ιδιαίτερα το δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου (MRC). Ο συγκεκριμένος δέκτης συλλέγει αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος και μεγιστοποιεί τον τελικό λόγο σήματος προς θόρυβο, βελτιώνοντας έτσι και την επίδοση του συστήματος.

Στο τελευταίο τμήμα της εργασίας μελετώνται οι επιδόσεις συστημάτων με τύπο διαμόρφωσης QPSK, αλλά και με τύπο διαφορικής ανίχνευσης BDPSK. Η μελέτη βασίζεται στην θεωρητική ανάλυση με μαθηματική προσέγγιση, αλλά και στην προσομοίωση μοντέλων που έχουν δημιουργηθεί με το λογισμικό Matlab / Simulink. Για

τον υπολογισμό της βελτίωσης της απόδοσης με τη χρήση διαφορισμού μελετήθηκαν συστήματα με απλό δέκτη, αλλά και με δέκτη MRC δύο κλάδων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις επιβεβαιώνουν απόλυτα την ακρίβεια της μαθηματικής προσέγγισης. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρατίθενται σχηματικά τόσο τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όσο και των μαθηματικών προσεγγίσεων ώστε να γίνει η επιβεβαίωση τους.

Abstract

The design of modern wireless radio communication systems requires accurate characterization of the propagation channel and especially the fading of the channels. The need of the systems performance's optimization drives us through the channel's knowledge, to the discovery of new techniques, so as to overcome the fading problems. Diversity reception has been a successfully used technique to overcome the fading problems at the wireless radio environments.

The subject of this dissertation is summarized in three basic units: a) the analysis and modelling of fading b) the analysis of diversity reception techniques and diversity receivers and c) the optimization's estimate of systems performances through theoretical analysis and simulation.

At the two first chapters there is the analysis and the modelling of the fading at the wireless systems. For the modelling of the channel it is used a description of probability's theory. Next, it is analyzed the Rayleigh distribution, which simulates the impact of the channel to a signal that is transmitted with multipath propagation and there is no line of sight between transmitter and receiver.

At the next chapter it is analyzed the meaning of diversity reception and the basic techniques of diversity reception that are used in the modern wireless radio systems in order to improve their performance. Also there is a study of diversity receivers and especially the maximal ratio combining MRC receiver. This specific type of receiver collects copies of the transmitted signal and maximizes the signal to noise ratio SNR, so as to improve the performance of the system.

At the last part of the dissertation it is studied the performance of systems with type of modulation QPSK and differential detection type BDPSK. The study is based on the theoretical analysis, but also on the models simulation that are created with software Matlab/Simulink. In order to estimate the improvement of the performance with diversity reception were studied systems with plane and MRC receivers with two branches. The results of the simulation confirm the accuracy of the theoretical analysis. For every previous

case there are graphical schemes with the results of the simulation and the theoretical analysis in order to be confirmed.

1. Κανάλια Διαλείψεων

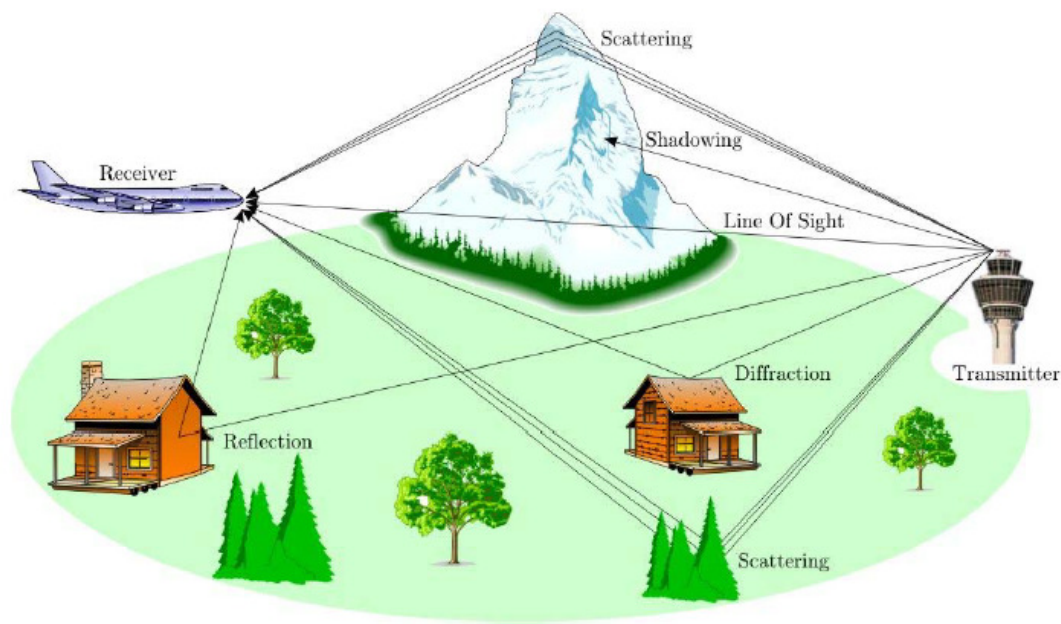
Το φαινόμενο των διαλείψεων στα σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα αποτελεί ένα πεδίο έρευνας με σκοπό την ανάπτυξη μεθόδων αντιμετώπισής τους. Συνεπώς τα χαρακτηριστικά και τα είδη των διαλείψεων, καθώς και οι φυσικοί παράγοντες που τις επηρεάζουν είναι τα πρώτα θέματα που πρέπει να αναπτυχθούν και αυτό γίνεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

1.1 Μελέτη ασύρματων συστημάτων σε περιβάλλον με διαλείψεις

Η ασύρματη επικοινωνία συνιστάται στην μετάδοση των ραδιοκυμάτων, που μεταφέρουν την πληροφορία από τον πομπό στον δέκτη διαμέσου του περιβάλλοντος χώρου. Το ασύρματο κανάλι επηρεάζεται από τη σκίαση (shadowing) και την πολυδιόδευση (multipath). Τα σύνθετα αυτά φαινόμενα που αλληλεπιδρούν στο λαμβανόμενο σήμα έχουν ως αποτέλεσμα την διακύμανση της ισχύος του και περιγράφονται με τον όρο διαλείψεις (fading). Η πολυπλοκότητα και η μεταβλητότητα του ασύρματου καναλιού καθιστούν δύσκολη την περιγραφή του ως ένα ακριβές ντετερμινιστικό μοντέλο. Το είδος και το μέγεθος των διαλείψεων ποικίλει, γι' αυτό μελετώνται και προτυποποιούνται ως μια στοχαστική διαδικασία. Μια ακριβής μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των διαλείψεων για την μελέτη των ασύρματων συστημάτων είναι πολύ δύσκολη. Για αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την στατιστική μοντελοποίηση των διαλείψεων και έχουν οδηγήσει στην ύπαρξη στατιστικών μοντέλων για κανάλια με διαλείψεις, τα οποία είναι ακριβή και εξαρτώνται από το περιβάλλον όπου γίνεται η μετάδοση.

Οι διαλείψεις που εμφανίζονται στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες μπορούν να χωριστούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους σε δυο μεγάλες κατηγορίες :

- διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading)
- διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading)



Σχήμα 1.1 : Ασύρματη επικοινωνία σε περιβάλλον με διαλείψεις.

1.1.1 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας οφείλονται στο φαινόμενο της σκίασης το οποίο δημιουργείται από την παρεμπόδιση του μεταδιδόμενου σήματος από ψηλά κτίρια ή από ανομοιόμορφη κατανομή του φυσικού ανάγλυφου. Επειδή όμως το ανάγλυφο της περιοχής, το μέγεθος, οι διηλεκτρικές ιδιότητες του αντικειμένου παρεμπόδισης και οι μεταβολές του σήματος από ανακλάσεις και σκεδάσεις, που προκαλούν τυχαία εξασθένηση, είναι γενικά άγνωστα, γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν στατιστικά μοντέλα για το χαρακτηρισμό της τυχαίας αυτής διακύμανσης. Το πιο γνωστό μοντέλο είναι το λογαριθμο-κανονικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο η μέση λαμβανόμενη ισχύς ακολουθεί την κατανομή Gauss.

1.1.2 Διαλείψεις μικρής κλίμακας

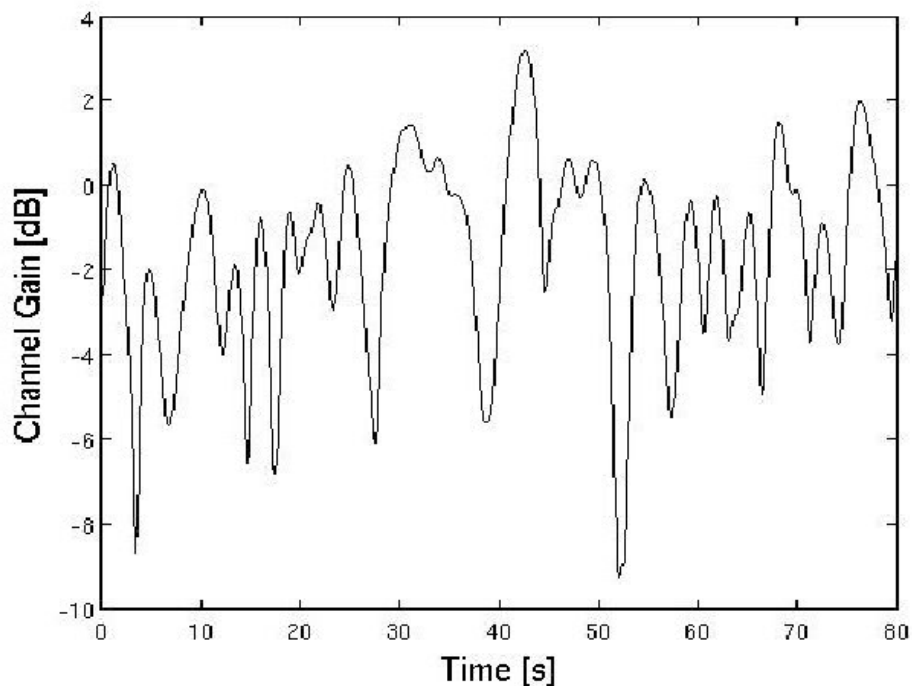
Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι οι απότομες διακυμάνσεις του πλάτους, φάσης και χρονικής καθυστέρησης του λαμβανόμενου σήματος σε μία μικρή απόσταση ή περίοδο χρόνου. Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται στην συμβολή δύο ή περισσότερων αντιγράφων του

εκπεμπόμενου σήματος που λαμβάνονται στο δέκτη. Αυτές οι διαλείψεις επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος και προκαλούν τα εξής :

- ταχύτατη μεταβολή της ισχύος του σήματος λήψης σε μικρά χρονικά διαστήματα
- μετατόπιση της συχνότητας του σήματος λήψης, λόγω του φαινομένου Doppler
- Χρονική διασπορά του σήματος λήψης.

Οι σημαντικότεροι φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι οι εξής :

- Διάδοση πολλαπλής διαδρομής. Η παρουσία ανακλαστικών και σκεδαστικών αντικειμένων στο κανάλι δημιουργεί ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, που καταναλώνει την ενέργεια του σήματος σε πλάτος, φάση και χρόνο. Αυτό οδηγεί σε πολλαπλά αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος, τα οποία φθάνουν στην κεραία λήψης μετατοπισμένα μεταξύ τους χρονικά και χωρικά. Η τυχαία φάση και τα πλάτη των διαφορετικών συνιστωσών πολλαπλής διαδρομής προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος, προκαλώντας διαλείψεις μικρής κλίμακας, παραμόρφωση ή και τα δύο. Η διάδοση πολλαπλής διαδρομής συχνά επιμηκύνει το χρόνο που απαιτείται για να φθάσει το τμήμα ζώνης βάσης του σήματος στον δέκτη, το οποίο μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση λόγω διασυμβολικής παρεμβολής.
- Κίνηση του δέκτη. Η σχετική κίνηση ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη οδηγεί σε τυχαία διαμόρφωση συχνότητας που οφείλεται στις διαφορετικές μετατοπίσεις Doppler σε καθένα από τα αντίγραφα της πολλαπλής διαδρομής. Η μετατόπιση θα είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το αν ο δέκτης κινείται προς ή απομακρύνεται από τον πομπό.



Σχήμα 1.2 : Απόκριση καναλιού σε περιβάλλον διαλείψεων μικρής κλίμακας.

- Κίνηση των αντικειμένων του περιβάλλοντος. Η κίνηση αντικειμένων στο ραδιοκανάλι προκαλεί μια χρονικά κυμαινόμενη μετατόπιση Doppler στα αντίγραφα πολλαπλής διαδρομής. Εάν τα περιβάλλοντα αντικείμενα κινούνται με ταχύτητα μεγαλύτερη του δέκτη, τότε η επίδραση αυτή υπερισχύει στις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Διαφορετικά η κίνηση των αντικειμένων μπορεί να αγνοηθεί και να εξετάζεται μόνο η κίνηση του δέκτη.
- Εύρος ζώνης σήματος. Εάν το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του καναλιού πολλαπλής διαδρομής, το λαμβανόμενο σήμα θα είναι παραμορφωμένο, αλλά οι διαλείψεις μικρής κλίμακας δεν θα είναι σημαντικές. Εάν το εκπεμπόμενο σήμα έχει μικρότερο εύρος ζώνης σε σχέση με εκείνο του καναλιού, το πλάτος του σήματος θα μεταβάλλεται γρήγορα αλλά το σήμα δεν θα παραμορφώνεται στο χρόνο.

1.2 Κανάλια επιλεκτικών και μη επιλεκτικών συχνοτήτων

Για τον χαρακτηρισμό των καναλιών πολλαπλής διαδρομής σε επιλεκτικών ή μη επιλεκτικών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω παράμετροι :

- Εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) του καναλιού, B_C . Το εύρος ζώνης συνοχής ή σύμφωνο εύρος ζώνης χαρακτηρίζει το κανάλι στο πεδίο της συχνότητας και είναι το εύρος ζώνης του φάσματος στο οποίο οι φασματικές συνιστώσες του σήματος να επηρεάζονται με παρόμοιο τρόπο. Εάν η συχνοτική απόσταση δύο σημάτων είναι μεγαλύτερη από B_C , τότε αυτά επηρεάζονται διαφορετικά κατά την μετάδοσή τους.
- Διασπορά καθυστέρησης (delay spread) του καναλιού, τ . Η διασπορά καθυστέρησης χαρακτηρίζει το κανάλι στο πεδίο του χρόνου και είναι η χρονική διαφορά με την οποία λαμβάνει ο δέκτης τα αντίγραφα του σήματος εκπομπής, τα οποία έχουν δημιουργηθεί λόγω του φαινομένου της διάδοσης πολλαπλής διαδρομής. Οι τιμές της ενεργούς διασποράς καθυστέρησης εξαρτώνται από το περιβάλλον διάδοσης και τη συχνότητα λειτουργίας.

Το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη μέγιστη διασπορά καθυστέρησης.

Τα συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα της σχέσης του εύρους ζώνης του σήματος, B_S , και του εύρους ζώνης συνοχής του καναλιού, B_C .

α) συστήματα στενής ζώνης (narrowband systems) για τα οποία ισχύει

$$B_S \ll B_C$$

β) συστήματα ευρείας ζώνης (wideband systems) για τα οποία ισχύει

$$B_S \gg B_C$$

1.2.1 Κανάλια μη επιλεκτικών συχνοτήτων

Αν όλες οι φασματικές συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος δέχονται όμοια επίδραση, οι διαλείψεις ονομάζονται μη επιλεκτικές στη συχνότητα ή επίπεδες. Όταν ένα κανάλι έχει σταθερό πλάτος και γραμμική φάση σε ένα εύρος ζώνης μεγαλύτερο του εύρους ζώνης του σήματος εκπομπής, τότε το κανάλι ονομάζεται μη επιλεκτικών συχνοτήτων. Συνεπώς όταν το σήμα εκπομπής μεταδίδεται σε ένα κανάλι μη επιλεκτικών συχνοτήτων, η ισχύς του σήματος λήψης μεταβάλλεται στο χρόνο λόγω του φαινομένου της διάδοσης πολλαπλής διαδρομής, όμως τα φασματικά χαρακτηριστικά του σήματος εκπομπής παραμένουν αναλλοίωτα. Αν ορίσουμε ως T_s τη διάρκεια συμβόλου και σ_τ την ενεργό διασπορά καθυστέρησης, τότε ένα κανάλι θεωρείται ως κανάλι μη επιλεκτικών συχνοτήτων όταν ισχύει

$$B_s \ll B_c \quad \text{και} \quad T_s \gg \sigma_\tau$$

Από τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι τα κανάλια μη επιλεκτικών συχνοτήτων είναι ουσιαστικά κανάλια στενής ζώνης.

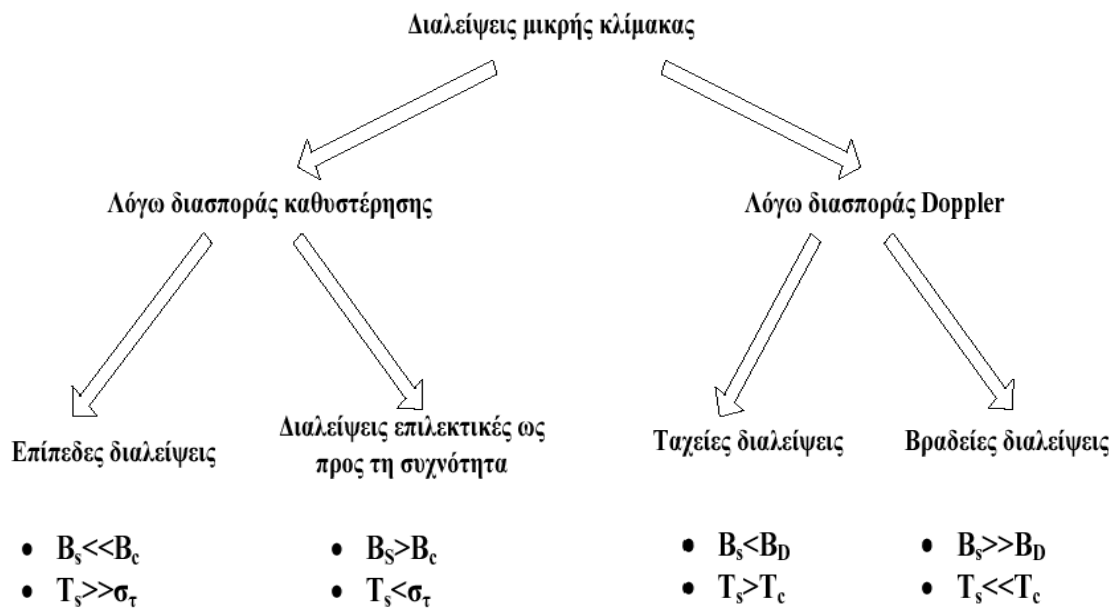
1.2.2 Κανάλια επιλεκτικών συχνοτήτων

Όταν οι φασματικές συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο από το κανάλι, είναι δηλαδή ασυσχέτιστες, τότε το κανάλι ονομάζεται κανάλι επιλεκτικών συχνοτήτων. Το κανάλι επιλεκτικών συχνοτήτων έχει σταθερό πλάτος και γραμμική φάση σε ένα εύρος ζώνης μικρότερο του εύρους ζώνης του σήματος εκπομπής. Σε ένα τέτοιο κανάλι η διασπορά της καθυστέρησης είναι μεγαλύτερη από την διάρκεια του συμβόλου με αποτέλεσμα να παρεμβάλλονται στον δέκτη και σύμβολα που έχει εκπέμψει ο πομπός προηγούμενες χρονικές στιγμές. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διασυμβολική παρεμβολή (inter-symbol interference, ISI) και οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων.

Σύμφωνα με τα οριζόμενα προηγουμένως, ένα κανάλι θεωρείται ως κανάλι επιλεκτικών συχνοτήτων όταν ισχύει

$$B_s > B_c \quad \text{και} \quad T_s < \sigma_\tau$$

Από τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι τα κανάλια επιλεκτικών συχνοτήτων είναι ουσιαστικά κανάλια ευρείας ζώνης.



Σχήμα 1.3 : Είδη διαλείψεων μικρής κλίμακας συναρτήσει διασποράς καθυστέρησης και διασποράς Doppler.

1.3 Κανάλια ταχέων και βραδέων διαλείψεων

Οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των καναλιών σε ταχέων ή βραδέων διαλείψεων είναι η διασπορά Doppler (Doppler spread), B_D , και ο χρόνος συνοχής (coherence time) του καναλιού, T_c . Αυτά τα μεγέθη περιγράφουν τον τρόπο μεταβολής του καναλιού στο χρόνο που οφείλεται στην κίνηση του δέκτη, του πομπού ή και των αντικειμένων του περιβάλλοντος. Η διασπορά Doppler αποτελεί ένα μέτρο της φασματικής διεύρυνσης που προκαλείται από τη χρονική μεταβολή του καναλιού

και ορίζεται ως το εύρος των συχνοτήτων, στο οποίο το λαμβανόμενο φάσμα Doppler είναι ουσιαστικά μη μηδενικό. Όταν μεταδίδεται ένα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας f_c , το φάσμα του σήματος λήψης, δηλαδή το φάσμα Doppler, θα έχει συνιστώσες στην περιοχή από $f_c - f_d$ έως $f_c + f_d$, όπου f_d είναι η ολίσθηση Doppler. Η φασματική διεύρυνση εξαρτάται από την ολίσθηση Doppler που αποτελεί συνάρτηση της σχετικής ταχύτητας του δέκτη και της γωνίας ανάμεσα στην κατεύθυνση της κίνησης του δέκτη και της κατεύθυνσης των σημάτων λήψης. Ο χρόνος συνοχής περιγράφει το κανάλι στο πεδίο του χρόνου και είναι εκείνο το χρονικό διάστημα στο οποίο η απόκριση του καναλιού παραμένει αμετάβλητη. Επίσης ο χρόνος συνοχής είναι η χρονική διάρκεια στην οποία δύο λαμβανόμενα σήματα έχουν ισχυρή πιθανότητα για συσχέτιση πλάτους. Εάν το αντίστροφο του εύρους ζώνης σήματος είναι μεγαλύτερο από το χρόνο συνοχής του καναλιού, τότε το κανάλι θα αλλάξει κατά τη διάρκεια της μετάδοσης προκαλώντας παραμόρφωση στο σήμα λήψης του δέκτη.

1.3.1 Κανάλια ταχέων διαλείψεων

Για να χαρακτηριστεί ένα κανάλι ως ταχέων διαλείψεων (fast fading) θα πρέπει η απόκριση του καναλιού να μεταβάλλεται ραγδαία κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός συμβόλου. Δηλαδή ο χρόνος συνοχής του καναλιού να είναι μικρότερος από τη διάρκεια του συμβόλου με αποτέλεσμα τη φασματική διασπορά του σήματος και τελικά την παραμόρφωσή του. Για να θεωρείται ένα κανάλι ως κανάλι ταχέων διαλείψεων θα πρέπει να ισχύει

$$B_s < B_D \quad \text{και} \quad T_s > T_C$$

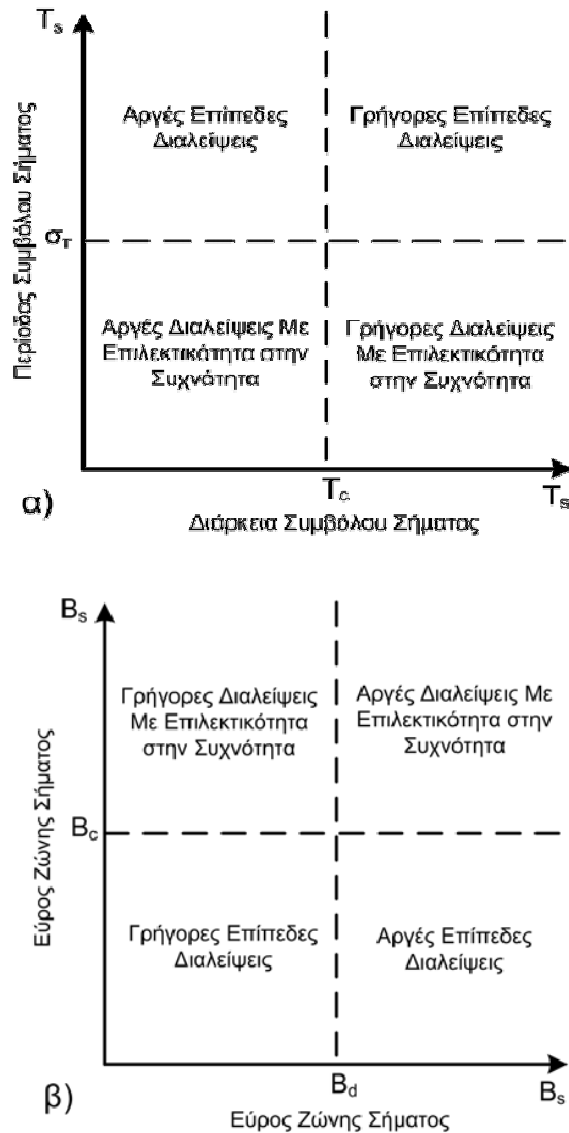
Πρακτικά το φαινόμενο των ταχέων διαλείψεων παρατηρείται μόνο σε συστήματα με πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

1.3.2 Κανάλια βραδέων διαλείψεων

Για να χαρακτηριστεί ένα κανάλι ως βραδέων διαλείψεων (slow fading) θα πρέπει η απόκριση του καναλιού να μεταβάλλεται με ρυθμό χαμηλότερο σε σχέση με τη χρονική διάρκεια του συμβόλου. Συνεπώς, το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι στατικό σε ένα ή

πολλά χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια της διάρκειας του συμβόλου. Αντίστοιχα στο πεδίο της συχνότητας, αυτό σημαίνει ότι η διασπορά Doppler του καναλιού είναι πολύ μικρότερη από το εύρος ζώνης του σήματος. Για να θεωρείται ένα κανάλι ως κανάλι βραδέων διαλείψεων θα πρέπει να ισχύει

$$B_s \gg B_D \quad \text{και} \quad T_s \ll T_C$$



Σχήμα 1.4 : Τύποι διαλείψεων ανάλογα με : α) την διάρκεια του συμβόλου και β) το εύρος ζώνης του σήματος.

Γενικά ανάμεσα στις παραμέτρους του σήματος (εύρος ζώνης, διάρκεια συμβόλου) και στις παραμέτρους του καναλιού (διασπορά καθυστέρησης, εύρος ζώνης συνοχής, διασπορά Doppler, χρόνος συνοχής) υπάρχει σχέση που καθορίζει το είδος της διάλειψης ανάλογα και με το είδος του σήματος εκπομπής, όπως φαίνεται στα σχήματα 1.3 και 1.4 .

Για το υπόλοιπο της εργασίας και τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια θεωρούμε ότι οι διαλείψεις που εμφανίζονται στο κανάλι θα είναι επίπεδες, δηλαδή μη επιλεκτικών συχνοτήτων, και βραδείες. Συνεπώς θα θεωρούμε ότι τα χαρακτηριστικά του φάσματος του σήματος εκπομπής επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από το κανάλι μετάδοσης και ότι τα χαρακτηριστικά του καναλιού παραμένουν αμετάβλητα κατά την διάρκεια διάδοσης ενός συμβόλου.

2. Στατιστικά Μοντέλα διαλείψεων

Το ασύρματο περιβάλλον λόγω της τυχαιότητας και της χρονικής μεταβλητότητας των διαλείψεων δεν μπορεί να περιγραφεί ως ένα ακριβές ντετερμινιστικό μοντέλο. Μία ακριβής μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των διαλείψεων είναι πολύ δύσκολη, εξαιτίας του υψηλού κόστους και χρόνου μελέτης που θα απαιτούνταν. Γι' αυτό το λόγο γίνεται χρήση ενός θεωρητικού στατιστικού μοντέλου για την περιγραφή της επίδρασης του ασύρματου καναλιού. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα τέτοια μοντέλα για να προσομοιώνουν διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος, δυο εκ των οποίων, από τα πιο αντιπροσωπευτικά, παρουσιάζονται παρακάτω.

2.1 Μοντέλο διαλείψεων Rayleigh

Το μοντέλο διαλείψεων Rayleigh είναι πολύ διαδεδομένο στις σύγχρονες κινητές τηλεπικοινωνίες και προσομοιώνει την επίδραση του καναλιού σε σήμα που μεταδίδεται με διάδοση πολλαπλής διαδρομής. Το σύγχρονο αστικό περιβάλλον με την πυκνή δόμηση και τις μεγάλες ανακλαστικές επιφάνειες αποτελούν ένα περιβάλλον στο οποίο το φαινόμενο της διάδοσης πολλαπλής διαδρομής είναι έντονο, γεγονός που ευνοεί την χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου. Επίσης το μοντέλο Rayleigh χρησιμοποιείται και για περιπτώσεις όπου έχουμε ιονοσφαιρική και τροποσφαιρική σκέδαση.

Η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των διαλείψεων μικρής κλίμακας σε περιβάλλοντα στα οποία δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη και η μετάδοση του σήματος γίνεται με διάδοση πολλαπλής διαδρομής λόγω φαινομένων ανάκλασης, διάθλασης, περίθλασης και εξασθένησης. Αποδεικνύεται ότι όταν έχουμε την παρουσία πολλαπλών διαδρομής διάδοσης για το σήμα, η κρουστική απόκριση του

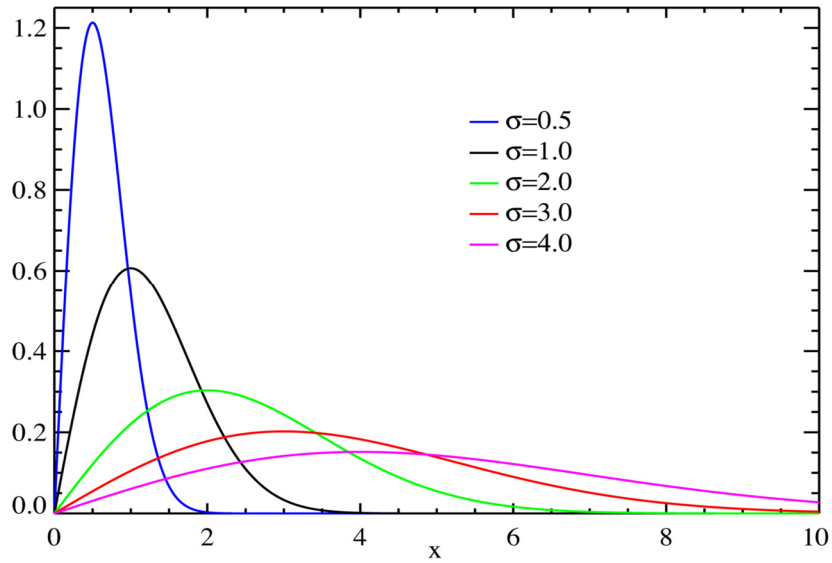


Σχήμα 2.1 : Lord Rayleigh (1842 – 1919)

καναλιού μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια Gaussian διαδικασία. Αφού δεν υπάρχει κυρίαρχη συνιστώσα του σήματος, λόγω της απουσίας οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, η διαδικασία θα έχει μηδενική μέση τιμή και ομοιόμορφα κατανεμημένη φάση μεταξύ 0 και 2π . Συνεπώς η κρουστική απόκριση του καναλιού θα ακολουθήσει την κατανομή Rayleigh.

Η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος $r(t)$ είναι το άθροισμα δυο συναρτήσεων Gauss με διαφορά φάσης $\pi/2$, οπότε υπακούει σε κατανομή Rayleigh και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function – pdf) δίνεται από τον τύπο :

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$



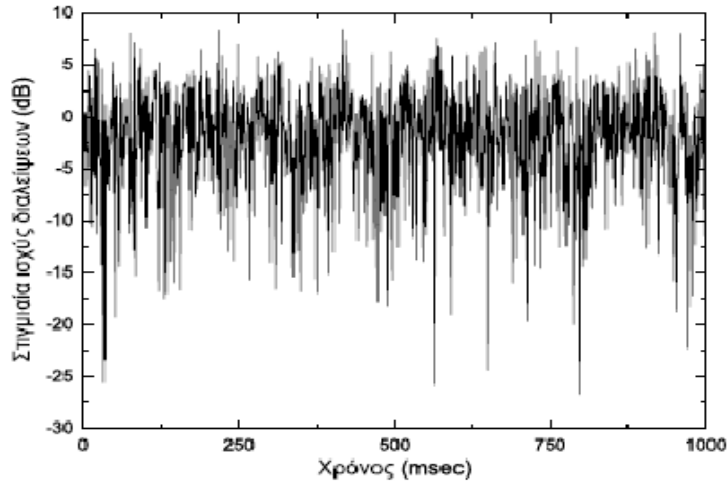
Σχήμα 2.2 : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομών Rayleigh

όπου σ^2 είναι η μέση τετραγωνική τιμή των συνιστωσών. Άρα η μέση ισχύς του σήματος του οποίου η περιβάλλουσα $r(t)$ ακολουθεί την Rayleigh κατανομή θα είναι :

$$\Omega = E[r^2(t)] = 2\sigma^2$$

Επίσης, η παραπάνω σχέση συναρτήσει της μέσης ισχύος του σήματος Ω γράφεται ως εξής :

$$f_r(r) = \frac{2r}{\Omega} \exp\left(-\frac{r^2}{\Omega}\right)$$



Σχήμα 2.3 : Παράδειγμα διαλείψεων Rayleigh

Όμως το μοντέλο Rayleigh σε ορισμένες περιπτώσεις δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί επειδή παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές μεταξύ του στατιστικού μοντέλου και της πραγματικότητας. Κάποιες περιπτώσεις στις οποίες συμβαίνει αυτό είναι οι εξής:

- όταν ο αριθμός των πολλαπλών διαδρομών διάδοσης δεν είναι αρκετά μεγάλος
- όταν το περιβάλλον διάδοσης είναι τέτοιο ώστε να δημιουργούνται συνθήκες κυματοδήγησης, δηλαδή πολλαπλές ανακλάσεις και στάσιμα κύματα
- όταν υπάρχει συνιστώσα του σήματος εκπομπής η οποία λαμβάνεται από τον δέκτη μέσω οπτικής επαφής. Σε αυτήν την περίπτωση η περιβάλλουσα του σήματος ακολουθεί την κατανομή Rice, η οποία θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

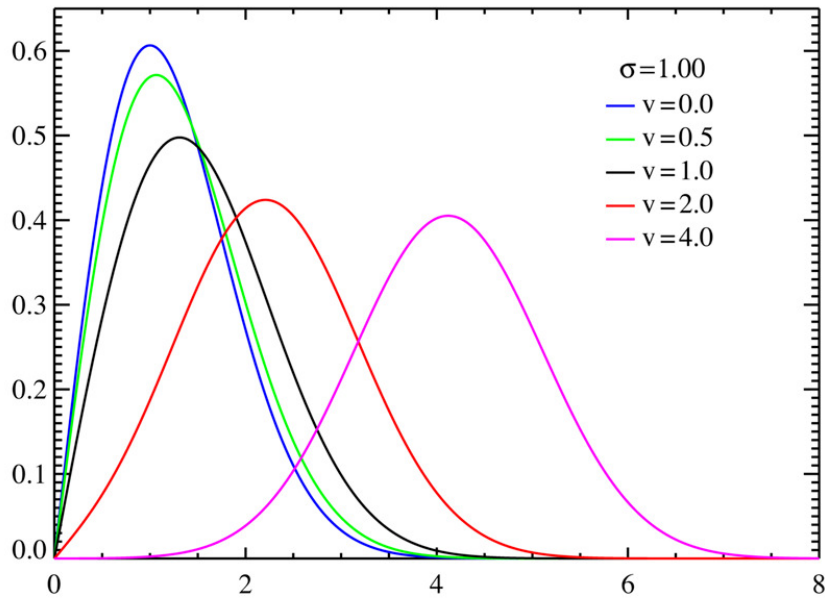


Σχήμα 2.4 : Stephen O. Rice (1907 – 1986)

2.2 Μοντέλο διαλείψεων Rice

Η κατανομή Rice, η οποία ονομάζεται και Nakagami-n, χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση περιβαλλόντων διαλείψεων στα οποία υπάρχει ένα ισχυρό σήμα λόγω οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη και αρκετές ασθενέστερες τυχαίες συνιστώσες του σήματος λόγω διάδοσης πολλαπλής διαδρομής. Στο μοντέλο αυτό η περιβάλλουσα του σήματος δεν έχει μηδενική μέση τιμή και μεταβάλλεται πολύ λιγότερο. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function – pdf) δίνεται από τον τύπο :

$$f_r(r) = \frac{2r}{\Omega} \exp\left(-\frac{r^2 + A_o^2}{\Omega}\right) \cdot I_0\left(\frac{2rA_o}{\Omega}\right)$$



Σχήμα 2.5 : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομών Rice

όπου Ω είναι η μέση ισχύς του λαμβανόμενου σήματος και A_o είναι η μέση τιμή του πλάτους της περιβάλλουσας η οποία είναι μη μηδενική και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο μοντέλο.

Στο μοντέλο Rice γίνεται χρήση του παράγοντα K , ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος της ισχυρής συνιστώσας λόγω οπτικής επαφής προς την ισχύ των υπόλοιπων ασθενέστερων συνιστωσών. Ο παράγοντας K δίνεται από τον τύπο:

$$K = \frac{A_o^2}{2\Omega}$$

Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ισχυρό σήμα λόγω οπτικής επαφής, τότε $A_o = 0$ και συνεπώς ο παράγοντας K μηδενίζεται. Τότε από τον παραπάνω τύπο προκύπτει η κατανομή Rayleigh.

3. Διαφορισμός και Δέκτες Διαφορισμού

Η αντιστάθμιση των επιπτώσεων των διαλείψεων στα σύγχρονα ασύρματα συστήματα έχει ως σκοπό την βελτίωση της επίδοσης τους. Ένας αξιόπιστος τρόπος αντιστάθμισης είναι η χρήση διαφορισμού. Στη συνέχεια θα αναπτύξουμε την έννοια του διαφορισμού, τις διάφορες τεχνικές διαφορισμού και τους τύπους των δεκτών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

3.1 Διαφορισμός

Η επίδοση των ασύρματων συστημάτων όταν λειτουργούν σε περιβάλλον με διαλείψεις υποβαθμίζεται λόγω της εξασθένησης του σήματος από το κανάλι που έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση σφαλμάτων κατά την αποδιαμόρφωση του σήματος στον δέκτη. Ενώ σε ένα κανάλι προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου η βελτίωση της επίδοσης μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της σηματοθορυβικής σχέσης (SNR), δηλαδή με αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, στα κανάλια διαλείψεων αυτό δεν είναι εύκολο, ιδιαίτερα χωρίς τη χρήση ειδικών τεχνικών. Η ρύθμιση της ισχύος εκπομπής για την αντιστάθμιση της εξασθένησης του σήματος από το κανάλι διαλείψεων παρουσιάζει δυο προβλήματα.

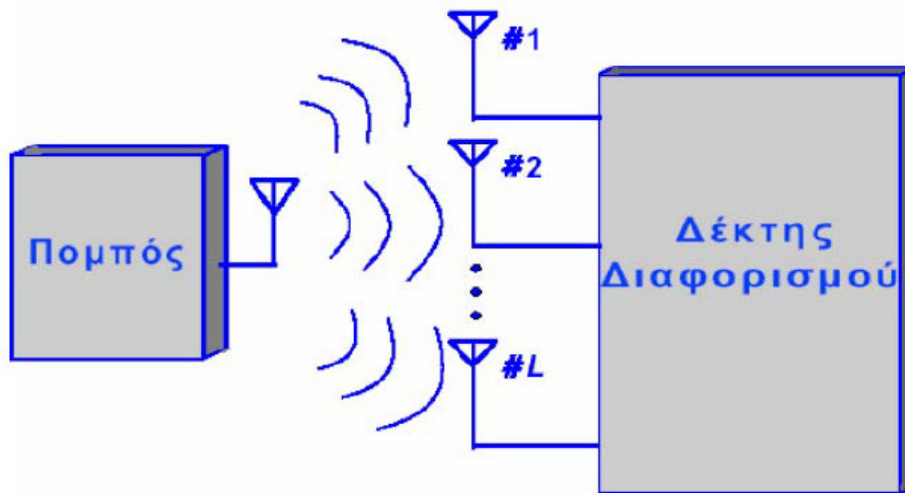
Το ένα ζήτημα που εγείρεται είναι η δυνατότητα του πομπού να λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικής περιοχής ώστε να αντισταθμίζει τις μεγάλες διακυμάνσεις ισχύος, το κόστος κατασκευής ενός πομπού με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τέλος το ρυθμιστικό πλαίσιο βάση του οποίου η ισχύς εκπομπής δεν θα πρέπει να ξεπερνάει κάποια καθορισμένα όρια. Το δεύτερο ζήτημα είναι η άγνοια του πομπού για τις συνθήκες διαλείψεων που επικρατούν στο κανάλι, καθώς οι διαλείψεις και τα αποτελέσματα τους γίνονται αντιληπτά μόνο στον δέκτη. Συνεπώς θα πρέπει να υπάρχει συνεχής ενημέρωση του πομπού από τον δέκτη για την κατάσταση του καναλιού, το οποίο όμως μειώνει την απόδοση και αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος

για την αντιμετώπιση των διαλείψεων στα ασύρματα συστήματα είναι η χρήση διαφορισμού.

Με τον όρο διαφορισμός στα ασύρματα συστήματα εννοούμε την χρήση από τον δέκτη δύο ή περισσότερων αντιγράφων του εκπεμπόμενου σήματος, τα οποία έχουν μεταδοθεί μέσα από κανάλια με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ο σκοπός μας είναι να εκμεταλλευτούμε την τυχαία φύση της ασύρματης διάδοσης και να χρησιμοποιήσουμε πολλαπλά κανάλια για την μετάδοση της πληροφορίας, πολλαπλές δηλαδή εκδοχές του σήματος, τα οποία θα είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστα. Έτσι, εάν σε ένα κανάλι το σήμα παρουσιάζει υψηλή εξασθένηση λόγω διαλείψεων, τότε η πιθανότητα σε κάποιο άλλο αντίγραφο του σήματος να μην έχουμε υψηλή εξασθένηση είναι μεγάλη, εφόσον αυτά τα αντίγραφα έχουν μεταδοθεί μέσα από διαφορετικά κανάλια και είναι ασυσχέτιστα.

3.2 Τεχνικές διαφορισμού

Ο διαφορισμός μπορεί να υλοποιηθεί είτε στον πομπό, είτε στον δέκτη, είτε και στους δύο. Στην πρώτη περίπτωση τα κανάλια διαφορισμού προκύπτουν από την πολλαπλή μετάδοση του σήματος εκπομπής, ενώ στην δεύτερη το σήμα εκπέμπεται μόνο μία φορά και τα κανάλια διαφορισμού προκύπτουν από την ασύρματη μετάδοση λόγω του φαινομένου της διάδοσης πολλαπλής διαδρομής. Οι τεχνικές διαφορισμού διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας των αντιγράφων του σήματος και οι βασικότερες παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 3.1 : Τηλεπικοινωνιακό σύστημα με δέκτη διαφορισμού

Διαφορισμός χώρου

Η πιο διαδεδομένη τεχνική διαφορισμού είναι ο διαφορισμός χώρου ο οποίος υλοποιείται με τη χρήση δύο ή περισσότερων κεραιών λήψης στον δέκτη. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απόσταση μεταξύ των κεραιών να είναι τέτοια, ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα σήματα λήψης θα έχουν πολύ μικρή μεταξύ τους συσχέτιση. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι δεν απαιτείται επιπλέον ισχύς εκπομπής ή εύρος ζώνης για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

Διαφορισμός συχνότητας

Η τεχνική του διαφορισμού συχνότητας υλοποιείται με την ταυτόχρονη εκπομπή του σήματος σε δύο ή περισσότερες συχνότητες. Η απόσταση ανάμεσα στα διάφορα κανάλια συχνοτήτων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να έχουν πολύ μικρή μεταξύ τους συσχέτιση. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτείται τόσες φορές μεγαλύτερη ισχύς εκπομπής και εύρος ζώνης όσος είναι ο αριθμός των συχνοτήτων που θα χρησιμοποιήσουμε.

Διαφορισμός χρόνου

Η τεχνική του διαφορισμού χρόνου απαιτεί την εκπομπή του σήματος δύο ή περισσότερες φορές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η μικρή συσχέτιση μεταξύ των επανεκπομπών του σήματος επιτυγχάνεται όταν η χρονική διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από το σύμφωνο χρόνο του καναλιού. Η τεχνική αυτή επωφελείται από τη δυναμική του καναλιού, αφού τη μια στιγμή οι διαλείψεις μπορεί να είναι ισχυρές, όμως τη στιγμή της επανεκπομπής μπορεί οι διαλείψεις να είναι μειωμένες. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ότι απαιτείται τόσες φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης όσος είναι ο αριθμός των επανεκπομπών του σήματος και ότι μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης του συστήματος.

Διαφορισμός πόλωσης

Η τεχνική του διαφορισμού πόλωσης μπορεί να υλοποιηθεί είτε στον πομπό είτε στον δέκτη. Το σήμα λόγω της ασύρματης μετάδοσης καθώς και λόγω της κίνησης της κεραίας του κινητού υπόκεινται σε μεταβολές της πόλωσης. Στον πομπό το σήμα μπορεί να εκπεμφθεί από δύο κεραίες διαφορετικής πόλωσης, το οποίο καθιστά τα δύο σήματα ασυσχέτιστα. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο κεραίες διαφορετικής πόλωσης στον δέκτη, ώστε να λαμβάνεται το ισχυρότερο σήμα κάθε στιγμή ανεξάρτητα της μεταβολής που έχει υποστεί από την μετάδοση.

Για το υπόλοιπο τμήμα της εργασίας όταν αναφερόμαστε στον όρο διαφορισμός θα θεωρούμε την έννοια του διαφορισμού στη λήψη. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε διάφορους τύπους δεκτών διαφορισμού λήψης, στους οποίους κάθε φορά επιλέγεται το βέλτιστο σήμα ανάλογα με το κριτήριο επιλογής σε κάθε τύπο.

3.3 Δέκτες διαφορισμού

Σε ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα μεγάλη σημασία για την απόδοση του θα έχει, εκτός από την τεχνική διαφορισμού που θα χρησιμοποιηθεί, και ο τρόπος με τον οποίο θα συνδυάζονται τα διάφορα σήματα κατά την λήψη τους από τον δέκτη. Εφόσον αντίγραφα του σήματος λαμβάνονται από τον δέκτη μέσω ανεξάρτητων καναλιών, οι

τρόποι με τους οποίους θα συνδυάζονται θα εξαρτηθεί από την ποσότητα της διαθέσιμης πληροφορίας για την κατάσταση του καναλιού (channel state information – CSI). Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι δεκτών διαφορισμού.

3.3.1 Δέκτες συνδυασμού μέγιστου λόγου

Ο συνδυασμός μέγιστου λόγου (maximal ratio combining - MRC) αποτελεί την βέλτιστη τεχνική συνδυασμού καναλιών διαφορισμού. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός δέκτη MRC με L κεραίες εισόδου. Σε αυτόν τον δέκτη κάθε κλάδος του λαμβανόμενου σήματος πολλαπλασιάζεται με έναν μιγαδικό συντελεστή βάρους W_i αφού πρώτα γίνει αντιστάθμιση της φάσης που εισάγει το κάθε κανάλι, όπου

$$w_i = a_i e^{-j\theta_i}$$

και το στιγμιαίο πλάτος του σήματος εξόδου του δέκτη MRC δίνεται από τη σχέση

$$R_{MRC} = s \sum_{i=1}^L w_i r_i .$$

Εάν υποθέσουμε ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι ίδια σε κάθε κανάλι εισόδου τότε η συνολική N_{TOT} στην έξοδο του δέκτη είναι

$$N_{TOT} = N_0 \sum_{i=1}^L w_i^2 .$$

Συνεπώς ο στιγμιαίος λόγος σήματος προς θόρυβο SNR στην έξοδο του δέκτη είναι

$$\gamma_{MRC} = \frac{R_{MRC}^2}{N_{TOT}} = \frac{1}{N_0} \frac{\left(s \sum_{i=1}^L w_i r_i \right)^2}{\sum_{i=1}^L w_i^2}$$

Το ζητούμενο είναι να υπολογισθούν τα βάρη w_i με τα οποία μεγιστοποιείται το γ_{MRC} , ώστε τα κανάλια εισόδου με τα μεγαλύτερα SNR να έχουν υψηλότερο βάρος από εκείνα με χαμηλότερο, για να είναι τα βάρη w_i^2 αναλογικά με τα SNR των καναλιών r_i^2/N_0 . Για τον

υπολογισμό τους χρησιμοποιούμε την ανισότητα Schwartz, από την οποία προκύπτει ότι τα βέλτιστα βάρη είναι όταν

$$w_i = R_i^*$$

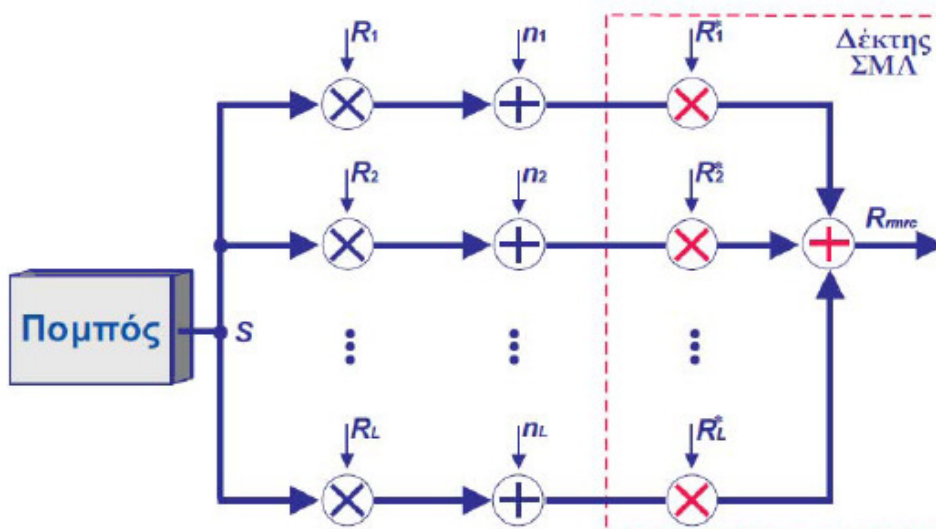
Συνεπώς το στιγμιαίο SNR στην έξοδο του δέκτη είναι

$$\gamma_{\text{MRC}} = \sum_{i=1}^L \gamma_i$$

Και το αντίστοιχο μέσο SNR είναι

$$\bar{\gamma}_{\text{MRC}} = \sum_{i=1}^L \bar{\gamma}_i$$

Με τον συνδυασμό μεγίστου λόγου ο δέκτης παράγει μία έξοδο με SNR όμοιο με το άθροισμα των ανεξάρτητων SNRs και έτσι μπορούμε να παράγουμε μία έξοδο με αποδεκτό SNR, ακόμα και εάν κανένα από τα επιμέρους σήματα δεν είναι αποδεκτό για λήψη. Συνεπώς επιτυγχάνεται μια μέγιστη εκμετάλλευση των σημάτων που λαμβάνονται από το δέκτη μέσω διαφορετικών καναλιών.

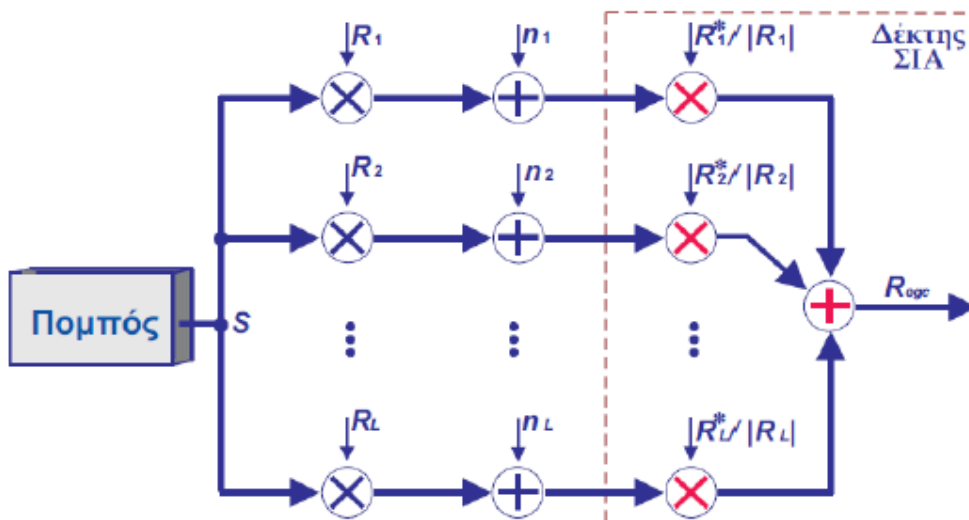


Σχήμα 3.2 : Δέκτης συνδυασμού μεγίστου λόγου

Ο δέκτης MRC βελτιστοποιεί την απόδοση του συστήματος, ανεξάρτητα από τις συνθήκες του καναλιού, εφόσον όμως υπάρχει άριστη γνώση όλων των παραμέτρων του καναλιού διαλείψεων. Όταν η γνώση μας είναι περιορισμένη, η σχεδίαση του δέκτη εξαρτάται από την στατιστική των παραμέτρων του καναλιού. Το μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι αυτό της αυξημένης πολυπλοκότητας, διότι απαιτείται συνεχής ενημέρωση των συνθηκών που επικρατούν.

3.3.2 Δέκτες συνδυασμού ίσης απολαβής

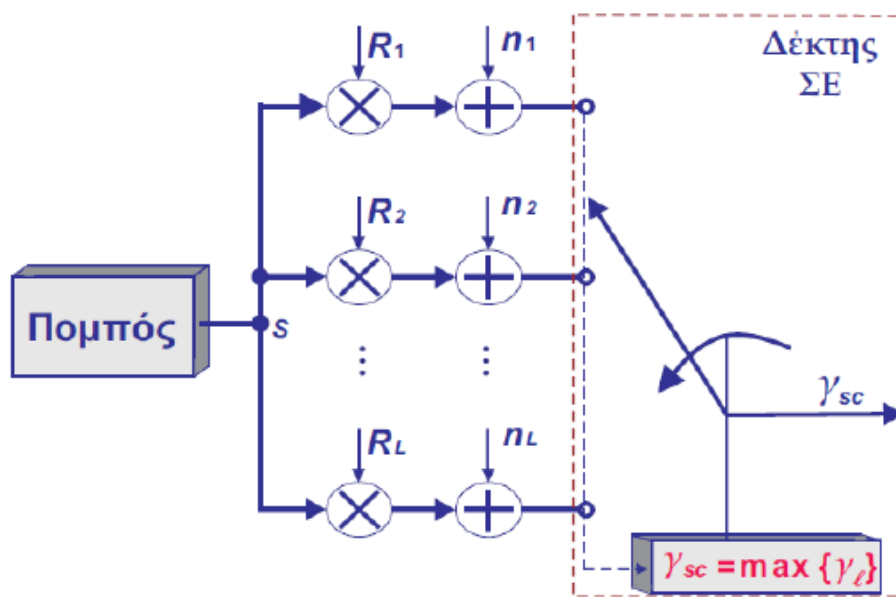
Ο συνδυασμός ίσης απολαβής (equal gain combining – EGC) αποτελεί μια τεχνική συνδυασμού καναλιών διαφορισμού, η οποία έχει πολλές ομοιότητες με αυτή του συνδυασμού μέγιστου λόγου. Η μόνη διαφορά είναι ότι στον δέκτη EGC όλα τα σήματα που λαμβάνονται από τους κλάδους πολλαπλασιάζονται με συντελεστές κλάδου οι οποίοι έχουν όλοι την ίδια τιμή. Έτσι θεωρούμε ότι δεν απαιτείται γνώση του πλάτους του σήματος εισόδου, παρά μόνο η φάση του. Αυτό τον καθιστά λιγότερο πολύπλοκο σε σχέση με τον δέκτη MRC, το οποίο αποτελεί το κύριο συγκριτικό του πλεονέκτημα. Η επίδοση του υστερεί αναλογικά με αυτή του δέκτη MRC, όμως αποτελεί ικανοποιητική λύση στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί με κάποιο σύμφωνο σχήμα διαμόρφωσης.



Σχήμα 3.3 : Δέκτης συνδυασμού ίσης απολαβής

3.3.3 Δέκτες συνδυασμού επιλογής

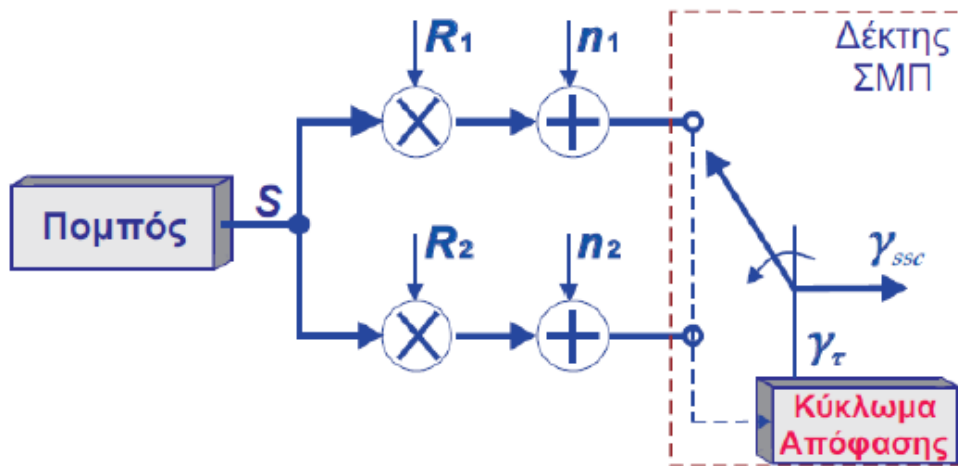
Στον δέκτη συνδυασμού επιλογής (selection combining – SC) απαιτείται γνώση μόνο των πλατών των λαμβανόμενων σημάτων εισόδου, από τα οποία κάθε φορά επιλέγεται το μεγαλύτερο με τη χρήση ενός επιλογέα. Μειονέκτημα του αποτελεί η ανάγκη ύπαρξης ενός ξεχωριστού δέκτη για κάθε επιπλέον κλάδο. Συνολικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι ο δέκτης SC είναι ο μικρότερης πολυπλοκότητας, αλλά και αντίστοιχα ο χαμηλότερης επίδοσης συγκριτικά με τους δυο προηγούμενους τύπους δεκτών.



Σχήμα 3.4 : Δέκτης συνδυασμού επιλογής

3.3.4 Δέκτες συνδυασμού μεταγωγής και παραμονής

Στον δέκτη συνδυασμού μεταγωγής και παραμονής (switch and stay combining – SSC) απαιτείται γνώση μόνο των πλατών των λαμβανόμενων σημάτων εισόδου, όπως και στον δέκτη SC, με μόνη διαφορά ότι η μεταγωγή ανάμεσα στους κλάδους γίνεται όταν το σήμα από κάποιο κλάδο μειωθεί κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή. Ο συγκεκριμένος τύπος δέκτη αποτελεί τον πιο απλό τύπο, αλλά συγχρόνως και τον πιο χαμηλής επίδοσης.



Σχήμα 3.5 : Δέκτης συνδυασμού μεταγωγής και παραμονής

4. Μελέτη Επιδόσεων Ασύρματων Συστημάτων

Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν θεωρητικά, το φαινόμενο των διαλείψεων στις ασύρματες κινητές επικοινωνίες, τα μοντέλα των διαλείψεων και οι τεχνικές αντιμετώπισής τους με τη χρήση του διαφορισμού και των δεκτών διαφορισμού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων των ασύρματων συστημάτων κάνοντας χρήση της τεχνικής διαφορισμού στη λήψη με δέκτη MRC, με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink που αποτελεί ένα πραγματικά χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Η μελέτη και η αξιολόγηση του συστήματος γίνεται με βάση της καμπύλες μέσης πιθανότητας σφάλματος (BER) που προκύπτουν κάθε φορά μετά το τέλος της προσομοίωσης.

Συγκεκριμένα, θα ακολουθήσει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων αναφορικά με την μέση πιθανότητα σφάλματος για το σύμφωνο τύπο διαμόρφωσης QPSK και τον ασύμφωνο BDPSK. Έχει προσομοιωθεί η διάδοση στο ασύρματο περιβάλλον για μεταδιδόμενο σήμα που υφίσταται διαλείψεις Rayleigh σε συνδυασμό με λευκό γκαουσιανό προσθετικό θόρυβο AWGN. Για την λήψη θα γίνει χρήση αρχικά απλού δέκτη και στη συνέχεια διαφορικής λήψης με δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC. Για όλες τις περιπτώσεις θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων προσομοίωσης Simulink με τα θεωρητικώς αναμενόμενα αποτελέσματα της μαθηματικής προσέγγισης ώστε να γίνει η επαλήθευσή τους.

4.1 Παρουσίαση του λογισμικού Matlab/Simulink

Το λογισμικό σχεδίασης Matlab/Simulink είναι ένα πρόγραμμα βασισμένο σε παραθυρικό περιβάλλον και χρησιμοποιείται σε πολλές πλατφόρμες όπως τα Windows, Linux και Mac. Μας επιτρέπει να μοντελοποιούμε και να αναλύουμε συστήματα των οποίων οι έξοδοι μεταβάλλονται με το χρόνο και τα οποία αναφέρονται ως δυναμικά. Το λογισμικό χρησιμοποιείται για να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός μεγάλου εύρους

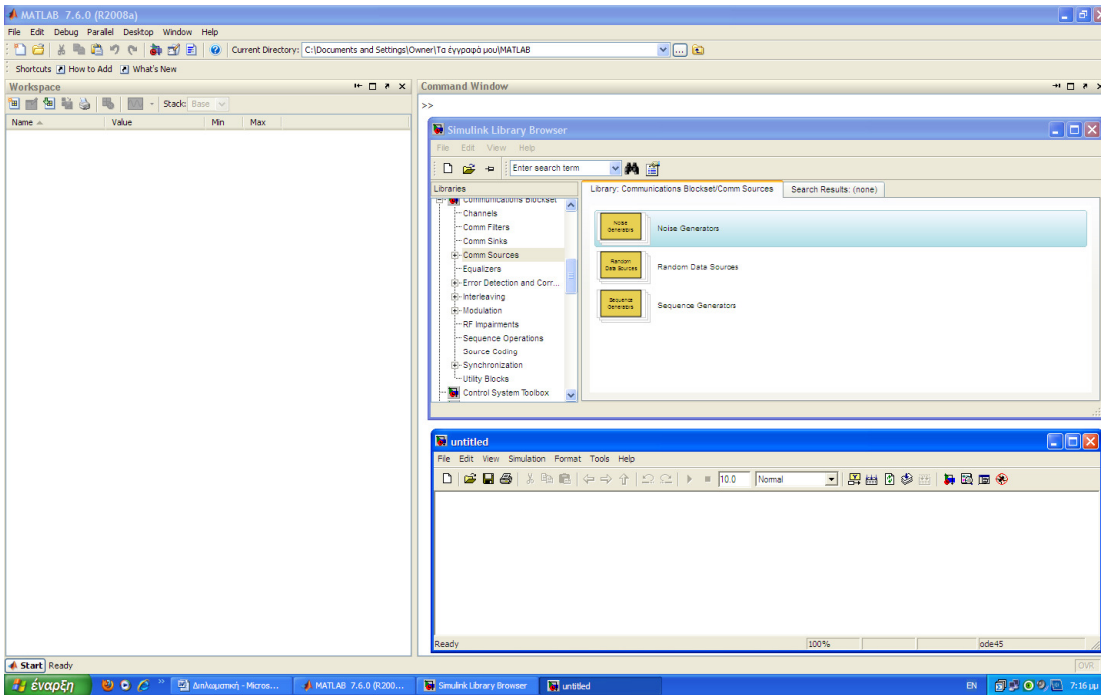
δυναμικών συστημάτων, συμπεριλαμβάνοντας ηλεκτρονικά κυκλώματα, μηχανικά και θερμοδυναμικά συστήματα. Επίσης υποστηρίζει και μη γραμμικά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε συνεχείς τιμές χρόνου, σε διακριτές ή σε συνδυασμό και των δυο. Το λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει το μοντέλο ενός ολοκληρωμένου τηλεπικοινωνιακού συστήματος και στην συνέχεια να το προσομοιώσει.

Η μοντελοποίηση ενός συστήματος γίνεται με την χρήση σχηματικών μητρών διαμόρφωσης (blocks). Το Matlab/Simulink εμπεριέχει μία ολοκληρωμένη ‘βιβλιοθήκη’ με blocks τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν αυτούσια ή να τροποποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του μοντέλου που θέλουμε να υλοποιήσουμε. Παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα νέο block από την αρχή στο οποίο θα ενσωματωθούν οι απαραίτητες μαθηματικές εκφράσεις της λειτουργίας για την οποία σχεδιάστηκε.

Στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας έγινε κυρίως χρήση blocks που αναφέρονται σε τηλεπικοινωνίες, όπως γεννήτριες παραγωγής σημάτων, διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές, κανάλια θορύβου AWGN και διαλείψεων Rayleigh. Το κάθε ξεχωριστό block μπορεί να παραμετροποιηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε μοντέλου που χρησιμοποιείτε. Η ανάλυση των βασικών blocks του λογισμικού Matlab/Simulink με τα οποία έγινε η μοντελοποίηση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων της εργασίας θα γίνει στο Παράρτημα 1.1. Επιπλέον στο Παράρτημα 1.2 γίνεται εκτενής αναφορά σε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο της εφαρμογής Matlab, το οποίο είναι αυτό της ανάλυσης ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate Analysis Tool). Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται για την γραφική απεικόνιση του ρυθμού σφαλμάτων BER σε σχέση με την ενέργεια ανά bit προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου E_b / N_0 τόσο για τα θεωρητικά μοντέλα, όσο και για τα εκάστοτε αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Συνοπτικά τα κύρια πλεονεκτήματα του λογισμικού Matlab/Simulink είναι ότι ο χρήστης μπορεί, μέσα από ένα ολοκληρωμένο πακέτο σχηματικών μητρών διαμόρφωσης (blocks) και ενός ισχυρού μηχανισμού προσομοίωσης, να σχεδιάσει το τηλεπικοινωνιακό μοντέλο που τον ενδιαφέρει και να εξάγει γρήγορες και ακριβείς αναλύσεις για την αξιολόγηση του συστήματος. Επίσης με τη χρήση του λογισμικού καθίσταται εύκολη η μετάβαση ανάμεσα

στα στάδια της αρχικής δημιουργίας του μοντέλου, της προσομοίωσης, της βελτιστοποίησης και της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ελέγχου του σήματος σε οποιοδήποτε στάδιο του τηλεπικοινωνιακού μοντέλου μας ενδιαφέρει.



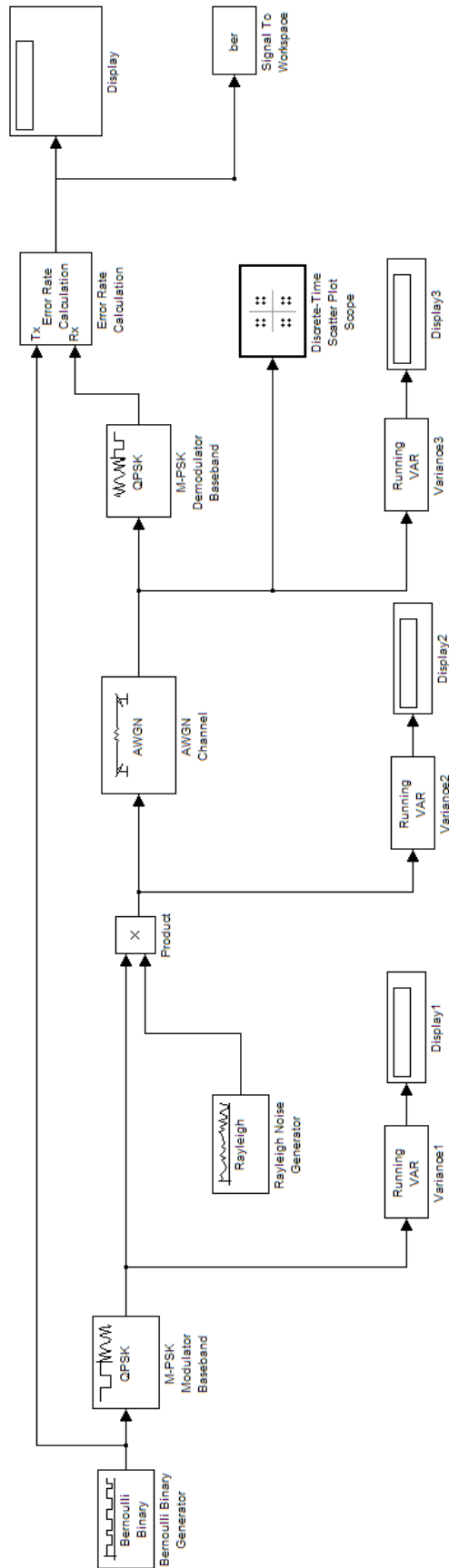
Σχήμα 4.1 : Λογισμικό Matlab/Simulink

4.2 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση QPSK σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh

4.2.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος

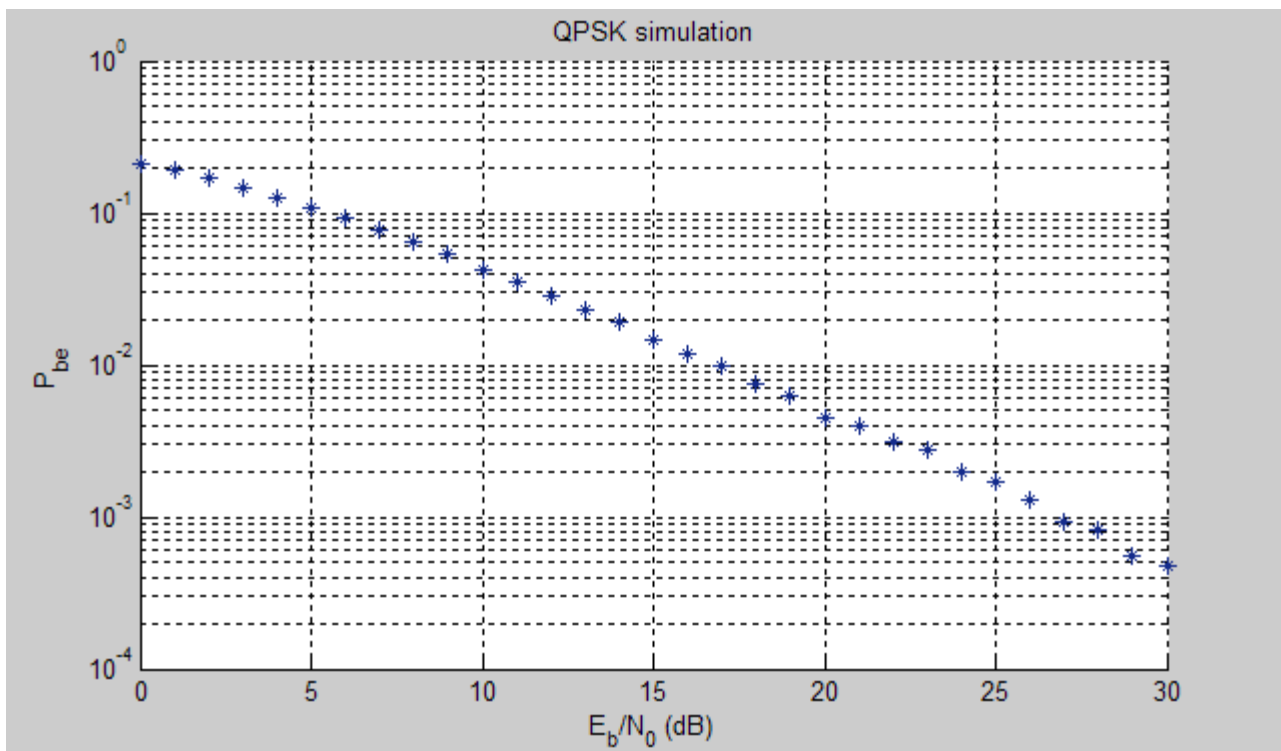
Στόχος στην περίπτωση αυτή είναι η σχεδίαση και υλοποίηση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος όπου το ασύρματο κανάλι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh σε συνδυασμό με λευκό γκαουσιανό προσθετικό θόρυβο AWGN. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι μεταλλαγής ολίσθησης φάσης QPSK, όπου το πλάτος και η συχνότητα του διαμορφωμένου σήματος παραμένουν σταθερά, ενώ η φάση έχει μία από τις 4 πιθανές τιμές. Για την βελτίωση της πιθανότητας σφάλματος έγινε χρήση της κωδικοποίησης Gray στον τύπο της διαμόρφωσης. Αναλυτικά το τηλεπικοινωνιακό μας μοντέλο απαρτίζεται από τρία βασικά τμήματα:

- Το τμήμα εκπομπής, το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ψηφίων και τον διαμορφωτή QPSK.
- Το ασύρματο κανάλι, το οποίο υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh, μέσω μίας γεννήτριας θορύβου κατανομής Rayleigh, σε συνδυασμό με λευκό γκαουσιανό προσθετικό θόρυβο, μέσω ενός καναλιού AWGN.
- Το τμήμα λήψης, το οποίο αποτελείται από τον αποδιαμορφωτή QPSK και τον υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων.



Σχήμα 4.2 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση QPSK

Στη συνέχεια ακολουθεί η προσομοίωση του μοντέλου με σκοπό την αποτύπωση της πιθανότητας σφάλματος στο εύρος του σηματοθορυβικού λόγου που θέλουμε να το εξετάσουμε. Η προσομοίωση του συγκεκριμένου μοντέλου, αλλά και όλων των υπόλοιπων που ακολουθούν στη συνέχεια της εργασίας, γίνεται μέσω του εργαλείου ανάλυσης ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate Analysis Tool). Το συγκεκριμένο εργαλείο πραγματοποιεί την προσομοίωση του μοντέλου για το εύρος του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit (E_b / N_0) που επιθυμούμε και επίσης μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε τα όρια της προσομοίωσης. Τόσο για το συγκεκριμένο μοντέλο, όσο και για όλα τα υπόλοιπα που ακολουθούν στην εργασία το όριο είναι ορισμένο στα 10000 εσφαλμένα bit, από όπου προκύπτει και η πιθανότητα σφάλματος ανά bit. Με το πέρας της προσομοίωσης ακολουθεί η γραφική παράσταση σε ημιλογαριθμική κλίμακα των πιθανοτήτων σφάλματος ανά bit (bit error probability) συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit (E_b / N_0 , signal to noise ratio per bit) σε decibels. Στο Παράρτημα 1.2 γίνεται αναφορά στις επιμέρους λειτουργίες του εργαλείου ανάλυσης ρυθμού σφαλμάτων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η καμπύλη BER του μοντέλου με τύπο διαμόρφωσης QPSK.



Σχήμα 4.3 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b / N_0 για διαμόρφωση QPSK

4.2.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.1 του θεωρητικού τμήματος της εργασίας, η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση ενός καναλιού διαλείψεων στο οποίο δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην περίπτωση αυτή η τυχαία μεταβλητή r , η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον μετάδοσης, έχει στιγμιαία ισχύ r^2 , μέση ισχύ $\Omega = \overline{r^2}$ και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_r(r)$ που δίνεται από τη σχέση

$$f_r(r) = \frac{2r}{\Omega} \exp\left(-\frac{r^2}{\Omega}\right).$$

Στη συνέχεια ορίζουμε το λόγο σήματος προς θόρυβο ανά σύμβολο γ , ο οποίος είναι μία τυχαία μεταβλητή, με στιγμιαία τιμή ως

$$\gamma = r^2 \frac{E_s}{N_0}$$

και μέση τιμή ως

$$\overline{\gamma} = \overline{r^2} \frac{E_s}{N_0} = \Omega \frac{E_s}{N_0}.$$

Γνωρίζουμε ότι η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής του στιγμιαίου γ είναι

$$F_\gamma(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma}}\right)$$

από την οποία εάν παραγωγίσουμε θα προκύψει η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του γ που θα είναι η εξής

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\overline{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma}}\right).$$

Το κανάλι AWGN είναι ένα κανάλι αναφοράς, όπου η πιθανότητα σφάλματος κατά τη λήψη ενός bit ή ενός συμβόλου εξαρτάται από την ενέργεια του σήματος και το επίπεδο του θορύβου. Στα πραγματικά όμως κανάλια ασύρματων επικοινωνιών το σήμα υφίσταται διαλείψεις που οφείλονται σε φαινόμενα διάδοσης και μεταβάλλονται τυχαία με το χρόνο και τη θέση του δέκτη, όπως οι διαλείψεις κατανομής Rayleigh. Συνεπώς αφού σε τέτοια κανάλια ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο γ είναι μια τυχαία μεταβλητή που περιγράφεται από την παραπάνω συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f_\gamma(\gamma)$, τότε και η πιθανότητα λανθασμένου συμβόλου θα είναι μία τυχαία μεταβλητή και θα πρέπει να περιγράφεται με στατιστικά χαρακτηριστικά. Αν η διάρκεια συμβόλου T_s είναι περίπου ίση με το χρόνο συνοχής T_c του καναλιού, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε το $\bar{\gamma}$ σχεδόν σταθερό στη διάρκεια ενός συμβόλου και να υπολογίσουμε το μέση πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου από τη σχέση

$$\bar{P}_{se} = \int_0^\infty P_{se}(\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma$$

όπου $P_{se}(\gamma)$ είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου για κανάλι AWGN με σηματοθορυβικό λόγο γ . Για τον τύπο διαμόρφωσης QPSK, η $P_{se}(\gamma)$ μπορεί να εκφρασθεί με την παρακάτω σχέση

$$P_{se}(\gamma) = \text{erfc}(\sqrt{\gamma}).$$

Συνεπώς η μέση πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου \bar{P}_{se} για τύπο διαμόρφωσης QPSK προκύπτει από τη σχέση

$$\bar{P}_{se} = \int_0^\infty \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma$$

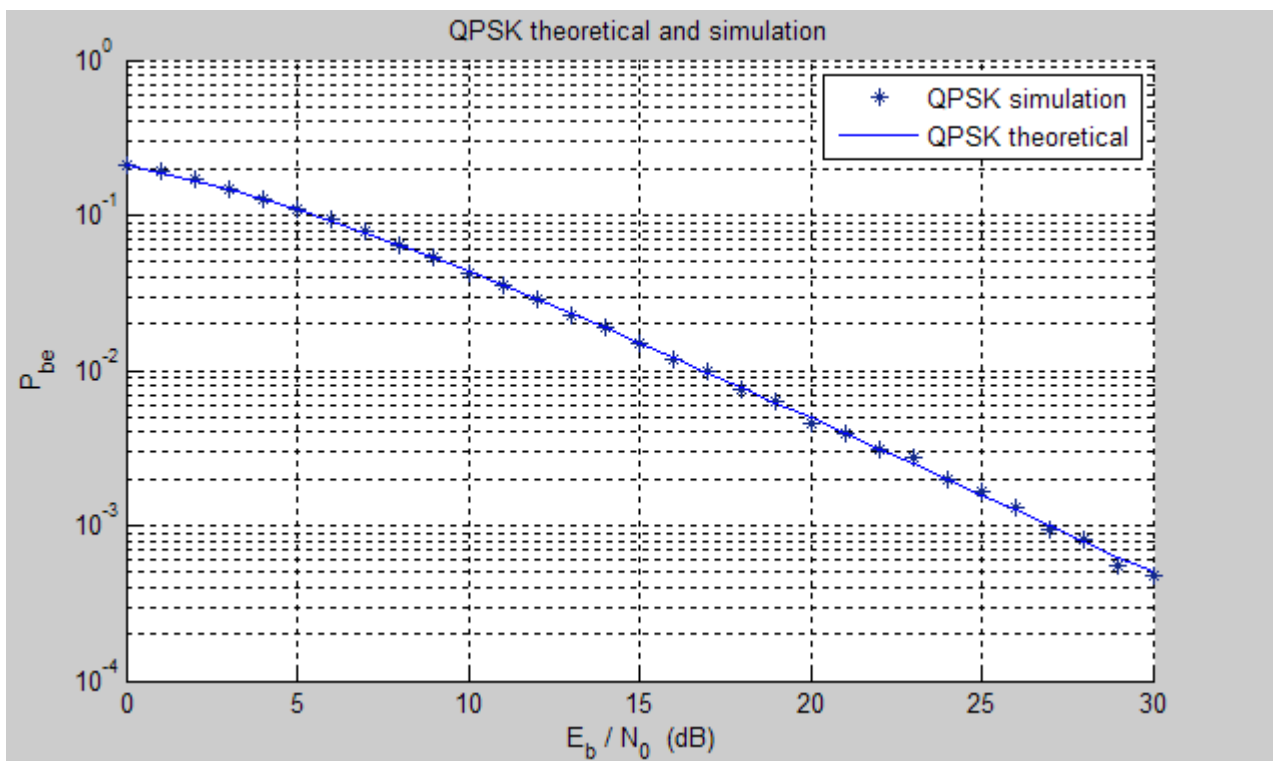
και στην τελική μορφή θα είναι

$$\bar{P}_{se} = 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}}{\bar{\gamma} + 1}}.$$

Επίσης μπορεί να εκφρασθεί και ως μέση πιθανότητα εσφαλμένου bit \bar{P}_{be} από την σχέση

$$\bar{P}_{be} = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma + 1}} \right].$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση της μέσης πιθανότητας σφάλματος ανά bit \bar{P}_{be} , που υπολογίστηκε προηγουμένως θεωρητικά, συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit (E_b / N_0 , signal to noise ratio per bit) σε decibels, για την δημιουργία της οποίας χρησιμοποιήθηκε το παράθυρο εντολών του λογισμικού Matlab. Στο Παράρτημα 2.1 υπάρχει ο κώδικας απόδοσης της παραπάνω μέσης πιθανότητας σφάλματος για την διαμόρφωση QPSK.



Σχήμα 4.4 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση QPSK

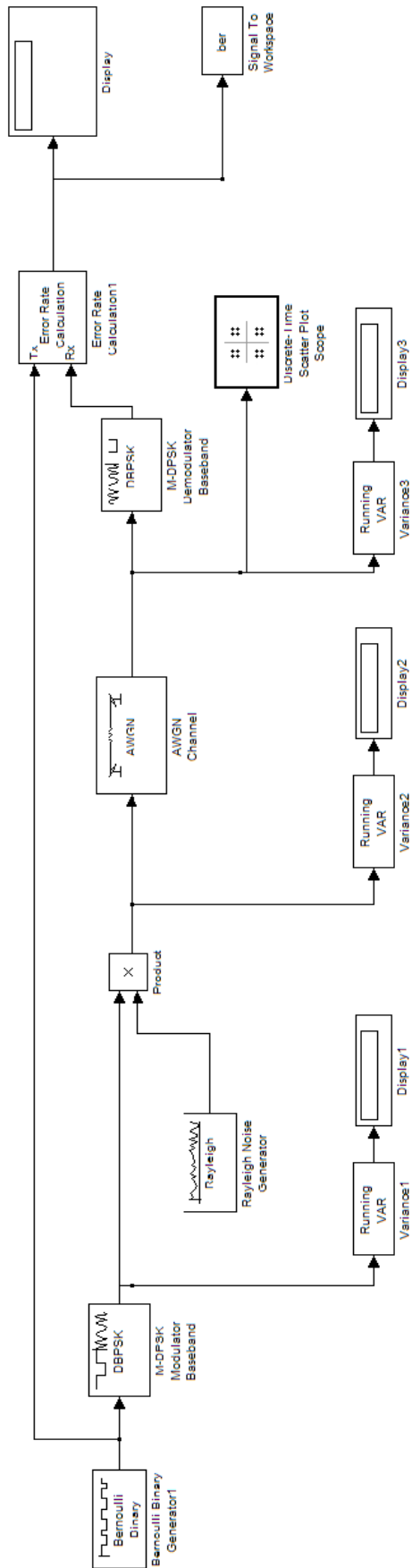
Είναι εμφανές από το σχήμα 4.4 ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση στους υπολογισμούς της πιθανότητας σφάλματος bit ανάμεσα στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και από την θεωρητική ανάλυση.

4.3 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση BDPSK σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh

4.3.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος

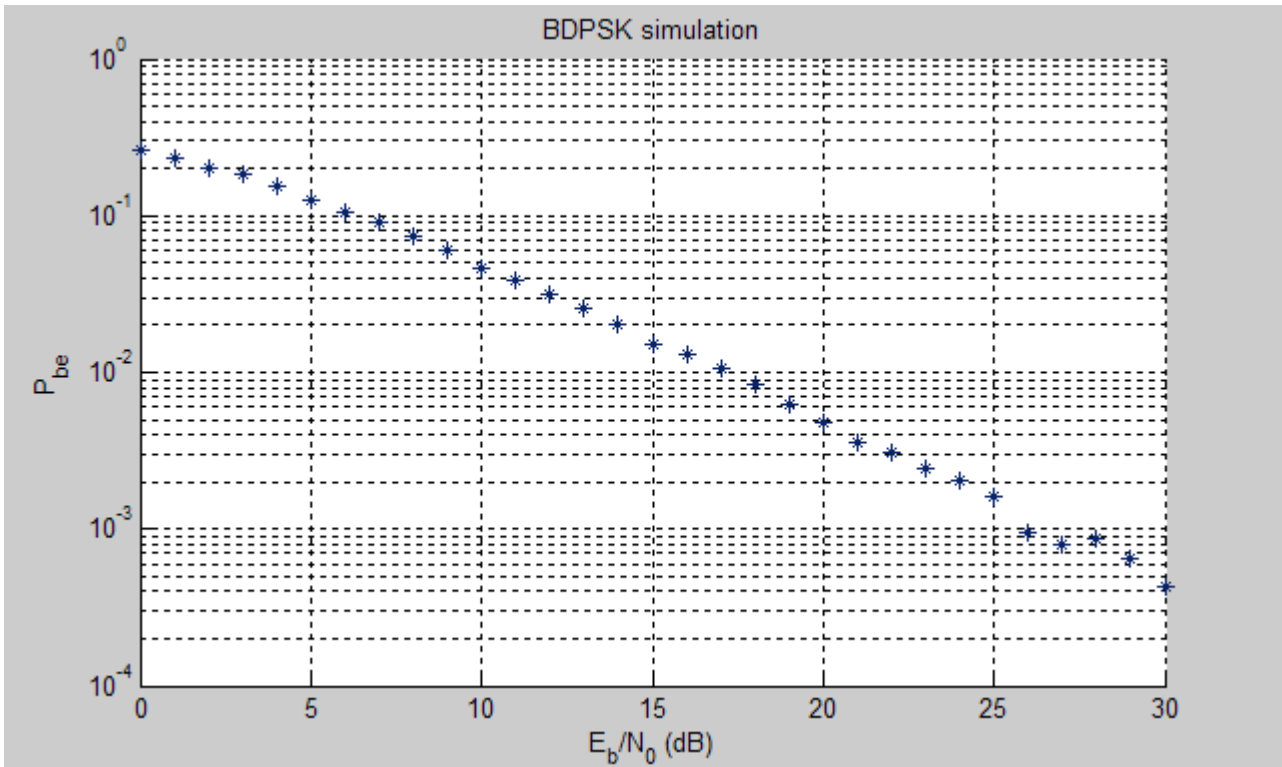
Στον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα (QPSK) ο δέκτης γνωρίζει και αξιοποιεί τη συχνότητα του φέροντος προκειμένου να αποδιαμορφώσει το λαμβανόμενο σήμα, τεχνική η οποία καλείται σύμφωνη (coherent). Υπάρχουν όμως και άλλες σύμφωνες τεχνικές όπως οι διαφορικής ανίχνευσης (differential detection) τύποι διαμόρφωσης, όπου η ψηφιακή πληροφορία κωδικοποιείται όχι σε κάποιο χαρακτηριστικό του φέροντος, αλλά στις μεταβολές αυτού. Το πλεονέκτημα των διαφορικών τύπων είναι η απλούστερη υλοποίηση του δέκτη, με τίμημα όμως την αύξηση της πιθανότητας σφάλματος. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος είναι η διαφορική διαμόρφωση μεταλλαγής ολίσθησης φάσης BDPSK. Συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση έχει σχεδιασθεί ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα όπου το ασύρματο κανάλι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh σε συνδυασμό με θόρυβο AWGN, ενώ χρησιμοποιείται ο παραπάνω τύπος διαμόρφωσης. Αναλυτικά το τηλεπικοινωνιακό μας μοντέλο απαρτίζεται από τρία βασικά τμήματα:

- Το τμήμα εκπομπής, το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ψηφίων και τον διαμορφωτή BDPSK.
- Το ασύρματο κανάλι, το οποίο υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh, μέσω μίας γεννήτριας θορύβου κατανομής Rayleigh, σε συνδυασμό με λευκό γκαουσιανό προσθετικό θόρυβο, μέσω ενός καναλιού AWGN.
- Το τμήμα λήψης, το οποίο αποτελείται από τον αποδιαμορφωτή BDPSK και τον υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων.



Σχήμα 4.5 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση BDPSK

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η καμπύλη πιθανότητας σφάλματος bit για εύρος σηματοθορυβικού λόγου ανά bit 0 έως 30 dB που προέκυψε από την προσομοίωση του μοντέλου με τύπο διαμόρφωσης BDPSK.



Σχήμα 4.6 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b / N_0 για διαμόρφωση BDPSK

4.3.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν στο κεφάλαιο 4.2 προκύπτει ότι η μέση πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου σε πραγματικά κανάλια ασύρματων επικοινωνιών με διαλείψεις κατανομής Rayleigh δίνεται από τη σχέση

$$\bar{P}_{se} = \int_0^{\infty} P_{se}(\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma$$

η οποία εκφράζεται και ως μέση πιθανότητα εσφαλμένου bit από τη σχέση

$$\bar{P}_{be} = \int_0^{\infty} P_{be}(\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma.$$

Για τον τύπο διαμόρφωσης BDPSK, η υπό συνθήκη πιθανότητα εσφαλμένου bit $P_{be}(\gamma)$ για κανάλι AWGN με σηματοθορυβικό λόγο γ μπορεί να εκφρασθεί από την παρακάτω σχέση

$$P_{be}(\gamma) = \frac{1}{2} \exp(-\gamma),$$

ενώ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του γ είναι όμοια με αυτή που υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και είναι η εξής

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right)$$

Συνεπώς η μέση πιθανότητα εσφαλμένου bit \bar{P}_{be} για τύπο διαμόρφωσης BDPSK προκύπτει από τη σχέση

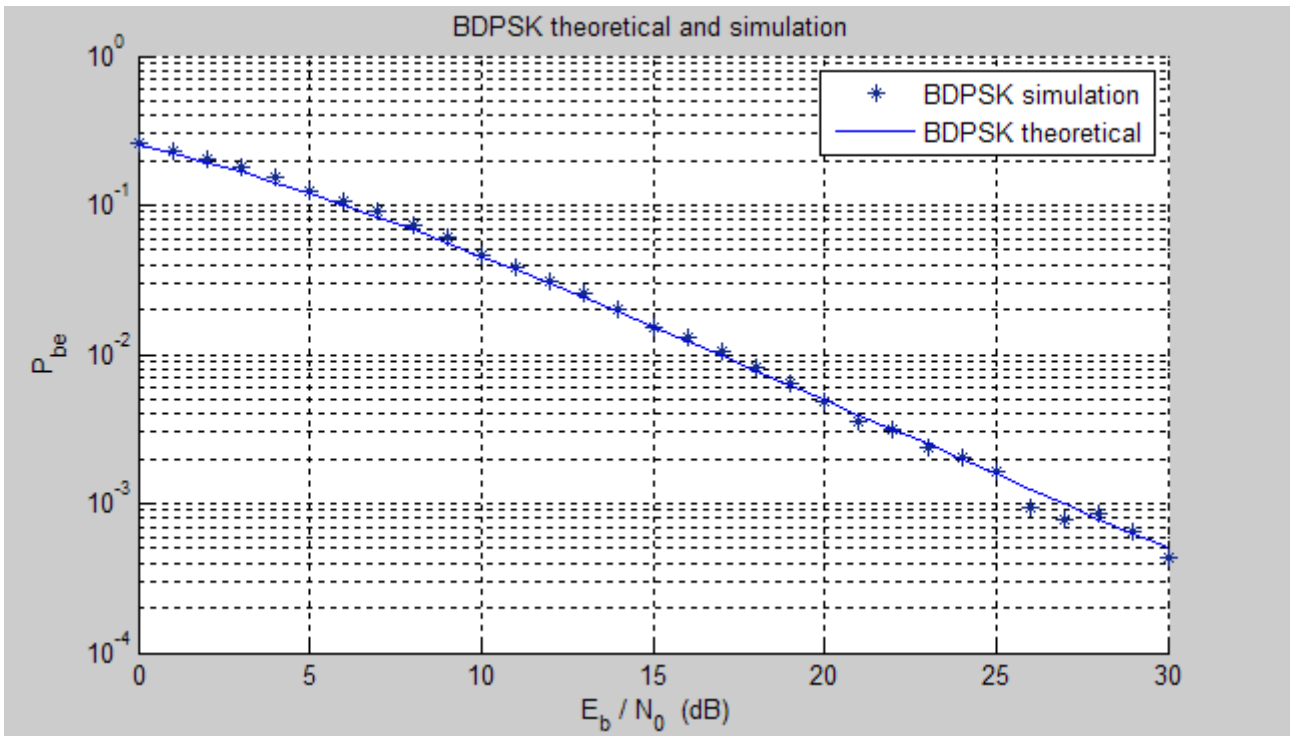
$$\bar{P}_{be} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \exp(-\gamma) \frac{1}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) d\gamma$$

και στην τελική μορφή θα είναι

$$\bar{P}_{be} = \frac{1}{2(\gamma+1)}.$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η γραφική παράσταση της μέσης πιθανότητας εσφαλμένου bit \bar{P}_{be} , που υπολογίστηκε προηγουμένως θεωρητικά, συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit (E_b / N_0 , signal to noise ratio per bit) σε decibels, για την δημιουργία της οποίας χρησιμοποιήθηκε το παράθυρο εντολών του λογισμικού Matlab. Στο Παράρτημα 2.2

υπάρχει ο κώδικας απόδοσης της παραπάνω μέσης πιθανότητας σφάλματος για την διαμόρφωση BDPSK.



Σχήμα 4.7 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση BDPSK

Είναι εμφανές από το σχήμα 4.7 ότι και για αυτό τον τύπο διαμόρφωσης υπάρχει πλήρης ταύτιση στους υπολογισμούς της πιθανότητας σφάλματος bit ανάμεσα στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και από την θεωρητική ανάλυση.

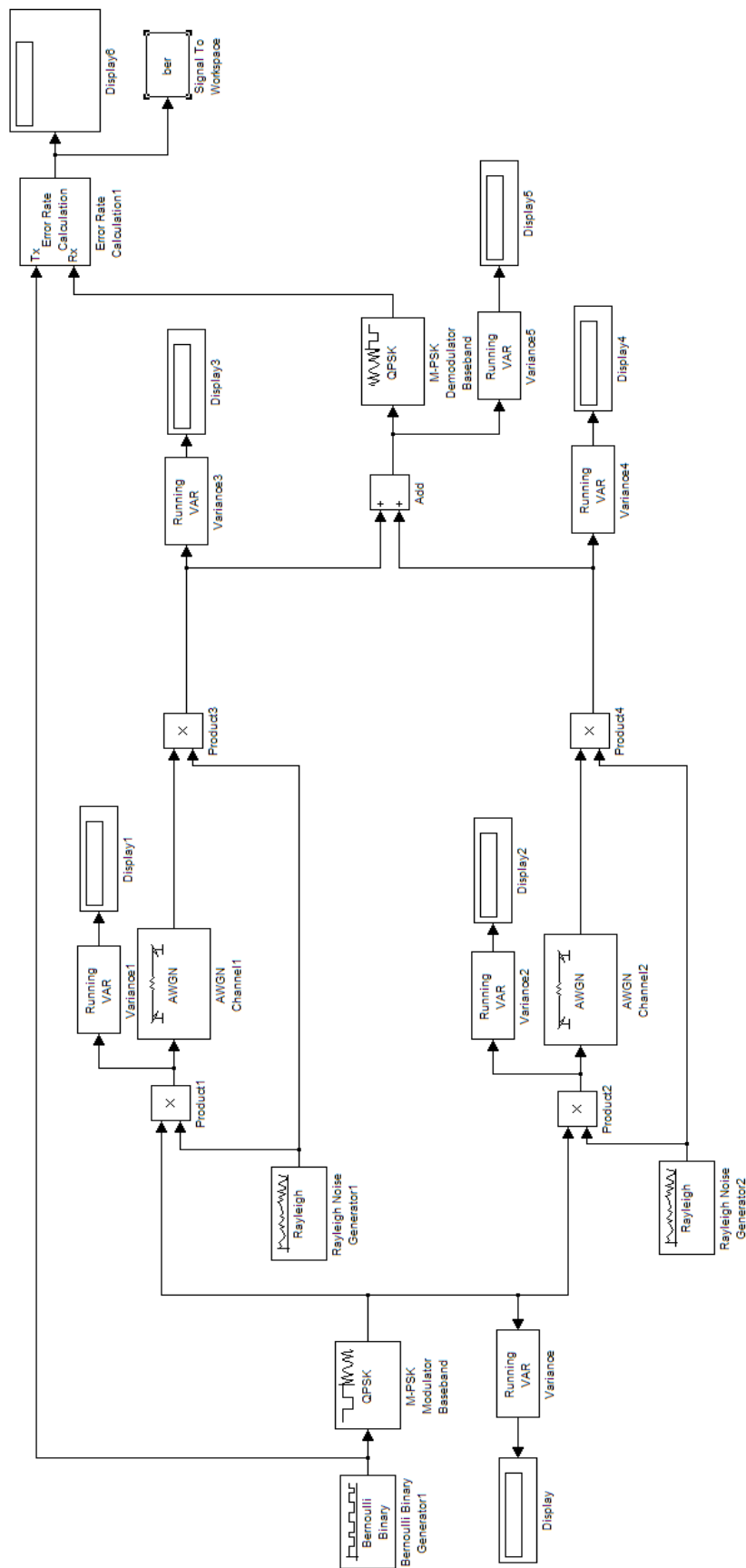
4.4 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση QPSK σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC

4.4.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη βελτίωσης της απόδοσης ασύρματων συστημάτων με χρήση τεχνικών διαφορισμού. Για να εξετάσουμε το συγκεκριμένο θέμα χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC, ο οποίος βελτιώνει την απόδοση και επιτυγχάνει μέγιστη εκμετάλλευση των σημάτων εισόδων του. Για τη

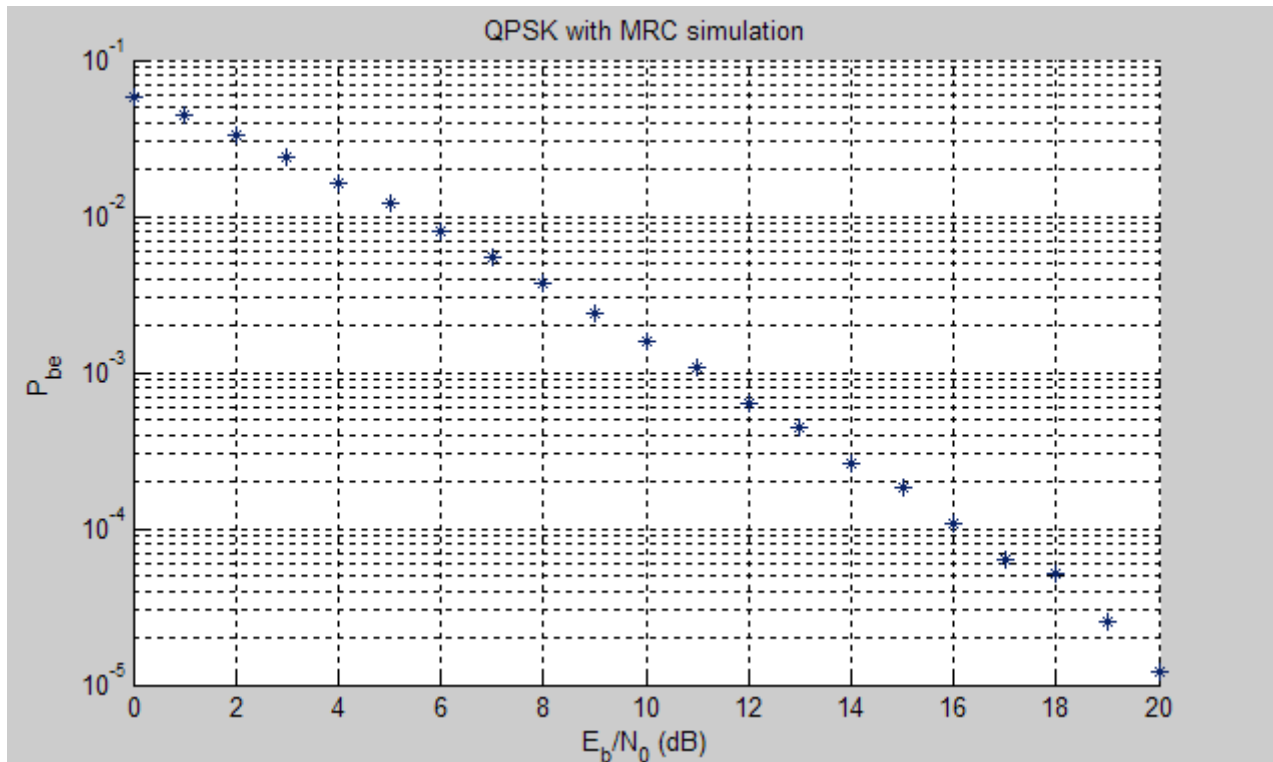
σχεδίαση του συγκεκριμένου μοντέλου βασιστήκαμε στο μοντέλο που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 4.2.1 , στο οποίο είχαμε διαμορφωση QPSK και η αξιοπιστία του επιβεβαιώθηκε από τους προηγούμενους υπολογισμούς. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δυο ανεξάρτητα κανάλια τα οποία υπόκεινται σε διαλείψεις Rayleigh σε συνδυασμό με θόρυβο AWGN, καθένα από τα οποία συνδεόταν στις εισόδους του δέκτη MRC. Αναλυτικά το τηλεπικοινωνιακό μας μοντέλο απαρτίζεται από τρία βασικά τμήματα:

- Το τμήμα εκπομπής, το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ψηφίων και τον διαμορφωτή QPSK και το διαχωρισμό του σήματος εξόδου του διαμορφωτή σε δυο κανάλια. Ο διαχωρισμός γίνεται για να προσομοιωθούν τα αντίγραφα του σήματος εκπομπής τα οποία λαμβάνονται από το δέκτη.
- Το τμήμα της ασύρματης μετάδοσης, το οποίο αποτελείται από δυο ασυσχέτιστα κανάλια που υπόκεινται σε διαλείψεις Rayleigh, μέσω δυο ανεξάρτητων γεννητριών θορύβου κατανομής Rayleigh, σε συνδυασμό με θόρυβο AWGN μέσω δύο καναλιών AWGN.
- Το τμήμα λήψης, το οποίο αποτελείται από την προσομοίωση του δέκτη MRC, τον αποδιαμορφωτή QPSK και τον υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων. Όπως γνωρίζουμε, ο δέκτης MRC χρειάζεται να έχει άριστη γνώση όλων των παραμέτρων του καναλιού διαλείψεων, για αυτό το λόγο στο μοντέλο μας τα δύο ανεξάρτητα σήματα στις εισόδους του δέκτη πολλαπλασιάζονται με τα σήματα από τις αντίστοιχες γεννήτριες θορύβου κατανομής Rayleigh. Στη συνέχεια το άθροισμα τους οδηγείται στον αποδιαμορφωτή για επεξεργασία.



Σχήμα 4.8 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση QPSK και δέκτη MRC

Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η καμπύλη πιθανότητας σφάλματος bit για εύρος σηματοθορυβικού λόγου ανά bit 0 έως 20 dB που προέκυψε από την προσομοίωση του μοντέλου με τύπο διαμόρφωσης QPSK σε συνδυασμό με δέκτη MRC.



Σχήμα 4.9 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b/N_0 για διαμόρφωση QPSK και δέκτη MRC

4.4.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας η στιγμιαία τιμή του σηματοθορυβικού λόγου στην έξοδο ενός δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου είναι το άθροισμα των σηματοθορυβικών λόγων όλων των κλάδων

$$\gamma_{MRC} = \sum_{i=1}^M \gamma_i .$$

Εάν το κανάλι υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh, αργές και μη επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα, και η μέση τιμή των σηματοθορυβικών λόγων όλων των κλάδων είναι $\bar{\gamma}$, τότε

η γ_{MRC} είναι το άθροισμα M ανεξάρτητων εκθετικά κατανομημένων τυχαίων μεταβλητών, με μέση τιμή $\bar{\gamma}_{\text{MRC}} = M \bar{\gamma}$ και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$f_{\gamma_{\text{MRC}}}(\gamma) = \frac{\gamma^{M-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)}{\bar{\gamma}^{-M} (M-1)!}.$$

Στην περίπτωση όπου ο αριθμός των κλάδων του δέκτη MRC είναι $M=2$, τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_{\gamma_{\text{MRC}}}(\gamma) = \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right).$$

Άρα σύμφωνα με τους υπολογισμούς προηγούμενων κεφαλαίων προκύπτει ότι η μέση πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου σε πραγματικά κανάλια ασύρματων επικοινωνιών με διαλείψεις κατανομής Rayleigh και κάνοντας χρήση δέκτη MRC δίνεται από τη σχέση

$$\bar{P}_{\text{se}} = \int_0^{\infty} P_{\text{se}}(\gamma) f_{\gamma_{\text{MRC}}}(\gamma) d\gamma$$

όπου η υπό συνθήκη πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου για κανάλι AWGN με σηματοθορυβικό λόγο γ για τον τύπο διαμόρφωσης QPSK, μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_{\text{se}}(\gamma) = \text{erfc}(\sqrt{\gamma})$$

Συνεπώς η μέση πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου \bar{P}_{se} για τύπο διαμόρφωσης QPSK προκύπτει από τη σχέση

$$\bar{P}_{\text{se}} = \int_0^{\infty} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) \frac{\gamma}{\bar{\gamma}^2} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) d\gamma$$

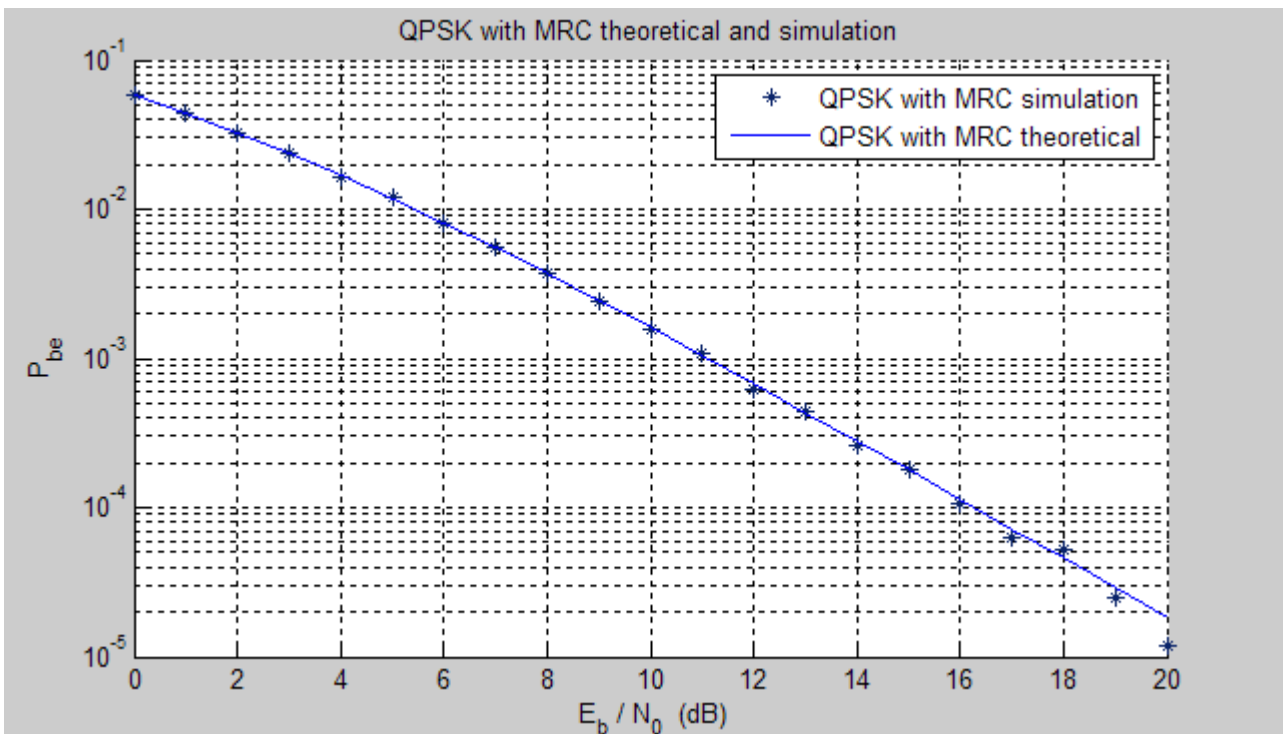
και στην τελική μορφή θα είναι

$$\bar{P}_{\text{se}} = \frac{-3 + 2\sqrt{\frac{\bar{\gamma}+1}{\bar{\gamma}}} + 2\left(-1 + \sqrt{\frac{\bar{\gamma}+1}{\bar{\gamma}}}\right)\bar{\gamma}}{2\sqrt{\frac{\bar{\gamma}+1}{\bar{\gamma}}}(1+\bar{\gamma})}.$$

Επίσης μπορεί να εκφραστεί και ως μέση πιθανότητα εσφαλμένου bit \bar{P}_{be} από την σχέση

$$\bar{P}_{be} = \frac{-3 + 2\sqrt{\frac{\bar{\gamma}+1}{\gamma}} + 2\left(-1 + \sqrt{\frac{\bar{\gamma}+1}{\gamma}}\right)\bar{\gamma}}{4\sqrt{\frac{\bar{\gamma}+1}{\gamma}}(1+\bar{\gamma})}$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση της μέσης πιθανότητας σφάλματος ανά bit \bar{P}_{be} , που υπολογίστηκε προηγουμένως θεωρητικά, συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit σε ένα εύρος 0 έως 20 dB. Στο Παράρτημα 2.3 υπάρχει ο κώδικας απόδοσης της παραπάνω μέσης πιθανότητας σφάλματος για διαμόρφωση QPSK που χρησιμοποιήθηκε στο παράθυρο εντολών του λογισμικού Matlab.



Σχήμα 4.10 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση QPSK και δέκτη MRC

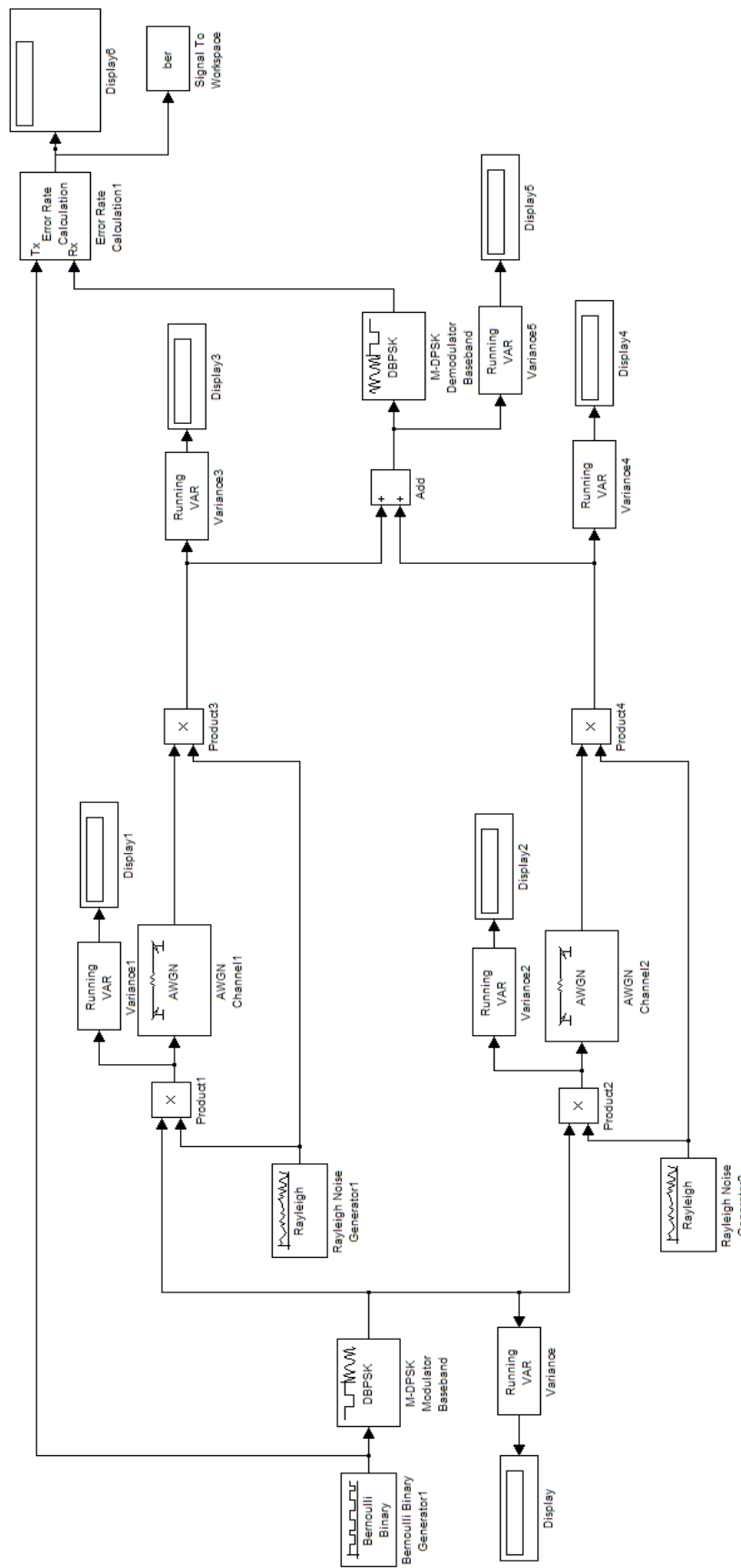
Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 4.10, και στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε διαμόρφωση QPSK σε συνδυασμό με δέκτη MRC υπάρχει πλήρης ταύτιση στους υπολογισμούς της πιθανότητας σφάλματος bit ανάμεσα στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και από την θεωρητική ανάλυση.

4.5 Μετάδοση σήματος με διαμόρφωση BDPSK σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC

4.5.1 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος

Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4.4.1, για να εξετάσουμε τη βελτίωση της απόδοσης ασύρματων συστημάτων με χρήση τεχνικών διαφορισμού έγινε χρήση του δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC. Για τη σχεδίαση του συγκεκριμένου μοντέλου βασιστήκαμε στο μοντέλο που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 4.3.1, στο οποίο είχαμε διαμόρφωση BDPSK και η αξιοπιστία του επιβεβαιώθηκε από τους προηγούμενους υπολογισμούς. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δυο ανεξάρτητα κανάλια τα οποία υπόκεινται σε διαλείψεις Rayleigh σε συνδυασμό με θόρυβο AWGN, καθένα από τα οποία συνδεόταν στις εισόδους του δέκτη MRC. Αναλυτικά το τηλεπικοινωνιακό μας μοντέλο απαρτίζεται από τρία βασικά τμήματα:

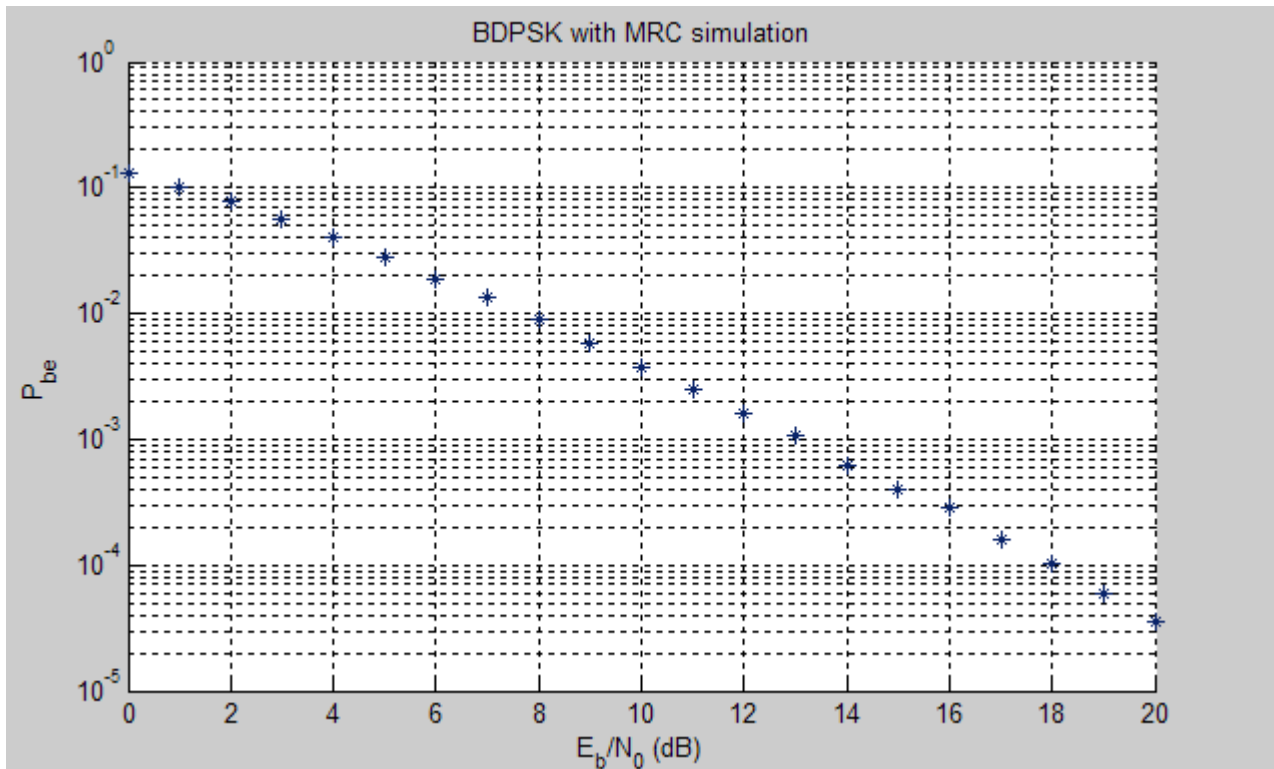
- Το τμήμα εκπομπής, το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ψηφίων και τον διαμορφωτή BDPSK και το διαχωρισμό του σήματος εξόδου του διαμορφωτή σε δυο κανάλια. Ο διαχωρισμός γίνεται για να προσομοιωθούν τα αντίγραφα του σήματος εκπομπής τα οποία λαμβάνονται από το δέκτη.
- Το τμήμα της ασύρματης μετάδοσης, το οποίο αποτελείται από δυο ασυσχέιστα κανάλια που υπόκεινται σε διαλείψεις Rayleigh, μέσω δυο ανεξάρτητων γεννητριών θορύβου κατανομής Rayleigh, σε συνδυασμό με θόρυβο AWGN μέσω δύο καναλιών AWGN.
- Το τμήμα λήψης, το οποίο αποτελείται από την προσομοίωση του δέκτη MRC, τον αποδιαμορφωτή BDPSK και τον υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων. Όπως γνωρίζουμε, ο δέκτης MRC χρειάζεται να έχει άριστη γνώση όλων των παραμέτρων του καναλιού διαλείψεων, για αυτό το λόγο στο μοντέλο μας τα δύο ανεξάρτητα σήματα στις εισόδους του δέκτη πολλαπλασιάζονται με τα σήματα από τις αντίστοιχες γεννήτριες θορύβου κατανομής Rayleigh. Στη συνέχεια το άθροισμα τους οδηγείται στον αποδιαμορφωτή για επεξεργασία.



Σχήμα 4.11 : Μοντέλο προσομοίωσης ασύρματου συστήματος με διαμόρφωση BDPSK και δέκτη

MRC

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η καμπύλη πιθανότητας σφάλματος bit για εύρος σηματοθορυβικού λόγου ανά bit 0 έως 20 dB που προέκυψε από την προσομοίωση του μοντέλου με τύπο διαμόρφωσης BDPSK σε συνδυασμό με δέκτη MRC.



4.12 : Πιθανότητα σφάλματος bit ανά E_b/N_0 για διαμόρφωση BDPSK και δέκτη MRC

4.5.2 Θεωρητικός υπολογισμός μέσης πιθανότητας σφάλματος

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν στα κεφάλαια 4.2 , 4.3 και 4.4 προκύπτει ότι η μέση πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου σε πραγματικά κανάλια ασύρματων επικοινωνιών με διαλείψεις κατανομής Rayleigh και κάνοντας χρήση δέκτη MRC δίνεται από τη σχέση

$$\bar{P}_{se} = \int_0^{\infty} P_{se}(\gamma) f_{\gamma_{MRC}}(\gamma) d\gamma.$$

Επίσης εκφράζεται και ως μέση πιθανότητα εσφαλμένου bit από τη σχέση

$$\bar{P}_{be} = \int_0^{\infty} P_{be}(\gamma) f_{\gamma_{MRC}}(\gamma) d\gamma,$$

όπου η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του γ για δέκτη MRC είναι η εξής

$$f_{\gamma_{MRC}}(\gamma) = \frac{\gamma}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right),$$

και η υπό συνθήκη πιθανότητα εσφαλμένου bit $P_{be}(\gamma)$ για κανάλι AWGN με σηματοθορυβικό λόγο γ για τον τύπο διαμόρφωσης BDPSK και δίνεται από τη σχέση

$$P_{be}(\gamma) = \frac{1}{2} \exp(-\gamma).$$

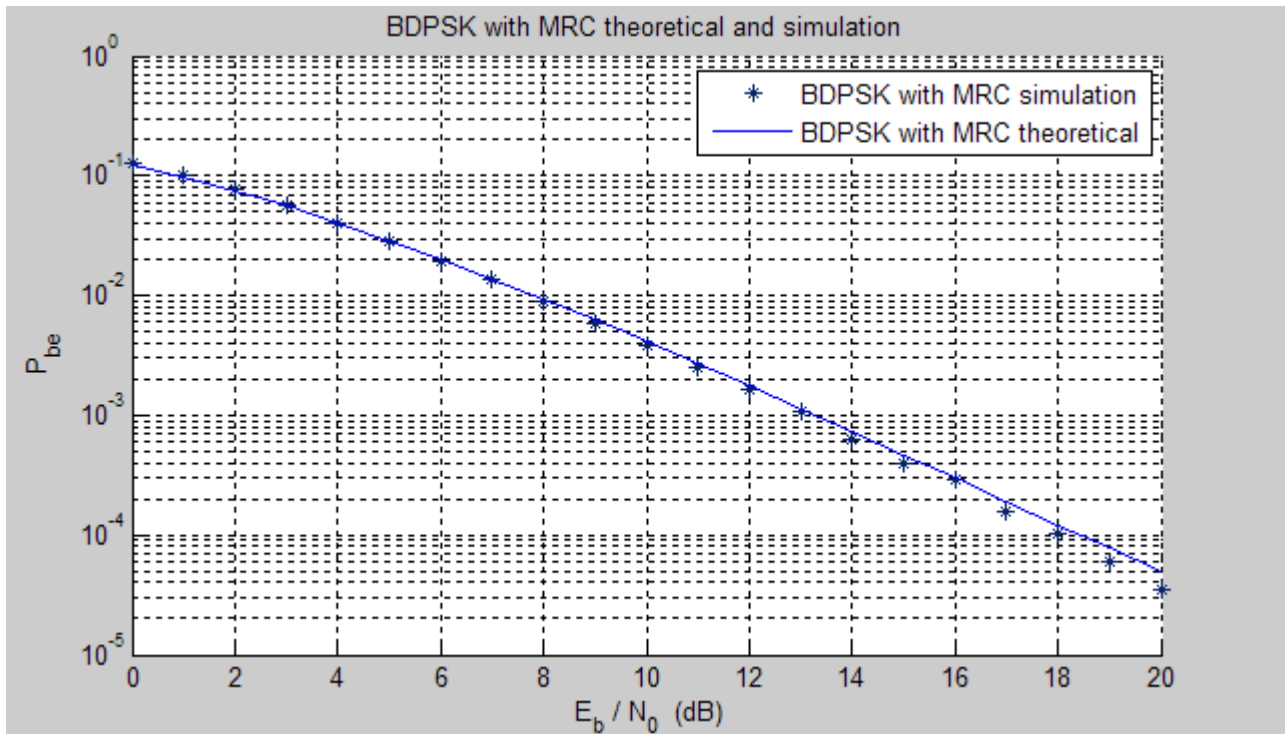
Συνεπώς η μέση πιθανότητα εσφαλμένου bit \bar{P}_{be} για τύπο διαμόρφωσης BDPSK προκύπτει από τη σχέση

$$\bar{P}_{be} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \exp(-\gamma) \frac{\gamma}{\gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right) d\gamma$$

και στην τελική μορφή θα είναι

$$\bar{P}_{be} = \frac{1}{2(\gamma + 1)^2}.$$

Στη σχήμα 4.13 ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση της μέσης πιθανότητας σφάλματος ανά bit \bar{P}_{be} , που υπολογίστηκε προηγουμένως θεωρητικά, συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit σε ένα εύρος 0 έως 20 dB. Στο Παράρτημα 2.4 υπάρχει ο κώδικας απόδοσης της παραπάνω μέσης πιθανότητας σφάλματος για διαμόρφωση BDPSK που χρησιμοποιήθηκε στο παράθυρο εντολών του λογισμικού Matlab.

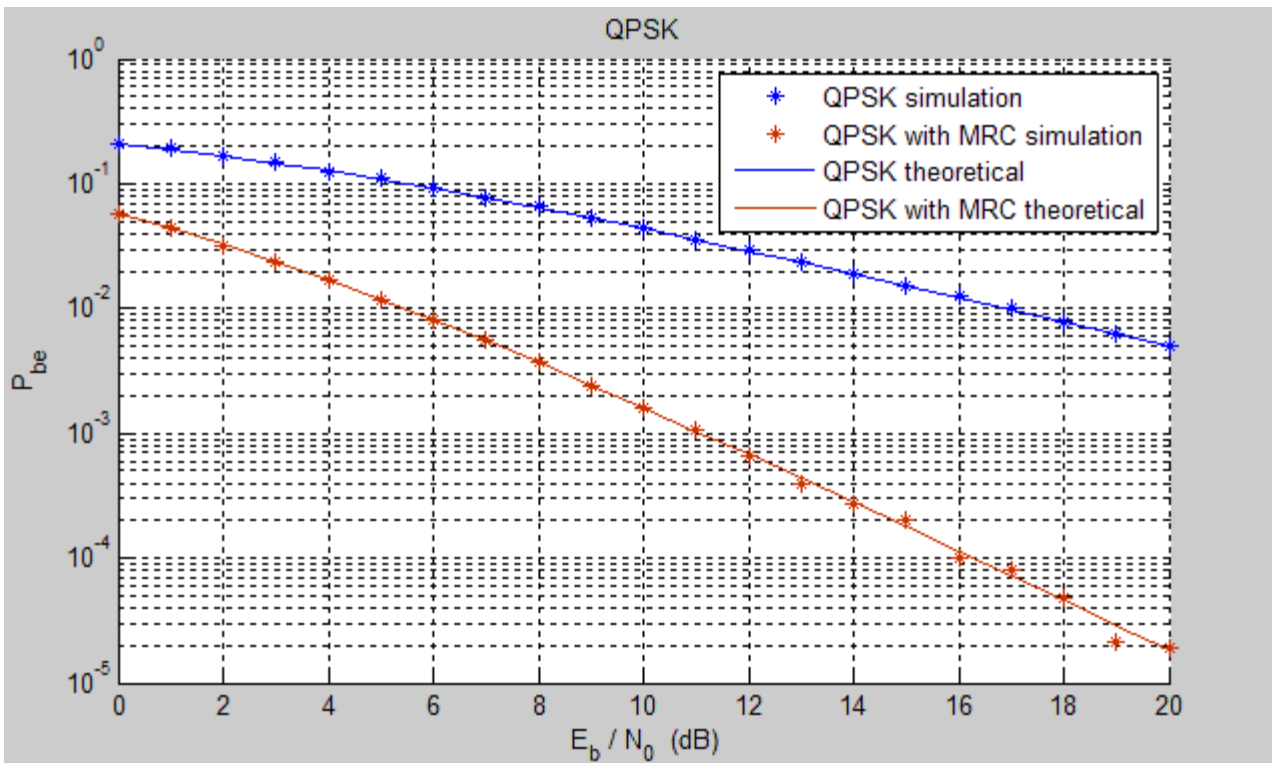


Σχήμα 4.13 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση BDPSK και δέκτη MRC

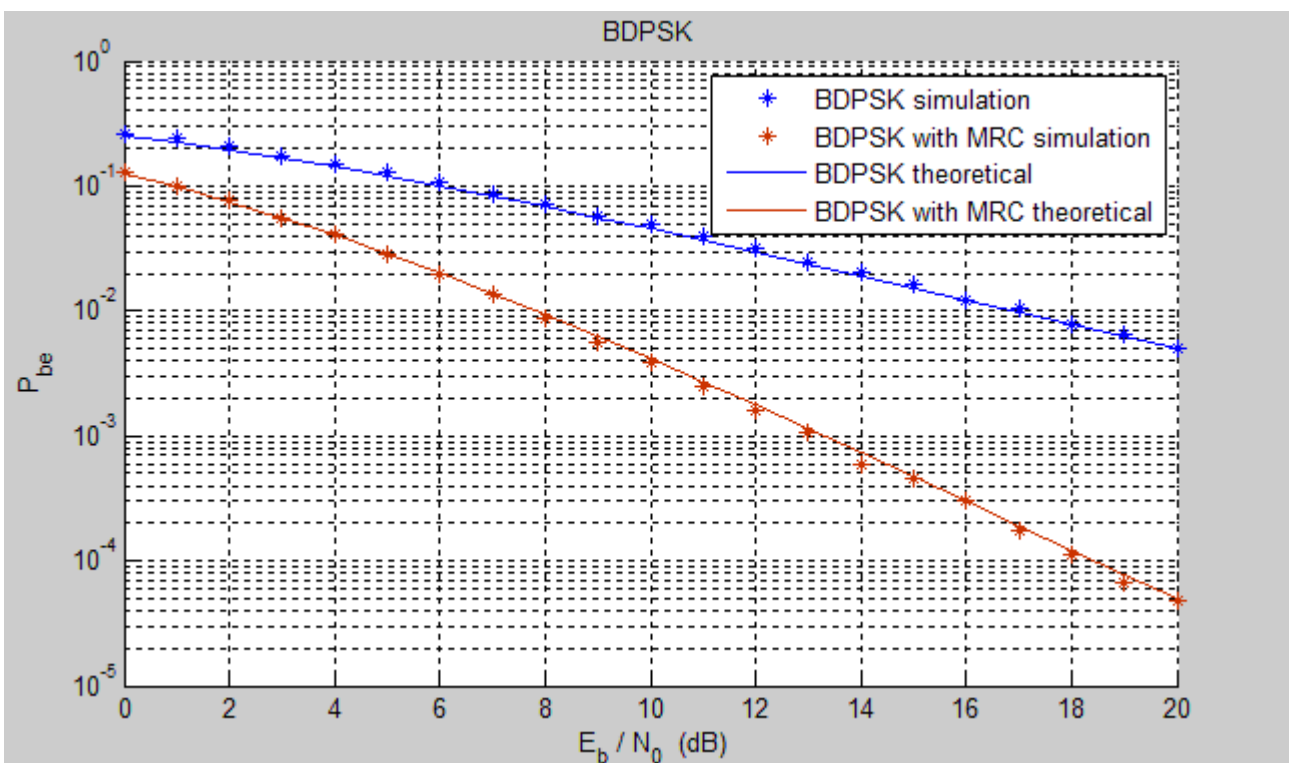
Ομοίως με τη διαμόρφωση QPSK, και στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε διαμόρφωση BDPSK σε συνδυασμό με δέκτη MRC υπάρχει πλήρης ταύτιση στους υπολογισμούς της πιθανότητας σφάλματος bit ανάμεσα στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση και από την θεωρητική ανάλυση, όπως παρατηρούμε από το σχήμα 4.13.

4.6 Βελτιστοποίηση απόδοσης ασύρματων συστημάτων με χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC

Συμπερασματικά, ενσωματώνοντας όλους τους προηγούμενους υπολογισμούς σε δύο γραφικές παραστάσεις, ανά τύπο διαμόρφωσης, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

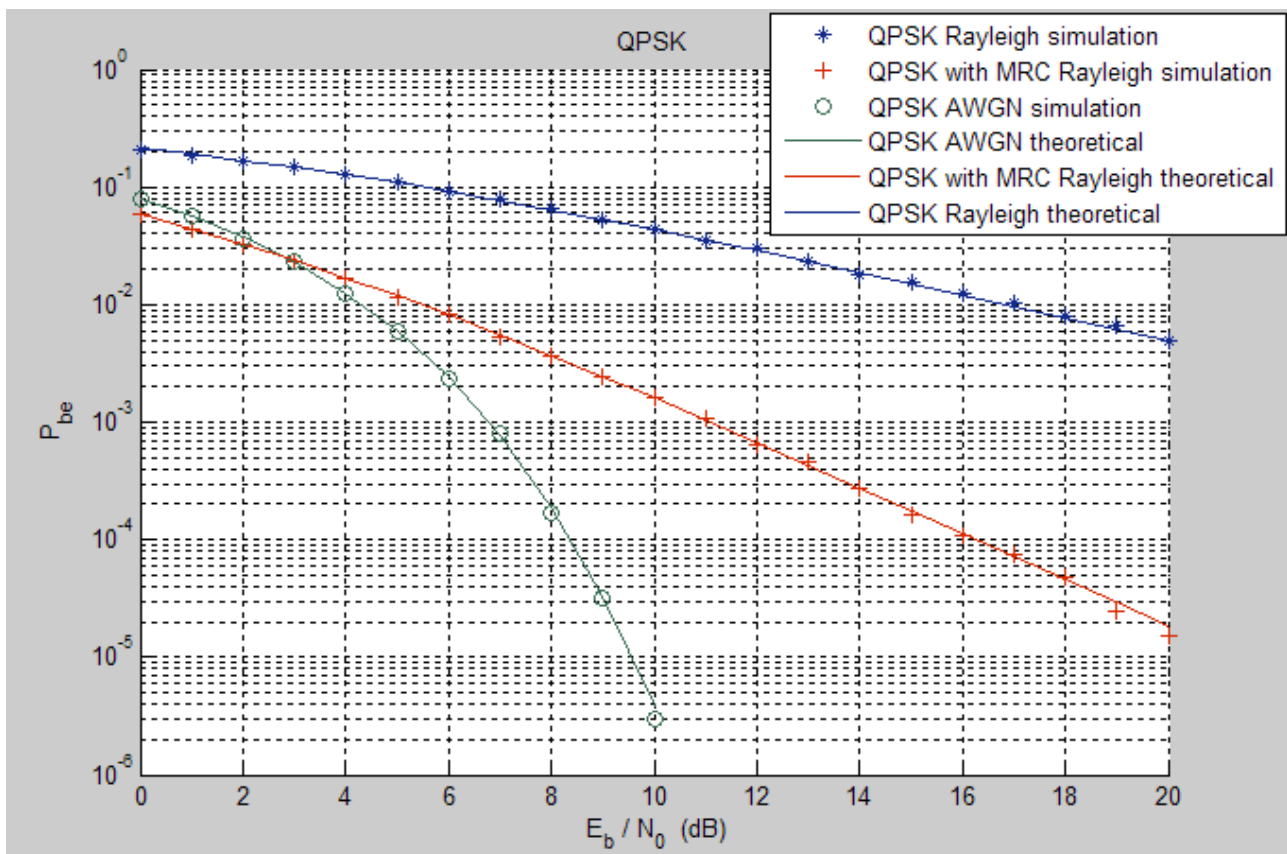


Σχήμα 4.14 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση QPSK με δέκτη MRC και χωρίς

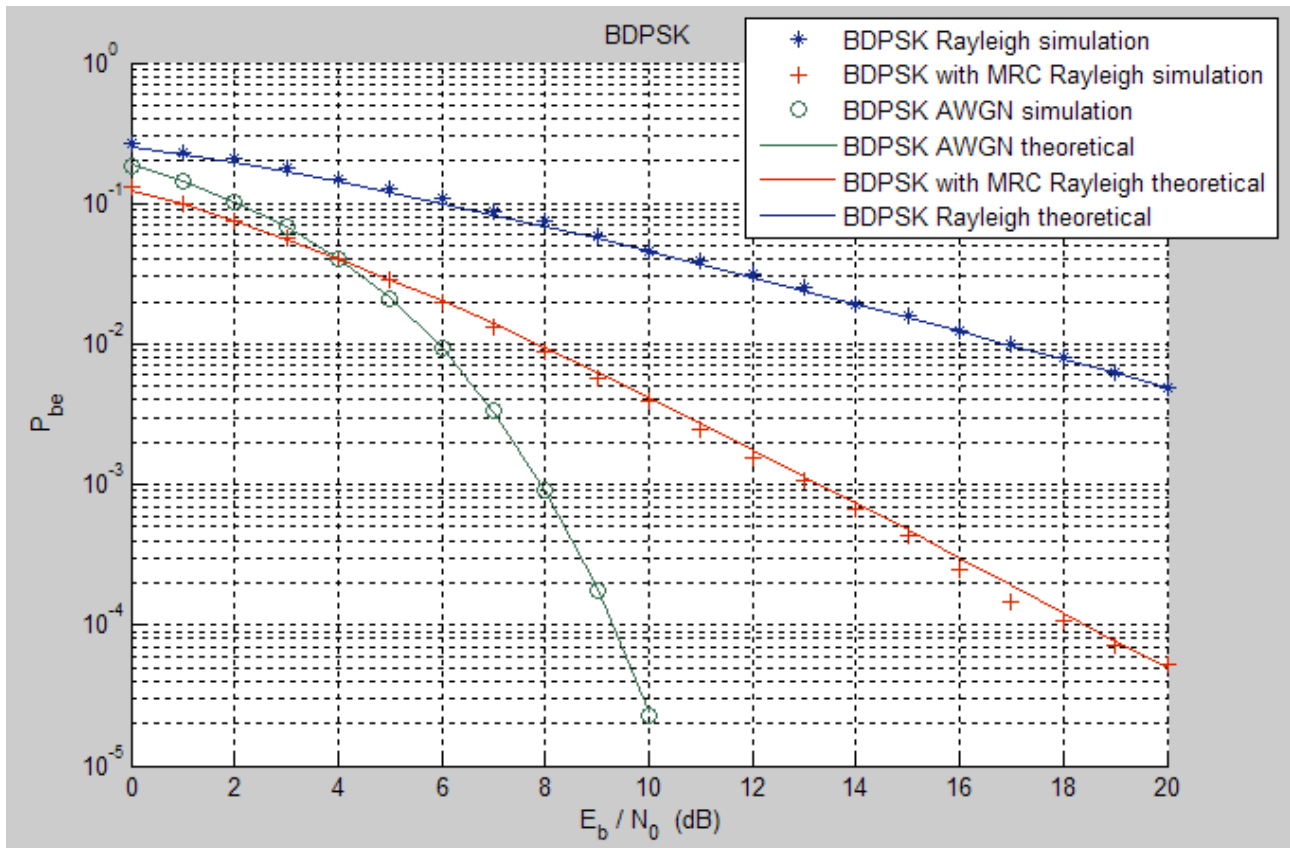


Σχήμα 4.15 : Σύγκριση P_{be} προσομοίωσης και θεωρητικής ανάλυσης για διαμόρφωση BDPSK με δέκτη MRC και χωρίς

Παρατηρώντας το σχήμα 4.14 είναι φανερό ότι η πιθανότητα σφάλματος bit για διαμόρφωση QPSK βελτιώνεται με τη χρήση δέκτη MRC, π.χ. για $\bar{P}_{be} = 10^{-2}$ υπάρχει βελτίωση 11dB, ενώ από το σχήμα 4.15 προκύπτει ότι και για διαμόρφωση BDPSK η πιθανότητα σφάλματος bit βελτιώνεται με τη χρήση δέκτη MRC, αλλά συγκριτικά λιγότερο, π.χ. για $\bar{P}_{be} = 10^{-2}$ υπάρχει βελτίωση 9dB. Συνεπώς γίνεται φανερό ότι η πιθανότητα σφάλματος bit βελτιώνεται αισθητά με τη χρήση διαφορικής λήψης με δέκτη MRC και για τους δύο τύπους διαμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.16 : Σύγκριση P_{be} για διαμόρφωση QPSK σε περιβάλλον θορύβου AWGN και διαλείψεων Rayleigh με δέκτη MRC και χωρίς



Σχήμα 4.17 : Σύγκριση P_{be} για διαμόρφωση BDPSK σε περιβάλλον θορύβου AWGN και διαλείψεων Rayleigh με δέκτη MRC και χωρίς

Επίσης στα σχήματα 4.16 και 4.17 ενσωματώθηκαν οι γραφικές παραστάσεις του λευκού γκαουσιανού προσθετικού θορύβου AWGN, ανά τύπο διαμόρφωσης στα προηγούμενα γραφήματα. Από τις νέες γραφικές παραστάσεις γίνεται φανερό ότι η χρήση δέκτη MRC δύο κλάδων σε κανάλια διαλείψεων Rayleigh βελτιώνει την πιθανότητα σφάλματος bit και σε χαμηλές τιμές του σηματοθορυβικού λόγου ανά bit πλησιάζει την πιθανότητα σφάλματος των καναλιών θορύβου AWGN. Επίσης συμπεραίνουμε ότι η χρήση δέκτη MRC τριών ή και περισσότερων κλάδων θα βελτίωνε ακόμα περισσότερο την πιθανότητα σφάλματος bit και θα πλησίαζε την πιθανότητα των καναλιών AWGN. Συνεπώς επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της επίδοσης σε ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνικές διαφορισμού, το οποίο ήταν και ο στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

5. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της εργασίας ήταν η βελτίωση της επίδοσης ασύρματων συστημάτων με χρήση τεχνικών διαφορισμού τα οποία λειτουργούν σε κανάλια διαλείψεων. Για να μελετηθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε ο δέκτης συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC, ο οποίος βελτιώνει την επίδοση και επιτυγχάνει μέγιστη εκμετάλλευση των σημάτων εισόδων του. Επίσης για την ευρύτερη ανάπτυξη του θέματος, έγινε μελέτη της επίδρασης του διαφορισμού σε συστήματα με σύμφωνο τύπο διαμόρφωσης (QPSK), αλλά και με ασύμφωνο τύπο (BDPSK). Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα προσομοίωσης, των οποίων τα αποτελέσματα ήταν συνεχώς σύμφωνα με τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης. Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω μελετών ήταν η πλήρης επιβεβαίωση ότι επιτυγχάνεται αισθητή βελτίωση της απόδοσης στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που κάνουν χρήση τεχνικών διαφορισμού.

Παραρτήματα

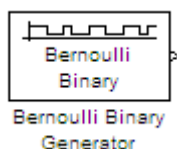
Π.1 Ανάλυση επιμέρους τμημάτων του λογισμικού Matlab/Simulink

Σε αυτή την ενότητα του παραρτήματος θα γίνει εκτενής αναφορά στα βασικά blocks του λογισμικού Matlab/Simulink που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, καθώς και στο εργαλείο ανάλυσης ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate Analysis Tool) της εφαρμογής Matlab, με το οποίο έγινε η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Π.1.1 Ανάλυση των blocks του λογισμικού Matlab/Simulink

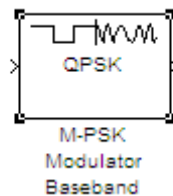
Αρχικά θα αναλύσουμε τα βασικά blocks του λογισμικού Matlab/Simulink με τα οποία έγινε η μοντελοποίηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Το λογισμικό διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία από πηγές, διαμορφωτές, κανάλια, αποδιαμορφωτές και στοιχεία ελέγχου και καταγραφής διαγραμμάτων, ωστόσο εμείς στο συγκεκριμένο σημείο θα αναλύσουμε μόνο τα blocks τα οποία χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση του συστήματος.

- **Γεννήτρια τυχαίων δυαδικών ψηφίων (Bernoulli binary generator)** : το block παρέχει τυχαία δυαδικά ψηφία χρησιμοποιώντας την κατανομή Bernoulli. Η κατανομή Bernoulli με την παράμετρο p παράγει το σύμβολο 0 με πιθανότητα p και το σύμβολο 1 με πιθανότητα $1-p$. Στο block αυτό ορίζουμε την πιθανότητα εμφάνισης του συμβόλου 0, τον αριθμό δειγμάτων ανά πλαίσιο, καθώς και το τύπο των δεδομένων που θα παράγονται.



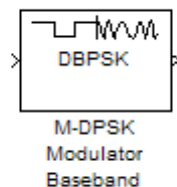
Σχήμα Π.1.1 : Block γεννήτριας τυχαίων δυαδικών ψηφίων

- **Διαμορφωτής PSK (M-PSK Modulator)** : το block αυτό κάνει διαμόρφωση μεταλλαγής ολίσθησης φάσης (PSK) του σήματος εισόδου με βάση τον τύπο της διαμόρφωσης που έχουμε επιλέξει (bpsk, qpsk, 8psk, 16psk, κτλ). Σε αυτή την διαμόρφωση η πληροφορία μεταδίδεται μεταβάλλοντας την φάση του φέροντος σε συγκεκριμένες γωνίες, διατηρώντας το πλάτος σταθερό. Εκτός από τον τύπο της διαμόρφωσης, σε αυτό το block μπορεί να ορισθεί ο τύπος των δεδομένων εισόδου και εξόδου και η κωδικοποίηση στο διάγραμμα αστερισμού.



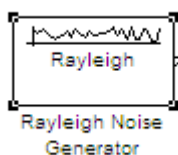
Σχήμα Π.1.2 : Block διαμορφωτή PSK

- **Διαμορφωτής DPSK (M-DPSK Modulator)** : το block αυτό κάνει διαμόρφωση διαφορικής μεταλλαγής ολίσθησης φάσης (DPSK) του σήματος εισόδου με βάση τον τύπο της διαμόρφωσης που έχουμε επιλέξει (bdpsk, qdpsk, 8dpsk, 16dpsk, κτλ). Σε αυτή την διαμόρφωση η πληροφορία κωδικοποιείται βάση των μεταβολών της φάσης του φέροντος. Εκτός από τον τύπο της διαμόρφωσης, σε αυτό το block μπορεί να ορισθεί ο τύπος των δεδομένων εισόδου και εξόδου και η κωδικοποίηση στο διάγραμμα αστερισμού.



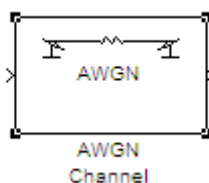
Σχήμα Π.1.3 : Block διαμορφωτή DPSK

- **Γεννήτρια θορύβου κατανομής Rayleigh (Rayleigh noise generator)** : το block αυτό προσομοιώνει την δημιουργία θορύβου που βασίζεται στην κατανομή Rayleigh. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, το λαμβανόμενο σήμα σε δέκτη ο οποίος δεν έχει οπτική επαφή με τον πομπό υπόκεινται σε διαλείψεις, λόγω διάδοσης πολλαπλής διαδρομής, οι οποίες στατιστικά περιγράφονται από την κατανομή Rayleigh. Συνεπώς με αυτό το block γίνεται εξομοίωση των διαλείψεων Rayleigh και μπορεί να γίνει ρύθμιση της παραμέτρου σ καθώς και τον τύπο των δεδομένων που εξάγονται.



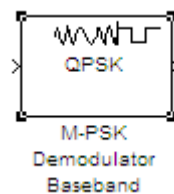
Σχήμα Π.1.4 : Block γεννήτριας θορύβου κατανομής Rayleigh

- **Κανάλι προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου (AWGN channel)** : το στοιχείο αυτό προσομοιώνει ένα κανάλι προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου μέσω του οποίου ο θόρυβος προστίθεται στο σήμα εισόδου. Τα σήματα εισόδου και εξόδου μπορεί να είναι πραγματικά (real) ή σύνθετα (complex). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ρύθμισης του καναλιού και της επίδρασης που θα έχει στο σήμα, μέσω παραμέτρων όπως το E_b / N_0 (ενέργεια ανά bit / ισχύς θορύβου), το E_s / N_0 (ενέργεια ανά σύμβολο / ισχύς θορύβου) και το SNR (σηματοθορυβική σχέση).



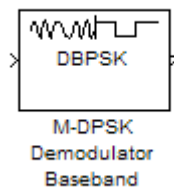
Σχήμα Π.1.5 : Block καναλιού προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου

- **Αποδιαμορφωτής PSK (M-PSK Demodulator)** : το block αυτό κάνει αποδιαμόρφωση μεταλλαγής ολίσθησης φάσης (PSK) του σήματος εισόδου με βάση τον τύπο της αποδιαμόρφωσης που έχουμε επιλέξει (bpsk, qpsk, 8psk, 16psk, κτλ). Ουσιαστικά πραγματοποιεί την αντίστροφη διαδικασία από τον διαμορφωτή PSK, δηλαδή αντιστοιχεί κάθε σημείο του διαγράμματος αστερισμού, με το εκάστοτε σύμβολο που αντιπροσωπεύει. Εκτός από τον τύπο της αποδιαμόρφωσης, σε αυτό το block μπορεί να ορισθεί ο τύπος των δεδομένων εισόδου και εξόδου, η κωδικοποίηση στο διάγραμμα αστερισμού και ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει απόφαση για την αντιστοίχιση του συμβόλου.



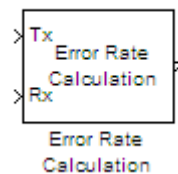
Σχήμα Π.1.6 : Block αποδιαμορφωτή PSK

- **Αποδιαμορφωτής DPSK (M-DPSK Demodulator)** : το block αυτό κάνει αποδιαμόρφωση διαφορικής μεταλλαγής ολίσθησης φάσης (DPSK) του σήματος εισόδου με βάση τον τύπο της αποδιαμόρφωσης που έχουμε επιλέξει (bdpsk, qdpsk, 8dpsk, 16dpsk, κτλ). Ουσιαστικά πραγματοποιεί την αντίστροφη διαδικασία από τον διαμορφωτή DPSK, δηλαδή αντιστοιχεί κάθε σημείο του διαγράμματος αστερισμού, με το εκάστοτε σύμβολο που αντιπροσωπεύει. Εκτός από τον τύπο της αποδιαμόρφωσης, σε αυτό το block μπορεί να ορισθεί ο τύπος των δεδομένων εισόδου και εξόδου, η κωδικοποίηση στο διάγραμμα αστερισμού και ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει απόφαση για την αντιστοίχιση του συμβόλου.



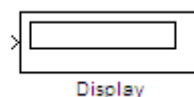
Σχήμα Π.1.7 : Block αποδιαμορφωτή PSK

- Υπολογιστής ρυθμού σφαλμάτων (Error rate calculation)** : σε αυτό το block γίνεται ο υπολογισμός του ρυθμού σφαλμάτων των δεδομένων λήψης αφού συγκριθούν με τα δεδομένα εκπομπής που προέρχονται απευθείας από την πηγή. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της καθυστέρησης ανάμεσα στις εισόδους Tx και Rx, καθώς επίσης και δυνατότητα παύσης της προσομοίωσης όταν ξεπερασθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός σφαλμάτων ή λαμβανόμενων συμβόλων τον οποίο καθορίζουμε εμείς. Στην έξοδο του block θα έχουμε τον ρυθμό σφαλμάτων, τον αριθμό των σφαλμάτων και τον συνολικό αριθμό των συμβόλων που συγκρίθηκαν, τα οποία μπορούν να εμφανισθούν σε μία οθόνη απεικόνισης.



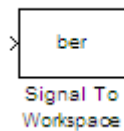
Σχήμα Π.1.8 : Block υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων

- Οθόνη απεικόνισης (Display)** : το στοιχείο αυτό πραγματοποιεί την αριθμητική απεικόνιση των τιμών που δέχεται στην είσοδό του.



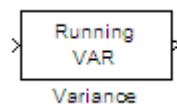
Σχήμα Π.1.9 : Block οθόνης απεικόνισης

- **Εγγραφή δεδομένων σήματος στο περιβάλλον εργασίας Matlab (Signal to workspace)** : για την εξαγωγή του γραφήματος ρυθμού σφαλμάτων BER σε σχέση με την ενέργεια ανά bit προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου E_b / N_0 χρησιμοποιούμε ένα ειδικό εργαλείο της εφαρμογής Matlab, το οποίο ονομάζεται Bit Error Rate Analysis Tool. Το συγκεκριμένο block (Signal to workspace) αναλαμβάνει την μεταφορά των δεδομένων από το block του υπολογισμού ρυθμού σφαλμάτων (error rate calculation) σε ένα ειδικό περιβάλλον του Matlab ώστε να γίνει χρήση τους από το παραπάνω εργαλείο.



Σχήμα Π.1.10 : Block εγγραφής δεδομένων σήματος στο Matlab

- **Υπολογιστής διακύμανσης (Variance)** : όπως υποδηλώνει και το όνομα του, το block αυτό υπολογίζει την διακύμανση των διανυσματικών στοιχείων εισόδου του. Στην περίπτωση όπου επιλεγεί η παράμετρος 'Running variance', τότε στην έξοδο θα έχουμε τον συνεχή υπολογισμό της διακύμανσης του σήματος εισόδου καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα Π.1.11 : Block υπολογιστή διακύμανσης

- **Πολλαπλασιαστής (Product)** : στο block αυτό γίνεται πολλαπλασιασμός δύο ή περισσότερων σημάτων εισόδου και το αποτέλεσμα παρέχεται στην έξοδό του.



Σχήμα Π.1.12 : Block πολλαπλασιαστή

- **Αθροιστής (Add)** : το block υπολογίζει το άθροισμα ή την διαφορά δύο ή περισσότερων σημάτων εισόδου και το οποίο παρέχει στην έξοδό του.

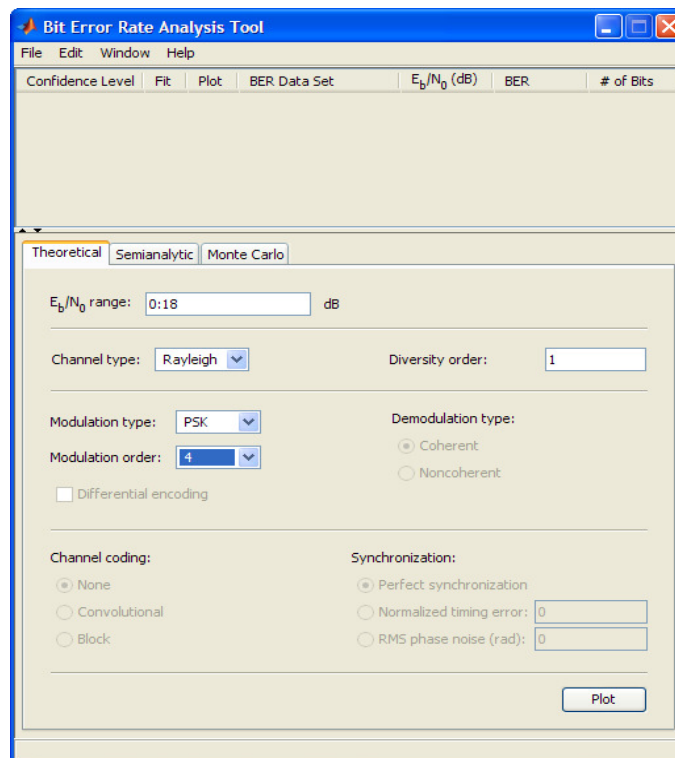


Σχήμα Π.1.13 : Block αθροιστή

Π.1.2 Ανάλυση του Bit Error Rate Analysis Tool

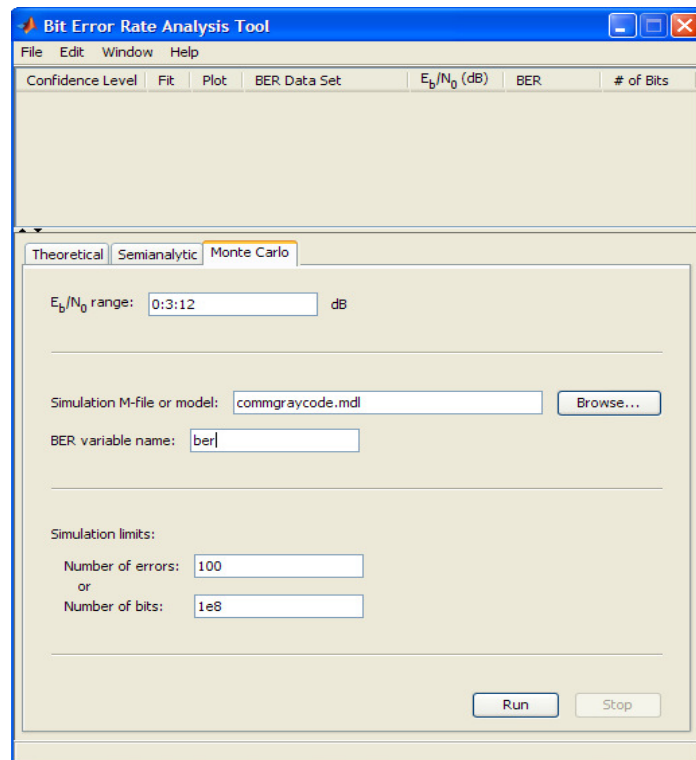
Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο της εφαρμογής Matlab είναι αυτό της ανάλυσης ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate Analysis Tool). Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται για την γραφική απεικόνιση του πιθανότητας σφάλματος bit σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο ανά bit E_b / N_0 τόσο για τα θεωρητικά μοντέλα, όσο και για τα εκάστοτε αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Οι δύο βασικές λειτουργίες του Bit error rate analysis tool, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της εργασίας είναι οι εξής :

- Γραφική απεικόνιση θεωρητικού μοντέλου. Στο πλαίσιο ‘Theoretical’ του εργαλείου υπάρχει η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης του BER σε σχέση με το E_b / N_0 για διάφορα είδη διαμόρφωσης (PSK, PAM, QAM,...) και καναλιού (AWGN, Rayleigh, Rice) .



Σχήμα Π.1.14 : Πλαίσιο ‘Theoretical’ του Bit error rate analysis tool

- Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων. Στο πλαίσιο ‘Monte Carlo’ του εργαλείου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του μοντέλου προσομοίωσης του οποίου θέλουμε να δούμε την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Μπορούμε να ορίσουμε το εύρος του E_b / N_0 καθώς και τα όρια της προσομοίωσης (αριθμός σφαλμάτων ή αριθμός συνολικών bits). Για να μπορέσει να λειτουργήσει η απεικόνιση θα πρέπει να γίνει χρήση του block ‘εγγραφή δεδομένων σήματος στο περιβάλλον εργασίας Matlab’, καθώς και ρύθμιση παραμέτρων στα blocks ‘κάναλι awgn’ και ‘υπολογιστή ρυθμού σφαλμάτων’.



Σχήμα Π.1.15 : Πλαίσιο 'Monte Carlo' του Bit error rate analysis tool

Π.2 Κώδικας απόδοσης Matlab για τον υπολογισμό της πιθανότητας σφάλματος

Σε αυτή την ενότητα του παραρτήματος παρατίθενται όλοι οι κώδικες του λογισμικού Matlab που χρησιμοποιήθηκαν για την γραφική απεικόνιση της πιθανότητας σφάλματος, όπως αυτή είχε υπολογισθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης και τοπολογίας του δέκτη.

Π.2.1 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh και διαμόρφωση QPSK

```
% κώδικας Matlab για την απεικόνιση διαμόρφωσης qpsk
% οι τιμές που θα πάρει το SNR είναι από 1 έως 20
SNRdB=0:1:30;
%Μετατροπή των τιμών του SNR από dB σε κανονικές
SNR=10.^(SNRdB./10);
%Υπολογισμός της συνάρτησης πιθανότητας σφάλματος
y=0.5*(1-(sqrt(SNR./(1+SNR))));
%Δημιουργία γραφήματος
semilogy (SNRdB,y)
xlabel(' Eb / N0 (dB)')
ylabel(' Pbe ')
title('QPSK theoretical ')
grid
```

Π.2.2 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh και διαμόρφωση BDPSK

```
% κώδικας Matlab για την απεικόνιση διαμόρφωσης bdpsk
% οι τιμές που θα πάρει το SNR είναι από 1 έως 20
SNRdB=0:1:30;
%Μετατροπή των τιμών του SNR από dB σε κανονικές
SNR=10.^(SNRdB./10);
%Υπολογισμός της συνάρτησης πιθανότητας σφάλματος
y=1./(2*(1+SNR));
%Δημιουργία γραφήματος
semilogy (SNRdB,y)
xlabel(' Eb / N0 (dB)')
ylabel(' Pbe ')
title('BDPSK theoretical ')
grid
```

Π.2.3 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh με διαμόρφωση QPSK και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC

```
% κώδικας Matlab για την απεικόνιση διαμόρφωσης qpsk με mrc
% οι τιμές που θα πάρει το SNR είναι από 1 έως 20
SNRdB=0:1:20;
%Μετατροπή των τιμών του SNR από dB σε κανονικές
SNR=10.^(SNRdB./10);
%Υπολογισμός της συνάρτησης πιθανότητας σφάλματος
y=(-3+2.*(sqrt((1+SNR)./SNR))+2.*SNR.*(-
1+(sqrt((1+SNR)./SNR))))/(4*(sqrt((1+SNR)./SNR)).*(1+SNR));
%Δημιουργία γραφήματος
semilogy (SNRdB,y)
xlabel(' Eb / N0 (dB)')
ylabel(' Pbe ')
title('QPSK with MRC theoretical ')
grid
```

Π.2.4 Κώδικας απόδοσης πιθανότητας σφάλματος για μετάδοση σε περιβάλλον με διαλείψεις Rayleigh με διαμόρφωση BDPSK και χρήση δέκτη συνδυασμού μεγίστου λόγου MRC

```
% κώδικας Matlab για την απεικόνιση διαμόρφωσης bdpsk με mrc
% οι τιμές που θα πάρει το SNR είναι από 1 έως 20
SNRdB=0:1:20;
%Μετατροπή των τιμών του SNR από dB σε κανονικές
SNR=10.^(SNRdB./10);
%Υπολογισμός της συνάρτησης πιθανότητας σφάλματος
y=1./(2*((1+SNR).^2));
%Δημιουργία γραφήματος
semilogy (SNRdB,y)
xlabel(' Eb / N0 (dB)')
ylabel(' Pbe ')
title('BDPSK with MRC theoretical ')
grid
```

Βιβλιογραφία

- [1] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών, Αθήνα, 2008
- [2] T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice, Upper Saddle River, NJ:PTR Prentice-Hall, 1996
- [3] John G. Proakis, Masoud Salehi, Digital Communications, McGraw-Hill, New York, 1999
- [4] Maral - Bousquet, Δορυφορικές Επικοινωνίες, Εκδόσεις Τζιόλα.
- [5] Νικόλαος Σαγιάς, Μελέτη Μοντέλου Συσχετισμένων Διαλείψεων Weibull και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Ψηφιακών Δεκτών Διαφορισμού, Αθήνα, Μάρτιος 2005
- [6] S.N.Datta, C.Bose, A.Chadra, Error Performance of Binary Modulation Schemes with MRC Diversity over Rayleigh Fading Channels
- [7] V.A.Aalo, Performance of Maximal-Ratio Diversity Systems in a Correlated Nakagami-Fading Environment, August 1995
- [8] Vahid Meghdadi, BER Calculation, January 2008
- [9] Rupaban Subadar, Performance of Dual MRC Receiver for M-ary Modulations over Correlated Nakagami-m Fading Channels with Non-identical and Arbitrary Fading Parameter, 2011
- [10] A. Goldsmith Wireless Communications, Stanford University, Cambridge University Press, 2005.
- [11] John G.Proakis, Masoud Salehi, Gerhard Bauch, Contemporary Communication Systems using Matlab, 2004