



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Επίδοση συστημάτων συνεργατικής επικοινωνίας με δύο
επαναλήπτες, σε περιβάλλον με συσχετισμένες διαλείψεις σκίασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ι. Σαλογιάννης

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λεκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Επίδοση συστημάτων συνεργατικής επικοινωνίας με δύο
επαναλήπτες, σε περιβάλλον με συσχετισμένες διαλείψεις σκίασης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Ι. Σαλογιάννης

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Λεκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, την Οκτωβρίου 2011

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λεκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

.....
Κωνσταντίνος Σαλογιάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Ι. Σαλογιάννης, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Ένα σύστημα συνεργατικής διαφορικότητας με πλήθος επαναληπτών όπου ο τελικός χρήστης/δέκτης συνδυάζει τα λαμβανόμενα σήματα από τους επαναλήπτες και το απευθείας σήμα, συνιστά μία πρακτική και χρήσιμη αρχιτεκτονική συστήματος όταν οι ραδιοδιάυλοι υποφέρουν από διαλείψεις.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται πρωτότυποι αναλυτικοί τύποι και αριθμητικά αποτελέσματα για την επίδοση των συστημάτων συνεργατικής επικοινωνίας με δύο επαναλήπτες, σε περιβάλλον συσχετισμένων λογαριθμοκανονικών διαλείψεων (Κεφάλαιο 4). Η μελέτη των συστημάτων γίνεται για το πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης (Fixed Relaying) και για τη χρήση των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης, TDMA (Time Domain Multiple Access) και SDMA (Space Domain Multiple Access). Ο κόμβος προορισμού/δέκτης συνδυάζει τις λαμβανόμενες εκδοχές του μεταδιδόμενου σήματος μέσω των τεχνικών της επιλογής (Selection Combining – SC) ή του συνδυασμού μέγιστου λόγου (Maximal Ratio Combining – MRC).

Η επίδοση του προτεινόμενου συστήματος συγκρίνεται με το βασικό συνεργατικό σύστημα, που χρησιμοποιεί έναν επαναλήπτη (αρχιτεκτονική τριγωνικού σχήματος) και η οποία παρουσιάζεται στο τρίτο κεφάλαιο, και με την απευθείας ζεύξη ώστε να αποκαλυφθεί η προσφορά της συνεργατικότητας. Οι προτεινόμενες εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής του συστήματος, μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες περιπτώσεις διάδοσης όπου η λογαριθμοκανονική κατανομή χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (διαλείψεις σκίασης) όπως είναι η διάδοση σε εσωτερικό ή εξωτερικό περιβάλλον.

Τέλος η επίδραση της επιλογής των λογαριθμοκανονικών παραμέτρων (συμπεριλαμβανομένης και της συσχέτισης) στην επίδοση των συστημάτων συνεργατικής επικοινωνίας εξετάζεται με αριθμητικά αποτελέσματα.

Ειδικό Όροι

Συνεργατική διαφορικότητα, λογαριθμοκανονικές διαλείψεις, πιθανότητα αποκοπής, συνδυασμός μέγιστου λόγου (MRC), αναμετάδοση, συνδυασμός επιλογής (SC), πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης

Abstract

A cooperative diversity system with multiple relays where the receiver combines the relayed and direct paths consists of a practical and useful configuration when the communication channels suffer from fading.

This diploma thesis presents novel analytical formulas and numerical results on the performance of a cooperative diversity system with two relays in arbitrary positions over correlated lognormal channels (Chapter 4). The two relays form a diamond-shaped cooperative system. The Fixed Relaying cooperative protocol and both the Time Domain Multiple Access (TDMA/half duplex relay) and the Space Domain Multiple Access (SDMA/ full duplex relay) schemes are considered in the present contribution. The destination receiver combines the multiple versions of the received signal utilizing either the Selection Combining (SC) or the Maximal Ratio Combining (MRC) techniques.

The performance of the proposed system is compared with a basic cooperative system with only one relay (triangle-shaped cooperative configuration) which is presented in chapter 3 and a direct link system, in order to investigate the benefits of cooperation. The proposed expressions for the outage probability can be directly applied to various propagation scenarios where the lognormal distribution is used to describe the large scale fading effects such as, indoor, urban and on body propagation environments.

Finally, the impact of the lognormal parameters (including correlation) on the cooperative system performance is investigated through extended numerical results.

Index Terms

Cooperative diversity, correlated lognormal channels, outage probability, Maximal Ratio Combining, relay, Selection Combining, Fixed Relaying.

Ευχαριστίες

Μέ την ευκαιρία που μου δίνεται, μέσω αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Α. Παναγόπουλο, Λέκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να περατώσω την διπλωματική μου εργασία, την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε και την άμεση καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Φ. Κωνσταντίνου, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, γιατί μέσα από τις διαλέξεις του με δίδαξε να αναζητώ και να ακολουθώ τις επιθυμίες μου.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Β. Σακαρέλλο, Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την μετάδοση των γνώσεών του και την συνολική προσφορά του για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω το σεβασμό, την ευγνωμοσύνη και τις ευχαριστίες μου, στην οικογένειά μου, Γιάννη, Μαρίνα, Δημήτρη και Σταματίνα, για την ηθική και υλική στήριξη σε όλο το διάστημα των σπουδών μου και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια. Μαζί με αυτούς θέλω να ευχαριστήσω και αυτούς που είναι στο πλευρό μου κάθε στιγμή, τους φίλους μου Αργύρη, Αντρέα, Πάνο, Γιάννη, Μήτσο, Ζήση, Τάσο

Περιεχόμενα

1.Συστήματα Συνεργατικών Επικοινωνιών17

1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Θέματα σχεδίασης των ασύρματων συστημάτων κινητών επικοινωνιών	17
1.3 Συστήματα συνεργατικής διαφορικότητας	19
1.4 Είδη επαναληπτών	22
1.5 Συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης	25
1.6 Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης	26
1.7 Πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας	26

2.Μοντέλα απωλειών διάδοσης29

2.1 Εισαγωγή	29
2.2 Διαλείψεις μικρής κλίμακας (Small Scale Fading)	30
2.3 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας (Large Scale Fading)	33
2.3.1 Μοντέλα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας	35
2.3.1.1 Λογαριθμοκανονική κατανομή	35
2.3.1.2 Κατανομή Γαμα	35

3. Επίδοση συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας τριγώνου σε κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις37

3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Μοντέλο του συστήματος	38

3.2.1 Γεωμετρία του συστήματος	38
3.2.2 Μοντέλο καναλιού διάδοσης	39
3.3 Επίδοση συνεργατικού συστήματος με τις τεχνικές SC και MRC.	39
3.3.1 Συνολικός σηματοθροβικός λόγος	39
3.3.2 Πιθανότητα αποκοπής	40
3.4 Αποδοτικότητα πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας ..	43
3.4.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα πρωτοκόλλων A και B	43
3.4.2 Φασματική αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων A και B	44
3.5 Αριθμητικά αποτελέσματα κα ισυμπεράσματα	45

4. Επίδοση συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας ρόμβου/διαμαντιού σε κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις.....53

4.1 Εισαγωγή-Βασικές Υποθέσεις	53
4.2 Συνεργατικό σύστημα ρόμβου χωρίς την απευθείας ζεύξη (diamond-shaped).....	54
4.2.1. Μοντέλο του συστήματος	54
4.2.1.1. Γεωμετρία του συστήματος	54
4.2.1.2. Μοντέλο καναλιού διάδοσης	55
4.2.2. Επίδοση του συνεργατικού συστήματος με χρήση των τεχνικών διαφορικής λήψης SC και MRC	56
4.2.2.1. Συνολικός σηματοθροβικός λόγος	56
4.2.2.2. Πιθανότητα αποκοπής	57

4.2.3. Απόδοση των πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας.....	62
4.2.3.1.Ενεργειακή αποδοτικότητα πρωτοκόλλων A και B.	62
4.2.3.2. Φασματική απόδοση των πρωτοκόλλων A και B ..	63
4.2.4. Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα	64
4.3. Συνεργατικό σύστημα ρόμβου με απευθείας ζεύξη (diamond/direct – shaped)	70
4.3.1. Μοντέλο του συστήματος	70
4.3.2. Επίδοση του συνεργατικού συστήματος με χρήση των τεχνικών SC και MRC	71
4.3.2.1. Συνολικός σηματοθροβικός λόγος	71
4.3.2.2. Πιθανότητα αποκοπής	72
4.3.3. Απόδοση πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας.....	76
4.3.4. Αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	77
4.4. Σύγκριση της επίδοσης των συνεργατικών συστημάτων με τοπολογία τριγώνου (triangle-shaped), ρόμβου (diamond-shaped) και ρόμβου με απευθείας ζεύξη (diamond/direct-shaped).....	81

Παράρτημα Α. Κώδικας MATLAB

A.1. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων του 3 ^{ου} Κεφαλαίου	87
A.2. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων του 4 ^{ου} Κεφαλαίου	93

Βιβλιογραφία

105

1 Συστήματα Συνεργατικών Επικοινωνιών

1.1 Εισαγωγή

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδοσης των συστημάτων συνεργατικών επικοινωνιών και ειδικότερα η επίδοσή τους υπό συνθήκες διαλείψεων σκίασης (shadow fading). Σε αυτό το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται, μέσω μιας γενικής σύντομης αναφοράς, τα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων κινητών επικοινωνιών, ενώ γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην αντιμετώπιση των διαλείψεων. Επίσης παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των συνεργατικών συστημάτων και γίνεται ανάλυση των όρων που θα χρησιμοποιηθούν για την παρουσίασή τους. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μια παρουσίαση των οφελών που αποκομίζουμε από τη χρήση των ασύρματων συνεργατικών δικτύων όπως και των βασικών μικροαρχιτεκτονικών που χρησιμοποιούνται για την υλοποίησή τους. Επίσης παρουσιάζονται οι συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης με τις οποίες ο τελικός δέκτης συνδυάζει τα διαφορετικά σήματα που λαμβάνει, τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης που επιτρέπουν την κοινή χρήση του μέσου από τους χρήστες και τα πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας που ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται οι κόμβοι του δικτύου.

1.2 Θέματα σχεδίασης των ασύρματων συστημάτων κινητών επικοινωνιών

Αρχικά η μεγαλύτερη προσπάθεια κατά τη σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων κινητών επικοινωνιών αφορούσε θέματα ραδιοδιαύλου. Μερικά συστήματα σχεδιάστηκαν κατά τρόπο που να εξασφαλίζεται μεγάλη απομόνωση μεταξύ των διαφόρων ραδιοζεύξεων [1]. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων ήταν τα μικροκυματικά συστήματα σημείου προς σημείο, τα δορυφορικά και τα πρώτα ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Μια ραδιοζεύξη μοντελοποιείται ως ζωνοπεριορισμένο, ζωνοπερατό γραμμικό σύστημα και στη σχεδίασή του λαμβάνονται σοβαρά υπόψη, η διαμόρφωση, η φώραση, ο συγχρονισμός (για τα ψηφιακά συστήματα) και η ανάκτηση του φέροντος. Τα πρώτα προβλήματα υποβάθμισης που μελετήθηκαν στο ραδιοδιάλυλο ήταν ο προσθετικός θόρυβος Gauss που προκύπτει στον ενισχυτή του δέκτη, καθώς και οι περιορισμοί στις

κεραίες και η απόσβεση λόγω διαδρομής, η οποία είναι σταθερή και εξαρτάται από τη συχνότητα. Συνεπώς το κύριο αντικείμενο ενδιαφέροντος ήταν η χωρητικότητα ραδιοδιαύλου παρουσία προσθετικού θορύβου Gauss. Οι κινητές όμως ραδιοζεύξεις μέσα σε κτίρια και γύρω από αυτά εμφανίζουν μεταβολές του σήματος, λόγω πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητες της συχνότητας. Επίσης φαινόμενα επιλεκτικά ως προς τη συχνότητα ή φαινόμενα χρονικής διασποράς δίνουν ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο για πολλές ασύρματες ζεύξεις μέσα ή γύρω από κτίρια. Η χωρική μεταβολή της συχνότητας λόγω πολλαπλών διαδρομών συντελεί ώστε δύο ή περισσότερες διαδρομές σήματος να εμφανίζουν διαλείψεις με διαφορετική εξασθένιση, γεγονός που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη διαφορική λήψη, που θα μελετηθεί στη συνέχεια. Οι υποβαθμίσεις στο ραδιοδιάυλο αναιρούνται μερικώς, αν εφαρμόζεται εξισορρόπηση και έλεγχος σφαλμάτων. Η κίνηση του τερματικού επιφέρει χρονική μεταβολή των διαλείψεων στο δίαυλο. Επίσης, επειδή τα μεταδιδόμενα σήματα μπορεί να λαμβάνονται και από άλλους δέκτες, ενδιαφέρει πολύ η κρυπτογράφηση για να εξασφαλίζεται το απόρρητο.

Η εισαγωγή περισσότερων του ενός ραδιοδιαύλων ανά σταθμό βάσης προσέδωσε άλλες διαστάσεις στη σχεδίαση των ασυρμάτων συστημάτων. Τα θέματα πολυπλεξίας και πολλαπλής πρόσβασης έχουν διερευνηθεί αρκετά, καθώς επίσης και η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών διαύλων και η ανάγκη απομόνωσης μεταξύ των διαύλων. Η πρόσβαση χρηστών που η κατάστασή τους αλλάζει τυχαία από ανενεργή σε ενεργή, καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη μηχανισμών πρόσβασης στους διαύλους και εκχώρησης διαύλων, καθώς επίσης και μηχανισμών υποστήριξης της αναμονής των χρηστών που επιχειρούν πρόσβαση. Η χωρητικότητα του συστήματος με πολλούς ραδιοδιαύλους εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες από ότι στην περίπτωση της απλής ζεύξης.

Η χρησιμοποίηση πολλών σταθμών βάσης με πολλαπλούς ραδιοδιαύλους συντελεί στην χωρική απομόνωση των διαύλων και επιτρέπει χωρική πολυπλεξία, μέσω επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων, αλλά εισάγει ομοδιαυλική παρεμβολή. Στα μεγάλα συστήματα πολλαπλών διαύλων με επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, υπάρχουν πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλών σχεδιαστικών θεμάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ενώ υπάρχει ακόμα αρκετή αβεβαιότητα ως προς αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Οι διαδικασίες πρόσβασης στους διαύλους και εκχώρησης διαύλων εισάγουν την ανάγκη μέτρησης της ποιότητας των διαύλων, ενώ η κίνηση των χρηστών κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας απαιτεί διαπομπή από έναν σταθμό βάσης σε άλλον για να διατηρηθεί η επικοινωνία. Το θέμα της ολικής χωρητικότητας του συστήματος γίνεται πολύ περίπλοκο, δεδομένου ότι τώρα περιλαμβάνει τη χωρική κατανομή των σταθμών βάσης και την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, καθώς και την αύξηση του αριθμού των χρηστών ανά συχνότητα. Η σχέση της χωρητικότητας του συστήματος προς τη χωρητικότητα

ενός απλού διαύλου με προσθετικό θόρυβο Gauss, ή και προς εκείνη του διαύλου πολλαπλής πρόσβασης ενός σταθμού βάσης καθίσταται απόμακρη. Η τελική χωρητικότητα ενός τέτοιου συστήματος τείνει να γίνει απεριόριστη, όσο περιορίζεται η απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης.

Η διασύνδεση των σταθμών βάσης απόμακρων μεταξύ τους περιοχών μέσω του σταθερού δικτύου προϋποθέτει, ότι το σταθερό δίκτυο αντιμετωπίζει τα θέματα που αφορούν τα μεγάλης κλίμακας κίνηση των χρηστών μεταξύ των απομακρυσμένων περιοχών. Απαιτεί επίσης την ύπαρξη δυνατότητας στην κάθε ραδιοζεύξη, η οποία να βοηθάει τον χρήστη να προσδιορίζει την περιοχή στην οποία βρίσκεται και να εγγράφεται στο νέο δίκτυο, όταν καταλαβαίνει ότι άλλαξε δίκτυο. Το δίκτυο χρειάζεται επίσης να έχει δυνατότητες δρομολόγησης κλήσεων και μηνυμάτων από τις αρχικές θέσεις των χρηστών σε οποιεσδήποτε νέες θέσεις μπορεί να μετακινηθούν. Τα θέματα ασφαλείας γίνονται περισσότερο περίπλοκα από την ανάγκη μετακίνησης των χρηστών σε διάφορες περιοχές που μπορεί να ελέγχονται από διάφορες οντότητες.

1.3 Συστήματα συνεργατικής διαφορικότητας

Στα ασύρματα δίκτυα οι μεταβολές του σήματος που δημιουργούνται εξαιτίας της πολυδιαδρομικής διάδοσης αποτελούν μια ιδιαίτερα σημαντική υποβάθμιση του καναλιού, που μπορεί να αντιμετωπισθεί μέσω της διαφορικής λήψης [2]. Οι χωρικές (space), ή πολλαπλών κεραιών (multiple antennas) διαφορικές τεχνικές είναι ιδιαίτερα ελκυστικές καθώς μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με άλλα είδη διαφορικότητας/διαφορισμού όπως για παράδειγμα η χρονική και η συχνοτική διαφορικότητα (time and frequency diversity) και επίσης έχουν ιδιαίτερα ικανοποιητικό κέρδος όταν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα είδη διαφορικότητας. Σε αντίθεση με τις περισσότερο παραδοσιακές εκδοχές της χωρικής διαφορικότητας με φυσικούς πίνακες [3]-[5], σε αυτή τη διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τη δημιουργία χωρικής διαφορικότητας χρησιμοποιώντας μια σειρά συνδυαζόμενων κεραιών που ανήκουν σε πολλαπλά τερματικά, το καθένα έχοντας να μεταδώσει τη δική του πληροφορία. Αυτό το είδος χωρικής διαφορικότητας λέγεται συνεργατική διαφορικότητα (cooperative diversity), επειδή τα τερματικά μοιράζονται τους πόρους τους, όπως οι κεραιές και το φάσμα για να δημιουργήσουν έναν «εικονικό πίνακα» μέσω της συνδυασμένης μετάδοσης και της επεξεργασίας σήματος.

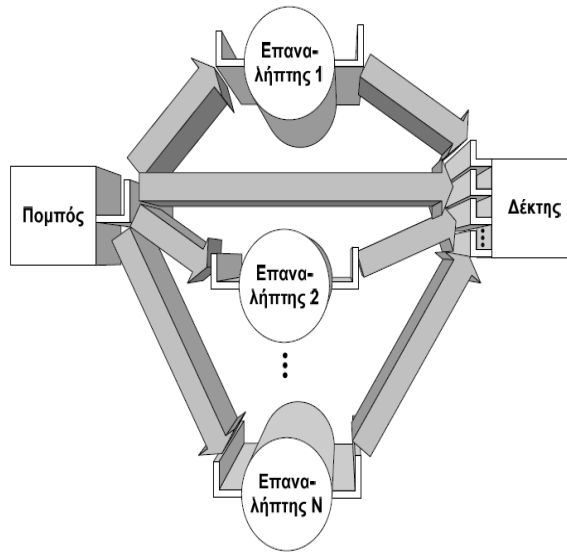
Η χρήση των συστημάτων συνεργατικής διαφορικότητας (cooperative diversity systems) έγκειται στο γεγονός ότι ο χρήστης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος, που προέρχονται από τους διαφορικούς επαναλήπτες, τα οποία

μπορεί να συνδυάσει για τη δημιουργία του τελικού σήματος, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να βελτιώσει την επίδοση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Τα συνεργατικά δίκτυα κερδίζουν έδαφος τελευταία, καθώς μπορούν να δώσουν λύσεις σε περιπτώσεις που κάποιο κανάλι υποφέρει από υψηλές διαλείψεις αλλά και στη βέλτιστη χρήση των πόρων ενός συστήματος, όπως είναι το φάσμα και η ισχύς. Για την ανάλυση των συνεργατικών δικτύων θεωρούμε ένα σύστημα κόμβων που αφιερώνουν μέρος των πόρων τους(φάσμα, ισχύ, κεραίες) για την αναμετάδοση πληροφορίας των υπολοίπων ζεύξεων.

Για την σχεδίαση συνεργατικών συστημάτων είναι απαραίτητη η μελέτη της επίδρασης τηλεπικοινωνιακών παραμέτρων όπως το εύρος φάσματος που απαιτείται για την μετάδοση της πληροφορίας, η εκπεμπόμενη και καταναλισκόμενη ισχύς από κάθε κόμβο, η αρχιτεκτονική και πολυπλοκότητα του συστήματος, ο τρόπος συνεργασίας των κόμβων, ο τρόπος πολλαπλής πρόσβασης, η ύπαρξη ενδοσυστημικών παρεμβολών και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των δεκτών, όπως το κέρδος και η κατευθυντικότητα των κεραιών και η ευαισθησία του δέκτη στα μεγέθη που περιγράφουν την επίδοση ενός συστήματος. Αυτά τα μεγέθη είναι, η πιθανότητα αποκοπής, ο συνολικός ή από άκρη σε άκρη(end to end) σηματοθορυβικός λόγος, η πιθανοτική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου και η χωρητικότητα του συστήματος.

Για την καλύτερη αξιοποίηση παραμέτρων ενός συνεργατικού συστήματος όπως είναι η ισχύς και το φάσμα και δεδομένου ότι οι κόμβοι του συστήματος μοιράζονται τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους, είναι σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση κάθε παραμέτρου σε κάθε κόμβο χωριστά, στο συνολικό σύστημα, στην επίδραση κάθε κόμβου με τους υπολοίπους αλλά και στις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος. Επιπλέον απαιτείται ο προσδιορισμός του εύρους των παραμέτρων που η συνεργασία μεταξύ των κόμβων επιφέρει κέρδος συγκριτικά με τη μη συνεργασία των κόμβων, η ποσοτικοποίηση του κέρδους αυτού και τα όριά του όσο αυξάνει ο αριθμός των συνεργαζόμενων κόμβων.

Για να δώσουμε μια γενική εικόνα των συνεργατικών δικτύων θα θεωρήσουμε το παράδειγμα ενός συνεργατικού συστήματος με N επαναλήπτες όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1-1.

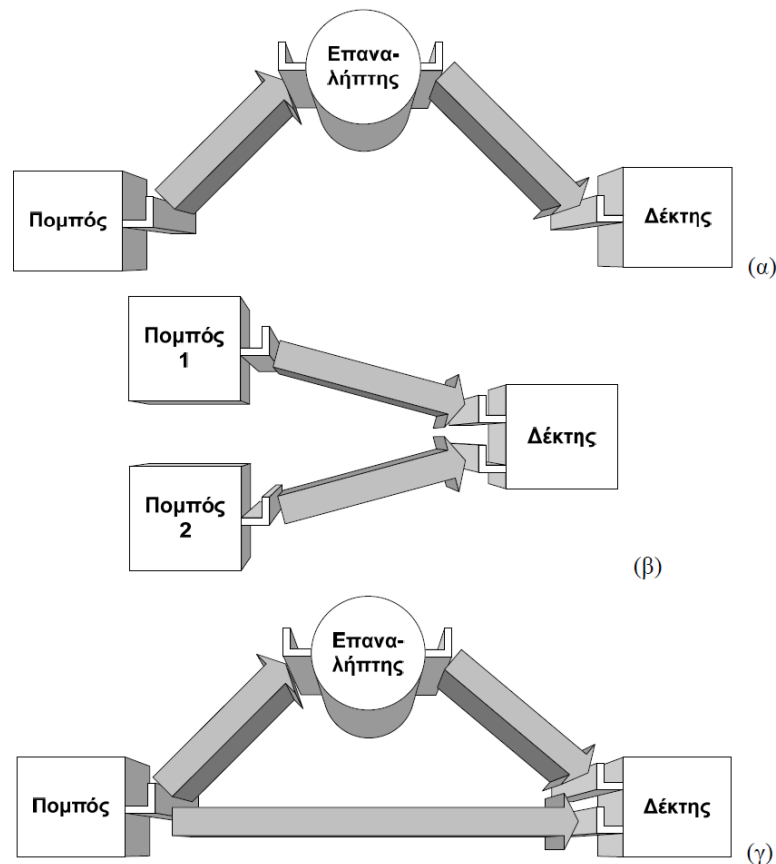


Σχήμα 1-1: Σύστημα συνεργατικής διαφορικότητας N επαναληπτών

Σε αυτό το σύστημα ο πομπός εκπέμπει το σήμα ταυτοχρόνως προς το δέκτη και τους N επαναλήπτες (broadcast channel) οι οποίοι το επανεκπέμπουν προς το δέκτη. Τελικά ο δέκτης συνδυάζει τα ληφθέντα σήματα με τεχνικές που θα αναλύσουμε παρακάτω και δημιουργεί το τελικό σήμα. Τα κανάλια στα οποία μεταδίδονται τα σήματα αυτά (απευθείας σήμα και σήματα από τους επαναλήπτες) χαρακτηρίζονται από διαλείψεις οι οποίες μπορεί να είναι συσχετισμένες και προκαλούν σφάλματα στη μετάδοση της πληροφορίας έχοντας ως αποτέλεσμα τη μειωμένη διαθεσιμότητα του συστήματος. Η στιγμιαία τιμή των διαλείψεων διαφέρει σε κάθε ζεύξη και έτσι ο δέκτης λαμβάνει πολλές διαφορετικές εκδοχές του ίδιου σήματος. Έτσι ο δέκτης λαμβάνει επιπλέον πληροφορία λόγω των πολλαπλών σημάτων και μπορεί με τη χρήση του ανάλογου πρωτοκόλλου να επιλέξει την καλύτερη εκδοχή του σήματος ή να συνδυάσει τις πολλαπλές εκδοχές για να βελτιώσει την εκτίμηση του σήματος που έλαβε από τον πομπό μέσω της απευθείας ζεύξης. Έτσι η ύπαρξη των επαναληπτών παρέχει συνεργατική διαφορικότητα στο σύστημα. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 1-1 το συνεργατικό δίκτυο με N επαναλήπτες μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εικονικό σύστημα MIMO $N+1$ τάξεως, όπου κάθε επαναλήπτης αντιστοιχεί σε μια κεραία του συστήματος MIMO.

Για τη μελέτη ενός πολύπλοκου συνεργατικού συστήματος λαμβάνονται υπόψη οι βασικές μικροαρχιτεκτονικές που τα απαρτίζουν. Οι βασικές αυτές μικροαρχιτεκτονικές φαίνονται στο Σχήμα 1-2 και είναι: (α) το απλό σύστημα με έναν επαναλήπτη, χωρίς την απευθείας ζεύξη. (β) σύστημα συνδυαστικής διαφορικής λήψης με δέκτη που λαμβάνει δύο σήματα από δύο πομπούς. (γ) το στοιχειώδες συνεργατικό δίκτυο με τον πομπό να μεταδίδει ταυτόχρονα προς τον

επαναλήπτη και τον δέκτη και τον δέκτη να λαμβάνει δύο εκδοχές του σήματος, μία από τον πομπό και μία από τον επαναλήπτη.



Σχημα 1-2: Βασικές μικροαρχιτεκτονικές συνεργατικών συστημάτων. (α) απλό σύστημα με επαναλήπτη χωρίς απευθείας ζεύξη, (β) σύστημα διαφορικής λήψης, (γ) στοιχειώδες συνεργατικό σύστημα.

1.4 Είδη επαναληπτών

Οι επαναλήπτες που συναντώνται συχνότερα είναι οι αναγεννητικοί (regenerative) και οι μη αναγεννητικοί (non-regenerative) ή διαφανείς (transparent). Οι αναγεννητικοί επαναλήπτες χρησιμοποιούν την τεχνική αποκωδικοποίηση και προώθηση (decode and forward), ενώ οι μη-αναγεννητικοί χρησιμοποιούν την τεχνική ενίσχυσης και προώθησης (amplify and forward).

Κατά τη λειτουργία του, ο αναγεννητικός επαναλήπτης λαμβάνει το μεταδιδόμενο σήμα το αποδιαμορφώνει το αποκωδικοποιεί και στη συνέχεια το διαμορφώνει, το κωδικοποιεί και το επανεκπέμπει. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να ορισθεί ένας συνολικός για το σύνολο της διαδρομής ή αλλιώς από άκρη σε άκρη (end to end) σηματοθαυρβικός λόγος. Αντί αυτού μπορούμε να ορίσουμε

μια στάθμη του σηματοθορυβικού λόγου όπου αν ο CNR του μεταδιδόμενου σήματος πέσει κάτω από αυτή τη στάθμη θεωρούμε ως μη αξιόπιστη αυτή τη μετάδοση. Για το απλό σύστημα με τον επαναλήπτη που φαίνεται στο σχήμα 1-2 (α) ο ισοδύναμος συνολικός, ή αλλιώς ο προς σύγκριση με τη στάθμη αποκοπής, σηματοθορυβικός λόγος θα δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{reg} = \min(CNR_1, CNR_2) \quad (1.1)$$

Στον προηγούμενο τύπο CNR_1 είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του επαναλήπτη (ζεύξη πομπού-επαναλήπτη) και ο CNR_2 ο λόγος στην είσοδο του δέκτη και αναφέρεται στην ζεύξη επαναλήπτη-δέκτη. Επεκτείνοντας την παραπάνω αρχιτεκτονική σε ένα σύστημα με N αναγεννητικούς επαναλήπτες σε σειρά τότε ο αντίστοιχος συνολικός σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$CNR_{reg} = \min(CNR_1, CNR_2, \dots, CNR_N, CNR_{N+1}), \quad (1.2)$$

όπου CNR_j ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του j-οστού επαναλήπτη για $j=1,2,\dots,N$.

Ο CNR_{N+1} είναι ο σηματοθορυβικός λόγος της ζεύξης από τον N-οστό επαναλήπτη ως τον δέκτη.

Οι μη-αναγεννητικοί επαναλήπτες κάνουν χρήση της μεθόδου ενίσχυσης και προώθησης. Έτσι ο επαναλήπτης λαμβάνει το σήμα από το πρώτο τμήμα της ζεύξης, το ενισχύει με σταθερό ή μεταβλητό κέρδος ενισχυτή χωρίς να το αποκωδικοποιεί και το εκπέμπει προς το δεύτερο τμήμα της ζεύξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μαζί με το σήμα πληροφορίας να ενισχύεται και ο θόρυβος που λαμβάνεται από το πρώτο τμήμα της ζεύξης. Οι μη αναγεννητικοί επαναλήπτες διακρίνονται στους επαναλήπτες με μεταβλητό κέρδος (adaptive gain) και στους επαναλήπτες με σταθερό κέρδος (fixed gain). Οι επαναλήπτες μεταβλητού κέρδους ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα τόσο ώστε να διατηρηθεί η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς σταθερή. Ένας απλός επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους κάνει μια εκτίμηση της απόσβεσης του συνδυασμού σήματος πληροφορίας και θορύβου και στη συνέχεια ενισχύει το συνολικό σήμα χωρίς να ξεχωρίζει πληροφορία και θόρυβο ώστε το επίπεδο ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος (άθροισμα ισχύος σήματος πληροφορίας και θορύβου) να είναι το ίδιο με αυτό που έλαβε. Ένας πιο σύνθετος τύπος επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους μπορεί να αναγνωρίσει ακριβώς την απόσβεση πληροφορίας κατά την πρώτη ζεύξη και να το ενισχύσει έτσι ώστε η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας να παραμείνει σταθερή.

Οι μη αναγεννητικοί επαναλήπτες σταθερού κέρδους (fixed gain) ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα με σταθερό κέρδος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι λιγότερο πολύπλοκοι από τους επαναλήπτες μεταβλητού κέρδους, αλλά στον

αντίποδα το σήμα που εκπέμπουν έχει μεταβλητή ισχύ. Οι επαναλήπτες σταθερού κέρδους δεν μπορούν να αντισταθμίσουν πλήρως τις απώλειες κατά το πρώτο τμήμα της ζεύξης και έτσι η ισχύς εκπομπής μειώνεται κατά αυτό το μέγεθος στη λειτουργία στη γραμμική περιοχή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναδίπλωση της ισχύος του ενισχυτή (amplifier's back-off effect).

Στο απλό σύστημα του σχήματος 1-2 (α) με μη-αναγεννητικό επαναλήπτη ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος (σηματοθορυβικός λόγος από άκρη σε άκρη. Ισχύει η έννοια του end-to-end) δίνεται από τον τύπο

$$CNR_{non-reg}^{-1} = CNR_1^{-1} + CNR_2^{-1} \quad (1.3)$$

Στον προηγούμενο τύπο οι σηματοθορυβικοί λόγοι εκφράζονται σε γραμμική κλίμακα και ορίζονται ως η αποσβεννύμενη ισχύς του σήματος πληροφορίας που εκπέμπει ο κάθε επαναλήπτης προς το θόρυβο και όχι ως η συνολική ισχύς του σήματος (ισχύς σήματος πληροφορίας και ισχύς θορύβου) προς το θόρυβο. Θεωρώντας ένα σύστημα με N επαναλήπτες τοποθετημένους σε σειρά ο σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τον παρακάτω τύπο ενώ ισχύουν όσα αναφέρονται παραπάνω

$$CNR_{non-reg}^{-1} = CNR_1^{-1} + CNR_2^{-1} + \dots + CNR_N^{-1} + CNR_{N+1}^{-1} \quad (1.4)$$

όπου CNR_j είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του j ($j=1,2,\dots,N$) επαναλήπτη και CNR_{N+1} είναι ο λόγος του (N+1)-οστού βήματος, δηλαδή από τον επαναλήπτη N ως το δέκτη.

Στην περίπτωση που ο επαναλήπτης είναι ένας σύνθετος μη-αναγεννητικός μεταβλητού κέρδους τότε οι σηματοθορυβικοί λόγοι CNR_j για $j=1,2,\dots,N+1$ της σχέσης (1.4) είναι σταθεροί, όπως και στην (1.3). Αντίθετα αν πρόκειται για απλούς επαναλήπτες μεταβλητού κέρδους ή για μεταβλητού κέρδους ο υπολογισμός των σηματοθορυβικών λόγων των σχέσεων (1.3) και (1.4) είναι πιο δύσκολος και δεν θα μας απασχολήσει στο παρόν κεφάλαιο.

1.5 Συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης

Ο τελικός δέκτης σε ένα σύστημα διαφορικής λήψης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος πληροφορίας και χρησιμοποιώντας διάφορες συνδυαστικές τεχνικές (combining techniques) δημιουργεί το τελικό σήμα. Οι κυριότερες συνδυαστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι αυτή του συνδυασμού μεγίστου λόγου (Maximal Ratio Combining-MRC), του συνδυασμού ίσων κερδών (Equal Gain Combining-EGC) και του συνδυασμού με επιλογή (Selection Combining-SC).

Στην τεχνική του MRC κάθε κανάλι χρησιμοποιεί διαφορετικό κέρδος που είναι ανάλογο της ισχύος του σήματος. Ο δέκτης ενισχύει κάθε λαμβανόμενο σήμα με το κέρδος του καναλιού του και τελικώς τα προσθέτει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ισχυρά σήματα πληροφορίας να ενισχύονται περαιτέρω ενώ τα αδύναμα σήματα αποδυναμώνονται ακόμα περισσότερο. Ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος του τελικού σήματος ισούται με το άθροισμα των σηματοθορυβικών λόγων των σημάτων που λαμβάνονται όταν αυτά είναι εκφρασμένα σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB. Σε ένα σύστημα διαφορικής λήψης όπου ο δέκτης λαμβάνει N εκδοχές του σήματος πληροφορίας, ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος σε γραμμική κλίμακα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$CNR_{MRC} = \sum_{j=1}^N CNR_j \quad (1.5)$$

Στην τεχνική EGC σε κάθε κανάλι αντιστοιχεί ο το ίδιο κέρδος ανεξάρτητα από την ισχύ του σήματος. Έτσι κάθε εκδοχή του σήματος που λαμβάνεται στο δέκτη ενισχύεται με το ίδιο κέρδος ενώ στη συνέχεια τα ληφθέντα σήματα προστίθενται. Ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος για ένα σύστημα που λαμβάνει N εκδοχές του σήματος πληροφορίας δίνεται σε γραμμική κλίμακα από τον παρακάτω τύπο :

$$CNR_{EGC} = \left(\sum_{j=1}^N \sqrt{CNR_j} \right)^2 / N \quad (1.6)$$

Στην τεχνική SC ο δέκτης συγκρίνει το σηματοθορυβικό λόγο των λαμβανόμενων εκδοχών του σήματος και επιλέγει αυτό με τον υψηλότερο CNR. Έτσι αν ο δέκτης λαμβάνει N σήματα με CNR_j για $j=1,2,\dots,N$ ο σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_j = \max(CNR_1, CNR_2, \dots, CNR_N) \quad (1.7)$$

1.6 Πρωτόκολλα Πολλαπλής Πρόσβασης

Η πρόσβαση των κόμβων που απαρτίζουν το συνεργατικό δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης. Τα συνηθέστερα από αυτά τα πρωτόκολλα είναι η πολυπλεξία στο χρόνο (Time Division Multiple Access-TDMA), η πολυπλεξία στη συχνότητα (Frequency Division Multiple Access-FDMA), η πολυπλεξία στο χώρο (Space Division Multiple Access-SDMA) και η πολυπλεξία με τη χρήση κωδικών (Code Division Multiple Access-CDMA).

Όταν για την πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιείται η πολυπλεξία στο χρόνο/συχνότητα (TDMA/ FDMA) και θεωρήσουμε το συνεργατικό σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 1-1, τότε στην πρώτη χρονική/συχνοτική σχισμή (time/frequency slot) ο πομπός μεταδίδει το σήμα προς όλους τους επαναλήπτες αλλά και προς τον δέκτη. Στη δεύτερη χρονική/συχνοτική σχισμή (time/frequency slot) οι επαναλήπτες μεταδίδουν με τη σειρά τους το σήμα προς το δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι για τη μετάδοση του σήματος από τον πομπό στον δέκτη απαιτούνται δύο χρονικές/συχνοτικές σχισμές και άρα δεσμεύονται δύο βαθμοί ελευθερίας. Έτσι η μετάδοση μέσω του επαναλήπτη διαρκεί διπλάσιο χρόνο(TDMA) ή διπλάσιο εύρος φάσματος (FDMA) συγκριτικά με την απευθείας ζεύξη και για αυτό η λειτουργία αυτού του επαναλήπτη ονομάζεται half duplex.

Όταν χρησιμοποιείται η πολυπλεξία στο χώρο (SDMA) ο επαναλήπτης τη στιγμή που λαμβάνει το σήμα από τον πομπό, ταυτόχρονα εκπέμπει προς το δέκτη το σήμα που είχε λάβει κατά το προηγούμενο συχνοτικό παράθυρο. Αυτή η λειτουργία έχει σαν αποτέλεσμα το πρωτόκολλο αυτό να δεσμεύει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας και η λειτουργία του επαναλήπτη σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται full-duplex. Την τεχνική SDMA μπορούμε να την ερμηνεύσουμε σαν μια αλυσίδα παραγωγής (pipeline system) και να αντιληφθούμε γιατί απαιτεί λιγότερους βαθμούς ελευθερίας από TDMA και FDMA. Επίσης η φασματική αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου SDMA είναι η ίδια με αυτήν της απευθείας ζεύξης παρόλο που είναι πιο ενεργοβόρο για κάθε χρονική/συχνοτική σχισμή.

1.7 Πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας

Τα πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο οι επαναλήπτες προωθούν το αρχικό σήμα και τον τρόπο που ο τελικός χρήστης (δέκτης) συνδυάζει αυτά τα λαμβανόμενα σήματα. Τέτοια πρωτόκολλα είναι το πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης/προώθησης (Fixed Relaying-FR), το

πρωτόκολλο επιλεγόμενης επανάληψης (Selection Relaying-SR) και το πρωτόκολλο αυξανόμενης επανάληψης (Incremental Relaying).

Στο πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης (FR) οι επαναλήπτες προωθούν πάντα το λαμβανόμενο σήμα προς το δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι αν οι ζεύξεις μεταξύ πομπού και επαναλήπτη υποφέρουν από διαλείψεις τότε και το συνολικό σύστημα περιορίζεται ακόμα και αν η απευθείας ζεύξη είναι επιτυχημένη. Αν στο συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιούνται αναγεννητικοί επαναλήπτες, αν ο επαναλήπτης δεν αποκωδικοποιήσει σωστά το σήμα τότε ούτε και ο δέκτης θα μπορέσει να το αποκωδικοποιήσει σωστά. Αυτό σημαίνει ότι για τη σωστή μετάδοση του σήματος τόσο ο επαναλήπτης, όσο και ο δέκτης θα πρέπει να αποκωδικοποιήσουν σωστά το σήμα. Αν οι επαναλήπτες είναι μη-αναγεννητικοί και ο σηματοθορυβικός λόγος στο σήμα που λαμβάνει ο επαναλήπτης από τον πομπό είναι χαμηλός τότε κατά την ενίσχυση του σήματος ενισχύεται και ο θόρυβος και το σήμα που προωθείται προς το δέκτη έχει ενισχυμένο θόρυβο επομένως περιορίζεται η επίδοση του συστήματος.

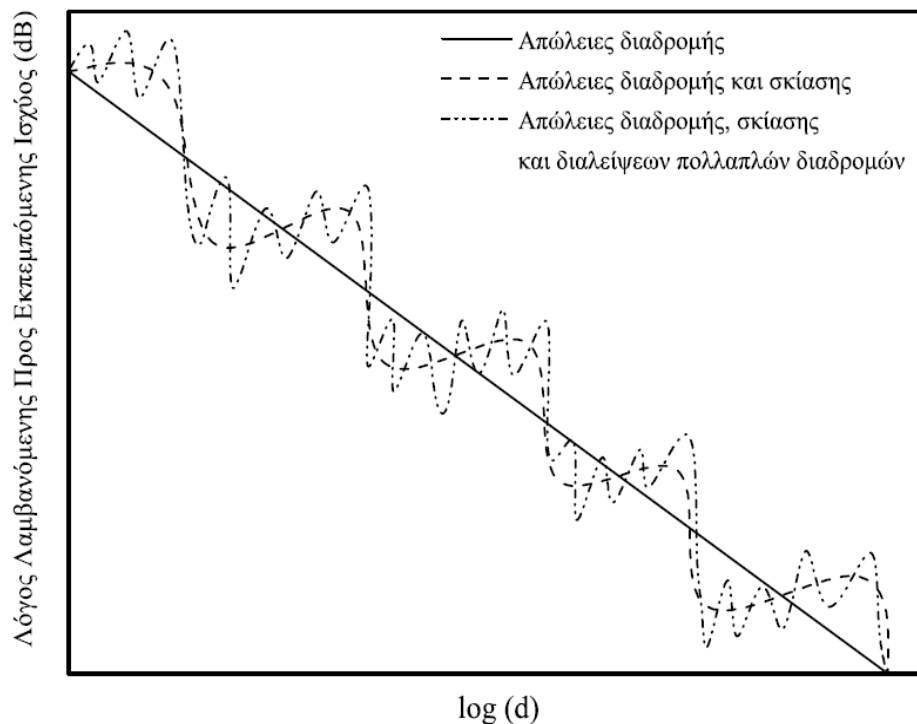
Στο πρωτόκολλο επιλεγόμενης επανάληψης (SR) στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αναγεννητικός επαναλήπτης και δεν μπορέσει να αποκωδικοποιήσει σωστά το λαμβανόμενο σήμα τότε δεν το προωθεί προς το δέκτη. Ομοίως αν χρησιμοποιείται μη-αναγεννητικός επαναλήπτης και ο σηματοθορυβικός λόγος του σήματος που λαμβάνει δεν είναι ικανοποιητικός πάλι το σήμα δεν προωθείται προς το δέκτη. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις το σύστημα μετατρέπεται σε ένα σύστημα απευθείας ζεύξης και οι πιθανές διαλείψεις στο κομμάτι πομπός επαναλήπτης δεν το επηρεάζουν. Αν το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται είναι το TDMA/FDMA και ο δέκτης χρησιμοποιεί μία από τις μεθόδους MRC ή EGC τότε κατά το 2^ο χρονικό/συχνотικό παράθυρο ο πομπός μπορεί να επανεκπέμψει το σήμα με την απευθείας ζεύξη προς τον δέκτη ώστε ο τελευταίος να συνδυάσει τα δύο σήματα που έλαβε για τη δημιουργία του τελικού σήματος και να βελτιώσει με αυτόν τον τρόπο την επίδοσή του.

Στο πρωτόκολλο αυξανόμενης επανάληψης (IR) ο πομπός εκπέμπει το σήμα ταυτόχρονα προς το δέκτη και τους επαναλήπτες. Αν η μετάδοση του σήματος πληροφορίας στον τελικό δέκτη μέσω της απευθείας ζεύξεως είναι επιτυχημένη τότε οι επαναλήπτες δεν προωθούν το σήμα προς το δέκτη κάνοντας έτσι οικονομία σε ενεργειακούς και φασματικούς πόρους. Η ενημέρωση των επαναληπτών για την επιτυχημένη ή λανθασμένη αποκωδικοποίηση του σήματος στο δέκτη από την απευθείας ζεύξη μπορεί να γίνει με τη αποστολή ενός bit.

2. Μοντελα Απωλειών Διάδοσης

2.1 Εισαγωγή

Θεωρώντας δέκτη που κινείται σε περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης και καταγράφοντας τη στιγμιαία λαμβανόμενη Ισχύ συναρτήσει της απόστασης θα προκύψει κάτι ανάλογο του σχήματος 2-1.



Σχημα 2-3: Υπέρθυση διαλείψεων

Εκείνο που παρατηρούμε είναι ότι μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη διαλείψεων [6],[8]. Αρχικά τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (Large Scale Fading), που εμπεριέχουν τα δύο από τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά της ραδιομετάδοσης: τις απώλειες διάδοσης, δηλαδή τη μεταβολή της εξασθένισης με την απόσταση, και τη σκίαση, δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένισης με την απόσταση. Οι μεγάλης κλίμακας διαλείψεις εκφράζουν τη μέση εξασθένιση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας της κίνησης σε μεγάλες περιοχές. Επιπλέον διακρίνουμε τις διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading) που περιγράφουν τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος (πλάτους και φάσης) για μετατοπίσεις του κινητού σταθμού της τάξης $\lambda/2$. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης

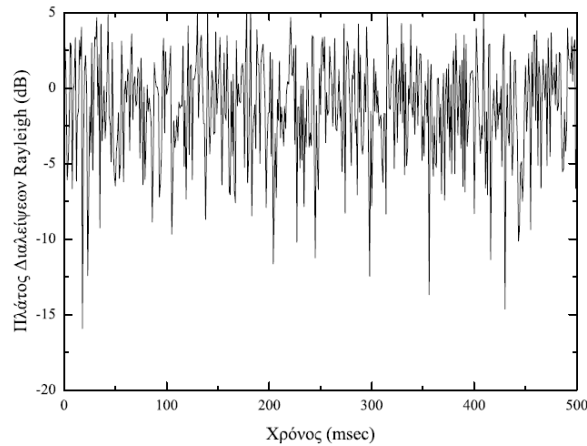
και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση.

Παρατηρώντας το σχήμα 2-1 βλέπουμε ότι η αφαιρετική συμβολή πολυδιαδρομικών συνιστωσών μπορεί να προκαλέσει τη μείωση της λαμβανόμενης ισχύος κατά δεκάδες dB, σε σχέση με τη μέση τιμή του. Όταν η στιγμιαία ισχύς είναι χαμηλότερη από την απαιτούμενη τιμή των προδιαγραφών για την επίδοση της ζεύξης, κάνουμε λόγο για ραδιοδιάυλο που βρίσκεται σε ισχυρές/βαθείς διαλείψεις (deep fades). Επειδή συνήθως, κατά τη σχεδίαση των συστημάτων υπάρχει ένα προβλεπόμενο περιθώριο ισχύος (link margin) της τάξης των 10-20 dB για την αντιμετώπιση των διαλείψεων και άλλων υποβιβασμών του διαύλου, θεωρούμε ότι ο ραδιοδιάυλος είναι σε ισχυρές διαλείψεις όταν η λαμβανόμενη ισχύς είναι κατά 10-20 dB χαμηλότερη της μέσης λαμβανόμενης ισχύος. Όπως γίνεται αντιληπτό, η επιδείνωση του ρυθμού σφαλμάτων (BER), κατά τη διάρκεια που ο διάυλος βρίσκεται σε ισχυρές διαλείψεις, είναι δραματική και εν μέρει μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας την ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος. Όμως λαμβάνοντας υπόψη ότι η διάρκεια των ισχυρών διαλείψεων είναι μικρή, η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος του σήματος, είναι μια σπάταλη επιλογή. Κατά τη διάρκεια των ισχυρών διαλείψεων είναι αρκετά τα διαδοχικά bit τα οποία επηρεάζονται και για αυτό αναφερόμαστε σε ριπές σφαλμάτων (burst errors). Οι συνήθεις κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων μπορούν να διορθώσουν μέχρι κάποιο μικρό αριθμό διαδοχικών εσφαλμένων bits, επομένως για την αντιμετώπιση των ριπών σφαλμάτων απαιτούνται άλλοι τρόποι αντιμετώπισης. Τέτοιοι είναι η διαφορική λήψη, η κωδικοποίηση σε συνδυασμό με διεμπλοκή (coding-interleaving), και προσαρμοστικές (adaptive) τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης [9].

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε περιληπτικά τις διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας και θα παρουσιάσουμε τα μοντέλα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, καθώς αυτά θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας κατά τη μελέτη της απόδοσης των συνεργατικών συστημάτων.

2.2 Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας (Small Scale Fading)

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι οι μικρές διακυμάνσεις που παρατηρούνται στο πλάτος, τη φάση και τις χρονικές καθυστερήσεις των ραδιοσημάτων σε μια μικρή απόσταση ή περίοδο του χρόνου. Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται σε παρεμβολές μεταξύ δύο ή περισσότερων εκδοχών του εκπεμπόμενου σήματος οι οποίες λαμβάνονται στο δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές [10]. Στο Σχ. 2.2, απεικονίζονται οι γρήγορες διακυμάνσεις του πλάτους των διαλείψεων σαν συνάρτηση του χρόνου.



Σχημα 2-2: Πλάτος διαλείψεων Rayleigh

Υπάρχουν πολλοί φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας σε ένα ασύρματο κανάλι διάδοσης. Οι πιο σημαντικοί είναι :

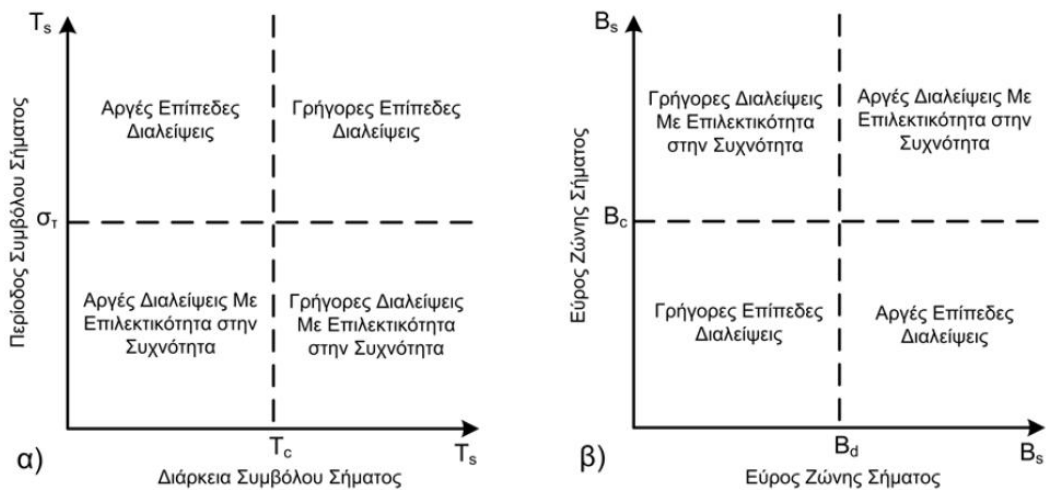
Διάδοση πολλαπλής διαδρομής: Οι μηχανισμοί διάδοσης των κυμάτων και η μετάδοσή τους σε ένα περίπλοκο περιβάλλον έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλαπλών εκδοχών του εκπεμπόμενου σήματος, οι οποίες λαμβάνονται στην κεραία λήψης, μετατοπισμένες στο χωρικό και χρονικό προσανατολισμό. Τα διαφορετικά αυτά κύματα πολλαπλής διαδρομής έχουν τυχαίο πλάτος και φάση, δημιουργώντας έτσι διακυμάνσεις στην ισχύ των σημάτων και συνεπώς διαλείψεις μικρής κλίμακας .

Κίνηση του κινητού : Η σχετική κίνηση μεταξύ του σταθμού βάσης και ενός κινητού δέκτη επιφέρει τυχαία μεταβολή της συχνότητας εξαιτίας των διαφορετικών μετατοπίσεων Doppler των κυμάτων πολλαπλής διαδρομής. Η μετατόπιση Doppler μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το αν ο κινητός δέκτης πλησιάζει ή απομακρύνεται από το σταθμό βάσης αντίστοιχα.

Κίνηση των αντικειμένων του περιβάλλοντος : Η κίνηση των αντικειμένων σε ένα ασύρματο κανάλι επιφέρει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μετατόπιση Doppler στα κύματα πολλαπλής διαδρομής. Η κίνηση των αντικειμένων του περιβάλλοντος λαμβάνεται υπόψη όταν είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του κινητού δέκτη, αλλιώς μπορεί να αγνοηθεί και να εξεταστεί μόνο η ταχύτητα του δέκτη.

Εύρος ζώνης εκπομπής του σήματος: Εάν το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου ράδιο-σήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του καναλιού πολλαπλής διαδρομής, το λαμβανόμενο σήμα θα παραμορφωθεί αλλά οι διαλείψεις μικρής κλίμακας δεν θα είναι σημαντικές. Εάν το εκπεμπόμενο σήμα έχει μικρότερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με εκείνο του καναλιού, το πλάτος του σήματος θα μεταβάλλεται γρήγορα αλλά το σήμα δεν θα παραμορφώνεται στο χρόνο.

Γενικότερα, το ασύρματο κανάλι μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα γραμμικό φίλτρο με χρονικά μεταβαλλόμενη κρουστική απόκριση, όπου η χρονική μεταβολή οφείλεται στην κίνηση στο χώρο [2]. Αυτή η φύση του καναλιού οφείλεται στο άθροισμα των πλατών και των καθυστερήσεων των πολλαπλών εισερχόμενων κυμάτων που έχουν σαν αποτέλεσμα: α) τη χρονική εξάπλωση (time spread) των πολλαπλών διαδρομών, και β) τη χρονική διασπορά (time variance) των πολλαπλών διαδρομών [6]. Η χρονική εξάπλωση είναι η καθυστέρηση μεταξύ της άφιξης του πρώτου και του τελευταίου συνθετικού πολλαπλών διαδρομών, ενώ η χρονική διασπορά είναι η αλλαγή στο πλάτος και τη φάση του σήματος λόγω της μεταβολής του περιβάλλοντος που οφείλεται στην κίνηση. Εξαιτίας αυτών των μηχανισμών, ένα ράδιο-σήμα το οποίο διαδίδεται σε ένα ασύρματο κινητό κανάλι επηρεάζεται από διαφορετικά είδη διαλείψεων ανάλογα με τις παραμέτρους του σήματος (εύρος ζώνης, περίοδος συμβόλου) και τα χαρακτηριστικά του καναλιού (εξάπλωση καθυστέρησης, delay spread, εξάπλωση Doppler).

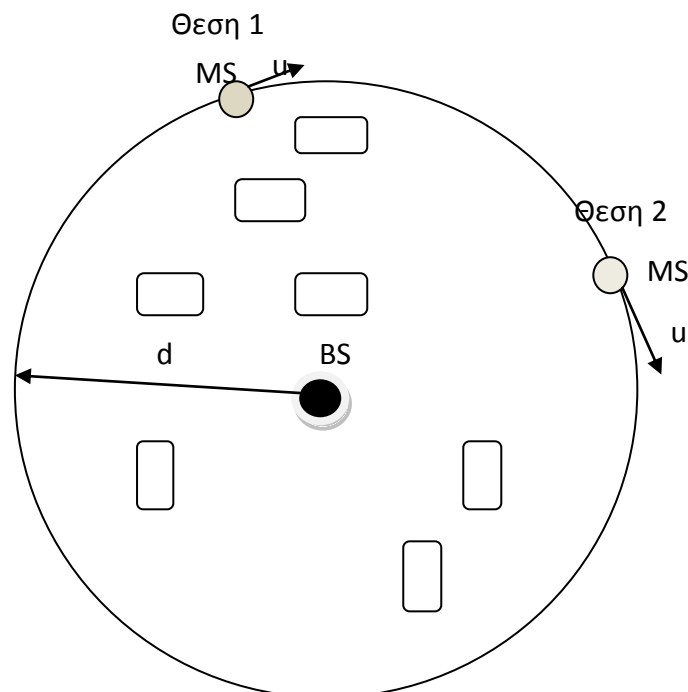


Σχημα 2-3: Τύποι διαλείψεων μικρής κλίμακας ανάλογα με: α) την περίοδο του σήματος, β) εύρος ζώνης του σήματος

Για παράδειγμα όταν το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος B_s είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συμφωνίας (coherence bandwidth) του καναλιού B_c , τότε έχουμε συχνο-επιλεκτικές διαλείψεις (frequency selective), αλλιώς έχουμε επίπεδες διαλείψεις (flat fading). Αντίστοιχο του B_c στο πεδίο της συχνότητας, είναι η εξάπλωση καθυστέρησης, σ_t , στο πεδίο του χρόνου. Επίσης, εάν η χρονική διάρκεια ενός συμβόλου T_s είναι μεγαλύτερη από το σύμφωνο χρόνο ενός καναλιού T_c , τότε έχουμε γρήγορες διαλείψεις (fast fading), διαφορετικά έχουμε αργές διαλείψεις (slow fading). Το αντίστοιχο του T_c στο πεδίο του χρόνου, είναι η εξάπλωση Doppler (Doppler spread) B_d , στο πεδίο της συχνότητας. Όλα τα παραπάνω γίνονται ευκολότερα κατανοητά παρατηρώντας το σχήμα 2-3.

2.3 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας (Large Scale Fading)

Η λαμβανόμενη ισχύς από δύο κινητούς δέκτες (Mobile Stations) που βρίσκονται ακριβώς στην ίδια απόσταση από τον πομπό (Base Station) μπορεί να είναι εντελώς διαφορετική και αυτό οφείλεται στο διαφορετικό περιβάλλον στις δύο περιπτώσεις όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-4. Τα ραδιοκύματα σκιάζονται από τα κτίρια και άλλες κατασκευές, έτσι αντιλαμβανόμαστε ότι στο σχήμα 2-4 οι δέκτες στην θέση 1 και στη θέση 2 δεν μπορούν να λαμβάνουν την ίδια ισχύ. Η σκίαση είναι συνήθως βαθμιαία λόγω του φαινομένου της περίθλασης[7]. Η λαμβανόμενη ισχύς είναι στην πραγματικότητα μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών, που συμμετέχουν στη διάδοση. Αυτές οι τυχαίες μεταβολές του λαμβανόμενου σήματος λόγω της παρουσίας των αντικειμένων στο χώρο διάδοσης αναφέρονται ως **διαλείψεις σκίασης (shadow fading)**.



Σχήμα 2-4: Επεξήγηση του φαινομένου της σκίασης

Οι μετρήσεις που έχουν γίνει σε ραδιοδιαύλους έχουν δείξει ότι η λαμβανόμενη ισχύς εκφρασμένη σε λογαριθμική κλίμακα (dBm ή dBW), ακολουθεί κανονική κατανομή, με τη μέση τιμή να καθορίζεται από τον από το συντελεστή απωλειών διάδοσης και τυπική απόκλιση που εξαρτάται από το περιβάλλον. Άρα γράφουμε

$$P_r(d) = \overline{P_r(d)} + \varepsilon_\sigma \quad (\text{dBm}) \quad (2.1)$$

όπου $\overline{P_r(d)}$ είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση d και ε_σ είναι μια τυχαία μεταβλητή σε dB που ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ_p σε dB. Αν χρησιμοποιήσουμε το εκθετικό μοντέλο ή μοντέλο απλής κλίσης τότε

$$P_r(d) = \overline{P_r(d_o)} - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + \varepsilon_\sigma \quad (\text{dBm}) \quad (2.2)$$

Όμοια

$$PL(d) = \overline{PL(d)} + \varepsilon_\sigma \quad (\text{dBm}) \quad (2.3)$$

Και

$$PL(d) = \overline{PL(d_o)} - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_o} \right) + \varepsilon_\sigma \quad (\text{dBm}) \quad (2.4)$$

Όπου το σύμβολο $\overline{P_r(d_o)}$ υποδεικνύει τη μέση λαμβανόμενη ισχύ στην απόσταση αναφοράς d_o και το σύμβολο $\overline{PL(d_o)}$ τη μέση τιμή των απωλειών διάδοσης. Όταν η κατανομή της λαμβανόμενης ισχύος, εκφρασμένης σε λογαριθμική κλίμακα, είναι κανονική, τότε την αποκαλούμε λογαριθμοκανονική (lognormal). Η μεταβλητή ε_σ αναπαριστά την απόκλιση της πραγματικής από τη μέση τιμή των απωλειών διάδοσης. Όσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο απωλειών διάδοσης, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης. Συνήθεις τιμές είναι από 4dB ως 12dB με συνηθέστερη αυτή των 8dB. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η τυπική απόκλιση σ_p είναι ανεξάρτητη της απόστασης d .

Τόσο η θέση, το μέγεθος αλλά και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων που προκαλούν σκίαση είναι γενικά τυχαίες. Συνεπώς, η εξασθένιση που προκαλείται από αυτό το φαινόμενο πρέπει να μοντελοποιηθεί στοχαστικά. Το πιο κοινό μοντέλο για τα φαινόμενα σκίασης που έχει επιβεβαιωθεί εμπειρικά, όπως αναφέρεται και προηγουμένως, είναι το λογαριθμοκανονικό, όπου η απόσβεση

λόγω σκίασης, εκφρασμένη σε γραμμική κλίμακα μοντελοποιείται ως μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή.

2.3.1 Μοντέλα Διαλείψεων Μεγάλης Κλίμακας

Εμπειρικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι η σκίαση σε εξωτερικό αλλά και στο εσωτερικό περιβάλλον μπορεί να μοντελοποιηθεί από τη λογαριθμοκανονική (log-normal) κατανομή.

2.3.1.1 Λογαριθμοκανονική κατανομή (log-normal)

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function-pdf) μιας τυχαίας λογαριθμοκανονικής μεταβλητής a δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f_a(a) = \frac{1}{\alpha\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln a - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

Όπου μ , σ η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του $\ln a$, αντίστοιχα σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB. Η παραπάνω λογαριθμοκανονική κατανομή προκύπτει από την κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma)$ χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό $u = \ln a$:

$$f_u(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(u - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) = N(\mu, \sigma) \quad (2.6)$$

Οι ροπές μιας λογαριθμοκανονικής τυχαίας μεταβλητής υπολογίζονται από τη ροπογεννήτρια συνάρτηση της τυχαίας μεταβλητής [11]:

$$m_k = E[a^k] = \exp\left(\mu k + \frac{k^2\sigma^2}{2}\right) \quad (2.7)$$

Αν η απόσβεση λόγω σκίασης α είναι μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή, τότε τόσο η λαμβανόμενη ισχύς:

$$P_R(W) = P_T a \quad (2.8)$$

Όσο και ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος (γραμμική κλίμακα):

$$\gamma = \frac{P_T}{N_0} a \quad (2.9)$$

Είναι και αυτές λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές ως πολλαπλασιασμός της τυχαίας μεταβλητής με σταθερό αριθμό. Στους παραπάνω τύπους $P_T(W)$ είναι η εκπεμπόμενη ισχύς και N_0 είναι η ισχύς του θορύβου.

2.3.1.2 Κατανομή Γάμα

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του μοντέλου της log-normal κατανομής από μαθηματικής απόψεως, που είχε ως αποτέλεσμα την δύσκολη εξαγωγή μαθηματικών εκφράσεων για την αναλυτική εξέταση της επίδοσης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας. Μια από αυτές τις προσεγγίσεις που μπορεί να μοντελοποιήσει ικανοποιητικά τις Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας είναι η κατανομή Γάμα. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Γάμα δίνεται από τον τύπο:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{\gamma^{k-1}}{\Gamma(k)\gamma^k} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma}\right), \gamma \geq 0 \quad (2.10)$$

Όπου το $k > 0$ είναι η παράμετρος μορφοποίησης της κατανομής Γάμα. Η ροπογεννήτρια συνάρτηση δίνεται από τον τύπο:

$$M_{\gamma}(s) = \left[\frac{1}{\gamma \left(s + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]^{-k} \quad (2.11)$$

Και οι ροπές δίνονται από τον τύπο:

$$m_{\gamma}(n) = \frac{\Gamma(k+n)}{\Gamma(k)} \gamma^{-n} \quad (2.12)$$

3. Επίδοση συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας τριγώνου σε κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις.

3.1. Εισαγωγή

Τα συστήματα συνεργατικής διαφορικότητας αποτελούνται από πολλαπλούς κόμβους/χρήστες οι οποίοι μοιράζονται πόρους ώστε να δημιουργήσουν πολλαπλά κανάλια διαφορικότητας και με αυτόν τον τρόπο να βελτιώσουν την επίδοση του συστήματος, όπως για παράδειγμα να αυξήσουν τη διαθεσιμότητα, το εύρος συχνοτήτων των ζεύξεων και το ρυθμό διέλευσης (throughput).

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφερόμαστε στη συνεργατική διαφορικότητα σε κανάλια με λογαριθμοκανονικές διαλείψεις. Τα μοντέλα λογαριθμοκανονικών καναλιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση τόσο των συνθηκών διάδοσης εσωτερικού όσο και εξωτερικού χώρου[12][13][14][15][16]. Εξαιτίας των διαφόρων επιδράσεων στη διάδοση αλλά και των γεωμετρικών παραμέτρων, οι διαλείψεις που οφείλονται στα διαφορετικά κανάλια διάδοσης μπορούμε να δεχτούμε ότι είναι συσχετισμένες [17][18][19], ακολουθώντας μια πολυδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή όπως θα αναλυθεί στην παράγραφο 3.2.

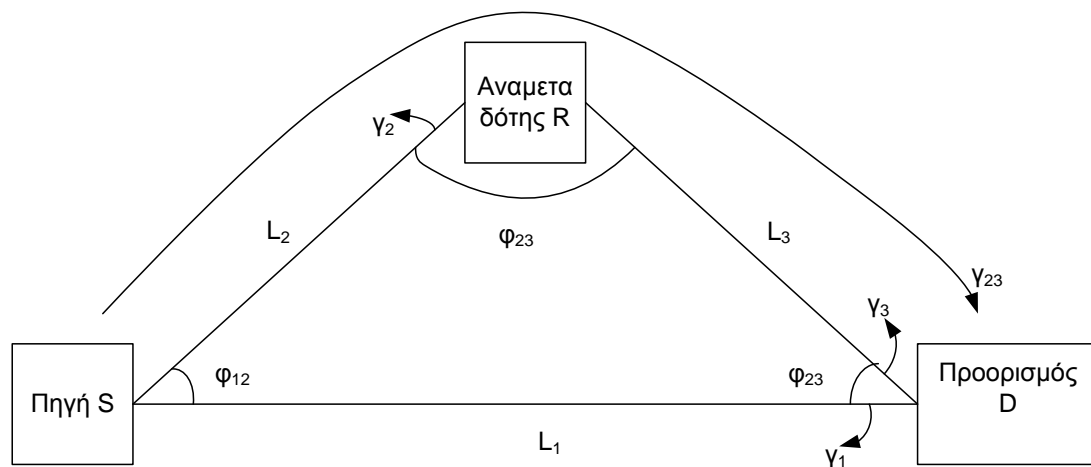
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε την επίδοση των συνεργατικών συστημάτων και ειδικότερα για την τοπολογία τριγώνου[20][21][22][23], που θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα και θα προταθούν αναλυτικοί τύποι σε μορφή ολοκληρωμάτων για να περιγράψουν την συνολική πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος σε κανάλια με συσχετισμένες διαλείψεις. Επίσης θα συγκριθεί η επίδοση του συνεργατικού συστήματος με ένα μη συνεργατικό σύστημα. Οι παραδοχές για το μοντέλο του ύπο μελέτη συστήματος και η ακριβής περιγραφή των συνθηκών κατά τη διάδοση παρέχονται στην ενότητα 3.2. Στην ενότητα 3.3 προτείνονται οι ακριβείς ολοκληρωτικές εκφράσεις για την περιγραφή της ολικής πιθανότητας αποκοπής του τριγωνικού συνεργατικού συστήματος, όπου ένας επαναλήπτης αποκωδικοποίησης και προώθησης (decode-and-forward)[24] χρησιμοποιείται, παρέχοντας μια διαφορετική πορεία διάδοσης του σήματος πέρα από την απευθείας ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη, για τη βελτίωση της επικοινωνίας των δύο κόμβων. Σε αυτό το σύστημα ο δέκτης λαμβάνει δύο εκδοχές του ίδιου σήματος, τις οποίες συνδυάζει ομόδυνα χρησιμοποιώντας την τεχνική

MRC ή την τεχνική SC [15]. Στην ενότητα 3.4 περιγράφεται αναλυτικά η αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας σε σύγκριση με συστήματα μη συνεργασίας. Σημειώνεται εδώ ότι ο τρόπος πρόσβασης των κόμβων στο μέσο εξαρτάται από τις δυνατότητες του επαναλήπτη για ημι-αμφίδρομη (half-duplex) ή για αμφίδρομη (full duplex) επικοινωνία. Τέλος στην ενότητα 3.5 περιέχονται αριθμητικές εφαρμογές των προτεινόμενων εκφράσεων για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής του συστήματος και διερευνάται το εύρος των τιμών των παραμέτρων του προβλήματος, όπου η συνεργασία των κόμβων κρίνεται αποδοτική συγκριτικά με τη μη συνεργασία.

3.2. Μοντέλο του συστήματος

3.2.1. Γεωμετρία του συστήματος

Οι γεωμετρικές παράμετροι του υπό μελέτη συστήματος συνεργατικής επικοινωνίας (συνεργατικό σύστημα τριγώνου) φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Γεωμετρικό μοντέλο συστήματος συνεργατικής διαφορικότητας (σύστημα επαναλήπτη)

Η πηγή S επικοινωνεί με τον προορισμό D μέσω της απευθείας ζεύξης αλλά και μέσω του κόμβου του αναμεταδότη R (dual-hop transmission). Τα δύο σήματα που λαμβάνει ο κόμβος D μέσω αυτών των δύο διαδρομών μπορεί να τα συνδυάζει μέσω των τεχνικών διαφορικής λήψης.

Στο σχήμα 3-1 απεικονίζονται οι γεωμετρικοί παράμετροι $L_j(m)$, που αποτελούν τα μήκη των ζεύξεων $j=1,2,3$, πηγής-προορισμού (S-D), πηγής-αναμεταδότη (S-R) και αναμεταδότη-προορισμού (R-D) αντίστοιχα. Επίσης όπως απεικονίζονται στο σχήμα 2-1 οι $\phi_{ij}(\text{deg})$ για $(i,j=1,2,3 \ i \neq j)$ αποτελούν τις γωνίες μεταξύ των ζεύξεων σε μοίρες με $\phi_{ij} = \phi_{ji}$.

3.2.2 Μοντέλο καναλιού διάδοσης

Ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη κάθε ζεύξης j ($j=1,2,3$) δίνεται σε γραμμική κλίμακα από τον τύπο:

$$\gamma_j = \frac{1}{N_0} P_{Txj} w_j \quad (1)$$

όπου το N_0 είναι η πυκνότητα του θορύβου σε γραμμική κλίμακα (στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται ίσο με τη μονάδα χωρίς άρση της γενικότητας), P_{Txj} είναι η ισχύς εκπομπής για τη ζεύξη j ενώ w_j είναι η λογαριθμοκανονική μεταβλητή που χαρακτηρίζει τις διαλείψεις λόγω σκίασης και έχει παραμέτρους με μονάδα μέτρησης το Neper ($1 \text{ Np} = 10 \text{ dB} = 10/\ln(10) \text{ dB}$):

$$(\mu_{w_j}, \sigma_j) = (-\ln(PL_j), \sigma_j) \quad (2)$$

όπου PL_j είναι οι απώλειες διάδοσης για τη ζεύξη j (σε γραμμική κλίμακα) και σ_j είναι η μεταβλητότητα της λογαριθμοκανονικής παραμέτρου η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης [18]. Συνεπώς ο σηματοθορυβικός λόγος γ_j του λαμβανόμενου σήματος από τον δέκτη της ζεύξης j είναι και αυτός μια λογαριθμοκανονική μεταβλητή με παραμέτρους (σε Neper):

$$(\mu_j, \sigma_j) = ((\ln(P_{Txj}) + \mu_{w_j}), \sigma_j) \quad (3)$$

όπου το μ_{w_j} δίνεται από την εξίσωση (2) και το P_{Txj} έχει παρουσιαστεί παραπάνω, όπως και το σ_j . Οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι γ_j ($j=1,2,3$) θεωρούνται ότι είναι συσχετισμένες και ακολουθούν την τριδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$, που θα περιγραφεί στην παράγραφο 3.3.

3.3. Επίδοση συνεργατικού συστήματος με τις τεχνικές SC και MRC

3.3.1. Συνολικός σηματοθορυβικός λόγος

Θεωρείται ότι ο επαναλήπτης του συστήματος χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης (FR) οπότε μια επιτυχημένη μετάδοση προϋποθέτει ότι τόσο ο τελικός δέκτης D όσο και ο επαναλήπτης R να αποκωδικοποιήσαν σωστά το λαμβανόμενο σήμα. Για την περίπτωση της χρήσης της τεχνικής MRC στον προορισμό D, ο ολικός σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{MRC} = \min(\gamma_2, \gamma_1 + \gamma_3) \quad (4)$$

Όταν χρησιμοποιείται η τεχνική SC, ο ολικός σηματοθορυβικός λόγος στον προορισμό D δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{SC} = \min(\gamma_2, \max(\gamma_1, \gamma_3)) \quad (5)$$

Ο πρώτος όρος στις εξισώσεις (4) και (5) αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο επαναλήπτης R να αποκωδικοποιεί χωρίς σφάλματα το σήμα που δέχεται από τον πομπό S. Ο δεύτερος όρος στις (4) και (5) είναι ισοδύναμος με την έξοδο των συνδυαστών MRC και SC αντίστοιχα [15] και αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο προορισμός D να αποκωδικοποιήσει χωρίς σφάλματα το λαμβανόμενο σήμα από την πηγή S και τον αναμεταδότη D.

3.3.2. Πιθανότητα αποκοπής

Σε αυτήν την ενότητα θα προταθούν ακριβείς εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής του υπό μελέτη συνεργατικού συστήματος με τη μορφή ολοκληρωμάτων [20][21][22]. Η πιθανότητα αποκοπής ορίζεται ως το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος (total SNR) γ_c δεν υπερβαίνει κάποιο όριο γ_{th} :

$$P_{out} = P(\gamma_c < \gamma_{th}) \quad (6)$$

όπου το κατώφλι γ_{th} εξαρτάται από τη φασματική αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου όπως θα αναλυθεί στην παράγραφο 3.4. Στο συγκεκριμένο σύστημα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως πρέπει η αποκωδικοποίηση στον αναμεταδότη R αλλά και στον προορισμό D πρέπει να είναι επιτυχημένη. Επομένως σε μορφή ενδεχομένων η πιθανότητα αποκοπής είναι:

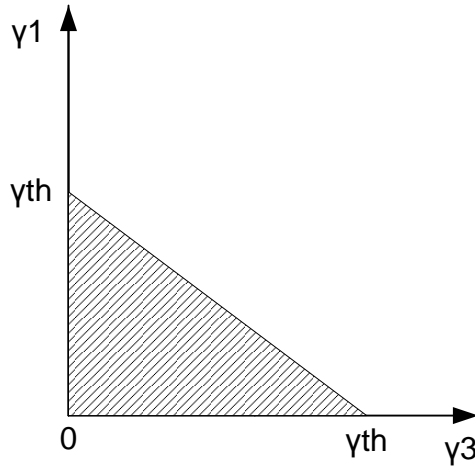
$$P_{out} = P(\gamma_2 < \gamma_{th} \cup (\gamma_s < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th})) \quad (7)$$

και εν συνεχεία:

$$P_{out} = P(\gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_s < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th}) \quad (8)$$

$$\text{όπου} \quad \gamma_s = \begin{cases} \max(\gamma_1, \gamma_3) & SC \\ \gamma_1 + \gamma_3 & MRC \end{cases} \quad (9)$$

Το ενδεχόμενο αποκοπής εξαιτίας αποτυχημένης αποκωδικοποίησης στον προορισμό D, που εκφράζεται από τον 2^ο όρο της σχέσης (8) για την τεχνική του MRC όπου το $\gamma_s = \gamma_1 + \gamma_3$ όπως φαίνεται από τον τύπο (9) εξηγείται από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3-2) όπου η γραμμοσκιασμένη περιοχή απεικονίζει το ενδεχόμενο της αποκοπής το οποίο είναι: $\gamma_1 + \gamma_3 < \gamma_{th}$.



Σχήμα 3-2: Ενδεχόμενο αποκοπής για την τεχνική MRC

Χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ καθώς και τους τύπους (8) και (9) η πιθανότητα αποκοπής δίνεται από τον παρακάτω τύπο[20][22]:

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 + \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_1 \int_0^{\gamma_0} d\gamma_3 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_2 f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \quad (10)$$

$$\text{όπου} \quad \gamma_0 = \begin{cases} \gamma_{th} & SC \\ \gamma_{th} - \gamma_1 & MRC \end{cases} \quad (11)$$

Στην έκφραση (10), ο πρώτος και ο δεύτερος όρος αντιστοιχούν στον πρώτο και τον δεύτερο όρο αντίστοιχα της έκφρασης (4) να πρόκειται για την τεχνική MRC και της έκφρασης (5) αν πρόκειται για την τεχνική SC.

Η από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ προκύπτει από την κανονική κατανομή $f_{u_1u_2u_3}(u_1, u_2, u_3)$ [11] χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = \frac{\ln(\gamma_j) - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (j=1,2,3) \quad (12)$$

Όπου μ_j, σ_j δίνονται από την έκφραση (3).

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό (12) η πιθανότητα αποκοπής (12) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{out} = \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_2}(u_2) du_2 + \int_{-\infty}^{u_{1,0}} du_1 \int_{-\infty}^{u_{3,0}} du_3 \int_{u_{2,0}}^{\infty} f_{u_1u_2u_3}(u_1, u_2, u_3) du_2 \quad (13)$$

Ενώ κάνοντας χρήση και του θεωρήματος Bayes [11] η έκφραση (13) γίνεται:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(-\infty) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{2,0}}{\sqrt{2}}\right) + \int_{-\infty}^{u_{1,0}} du_1 \int_{-\infty}^{u_{3,0}} f_{u_1u_3}(u_1, u_3) \left(\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{2,0} - \mu_{2/1,3}}{\sqrt{2}\sigma_{2/1,3}}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\infty) \right) du_3 \Rightarrow$$

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{2,0}}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{u_{1,0}} du_1 \int_{-\infty}^{u_{3,0}} f_{u_1u_3}(u_1, u_3) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{2,0} - \mu_{2/1,3}}{\sqrt{2}\sigma_{2/1,3}}\right) du_3 \quad (14)$$

$$\text{όπου} \begin{cases} u_{3,0} = (\ln \gamma_0 - \mu_3) / \sigma_3 \\ u_{j,0} = (\ln \gamma_{th} - \mu_j) / \sigma_j \end{cases} \quad j = (1,2) \quad (15)$$

και το γ_0 δίνεται από την σχέση (11), ενώ $f_{u_1u_3}(u_1, u_3)$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών (u_1, u_3) [11]. Οι παράμετροι $\mu_{2/1,3}$ και $\sigma_{2/1,3}$ [12, Κεφάλαιο 7] δίνονται από:

$$\begin{cases} \mu_{2/1,3} = \frac{\rho_{12} - \rho_{13}\rho_{23}}{1 - \rho_{13}^2} u_1 + \frac{\rho_{23} - \rho_{12}\rho_{13}}{1 - \rho_{13}^2} u_3 \\ \sigma_{2/1,3} = \sqrt{\frac{1 - \rho_{12}^2 - \rho_{13}^2 - \rho_{23}^2 + 2\rho_{12}\rho_{13}\rho_{23}}{1 - \rho_{13}^2}} \end{cases} \quad (16)$$

Στην έκφραση (16), ρ_{ij} είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των λογαριθμοκανονικών μεταβλητών (γ_i, γ_j) όπου $(i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$ και $\rho_{ij} = \rho_{ji}$.

Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθεί η ενεργειακή και φασματική αποδοτικότητα των δύο πρωτοκόλλων, ενώ στην ενότητα 3.5 θα γίνει εφαρμογή των τύπων που παρουσιάστηκαν παραπάνω και παρουσίαση της αποδοτικότητας του συστήματος.

3.4. Αποδοτικότητα πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας

Σε αυτήν την παράγραφο συγκρίνεται αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων TDMA (στο εξής θα αναφέρεται και ως πρωτόκολλο A) και SDMA (θα αναφέρεται και ως πρωτόκολλο B), που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, των συνεργατικών συστημάτων με συστήματα που δεν χρησιμοποιούν συνεργατική διαφορικότητα. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται ως προς τους ακόλουθους παράγοντες σχεδιασμού:

- α) χρήση φάσματος
- β) ολική ενέργεια εκπομπών

3.4.1. Ενεργειακή αποδοτικότητα πρωτοκόλλων A και B

Τα πρωτόκολλα A και B καταναλώνουν την ίδια ενέργεια εκπομπής για κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο η οποία δίνεται:

$$E_{\text{protoco}(A)} = E_{\text{protoco}(B)} = \sum_{i=0}^2 p_{\text{total}(t=i)} T \quad (17)$$

Όπου $p_{\text{total}(t=i)}$ είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπει το σύστημα στη θυρίδα πολλαπλής πρόσβασης $t = i$ και T είναι η χρονική διάρκεια της κάθε θυρίδας.

Ένα σύστημα που δεν χρησιμοποιεί τη συνεργατική διαφορικότητα αποτελείται μόνο από τους κόμβους S και D και χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια εκπομπής ανά σύμβολο συγκριτικά με το συνεργατικό σύστημα που μελετάται σε αυτό το κεφάλαιο. Θεωρώντας ότι ο αναμεταδότης R του συνεργατικού συστήματος εκπέμπει με την ίδια ισχύ όπως η πηγή S, τότε το συνεργατικό σύστημα εκπέμπει διπλάσια ισχύ ανά σύμβολο συγκριτικά με την ισχύ εκπομπής του συστήματος απευθείας ζεύξης. Έτσι με τη συνεργασία των κόμβων επιτυγχάνεται καλύτερη επίδοση στο σύστημα αλλά δαπανάται περισσότερη ενέργεια.

Για τη σύγκριση των δύο συστημάτων σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιείται το ενεργειακά ισοδύναμο (με το συνεργατικό σύστημα) μη συνεργατικό σύστημα. Σε αυτό το σύστημα η πηγή S έχει ενέργεια εκπομπής ανά σύμβολο $E_{direct(eff)} = T \cdot P_{Tx(eff)}$ ίση με τη συνολική ενέργεια των πρωτοκόλλων A και B, η οποία δίνεται από τη σχέση (17), οπότε η ισχύς εκπομπής δίνεται από τον τύπο:

$$P_{Tx(eff)} = P_{Tx1} + P_{Tx2} \quad (18)$$

όπου p_{Txj} ($j=1,2$) είναι η ισχύς εκπομπής της ζεύξης j του συνεργατικού συστήματος. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3) και (18), το ενεργειακά ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα ερμηνεύεται ως ένα μη-συνεργατικό σύστημα με μεγαλύτερη λογαριθμοκανονική μέση τιμή (σε Neper):

$$(\mu_{eff}, \sigma_{eff}) = (\mu_{w_{eff}} + \ln(\exp(\mu_1 - \mu_{w_1}) + \exp(\mu_3 - \mu_{w_3})), \sigma_1) \quad (19)$$

όπου $\mu_{w_{eff}} = \mu_{w_1}$. Η θεώρηση $\sigma_{eff} = \sigma_1$ ισχύει καθώς θεωρείται ότι το μη – συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιεί το ίδιο μέσο διάδοσης με τη ζεύξη S-D του συνεργατικού συστήματος του σχήματος 3-1.

3.4.2 Φασματική αποδοτικότητα των πρωτοκόλλων A και B

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2.4, το πρωτόκολλο A χρησιμοποιεί δύο θυρίδες πολλαπλής πρόσβασης, οδηγώντας σε μη-αποδοτικότητα ως προς τη χρήση φάσματος. Η φασματική αποδοτικότητα μπορεί να ενταχθεί στην ανάλυση αρχικά μέσω της έκφρασης της πιθανότητας αποκοπής της χωρητικότητας του συνδυαστή $C_{C(A)}$ για το πρωτόκολλο A με κατώφλι R όπως φαίνεται στους τύπους που ακολουθούν:

$$P_{out(A)} = P(C_{C(A)} < R) \quad (20)$$

Ή ισοδύναμα χρησιμοποιώντας τον τύπο του Shannon για την χωρητικότητα:

$$P_{out(A)} = P\left(\frac{1}{2}\log_2(1 + \gamma_c) < \log_2(1 + \gamma_{th-norm})\right) \quad (21)$$

όπου το γ_c δίνεται από την σχέση (4) ή (5) ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται η τεχνική MRC ή η τεχνική SC αντίστοιχα, και $\gamma_{th-norm}$ είναι το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου. Το κατώφλι $\gamma_{th-norm}$ είναι ο σηματοθορυβικός λόγος που αντιστοιχεί σε κατώφλι φασματικής αποδοτικότητας R και είναι ένα κοινό εργαλείο της θεωρίας πληροφοριών για την απλοποίηση της ανάλυσης προβλημάτων με πολλούς παράγοντες.

Από τη σχέση (21) προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την πιθανότητα αποκοπής του πρωτοκόλου A:

$$P_{out(A)} = P\left(\gamma_c < \gamma_{th-norm}^2 + 2\gamma_{th-norm}\right) \quad (22)$$

Η πιθανότητα αποκοπής για τα πρωτόκολλα A και B μπορεί να δοθεί μέσω της σχέσης (14) και ενός τροποποιημένου κατωφλίου που περιέχει το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th-norm}$ και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma_{th} = \begin{cases} \gamma_{th-norm}^2 + 2\gamma_{th-norm} & , \text{για το πρωτόκολλο A} \\ \gamma_{th-norm} & , \text{για το πρωτόκολλο B} \end{cases} \quad (23)$$

Επίσης δεδομένης μιας πιθανότητας αποκοπής αναφοράς $P_{out(ref)}$, το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th-norm}$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\gamma_{th-norm}|_{P_{out}=P_{out(ref)}} = \begin{cases} \sqrt{1 + \gamma_{th}|_{P_{out}=P_{out(ref)}}} - 1 & , \text{για το πρωτόκολλο A} \\ \gamma_{th}|_{P_{out}=P_{out(ref)}} & , \text{για το πρωτόκολλο B} \end{cases} \quad (24)$$

3.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για την επίδοση των συνεργατικών συστημάτων με χρήση των τεχνικών διαφορικής λήψης SC και MRC. Τα αποτελέσματα αυτά παρήχθησαν με τη χρήση του προγράμματος MATLAB, εφαρμόζοντας για την υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής την σχέση (14).

Η σχέση αυτή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αριθμητικά και συγκλίνει γρήγορα εξαιτίας της μονοτονίας των ολοκληρωτέων συναρτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, αντικαθιστώντας το όριο $-\infty$ με έναν κατάλληλο αρνητικό αριθμό (στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το -10) μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε ζητούμενη ακρίβεια στο αποτέλεσμα, όπως ακριβώς και με τις τελικές εκφράσεις της πιθανότητας αποκοπής.

Η πιθανότητα αποκοπής του ενεργειακά ισοδύναμου μη-συνεργατικού συστήματος δίνεται από $P_{out(eff)} = P(\gamma_{eff} < \gamma_{th-norm(eff)})$ ή ισοδύναμα:

$$P_{out(eff)} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(\gamma_{th-norm(eff)}) - \mu_{eff}}{\sigma_{eff} \sqrt{2}} \right) \quad (25)$$

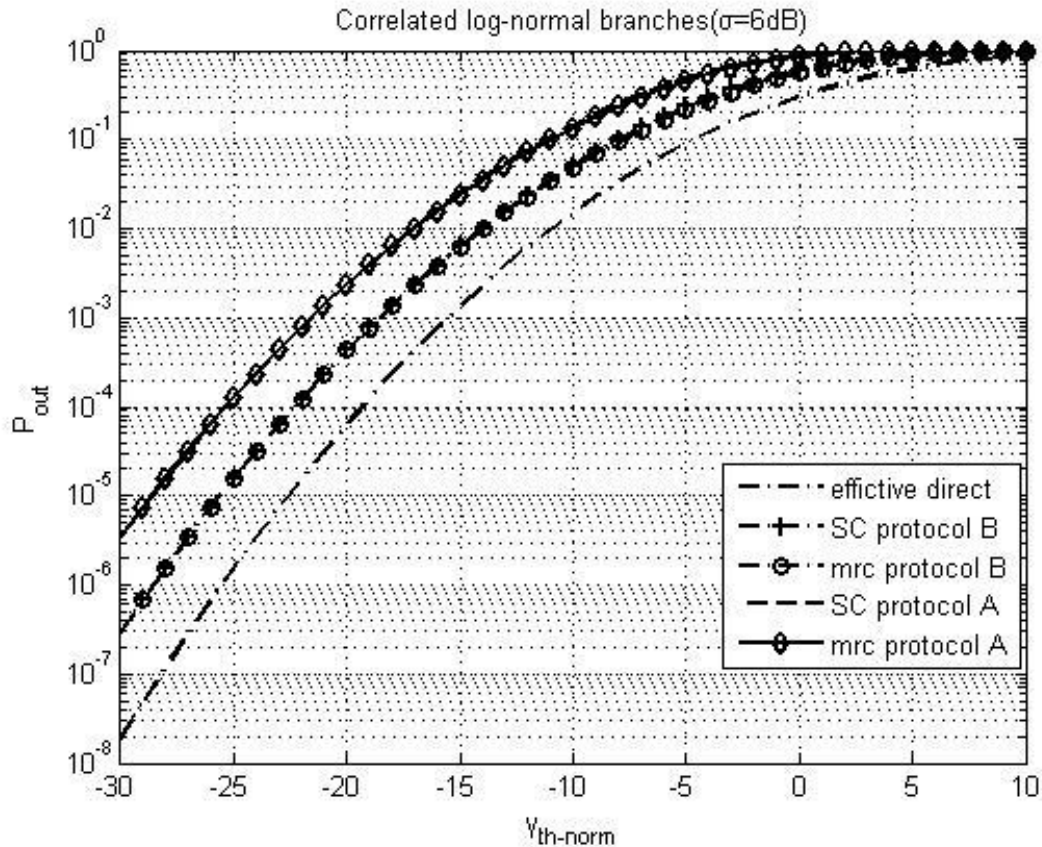
όπου οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι $(\mu_{eff}, \sigma_{eff})$ δίνονται από τη σχέση (19) και $\gamma_{th-norm(eff)} = \gamma_{th-norm}$.

Στις παρακάτω εφαρμογές θεωρούνται οι ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους $\mu_j = 0dB$ και $\mu_{w_j} = 0dB$ για κάθε j . Επιπλέον στο Σχήμα 3-3, το Σχήμα 3-4 και το Σχήμα 3-5 χρησιμοποιείται το ακόλουθο μοντέλο του συντελεστή συσχέτισης λόγω σκίασης [18][28]:

$$\rho_{ij} = \left(\frac{\phi_{\Gamma}}{\phi_{ij}} \right)^{\alpha} \sqrt{\frac{L_i}{L_j}}, \quad (i, j = 1, 2, 3, \quad i \neq j) \quad (26)$$

όπου $L_j \geq L_i$, $\phi_{\Gamma} = 2 \sin^{-1}(L_c / 2L_i)$, $L_c = 20m$ είναι η απόσταση αποσυσχέτισης και $\alpha=0.3$ είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος όπως το μέγεθος και τα ύψη των αντικειμένων του περιβάλλοντος χώρου καθώς και τα ύψη όπου βρίσκονται οι κεραιές του συστήματος.

Στο Σχήμα 3-3 απεικονίζεται η πιθανότητα αποκοπής των τεχνικών SC και MRC του συνεργατικού συστήματος τριγώνου, που χρησιμοποιεί είτε τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA (πρωτόκολλο A) είτε το πρωτόκολλο SDMA (πρωτόκολλο B) συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης $\gamma_{th-norm}$. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι $\sigma_j = 6dB = 1.38Np$, ($j = 1, 2, 3$), $L_1 = L_3 = 2000m$ και $\phi_{23} = 30^\circ$.

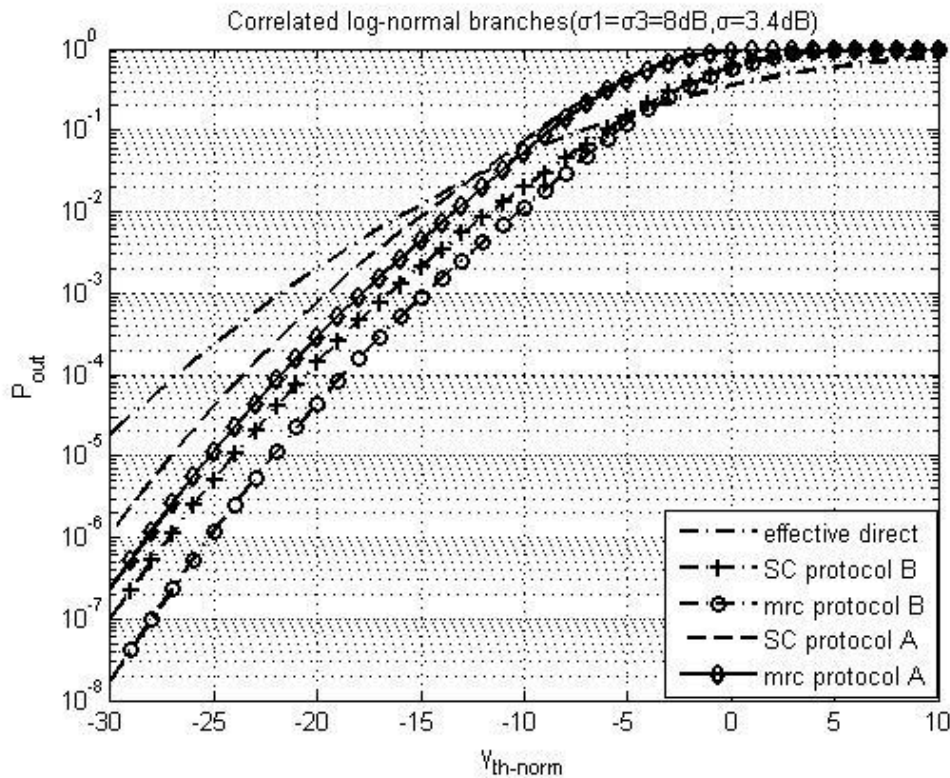


Σχήμα 3-3: Πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος τριγώνου και σύγκριση με την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη.

Από το Σχήμα 3-3 φαίνεται ότι αν σε όλες τις ζεύξεις οι τυπικές αποκλίσεις είναι ίσες, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση $\sigma_j = 6dB = 1.38N_p$, ($j = 1,2,3$) το συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Fixed Relaying (FR) παρουσιάζει χειρότερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για όλο το εύρος τιμών του λόγου $\gamma_{th-norm}$, τόσο στην περίπτωση του πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης A όσο και σε αυτήν του πρωτοκόλλου B. Επίσης φαίνεται ότι για καθένα από αυτά τα πρωτόκολλα η επίδοση του συνεργατικού συστήματος με τη χρήση της τεχνικής MRC ταυτίζεται με την επίδοσή του όταν χρησιμοποιείται η τεχνική SC. Επιπλέον διακρίνεται ότι όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο B το συνεργατικό σύστημα παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την χρήση του πρωτοκόλλου A.

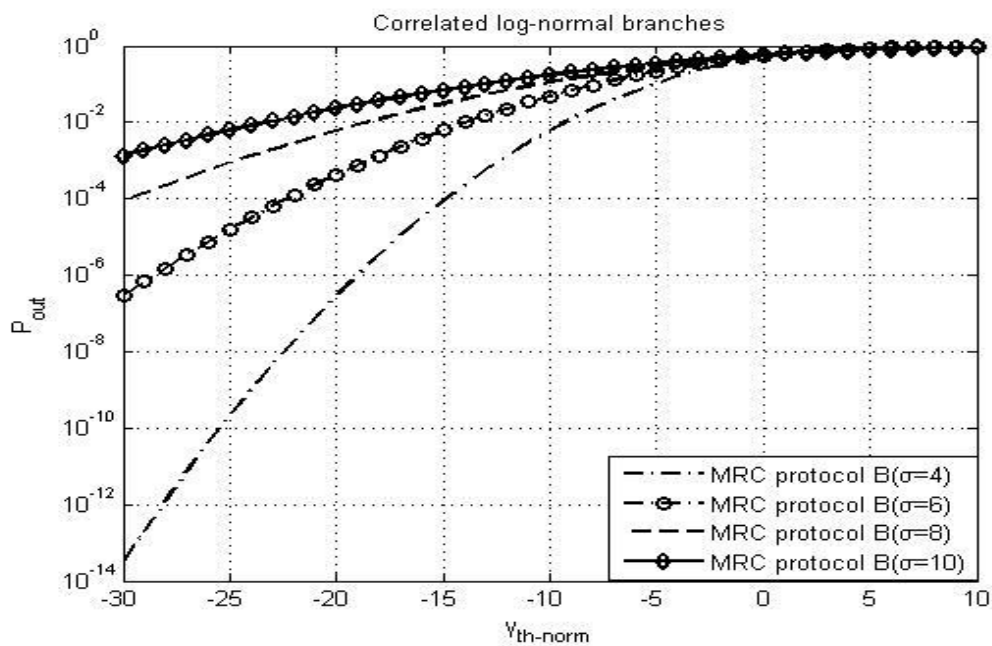
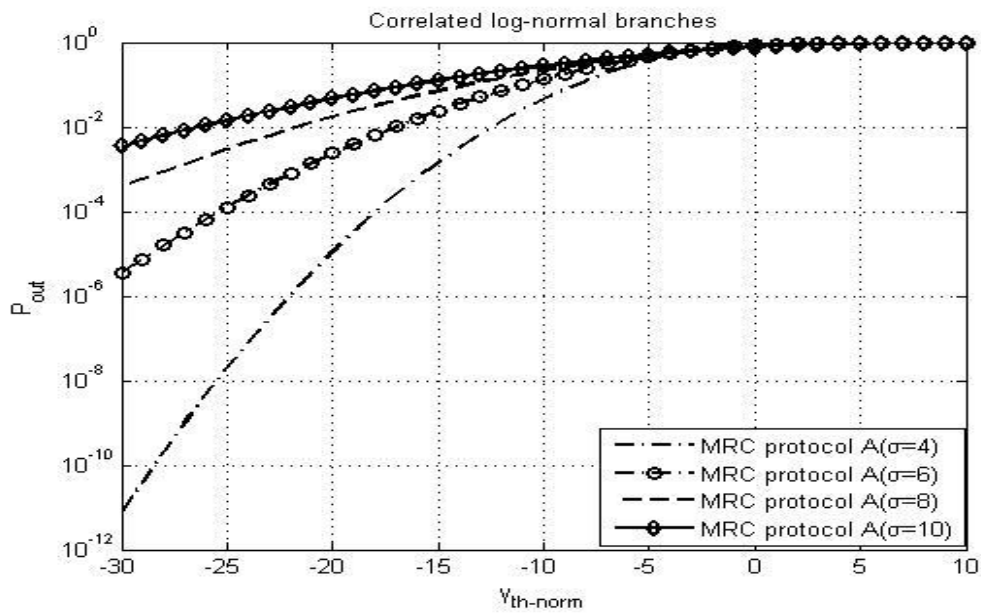
Στο Σχήμα 3-4 συγκρίνονται οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού συστήματος με τη χρήση των τεχνικών SC και MRC και των πρωτοκόλλων A και B για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών του κανονικοποιημένου ως προς το ρυθμό κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$. Σε αυτό το σχήμα οι παράμετροι του συστήματος είναι $\sigma_1 = \sigma_3 = 8dB$, $\sigma_2 = 3.4dB$ που αντιστοιχούν σε κόμβους S και R τοποθετημένους

πάνω στις στεγες κτιρίων και τον κόμβο D τοποθετημένο σε ύψος χαμηλότερο από τις στέγες των κτιρίων [18]. Οι υπόλοιπες παράμετροι του συστήματος είναι οι ίδιες με αυτές του Σχήματος 3-3 δηλαδή τα μήκη των ζεύξεων 1 και 3: $L_1 = L_3 = 2000m$ και η γωνία των ζεύξεων 2 και 3 $\phi_{23} = 30^\circ$.



Σχήμα 3-4: Πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος με χρήση των πρωτοκόλλων A και B και των τεχνικών MRC και SC και σύγκριση με το ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα.

Όπως είναι φανερό από το Σχήμα 3-4 όπου η ζεύξη μεταξύ πηγής S και αναμεταδότη R δεν υποφέρει από διαλείψεις, τα συνεργατικά συστήματα έχουν καλύτερη επίδοση από το ενεργειακά ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα σε ένα εύρος πρακτικών τιμών του κανονικοποιημένου κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$ (για παράδειγμα για κατώφλι μικρότερο του 0.1 και του 0.01 για τα πρωτόκολλα A και B αντίστοιχα). Επίσης φαίνεται ότι το σχετικό κέρδος από τη χρήση της τεχνικής MRC σε σχέση με την τεχνική SC, ανεξάρτητα από το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται, είναι περίπου 2dB για πρακτικές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επιπλέον από αυτό το διάγραμμα διακρίνουμε ότι ο πιο αποδοτικός συνδυασμός πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης και τεχνικής διαφορικής λήψης υπό αυτές της συνθήκες (πηγή και αναμεταδότης στη στέγη κτιρίου και κόμβος προορισμού χαμηλότερα) είναι αυτός του πρωτοκόλλου SDMA και της τεχνικής MRC.



Σχήμα 3-5: Σύγκριση της πιθανότητας αποκοπής συναρτήσσει της τυπικής απόκλισης των ζεύξεων του συνεργατικού συστήματος με χρήση της τεχνικής MRC για (α)πρωτόκολλο A και για (β) το πρωτόκολλο B

Στο Σχήμα 3-5 συγκρίνονται οι επιδόσεις του συνεργατικού συστήματος για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ_j ($j = 1,2,3$) για τα πρωτόκολλα A και B

χρησιμοποιώντας την τεχνική διαφόρισης MRC στο δέκτη, που όπως αποδείχθηκε από τα προηγούμενα διαγράμματα είναι πιο αποδοτική από την SC. Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν τις ίδιες τιμές όπως και στα προηγούμενα σχήματα.

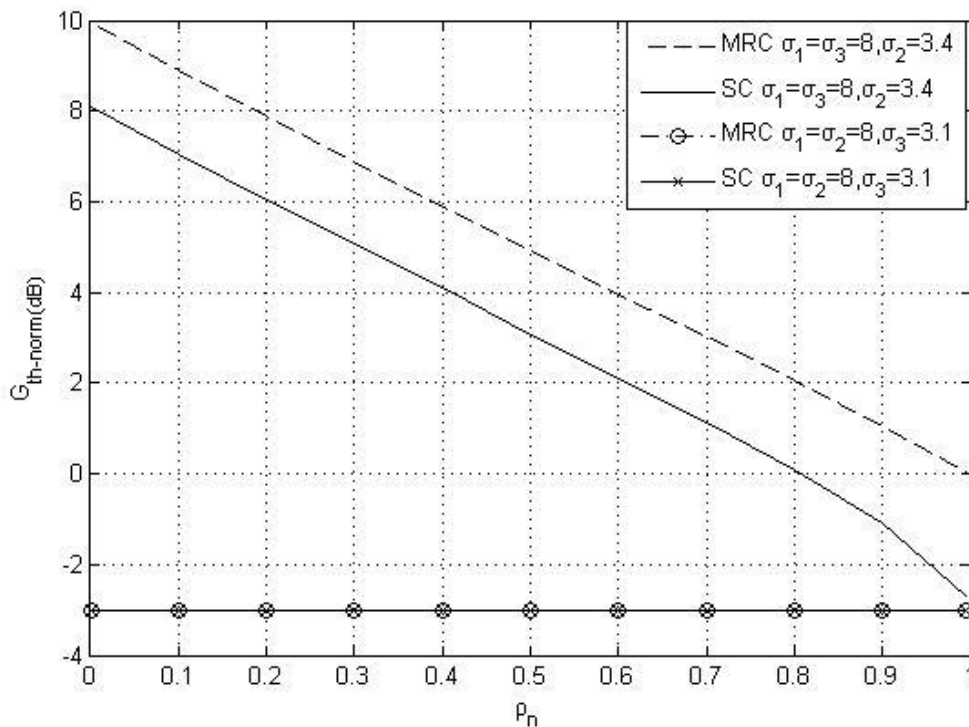
Όπως φαίνεται και στα δύο διαγράμματα όσο αυξάνεται η τυπική απόκλιση για τις ζεύξεις τόσο αυξάνεται η πιθανότητα αποκοπής και για τα δύο πρωτόκολλα. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς όσο λιγότερο παρουσιάζονται διαλείψεις σε μια ζεύξη τόσο πιο μικρή είναι η τυπική απόκλιση. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων (α) και (β) του σχήματος 3-5 προκύπτει ότι για τις μικρότερες τιμές της τυπικής απόκλισης το πρωτόκολλο B είναι πιο αποδοτικό από το A. Για $\sigma_j = 10dB$ ($j=1,2,3$) όμως παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των διαγραμμάτων (α) και (β) τείνουν να ταυτιστούν επομένως τα δύο πρωτόκολλα έχουν την ίδια απόδοση. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης τόσο μειώνεται και η διαφορά μεταξύ της επίδοσης του πρωτοκόλλου B με το A μέχρι η επίδοσή τους να ισοροπήσει.

Για το σχεδιασμό του επόμενου διαγράμματος ορίζεται το κέρδος κανονικοποιημένου κατωφλίου σε σηματοθορυβικό λόγο (σε dB) για δεδομένη πιθανότητα αποκοπής $P_{out(ref)}$ ως η διαφορά του κανονικοποιημένου κατωφλίου της συνεργασίας $\gamma_{th-norm}$ (σε dB) (από την έκφραση 24) με το αντίστοιχο κανονικοποιημένο κατώφλι της μη-συνεργασίας $\gamma_{th-norm(eff)}$ (σε dB) για ίδια πιθανότητα αποκοπής $P_{out(ref)}$ και δίνεται από τον τύπο[20][22]:

$$G_{\gamma_{th-norm}} [dB] = \gamma_{th-norm} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}} [dB] - \gamma_{th-norm(eff)} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}} [dB] \quad (27)$$

Στο Σχήμα 3-6 φαίνεται το κέρδος κατωφλίου $G_{\gamma_{th-norm}}$ συναρτήσεως του συντελεστή συσχέτισης για το πρωτόκολλο B και συσχετίσεις $\rho_{12} = \rho_{23} = \rho_{13} = \rho_n$, οι οποίες αντιστοιχούν σε ένα σύστημα με γεωμετρία ισόπλευρου τριγώνου ($L_1 = L_2 = L_3 = L$) όπου ο συντελεστής L λαμβάνει τιμές από L_c μέχρι $+\infty$ που αντιστοιχεί σε συντελεστές συσχέτισης ρ_n από 1 μέχρι 0 (σύμφωνα με την εξίσωση 26).

Στο σχήμα αυτό περιλαμβάνονται δύο ομάδες τιμών για τις τυπικές αποκλίσεις. Η πρώτη ομάδα $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (8, 3.4, 8)dB$ χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα σχήματα ενώ η δεύτερη ομάδα $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (8, 8, 3.1)dB$ αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του κόμβου S στη στέγη των κτιρίων και των υπολοίπων κόμβων R και D σε ύψος χαμηλότερο της στέγης των κτιρίων [18]. Η πιθανότητα αναφοράς για τη δημιουργία του σχήματος έχει την τιμή $P_{out(ref)} = 10^{-4}$.



Σχήμα 3-6: Επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στο κέρδος κανονικοποιημένου κατωφλίου για τις τεχνικές διαφορικής λήψης MRC και SC και διάφορες λογαριθμοκανονικές μεταβλητότητες

Για την πρώτη ομάδα τιμών των τυπικών αποκλίσεων, παρατηρείται ότι στις τεχνικές MRC και SC ο συντελεστής συσχέτισης επιδρά αρνητικά στο κέρδος της επίδοσης της συνεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική SC έχει επίδοση κατώτερη του ενεργειακά ισοδύναμου μη-συνεργατικού συστήματος, για μεγάλες τιμές του συντελεστή συσχέτισης (όπου λαμβάνονται αρνητικές τιμές του κέρδους κανονικοποιημένου κατωφλίου). Από την άλλη μεριά, για τις συγκεκριμένες τιμές των τυπικών αποκλίσεων, η τεχνική MRC έχει καλύτερη επίδοση από το ισοδύναμο σύστημα απευθείας ζεύξης, ανεξαρτήτως της συσχέτισης.

Για τη δεύτερη ομάδα τιμών, παρατηρείται ότι οι δύο τεχνικές διαφορικής λήψης έχουν την ίδια επίδοση με αρνητικό κέρδος ως προς το ενεργειακά ισοδύναμο σύστημα απευθείας ζεύξης.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις δύο ομάδες τιμών των μεταβλητοτήτων, φαίνεται πως η ποιότητα της ζεύξης S-R παίζει καθοριστικό ρόλο για την επίδοση του συνεργατικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα το συνεργατικό σύστημα έχει κέρδος σε σχέση με το ισοδύναμο μη-συνεργατικό μόνο για τιμές της σ_2 σημαντικά μικρότερες αυτών της σ_1 .

Λαμβάνοντας υπ'όψην τα παραπάνω συμπεράσματα καθώς και την περιγραφή του φυσικού μοντέλου διάδοσης [18], προκύπτει οτι σε ένα σύστημα με διαλείψεις λόγω

σκίασης με έναν αναμεταδότη αποκωδικοποίησης και προώθησης, ο αναμεταδότης πρέπει να τοποθετείται πάνω από τις στέγες κτιρίων ώστε να διασφαλίζεται ικανοποιητικός σηματοθορυβικός λόγος γ_2 για τη ζεύξη S-R (ζεύξη οπτικής επαφής) και να εξασφαλίζεται σημαντικό κέρδος επίδοσης σε σχέση με τα συστήματα απευθείας ζεύξης.

4. Επίδοση συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας ρόμβου/διαμαντιού σε κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις.

4.1 Εισαγωγή-Βασικές Υποθέσεις

Αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται στη συνεργατική διαφορικότητα σε κανάλια με λογαριθμοκανονικές διαλείψεις για τοπολογίες συστημάτων ρόμβου και το περιεχόμενό του αποτέλεσε αντικείμενο της δημοσίευσης [27]. Κάνουμε τη βασική υπόθεση ότι οι διαλείψεις, των διαφορετικών διαδρομών είναι συσχετισμένες [17][18][19]. Το μοντέλο που θα παρουσιαστεί παρακάτω, είναι ευέλικτο και γενικό και μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε τοπολογία/γεωμετρία των επαναληπτών.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η επίδοση των συστημάτων συνεργατικής επικοινωνίας δύο επαναληπτών και παρουσιάζονται αναλυτικοί ολοκληρωτικοί τύποι για να περιγράψουν την συνολική πιθανότητα αποκοπής, σε κανάλια με συσχετισμένες διαλείψεις. Τα συνεργατικά συστήματα αυτά είναι: Το σύστημα που χρησιμοποιεί δύο επαναλήπτες χωρίς την απευθείας ζεύξη και παρουσιάζει σχήμα διαμαντιού/ρόμβου (diamond-shaped), ενώ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εικονικό MIMO σύστημα [29] και περιγράφεται στην Ενότητα 4.2, και το σύστημα με δύο επαναλήπτες σε τοπολογία ρόμβου που χρησιμοποιεί και την απευθείας ζεύξη (diamond-shaped/direct) και περιγράφεται στην Ενότητα 4.3. Επίσης συγκρίνεται η επίδοση των δύο αυτών συνεργατικών συστημάτων με την απευθείας ζεύξη, ενώ στην Ενότητα 4.4 πραγματοποιείται η σύγκριση όλων των παραπάνω τοπολογιών και με το τριγωνικού σχήματος συνεργατικό σύστημα με τον έναν επαναλήπτη (triangle-shaped)[22].

Οι αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα που μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο είναι αναγεννητικοί (regenerative) και χρησιμοποιούν τη μέθοδο αποκωδικοποίησης και προώθησης (decode-and-forward), που σημαίνει ότι ο αναμεταδότης λαμβάνοντας το σήμα από την πηγή το αποδιαμορφώνει, το αποκωδικοποιεί, διορθώνει τυχόν σφάλματα που εντοπίζει, κωδικοποιεί, επαναδιαμορφώνει το σήμα και τελικώς το αποστέλλει προς τον δέκτη.

Και τα δύο συνεργατικά συστήματα που μελετώνται χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης (Fixed Relaying-FR)[24] που σημαίνει ότι οι αναμεταδότες προωθούν πάντοτε το σήμα που έλαβαν από την πηγή προς τον προορισμό, ακόμα και αν αυτό δεν αποκωδικοποιήθηκε σωστά. Αποκοπή προκαλείται όμως αν ένα από τα δυο relays δεν έχει αποκωδικοποιήσει σωστά την πληροφορία.

Στον κόμβο προορισμού του συνεργατικού συστήματος θεωρείται ότι εφαρμόζονται οι τεχνικές διαφορικής λήψης MRC και SC, οι οποίες αναλύονται στην ενότητα 1.5.

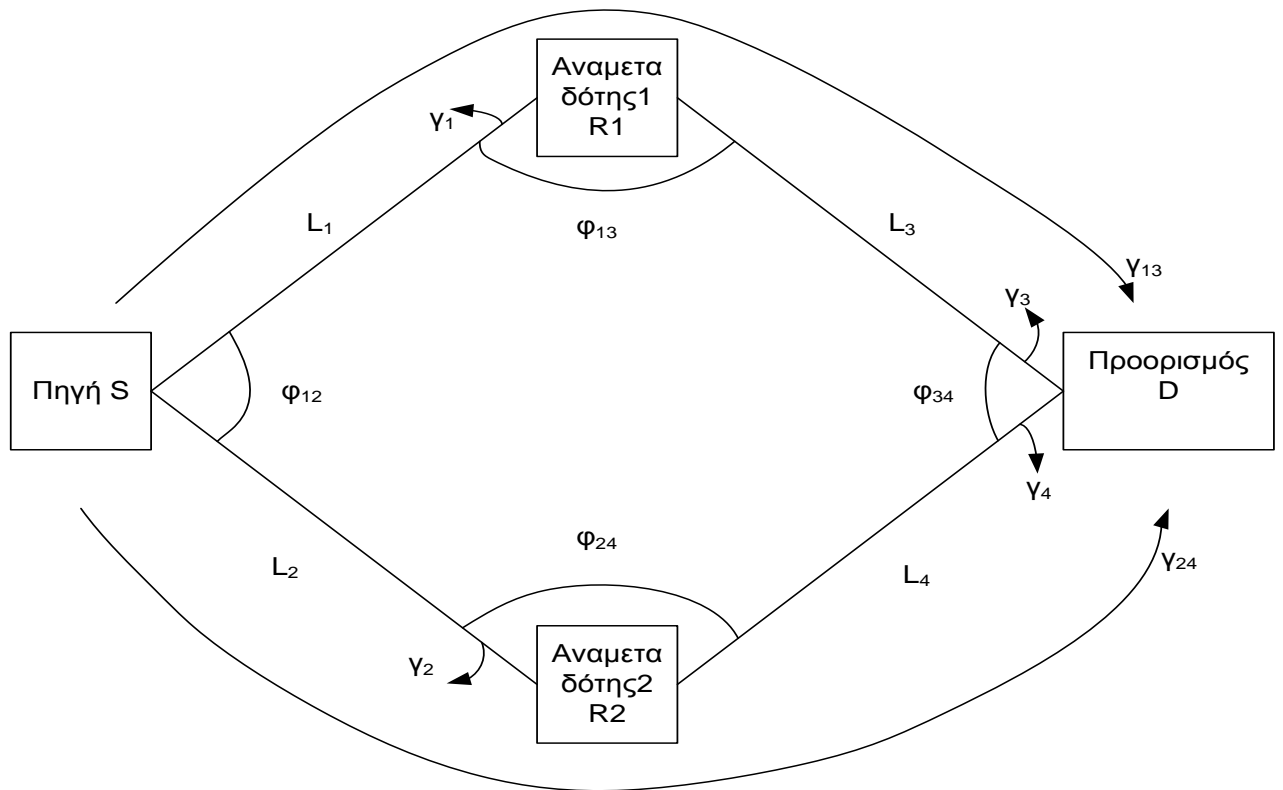
Η πρόσβαση των κόμβων στο μέσο ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να επιτευχθεί μέσω των τεχνικών πολυπλεξίας στο χρόνο (Time Division Multiple Access - TDMA), στη συχνότητα (Frequency Division Multiple Access- FDMA) ή μέσω της πολυπλεξίας στο χώρο (Space Division Multiple Access- SDMA). Οι τεχνικές TDMA και FDMA που στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρονται ως «πρωτόκολλο Α» , όπως και στο τρίτο κεφάλαιο, χρησιμοποιούν δύο βαθμούς ελευθερίας, ενώ στην τεχνική SDMA, η οποία θα αναφέρεται ως «πρωτόκολλο Β», χρησιμοποιείται μόνο ένας βαθμός ελευθερίας.

4.2 Συνεργατικό Σύστημα ρόμβου χωρίς την απευθείας ζεύξη (diamond)

4.2.1 Μοντέλο του συστήματος

4.2.1.1 Γεωμετρία του συστήματος

Οι γεωμετρικές παράμετροι του υπό μελέτη συστήματος συνεργατικής επικοινωνίας (συνεργατικό σύστημα ρόμβου χωρίς απευθείας ζεύξη (diamond)) φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 4-1. Όπως φαίνεται και από το σχήμα η πηγή S δεν επικοινωνεί απευθείας με τον κόμβο προορισμού D, παρά μόνο μέσω των αναμεταδοτών R1 και R2, τοπολογία η οποία θα ήταν δόκιμη σε περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να επιτευχθεί απευθείας ζεύξη λόγω ύπαρξης πολλών και μεγάλων εμποδίων μεταξύ των δύο κόμβων. Αυτό έχει εφαρμογή κυρίως σε δίκτυα αισθητήρων. Έτσι ο κόμβος S αποστέλλει το σήμα με μετάδοση ευρυεκπομπής (broadcasting transmission) στους δύο αναμεταδότες , ο καθένας από αυτούς το αποκωδικοποιεί και το προωθεί προς τον τελικό χρήστη-προορισμό D. Τα δύο προερχόμενα από τους επαναλήπτες R1 και R2 σήματα, τα λαμβάνει ο κόμβος D και μπορεί να τα συνδυάσει μέσω των τεχνικών MRC και SC.



Σχήμα 4-1: Γεωμετρικό μοντέλο συστήματος συνεργατικής διαφορικότητας τοπολογίας ρόμβου, χωρίς την απευθείας ζεύξη

Στο Σχήμα 4-1 απεικονίζονται οι γεωμετρικοί παράμετροι $L_j(m)$, που αποτελούν τα μήκη των ζεύξεων $j=1,2,3,4$ πηγής-αναμεταδότη1 (S-R1), πηγής-αναμεταδότη2 (S-R2) και αναμεταδότη1-προορισμού (R1-D), αναμεταδότη2-προορισμού (R2-D) αντίστοιχα. Επίσης όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 4-1 οι $\phi_{ij}(\text{deg})$ για $(i,j=1,2,3,4 \ i \neq j)$ αποτελούν τις γωνίες μεταξύ των ζεύξεων σε μοίρες με $\phi_{ij} = \phi_{ji}$.

4.2.1.2 Μοντέλο καναλιού διάδοσης

Ο σηματοθυροβικός λόγος στο δέκτη κάθε ζεύξης j ($j=1,2,3,4$) δίνεται σε γραμμική κλίμακα από τον τύπο:

$$\gamma_j = \frac{1}{N_0} P_{Txj} w_j \quad (1)$$

όπου το N_0 είναι η πυκνότητα του θορύβου σε γραμμική κλίμακα (στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται ίσο με τη μονάδα χωρίς άρση της γενικότητας), P_{Txj} είναι η ισχύς εκπομπής για τη ζεύξη j ενώ w_j είναι η λογαριθμοκανονική μεταβλητή που χαρακτηρίζει τις διαλείψεις λόγω σκίασης και έχει παραμέτρους με μονάδα μέτρησης το Neper ($1 \text{ Np} = 10 \text{ dB} = 10/\ln(10) \text{ dB}$):

$$(\mu_{w_j}, \sigma_j) = (-\ln(PL_j), \sigma_j) \quad (2)$$

όπου PL_j είναι οι απώλειες διάδοσης για τη ζεύξη j (σε γραμμική κλίμακα) και σ_j είναι η μεταβλητότητα της λογαριθμοκανονικής παραμέτρου η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης [18]. Συνεπώς ο σηματοθορυβικός λόγος γ_j του λαμβανόμενου σήματος από τον δέκτη της ζεύξης j είναι και αυτός μια λογαριθμοκανονική μεταβλητή με παραμέτρους (σε Neper):

$$(\mu_j, \sigma_j) = ((\ln(P_{Txj}) + \mu_{w_j}), \sigma_j) \quad (3)$$

όπου το μ_{w_j} δίνεται από την εξίσωση (2) και το P_{Txj} έχει παρουσιαστεί παραπάνω, όπως και το σ_j . Οι σηματοθορυβικοί λόγοι που έкаστος ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή γ_j ($j=1,2,3,4$), θεωρείται ότι ακολουθούν την από κοινού τετραδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$, η οποία περιγράφεται παρακάτω. Αυτή είναι η βασική μας υπόθεση για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα αποκοπής λαμβάνοντας συσχετισμένες διαλείψεις.

4.2.2 Επίδοση του συνεργατικού συστήματος με χρήση των τεχνικών διαφορικής λήψης SC και MRC

4.2.2.1. Συνολικός σηματοθορυβικός λόγος

Εφόσον, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 4.1 της εισαγωγής στο υπό μελέτη σύστημα το πρωτόκολλο συνεργατικής διαφορικότητας το οποίο χρησιμοποιείται είναι το πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης (FR) αυτό σημαίνει ότι οι επαναλήπτες του συστήματος προωθούν πάντα το σήμα που έλαβαν, ανεξάρτητα από το αν η αποκωδικοποίησή του ήταν επιτυχημένη. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η επικοινωνία πηγής-προορισμού θεωρείται επιτυχημένη όταν τόσο οι δύο αναμεταδότες R1 και R2, όσο και ο προορισμός D αποκωδικοποίησαν σωστά το λαμβανόμενο σήμα[24]. Στην περίπτωση που στο δέκτη χρησιμοποιείται η τεχνική διαφορικής λήψης MRC, ο ολικός σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{MRC} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 + \gamma_4) \quad (4)$$

Όταν στον δέκτη χρησιμοποιείται η τεχνική SC, ο ολικός σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{SC} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \max(\gamma_3, \gamma_4)) \quad (5)$$

Ο πρώτος όρος στις εξισώσεις (4) και (5) αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο επαναλήπτης R1 να αποκωδικοποιεί χωρίς σφάλματα το σήμα που δέχεται από τον πομπό S, ενώ ο δεύτερος όρος των εξισώσεων αυτών αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο επαναλήπτης R2 να αποκωδικοποιεί χωρίς σφάλματα το λαμβανόμενο σήμα από τον πομπό S. Ο τρίτος όρος στις (4) και (5) είναι ισοδύναμος με την έξοδο των συνδυαστών MRC και SC αντίστοιχα [4 Κεφαλαίου 3^{ου}] και αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο προορισμός D να αποκωδικοποιήσει χωρίς σφάλματα το λαμβανόμενο σήμα από την πηγή S και τους αναμεταδότες R1 και R2.

4.2.2.2. Πιθανότητα αποκοπής

Σε αυτήν την ενότητα θα προταθούν ακριβείς εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής του υπό μελέτη συνεργατικού συστήματος με τη μορφή ολοκληρωμάτων. Η πιθανότητα αποκοπής ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος (total SNR) γ_c δεν υπερβαίνει κάποιο όριο γ_{th} :

$$P_{out} = P(\gamma_c < \gamma_{th}) \quad (6)$$

όπου το κατώφλι γ_{th} εξαρτάται από τη φασματική απόδοση του πρωτοκόλλου όπως έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.4. Στο συγκεκριμένο σύστημα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως πρέπει η αποκωδικοποίηση και στους δύο αναμεταδότες R1 και R2 αλλά και στον προορισμό D, να είναι επιτυχημένη. Επομένως σε μορφή ενδεχομένων η πιθανότητα αποκοπής είναι:

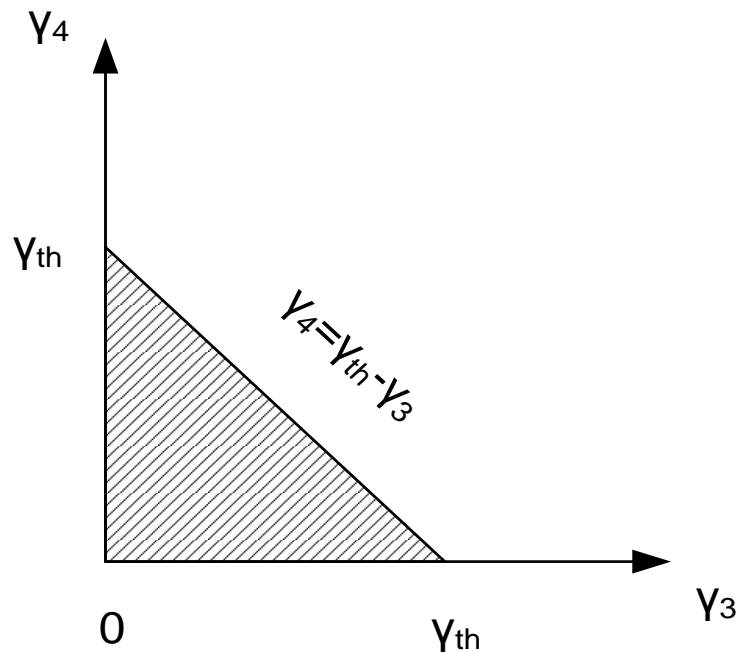
$$P_{out} = P(\gamma_2 < \gamma_{th} \cup \gamma_1 < \gamma_{th} \cup (\gamma_s < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th})) \quad (7)$$

και εν συνεχεία, εφόσον η πιθανότητα της ένωση δύο ενδεχομένων ισούται με την πιθανότητα να συμβεί το ένα ενδεχόμενο συν την πιθανότητα να συμβεί το δεύτερο ενδεχόμενο μείον την πιθανότητα να συμβούν και τα δύο ταυτοχρόνως, ο τύπος (7) γράφεται ως :

$$P_{out} = P(\gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 < \gamma_{th}) - P(\gamma_1 < \gamma_{th} \cap \gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_s < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th}) \quad (8)$$

$$\text{όπου} \quad \gamma_s = \begin{cases} \max(\gamma_3, \gamma_4) & SC \\ \gamma_3 + \gamma_4 & MRC \end{cases} \quad (9)$$

Το ενδεχόμενο αποκοπής εξαιτίας αποτυχημένης αποκωδικοποίησης στον προορισμό D, που εκφράζεται από τον 3^ο όρο της σχέσης (8) για την τεχνική του MRC όπου το $\gamma_s = \gamma_4 + \gamma_3$ όπως φαίνεται από τον τύπο (9) εξηγείται από το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4-2) όπου η γραμμοσκιασμένη περιοχή απεικονίζει το ενδεχόμενο της αποκοπής το οποίο είναι: $\gamma_4 + \gamma_3 < \gamma_{th}$, για τιμές των σηματοθορυβικών λόγων $\gamma_1, \gamma_2 > \gamma_{th}$ τα οποία δεν φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 4-2: Ενδεχόμενο αποκοπής για την τεχνική MRC στην περίπτωση μη επιτυχημένης αποκωδικοποίησης στο δέκτη D.

Χρησιμοποιώντας την τετραδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ για να εκφράσουμε το ενδεχόμενο του 4^{ου} όρου της σχέσης (8), την διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2)$ για να εκφραστεί το ενδεχόμενο του 3^{ου} όρου της σχέσης (8), καθώς και τους τύπους (8) και (9) η πιθανότητα αποκοπής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 - \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_2 + \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_3 \int_0^{\gamma_0} d\gamma_4 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_2 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) d\gamma_1 \quad (10)$$

όπου
$$\gamma_0 = \begin{cases} \gamma_{th} & SC \\ \gamma_{th} - \gamma_3 & MRC \end{cases} \quad (11)$$

Στην έκφραση (10) ο $1^{ος}$, ο $2^{ος}$, ο $3^{ος}$, και ο $4^{ος}$ όρος αντιστοιχούν στον $1^ο$, $2^ο$, $3^ο$ και $4^ο$ όρο της σχέσης (8) αντίστοιχα. Συνεπώς οι τρεις πρώτοι όροι της σχέσης (10) αντιστοιχούν στους δύο πρώτους όρους των σχέσεων (4) και (5) αν αναφερόμαστε στην τεχνική MRC και την SC αντίστοιχα.

Οι από κοινού λογαριθμοκανονικές κατανομές $f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2)$ και $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$ προκύπτουν από τις κανονικές κατανομές $f_{u_1u_2}(u_1, u_2)$ και $f_{u_1u_2u_3u_4}(u_1, u_2, u_3, u_4)$ [11] αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = \frac{\ln(\gamma_j) - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (12)$$

Όπου μ_j , σ_j δίνονται από την έκφραση (3).

Οι κανονικές κατανομές $f_{u_1u_2}(u_1, u_2)$ και $f_{u_1u_2u_3u_4}(u_1, u_2, u_3, u_4)$ προκύπτουν για κατάλληλη επιλογή της τιμής N από τη N-διάστατη κανονική κατανομή που δίνεται από τον τύπο[11]:

$$f_{u_1u_2\dots u_N} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N D_{1,2,\dots,N}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [u_1 u_2 \dots u_N] C_{1,2,\dots,N}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \right\} \quad (13)$$

$$\text{με} \quad C_{1,2,\dots,N} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1N} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{και} \quad D_{1,2,\dots,N} = \mathbf{det}[C_{1,2,\dots,N}] \quad (15)$$

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό (12) η πιθανότητα αποκοπής (10) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P_{out} = \int_{-\infty}^{u_{1,0}} f_{u_1}(u_1) du_1 + \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_2}(u_2) du_2 - \int_{-\infty}^{u_{1,0}} \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_1u_2}(u_1, u_2) du_2 + \int_{-\infty}^{u_{3,0}} \int_{-\infty}^{u_{4,0}} \int_{u_{2,0}}^{\infty} \int_{u_{1,0}}^{\infty} f_{u_1u_2u_3u_4}(u_1, u_2, u_3, u_4) du_1 \quad (16)$$

Ενώ κάνοντας χρήση και του θεωρήματος Bayes [11] η έκφραση (16) γίνεται:

$$\begin{aligned}
P_{out} = & 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{1,0}}{\sqrt{2}}\right) + 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{2,0}}{\sqrt{2}}\right) - \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_2}(u_2) \left(1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{1,0} - \mu_{1/2}}{\sqrt{2}\sigma_{1/2}}\right)\right) du_2 + \\
& + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{u_{3,0}} \int_{-\infty}^{u_{4,0}} \int_{u_{2,0}}^{\infty} f_{u_2 u_3 u_4}(u_2, u_3, u_4) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{1,0} - \mu_{1/2,3,4}}{\sqrt{2}\sigma_{1/2,3,4}}\right) du_2
\end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{όπου} \quad \begin{cases} u_{4,0} = (\ln \gamma_0 - \mu_4) / \sigma_4 \\ u_{j,0} = (\ln \gamma_{th} - \mu_j) / \sigma_j \quad j = (1,2,3) \end{cases} \quad (18)$$

και το γ_0 δίνεται από την σχέση (11).

Οι παράμετροι $\mu_{1/2}$, $\sigma_{1/2}$, $\mu_{1/2,3,4}$ και $\sigma_{1/2,3,4}$ προκύπτουν από τις δύο παρακάτω σχέσεις [11,Κεφάλαιο 7]:

$$\mu_{N|1,2,\dots,N-1} = \left\{ C_{1,2,\dots,N-1}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{1N} \\ \rho_{2N} \\ \vdots \\ \rho_{N-1N} \end{bmatrix} \right\}^T \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}^2 = 1 - \begin{bmatrix} \rho_{1N} \\ \rho_{2N} \\ \vdots \\ \rho_{N-1N} \end{bmatrix}^T C_{1,2,\dots,N-1}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{1N} \\ \rho_{2N} \\ \vdots \\ \rho_{N-1N} \end{bmatrix} \quad (20)$$

που αποτελούν την μέση τιμή και τυπική απόκλιση αντίστοιχα της δεσμευμένης κατανομής της μεταβλητής u_N που δίνεται από την κανονική κατανομή:

$$f_{u_N}(u_N | u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}} \exp\left[-\frac{(u_N - \mu_{N|1,2,\dots,N-1})^2}{2\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}^2}\right] \quad (21)$$

Στις σχέσεις (19),(20),(21) ρ_{ij} είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των λογαριθμοκανονικών μεταβλητών (γ_i, γ_j) όπου $(i \neq j)$ και $\rho_{ij} = \rho_{ji}$. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής του συστήματος είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος γ_c να είναι

μεγαλύτερος από το σηματοθορυβικό λόγο κατωφλίου γ_{th} και την αφαίρεσή της από τη μονάδα. Δηλαδή θα υπολογίσουμε την πιθανότητα διαθεσιμότητας. Συνεπώς:

$$P_{out} = 1 - P_{avail} \quad (22)$$

Όπου όπως περιγράφηκε παραπάνω η P_{avail} δίνεται από τα ενδεχόμενα:

$$P_{avail} = P(\gamma_3 > \gamma_{th} \cup \gamma_4 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th}) \quad (23)$$

Έτσι από τις σχέσεις (22) και (23) και χρησιμοποιώντας την τετραδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή η πιθανότητα αποκοπής γράφεται:

$$P_{out} = 1 - \int_0^{\infty} d\gamma_3 \int_{\gamma_{4,0}}^{\infty} d\gamma_4 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_2 f_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4} \quad (24)$$

όπου αν χρησιμοποιείται η τεχνική SC :

$$\gamma_{4,0} = \begin{cases} \gamma_{th} & , \gamma_3 < \gamma_{th} \\ 0 & , \gamma_3 > \gamma_{th} \end{cases} \quad (25)$$

Και αν χρησιμοποιείται η τεχνική MRC :

$$\gamma_{4,0} = \begin{cases} \gamma_{th} - \gamma_3 & , \gamma_{th} - \gamma_3 > 0 \\ 0 & , \gamma_{th} - \gamma_3 < 0 \end{cases} \quad (26)$$

Και κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού (12) γίνεται τελικώς:

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{u_{40}}^{\infty} \int_{u_{20}}^{\infty} f_{u_2 u_3 u_4}(u_2, u_3, u_4) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{10} - \mu_{1/234}}{\sqrt{2}\sigma_{1/234}}\right) du_2 du_4 du_3 \quad (27)$$

όπου $u_{j0} = \frac{\ln r - \mu_j}{\sigma_j}$ για $j=1,2,3$

$$u_{40} = \frac{\ln \gamma_{4,0} - \mu_4}{\sigma_4}$$

με το $\gamma_{4,0}$ να δίνεται από την σχέση (25) για την τεχνική SC και από την (26) για την περίπτωση που χρησιμοποιείται η τεχνική MRC.

Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθεί η ενεργειακή και φασματική απόδοση των δύο πρωτοκόλλων, ενώ στην ενότητα 4.2.4. θα γίνει εφαρμογή των τύπων που παρουσιάστηκαν παραπάνω και παρουσίαση της αποδοτικότητας του συστήματος.

4.2.3 Απόδοση των πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας

Σε αυτήν την παράγραφο συγκρίνεται η απόδοση των πρωτοκόλλων A και B, που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, των συνεργατικών συστημάτων με συστήματα που δεν χρησιμοποιούν συνεργατική διαφορικότητα. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται ως προς τους ακόλουθους παράγοντες σχεδιασμού:

α) χρήση φάσματος (εύρος ζώνης)

β) ολική ενέργεια εκπομπών

4.2.3.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα πρωτοκόλλων A και B

Και στην τοπολογία ρόμβου όπως και στην τοπολογία τριγώνου που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το συνεργατικό σύστημα καταναλώνει την ίδια ενέργεια εκπομπής για κάθε εκπεμπόμενο σύμβολο και για τα δύο πρωτόκολλα A και B. Η ενέργεια αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_{protocol(A)} = E_{protocol(B)} = \sum_{i=1}^3 p_{total(t=i)} T \quad (28)$$

Όπου $p_{total(t=i)}$ είναι η ολική ισχύ που εκπέμπει το σύστημα στη θυρίδα πολλαπλής πρόσβασης $t = i$ και T είναι η χρονική διάρκεια της κάθε θυρίδας.

Θεωρώντας ότι οι αναμεταδότες R1 και R2 του συνεργατικού συστήματος εκπέμπουν με την ίδια ισχύ όπως η πηγή S, τότε το συνεργατικό σύστημα εκπέμπει τριπλάσια ισχύ ανά σύμβολο συγκριτικά με την ισχύ εκπομπής του συστήματος απευθείας ζεύξης. Έτσι με τη συνεργασία των κόμβων επιτυγχάνεται καλύτερη επίδοση στο σύστημα αλλά δαπανάται περισσότερη ενέργεια.

Το ενεργειακά ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα, που αποτελείται μόνο από την πηγή S και τον προορισμό D, έχει ενέργεια εκπομπής ανά σύμβολο $E_{direct(eff)} = T \cdot p_{Tx(eff)}$ ίση με την συνολική ενέργεια για τη μετάδοση ενός συμβόλου που εκπέμπει το συνεργατικό σύστημα και είναι η ίδια τόσο για το

πρωτόκολλο A όσο και για το πρωτόκολλο B. Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται από την σχέση (28). Η ισχύς εκπομπής του ισοδύναμου συστήματος δίνεται από:

$$P_{Tx(eff)} = P_{Tx1} + P_{Tx3} + P_{Tx4} \quad (29)$$

όπου P_{Tx1} είναι η ισχύς εκπομπής της πηγής S, P_{Tx3} η ισχύς εκπομπής του αναμεταδότη R1 και P_{Tx4} η ισχύς εκπομπής του αναμεταδότη R2 του συνεργατικού συστήματος. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3) και (29) το ενεργειακά ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα ερμηνεύεται ως ένα μη-συνεργατικό σύστημα με μεγαλύτερη λογαριθμοκανονική μέση τιμή (σε Neper):

$$(\mu_{eff}, \sigma_{eff}) = (\mu_{w_{eff}} + \ln(\exp(\mu_1 - \mu_{w_1}) + \exp(\mu_3 - \mu_{w_3}) + \exp(\mu_4 - \mu_{w_4})), \sigma_{direct}) \quad (30)$$

Όπου $\mu_{w_{eff}} = 0dB$.

4.2.3.2 Φασματική απόδοση των πρωτοκόλλων A και B

Το πρωτόκολλο A χρησιμοποιεί δύο θυρίδες πολλαπλής πρόσβασης, οδηγώντας σε μη-αποδοτικότητα ως προς τη χρήση φάσματος. Η φασματική αποδοτικότητα μπορεί να ενταχθεί στην ανάλυση αρχικά μέσω της έκφρασης της πιθανότητας αποκοπής της χωρητικότητας του συνδυαστή $C_{C(A)}$ για το πρωτόκολλο A με κατώφλι R όπως φαίνεται στους τύπους που ακολουθούν:

$$P_{out(A)} = P(C_{C(A)} < R) \quad (31)$$

ή ισοδύναμα χρησιμοποιώντας τον τύπο του Shannon για την έκφραση της χωρητικότητας:

$$P_{out(A)} = P\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_c) < \log_2(1 + \gamma_{th-norm})\right) \quad (32)$$

όπου το γ_c δίνεται από την σχέση (4) ή (5) ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται η τεχνική MRC ή η τεχνική SC αντίστοιχα, και $\gamma_{th-norm}$ είναι το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου. Το κατώφλι $\gamma_{th-norm}$ είναι ο σηματοθορυβικός λόγος που αντιστοιχεί σε κατώφλι φασματικής αποδοτικότητας R και είναι ένα κοινό εργαλείο της θεωρίας πληροφοριών για την απλοποίηση της ανάλυσης προβλημάτων με πολλούς παράγοντες.

Από τη σχέση (32) προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την πιθανότητα αποκοπής του πρωτοκόλλου A:

$$P_{out(A)} = P(\gamma_c < \gamma_{th-norm}^2 + 2\gamma_{th-norm}) \quad (33)$$

Η πιθανότητα αποκοπής για τα πρωτόκολλα A και B μπορεί να δοθεί μέσω της σχέσης (17) και ενός τροποποιημένου κατωφλίου που περιέχει το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th-norm}$ και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma_{th} = \begin{cases} \gamma_{th-norm}^2 + 2\gamma_{th-norm} & , \text{για το πρωτόκολλο A} \\ \gamma_{th-norm} & , \text{για το πρωτόκολλο B} \end{cases} \quad (34)$$

Επίσης δεδομένης μιας πιθανότητας αποκοπής αναφοράς $P_{out(ref)}$, το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th-norm}$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\gamma_{th-norm}|_{P_{out}=P_{out(ref)}} = \begin{cases} \sqrt{1 + \gamma_{th}|_{P_{out}=P_{out(ref)}}} - 1 & , \text{για το πρωτόκολλο A} \\ \gamma_{th}|_{P_{out}=P_{out(ref)}} & , \text{για το πρωτόκολλο B} \end{cases} \quad (35)$$

4.2.4 Αριθμητικά αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για την επίδοση των συνεργατικών συστημάτων με χρήση των τεχνικών διαφορικής λήψης SC και MRC. Τα αποτελέσματα αυτά παρήχθησαν με τη χρήση του προγράμματος MATLAB, εφαρμόζοντας για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής την σχέση (17).

Η σχέση αυτή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί αριθμητικά και συγκλίνει γρήγορα εξαιτίας της μονοτονίας των ολοκληρωτέων συναρτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, αντικαθιστώντας το όριο $-\infty$ με έναν κατάλληλο αρνητικό αριθμό (στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το -10) μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε ζητούμενη ακρίβεια στο αποτέλεσμα, όπως ακριβώς και με τις τελικές εκφράσεις της πιθανότητας αποκοπής.

Η πιθανότητα αποκοπής του ενεργειακά ισοδύναμου μη-συνεργατικού συστήματος δίνεται από $P_{out(eff)} = P(\gamma_{eff} < \gamma_{th-norm(eff)})$ ή ισοδύναμα:

$$P_{out(eff)} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(\gamma_{th-norm(eff)}) - \mu_{eff}}{\sigma_{eff} \sqrt{2}} \right) \quad (36)$$

όπου οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι $(\mu_{eff}, \sigma_{eff})$ δίνονται από τη σχέση (30)

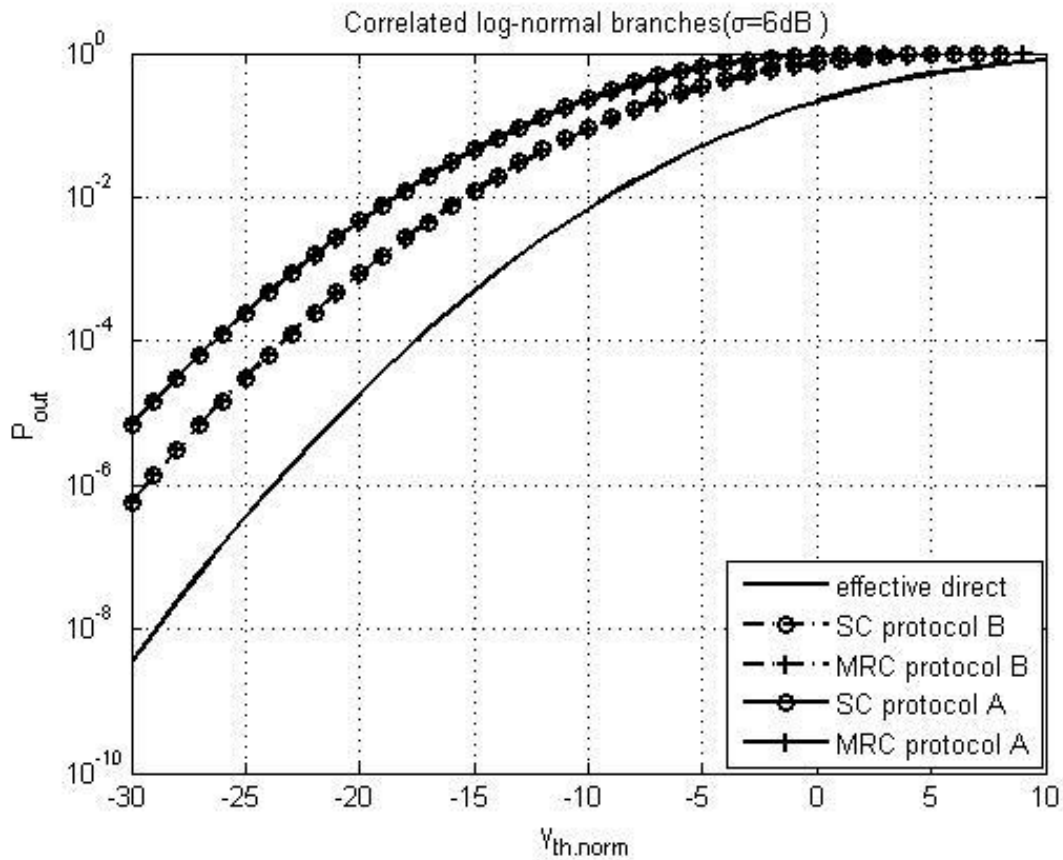
και $\gamma_{th-norm(eff)} = \gamma_{th-norm}$.

Στις παρακάτω εφαρμογές θεωρούνται $\mu_j = 0dB$ και $\mu_{w_j} = 0dB$ για κάθε j . Επιπλέον στο Σχήμα 4-3, το Σχήμα 4-4 και το Σχήμα 4-5 χρησιμοποιείται το ακόλουθο μοντέλο του συντελεστή συσχέτισης λόγω σκίασης [18][19][30]:

$$\rho_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{\phi_T}{\phi_{ij}} \right)^a \sqrt{\frac{L_i}{L_j}}, & (i, j = 1, 2, 3, 4 \quad i \neq j \cap (i, j) \neq (1, 4), (4, 1), (2, 3), (3, 2)) \\ \exp(-bd), & (i, j) = (1, 4), (4, 1), (2, 3), (3, 2) \end{cases} \quad (37)$$

όπου $L_j \geq L_i$, $\phi_T = 2 \sin^{-1}(L_c / 2L_i)$, $L_c = 20m$ είναι η απόσταση αποσυσχέτισης και $\alpha = 0.3$ είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος, ενώ d είναι η απόσταση μεταξύ των παράλληλων ζεύξεων 1 με 4 και 2 με 3 όπως αυτές εμφανίζονται στο Σχήμα 4-1 και $b = 2 \cdot 10^{-3}$ είναι μια παράμετρος εξαρτώμενη από τις γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος, τα περιβάλλοντα διάδοσης των ζεύξεων, και τον προσανατολισμό τους.

Στο Σχήμα 4-3 απεικονίζεται η πιθανότητα αποκοπής των τεχνικών SC και MRC του συνεργατικού συστήματος ρόμβου, που χρησιμοποιεί είτε τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA (πρωτόκολλο A) είτε το πρωτόκολλο SDMA (πρωτόκολλο B) συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης $\gamma_{th-norm}$. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι $\sigma_{direct} = \sigma_j = 6dB = 1.38Np$, $(j = 1, 2, 3, 4)$, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 2000m$ και $\phi_{13} = \phi_{24} = 30^\circ$.

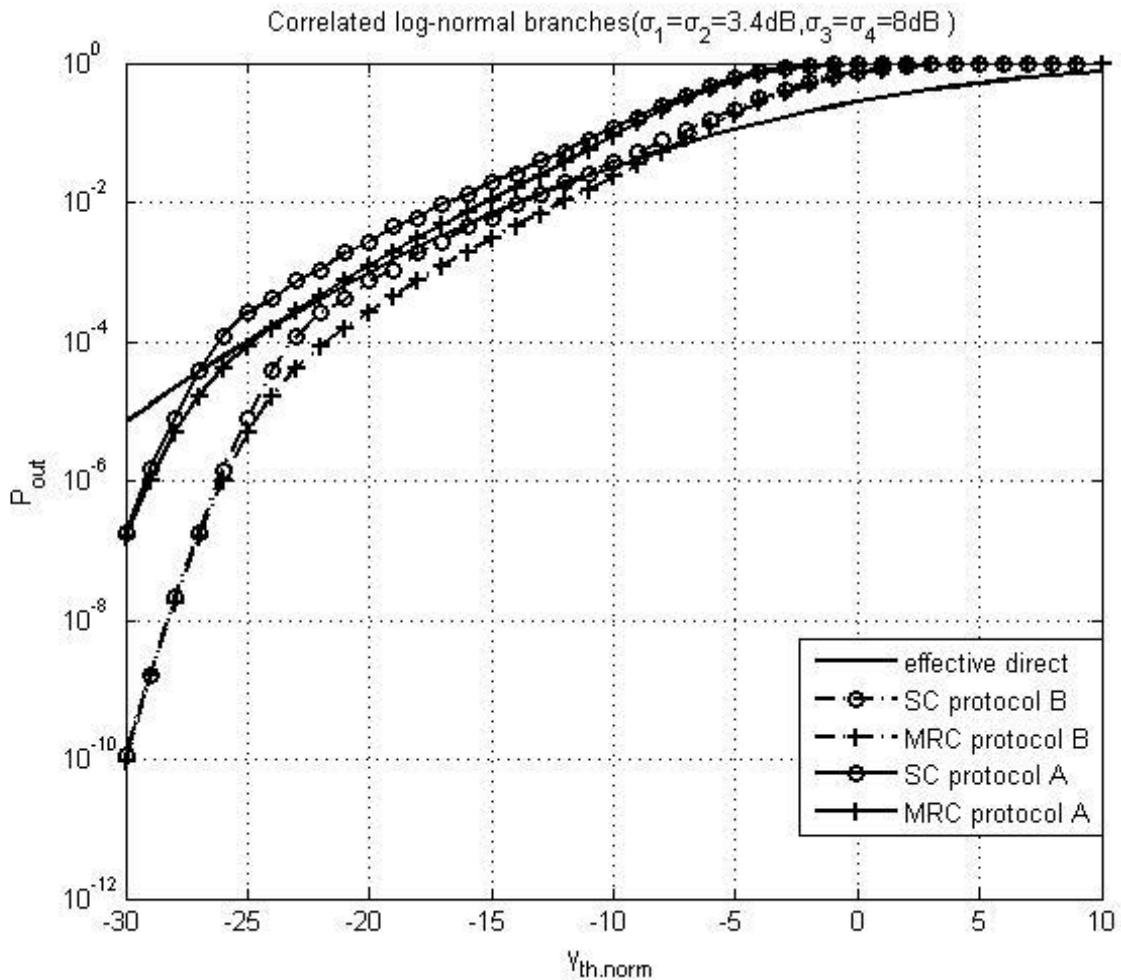


Σχήμα 4-3: Πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος ρόμβου κα σύγκριση με την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη.

Από το Σχήμα 4-3 φαίνεται ότι αν σε όλες τις ζεύξεις οι τυπικές αποκλίσεις είναι ίσες, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση $\sigma_j = 6dB = 1.38Np$, ($j = 1,2,3,4$) το συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Fixed Relaying (FR) παρουσιάζει χειρότερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για όλο το εύρος τιμών του λόγου $\gamma_{th-norm}$, τόσο στην περίπτωση του πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης A όσο και σε αυτήν του πρωτοκόλλου B. Επίσης φαίνεται ότι για καθένα από αυτά τα πρωτόκολλα η επίδοση του συνεργατικού συστήματος με τη χρήση της τεχνικής MRC ταυτίζεται με την επίδοσή του όταν χρησιμοποιείται η τεχνική SC. Επιπλέον διακρίνεται ότι όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο B το συνεργατικό σύστημα παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την χρήση του πρωτοκόλλου A.

Στο Σχήμα 4-4 συγκρίνονται οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού συστήματος για τα πρωτόκολλα A και B και τις τεχνικές MRC και SC ενώ φαίνεται και η επίδοση του ενεργειακά ισοδύναμου μη-συνεργατικού συστήματος. Οι

παράμετροι του συστήματος είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο διάγραμμα εκτός από τις μεταβλητότητες που παίρνουν τις τιμές: $\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_{direct} = 8dB$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 3.4dB$ που αντιστοιχούν σε κόμβους S,R1,R2 τοποθετημένους σε στέγες κτιρίων (Above Roof Top – ART) και τον κόμβο προορισμού D σε ύψος χαμηλότερο από αυτό των κτιρίων (Below Roof Top – BRT)[18].



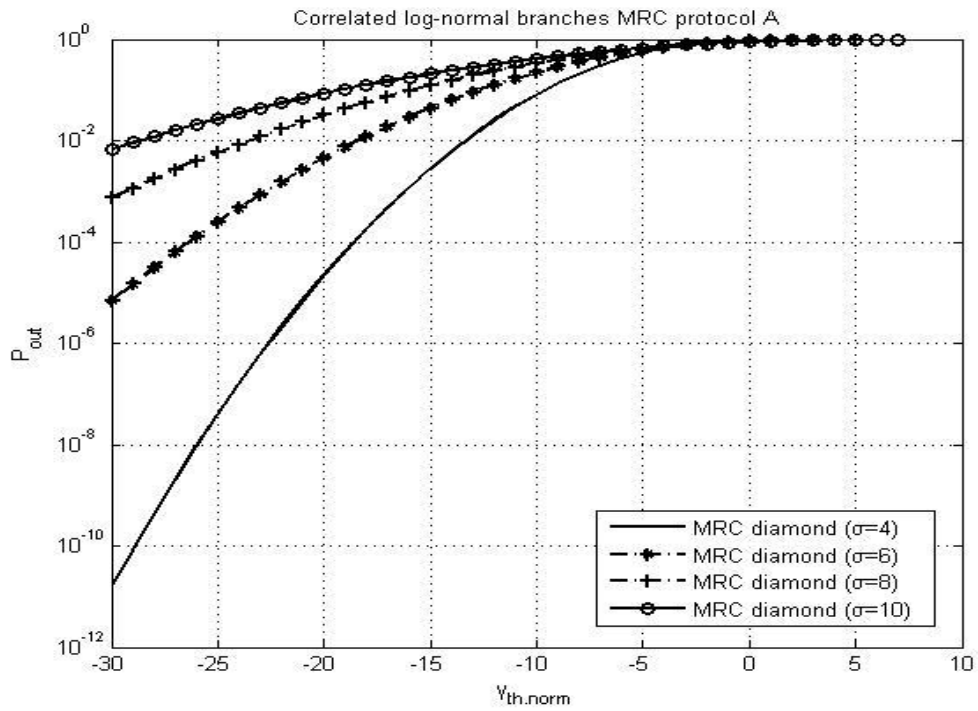
Σχήμα 4-4: Πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος με χρήση των πρωτοκόλλων A και B και των τεχνικών MRC και SC και σύγκριση με το ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα στην περίπτωση που οι ζεύξεις μεταξύ πηγής S και επαναληπτών R1 και R2 δεν υποφέρουν από ισχυρές διαλείψεις το συνεργατικό σύστημα ρόμβου χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο B σε συνδυασμό με την τεχνική MRC έχει καλύτερη επίδοση από το ενεργειακά ισοδύναμο σύστημα για ένα εύρος πρακτικών τιμών του κανονικοποιημένου κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$ που αντιστοιχούν σε πιθανότητα αποκοπής μικρότερη του 0,1.

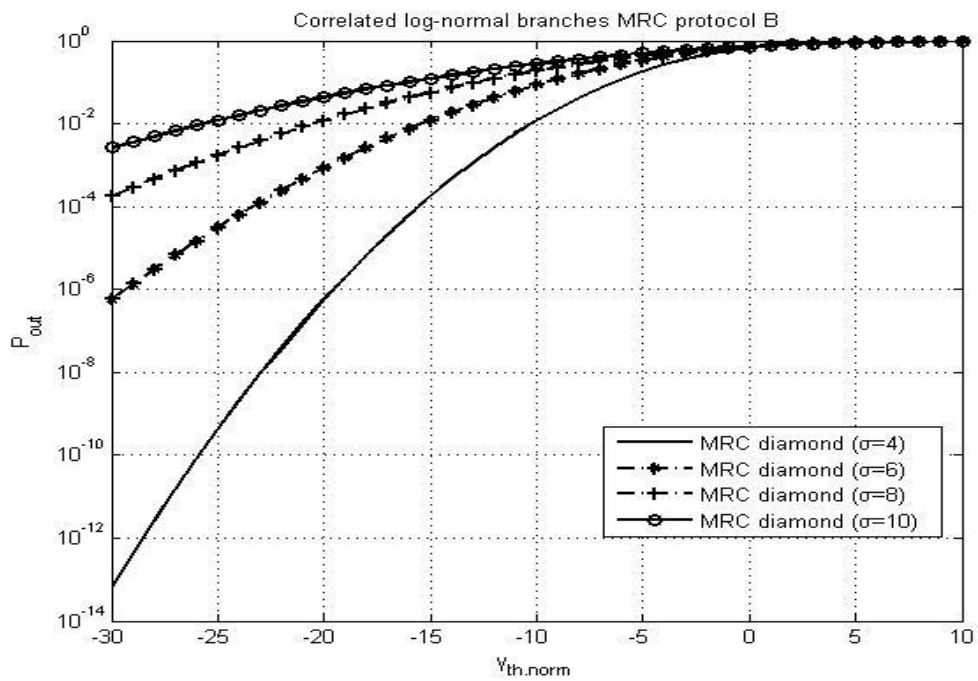
Ενώ ο συνδυασμός του πρωτοκόλλου B με την τεχνική SC παρουσιάζει περίπου την ίδια επίδοση με το ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα για τις τιμές του $\gamma_{th-norm}$ που αντιστοιχούν σε πιθανότητες αποκοπής από 0,1 έως 0,001 ενώ για τιμές του κανονικοποιημένου κατωφλίου που αντιστοιχούν σε μικρότερες πιθανότητες αποκοπής παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από το ενεργειακά ισοδύναμο και για πολύ μικρές τιμές του $\gamma_{th-norm}$, η επίδοσή του ταυτίζεται με την επίδοση του συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνική MRC. Από την άλλη πλευρά όταν το συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο A η επίδοσή του είναι καλύτερη από αυτή του ενεργειακού ισοδύναμου για μικρό εύρος τιμών και μάλιστα για πολύ χαμηλές τιμές του κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$ πράγμα που πρακτικά σημαίνει ότι το συνεργατικό σύστημα με χρήση του πρωτοκόλλου A είναι αναποτελεσματικό.

Στο Σχήμα 4-5 συγκρίνονται οι επιδόσεις του συνεργατικού συστήματος για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ_j ($j = 1,2,3,4$) για τα πρωτόκολλα A και B χρησιμοποιώντας την τεχνική διαφόρισης MRC στο δέκτη, που όπως αποδείχθηκε από τα προηγούμενα διαγράμματα είναι πιο αποδοτική από την SC. Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν τις ίδιες τιμές όπως και στα Σχήματα 4-3 και 4-4.

Όπως φαίνεται και στα δύο διαγράμματα όσο αυξάνεται η τυπική απόκλιση για τις ζεύξεις τόσο αυξάνεται η πιθανότητα αποκοπής και για τα δύο πρωτόκολλα. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων (α) και (β) του σχήματος 4-5 προκύπτει ότι για όλες τις τιμές της τυπικής απόκλισης το πρωτόκολλο B είναι πιο αποδοτικό από το A. Για $\sigma_j = 10dB$ ($j = 1,2,3,4$) όμως παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των διαγραμμάτων (α) και (β) πλησιάζουν αρκετά επομένως τα δύο πρωτόκολλα έχουν σχεδόν την ίδια απόδοση. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνουν οι τιμές της τυπικής απόκλισης τόσο μειώνεται και η διαφορά μεταξύ της επίδοσης του πρωτοκόλλου B με το A.



(a)



(β)

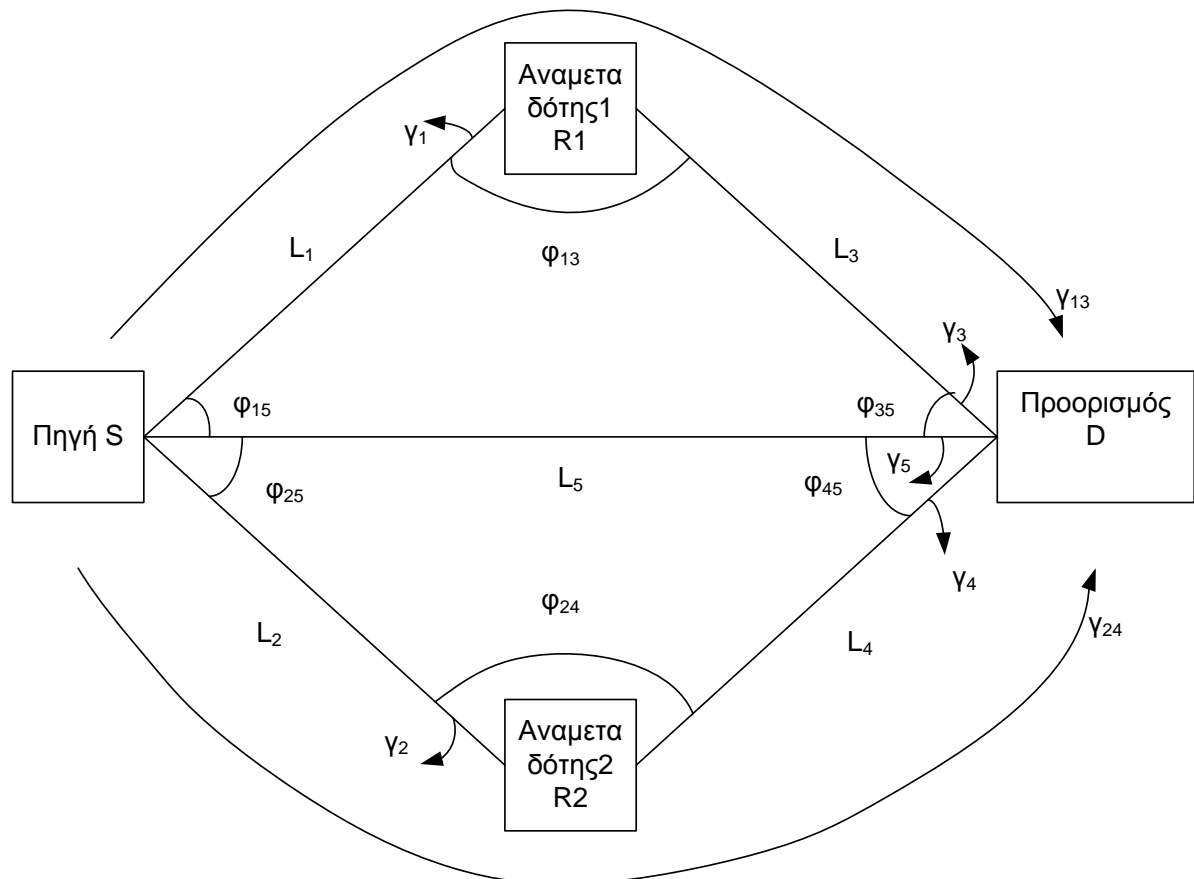
Σχήμα 4-5: Σύγκριση της πιθανότητας αποκοπής συναρτήσσει της τυπικής απόκλισης των ζεύξεων του συνεργατικού συστήματος με χρήση της τεχνικής MRC για (α) πρωτόκολλο A και για (β) το πρωτόκολλο B

4.3 Συνεργατικό Σύστημα ρόμβου με απευθείας ζεύξη (diamond/direct)

4.3.1 Μοντέλο του συστήματος

Οι γεωμετρικές παράμετροι του υπό μελέτη συστήματος συνεργατικής επικοινωνίας (συνεργατικό σύστημα ρόμβου με απευθείας ζεύξη (diamond/direct)) φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 4-6.

Στο σύστημα diamond/direct ο κόμβος της Πηγής S αποστέλλει το σήμα προς τον κόμβο προορισμού D και τους δύο αναμεταδότες R1 και R2, ο καθένας από τους οποίους το αποκωδικοποιεί και το προωθεί με τη σειρά του, προς τον τελικό χρήστη-προορισμό D. Τα δύο σήματα προερχόμενα από τους επαναλήπτες R1 και R2 και το απευθείας σήμα από την πηγή S τα λαμβάνει ο κόμβος D και εφαρμόζει διαφορετική λήψη μέσω των τεχνικών MRC και SC.



Σχήμα 4-6: Γεωμετρικό μοντέλο συστήματος συνεργατικής διαφορετικότητας τοπολογίας ρόμβου, με την απευθείας ζεύξη

Στο Σχήμα 4-6 απεικονίζονται οι γεωμετρικοί παράμετροι $L_j(m)$, που αποτελούν τα μήκη των ζεύξεων $j=1,2,3,4,5$ πηγής-αναμεταδότη1 (S-R1), πηγής-αναμεταδότη2 (S-R2) και αναμεταδότη1-προορισμού (R1-D), αναμεταδότη2-προορισμού (R2-D) και πηγή-προορισμός (S-D) αντίστοιχα. Επίσης όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 4-6 οι $\phi_{ij}(\text{deg})$ για $(i,j=1,2,3,4,5 \ i \neq j)$ αποτελούν τις γωνίες μεταξύ των ζεύξεων σε μοίρες με $\phi_{ij} = \phi_{ji}$.

Όσο αφορά το σηματοθορυβικό λόγο γ_j στο δέκτη κάθε ζεύξης j ($j=1,2,3,4,5$) δίνεται σε γραμμική κλίμακα από τη σχέση (1), ενώ οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής μεταβλητής w_j με μονάδα μέτρησης το Neper δίνονται από τη Σχέση (3). Συνεπώς όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 4.2.1.2 οι σηματοθορυβικοί λόγοι γ_j , $j=1,2,3,4,5$ είναι και αυτοί λογαριθμοκανονικές μεταβλητές με παραμέτρους (σε Neper) που δίνονται από τη Σχέση (3) για $j=1,2,3,4,5$ ενώ θεωρείται ότι είναι συσχετισμένοι και ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή πέντε διαστάσεων $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4\gamma_5}(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3,\gamma_4,\gamma_5)$.

4.3.2 Επίδοση του συνεργατικού συστήματος με χρήση των τεχνικών SC και MRC

4.3.2.1. Συνολικός σηματοθορυβικός λόγος

Χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο FR (Fixed Relaying)[24] για να είναι επιτυχημένη η επικοινωνία μεταξύ πηγής και προορισμού πρέπει και οι δύο αναμεταδότες και ο δέκτης να αποκωδικοποιήσουν με επιτυχία το λαμβανόμενο σήμα. Έτσι Στην περίπτωση που στο δέκτη για τη διαφορική λήψη χρησιμοποιείται η τεχνική MRC, ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος του συστήματος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma_{MRC} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5) \quad (39)$$

Όταν στον δέκτη χρησιμοποιείται η τεχνική SC, ο ολικός σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{SC} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \max(\gamma_3, \gamma_4, \gamma_5)) \quad (40)$$

Ο πρώτος όρος στις εξισώσεις (39) και (40) αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο επαναλήπτης R1 να αποκωδικοποιεί χωρίς σφάλματα το σήμα που δέχεται από τον πομπό S, ενώ ο δεύτερος όρος των εξισώσεων αυτών αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο επαναλήπτης R2 να αποκωδικοποιεί χωρίς σφάλματα το λαμβανόμενο σήμα από

τον πομπό S . Ο τρίτος όρος στις (39) και (40) είναι ισοδύναμος με την έξοδο των συνδυαστών MRC και SC αντίστοιχα και αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο ο προορισμός D να αποκωδικοποιήσει χωρίς σφάλματα το λαμβανόμενο σήμα από την πηγή S και τους αναμεταδότες R1 και R2.

4.3.2.2. Πιθανότητα αποκοπής

Η πιθανότητα αποκοπής του συστήματος ορίζει το ποσοστό του χρόνου που ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος γ_C δεν υπερβαίνει μία συγκεκριμένη στάθμη γ_{th} :

$$P_{out} = P(\gamma_C < \gamma_{th}) \quad (41)$$

και δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{out} &= P(\gamma_2 < \gamma_{th} \cup \gamma_1 < \gamma_{th} \cup (\gamma_s < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th})) \Rightarrow \\ P_{out} &= P(\gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 < \gamma_{th}) - P(\gamma_1 < \gamma_{th} \cap \gamma_2 < \gamma_{th}) + \\ &+ P(\gamma_s < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th}) \end{aligned} \quad (42)$$

$$\text{όπου} \quad \gamma_s = \begin{cases} \max(\gamma_3, \gamma_4, \gamma_5) & SC \\ \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 & MRC \end{cases} \quad (43)$$

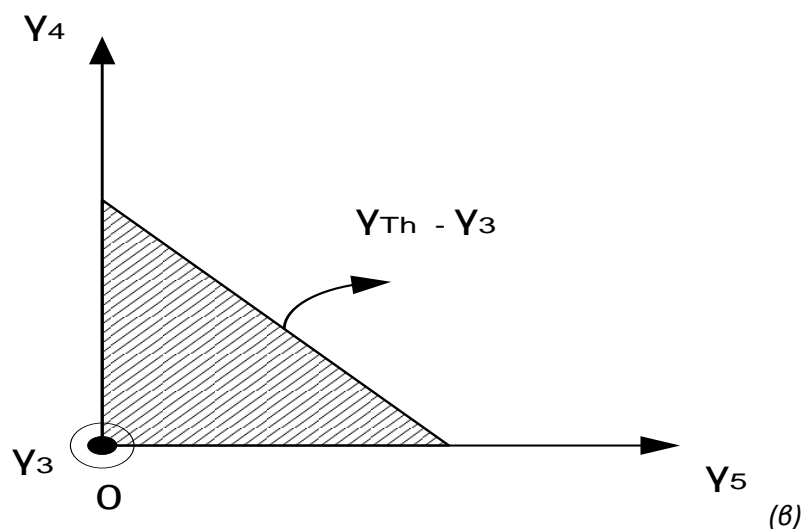
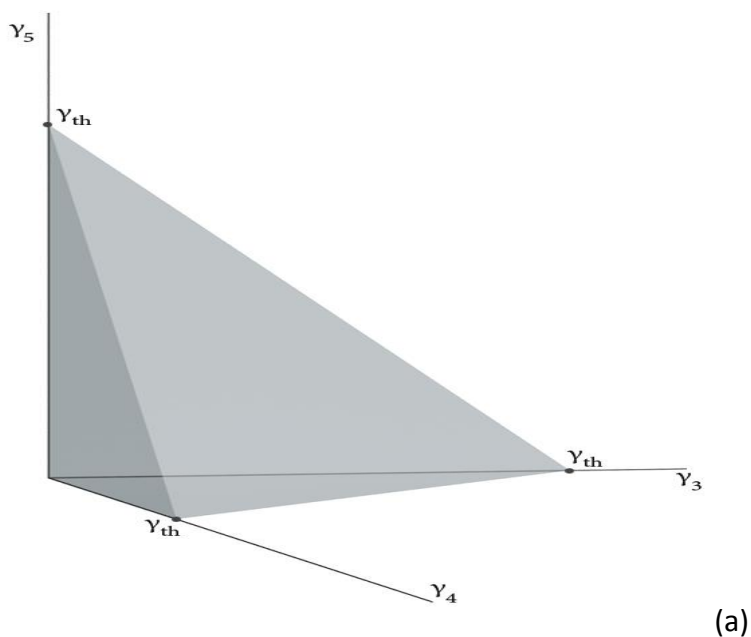
Χρησιμοποιώντας την λογαριθμοκανονική κατανομή 5-διαστάσεων $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4\gamma_5}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5)$, για να εκφράσουμε το ενδεχόμενο του 4^{ου} όρου της σχέσης (42), την διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή $f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2)$ για να εκφραστεί το ενδεχόμενο του 3^{ου} όρου της σχέσης (42), καθώς και τους τύπους (42) και (43) η πιθανότητα αποκοπής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned} P_{out} &= \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 - \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_2 + \\ &+ \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_3 \int_0^{\gamma_{04}} d\gamma_4 \int_0^{\gamma_{05}} d\gamma_5 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_2 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) d\gamma_1 \end{aligned} \quad (44)$$

$$\text{όπου} \quad \gamma_{04} = \begin{cases} \gamma_{th} & SC \\ \gamma_{th} - \gamma_3 & MRC \end{cases} \quad (45)$$

$$\gamma_{05} = \begin{cases} \gamma_{th} & SC \\ \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4 & MRC \end{cases} \quad (46)$$

Στο Σχήμα 4-7 φαίνεται το ενδεχόμενο αποκοπής για χρήση της τεχνικής MRC στον δέκτη του συστήματος. Για τιμές $\gamma_1, \gamma_2 > \gamma_{th}$ το ενδεχόμενο αποκοπής στο δέκτη απεικονίζεται ως ο σκιαγραφημένος όγκος στο σχήμα 4-7(α). Το άθροισμα των σηματοθορυβικών λόγων πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του λόγου κατωφλίου επομένως $\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 \leq \gamma_{th}$. Για μια συγκεκριμένη τιμή του γ_3 από το σχήμα 4-7(α) οδηγούμαστε στο σχήμα 4-7(β) όπου η οριακή γραμμή μπορεί να οριστεί ως $\gamma_{04} = \gamma_{th} - \gamma_3$ και $\gamma_5 + \gamma_4 = \gamma_{th} - \gamma_3 \Rightarrow \gamma_5 = \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4$



Σχήμα 4-7: Ενδεχόμενο αποκοπής MRC για (α) $\gamma_1, \gamma_2 > \gamma_{th}$ και (β) $\gamma_1, \gamma_2 > \gamma_{th}$ και $0 < \gamma_3 < \gamma_{th}$

Οι από κοινού λογαριθμοκανονικές κατανομές $f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1,\gamma_2)$ και $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4\gamma_5}(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3,\gamma_4,\gamma_5)$ προκύπτουν από τις κανονικές κατανομές $f_{u_1u_2}(u_1,u_2)$ και $f_{u_1u_2u_3u_4u_5}(u_1,u_2,u_3,u_4,u_5)$ αντίστοιχα χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = \frac{\ln(\gamma_j) - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (j = 1,2,3,4,5) \quad (47)$$

Όπου μ_j , σ_j δίνονται από την έκφραση (3), ενώ η κανονική κατανομή $f_{u_1u_2u_3u_4u_5}(u_1,u_2,u_3,u_4,u_5)$ προκύπτει για N=5 από την σχέση (13). Με τη χρήση λοιπόν του μετασχηματισμού (47) ο τύπος (44) γράφεται:

$$P_{out} = \int_{-\infty}^{u_{1,0}} f_{u_1}(u_1) du_1 + \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_2}(u_2) du_2 - \int_{-\infty}^{u_{1,0}} \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_1u_2}(u_1,u_2) du_2 + \int_{-\infty}^{u_{3,0}} \int_{-\infty}^{u_{4,0}} \int_{-\infty}^{u_{5,0}} \int_{u_{2,0}}^{\infty} \int_{u_{1,0}}^{\infty} f_{u_1u_2u_3u_4u_5}(u_1,u_2,u_3,u_4,u_5) du_1 \quad (48)$$

Και με χρήση του θεωρήματος Bayes [11] η παραπάνω έκφραση γίνεται :

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{1,0}}{\sqrt{2}}\right) + 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{2,0}}{\sqrt{2}}\right) - \int_{-\infty}^{u_{2,0}} f_{u_2}(u_2) \left(1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{1,0} - \mu_{1/2}}{\sqrt{2}\sigma_{1/2}}\right)\right) du_2 + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{u_{3,0}} \int_{-\infty}^{u_{4,0}} \int_{-\infty}^{u_{5,0}} \int_{u_{2,0}}^{\infty} f_{u_2u_3u_4u_5}(u_2,u_3,u_4,u_5) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_{1,0} - \mu_{1/2,3,4,5}}{\sqrt{2}\sigma_{1/2,3,4,5}}\right) du_2 \quad (49)$$

$$\text{Όπου} \quad \begin{cases} u_{4,0} = (\ln(\gamma_{th} - \gamma_3) - \mu_4) / \sigma_4 \\ u_{5,0} = (\ln(\gamma_{th} - \gamma_4 - \gamma_3) - \mu_5) / \sigma_5 \\ u_{j,0} = (\ln \gamma_{th} - \mu_j) / \sigma_j \quad j = (1,2,3) \end{cases} \quad (50)$$

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 4.2.2 είναι μέσω του υπολογισμού της πιθανότητας P_{avail} , δηλαδή

της πιθανότητας η λαμβανόμενη ισχύς να είναι μεγαλύτερη μιας ισχύος κατωφλίου, μέσα από τη σχέση (22). Έτσι η πιθανότητα αποκοπής δίνεται για την τοπολογία του ρόμβου με απευθείας ζεύξη από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{out} = 1 - \int_0^{\infty} d\gamma_3 \int_{\gamma_{4,0}}^{\infty} d\gamma_4 \int_{\gamma_{5,0}}^{\infty} d\gamma_5 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_2 f_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \gamma_5} \quad (51)$$

Όπου για χρήση της τεχνικής SC :

$$\gamma_{4,0} = \begin{cases} \gamma_{th} & , \gamma_3 < \gamma_{th} \\ 0 & , \gamma_3 > \gamma_{th} \end{cases} \quad (52)$$

$$\gamma_{5,0} = \begin{cases} \gamma_{th} & , (\gamma_3 < \gamma_{th}) \cap (\gamma_4 < \gamma_{th}) \\ 0 & , \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Και για την τεχνική MRC :

$$\gamma_{4,0} = \begin{cases} \gamma_{th} - \gamma_3 & , \gamma_{th} - \gamma_3 > 0 \\ 0 & , \gamma_{th} - \gamma_3 < 0 \end{cases} \quad (53)$$

$$\gamma_{5,0} = \begin{cases} \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4 & , \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4 > 0 \\ 0 & , \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4 < 0 \end{cases}$$

Και κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού (47) και του θεωρήματος Bayes[11] η σχέση (51) γίνεται:

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{u_{40}}^{\infty} \int_{u_{50}}^{\infty} \int_{u_{20}}^{\infty} f_{u_2 u_3 u_4 u_5} (u_2, u_3, u_4, u_5) \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{10} - \mu_{1/2345}}{\sqrt{2} \sigma_{1/2345}} \right) du_2 du_3 du_4 du_5 \quad (54)$$

Με $u_{j0} = \frac{\ln r - \mu_j}{\sigma_j}$ για $j=1,2,3$ και $u_{i0} = \frac{\ln \gamma_{i,0} - \mu_i}{\sigma_i}$ για $i=4,5$, όπου τα $\gamma_{i,0}$ για $i=4,5$ δίνονται από τη σχέση (52) αν χρησιμοποιείται η τεχνική SC και από τη σχέση (53) αν χρησιμοποιείται η σχέση (53).

4.3.3 Απόδοση πρωτοκόλλων συνεργατικής διαφορικότητας

Στην τοπολογία ρόμβου με απευθείας ζεύξη η εκπεμπόμενη ενέργεια του συστήματος ανά σύμβολο είναι η ίδια για τα πρωτόκολλα A και B. Επίσης θεωρώντας πως η πηγή S κάνει broadband εκπομπή η συνολική εκπεμπόμενη ενέργεια του συστήματος ανά σύμβολο ισούται με το άθροισμα της ενέργειας εκπομπής της πηγής συν την ενέργεια εκπομπής των δύο επαναληπτών και δίνεται από τη σχέση (28). Συνεπώς θεωρώντας ότι οι αναμεταδότες R1 και R2 εκπέμπουν με την ίδια ισχύ όπως η πηγή S, τότε το συνεργατικό σύστημα εκπέμπει τριπλάσια ισχύ ανά σύμβολο συγκριτικά με την ισχύ εκπομπής του συστήματος απευθείας ζεύξης ακριβώς όπως συμβαίνει και με το συνεργατικό σύστημα ρόμβου του Σχήματος 4.1.

Το μη-συνεργατικό ενεργειακά ισοδύναμο σύστημα λοιπόν (ισοδύναμο σύστημα απευθείας ζεύξης) έχει ενέργεια εκπομπής ανά σύμβολο $E_{direct(eff)} = T \cdot P_{Tx(eff)}$ ίση με την συνολική ενέργεια για τη μετάδοση ενός συμβόλου που εκπέμπει το συνεργατικό σύστημα και είναι η ίδια τόσο για το πρωτόκολλο A όσο και για το πρωτόκολλο B. Οπότε η ισχύς εκπομπής του ισοδύναμου συστήματος δίνεται απο:

$$P_{Tx(eff)} = P_{Tx5} + P_{Tx3} + P_{Tx4} \quad (55)$$

όπου P_{Tx5} είναι η ισχύς εκπομπής της πηγής S, P_{Tx3} η ισχύς εκπομπής του αναμεταδότη R1 και P_{Tx4} η ισχύς εκπομπής του αναμεταδότη R2 συνεργατικού συστήματος και οι παράμετροι του μη –συνεργατικού συστήματος δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$(\mu_{eff}, \sigma_{eff}) = (\mu_{w_{eff}} + \ln(\exp(\mu_5 - \mu_{w_5}) + \exp(\mu_3 - \mu_{w_3}) + \exp(\mu_4 - \mu_{w_4})), \sigma_5) \quad (56)$$

Όπου $\mu_{w_{eff}} = \mu_{w_5}$

Όσον αφορά τη φασματική απόδοση των πρωτοκόλλων A και B ισχύει ότι ακριβώς και για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου με την πιθανότητα αποκοπής για τα πρωτόκολλα A και B να μπορεί να δοθεί μέσω της σχέσης (49) και ενός τροποποιημένου κατωφλίου που περιέχει το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th-norm}$ που δίνεται από τη σχέση (34). Επίσης δεδομένης μιας πιθανότητας αποκοπής αναφοράς $P_{out(ref)}$, το κανονικοποιημένο ως προς το ρυθμό κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου $\gamma_{th-norm}$ μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση (35).

4.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα και Συμπεράσματα

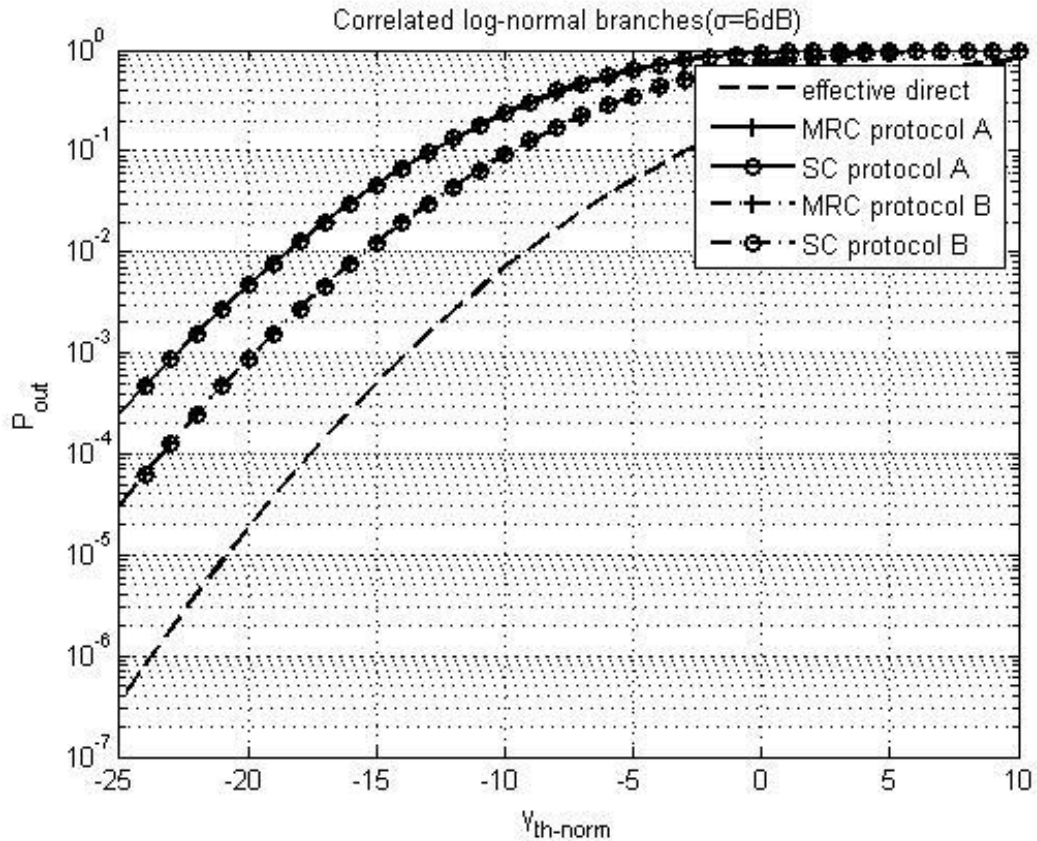
Με τη χρήση του προγράμματος MATLAB και εφαρμόζοντας τη σχέση (49) υπολογίζεται η πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος diamond/direct . Για τον υπολογισμό αυτό στη θέση των ορίων των ολοκληρωμάτων όπου στον τύπο βρίσκεται άπειρο όριο, $-\infty$ ή ∞ τοποθετούνται τα όρια -10 και 10 αντίστοιχα. Με την αντικατάσταση αυτή δεν παρατηρείται απόκλιση στα αποτελέσματα και η οι υπολογισμοί γίνονται πολύ συντομότεροι. Η πιθανότητα αποκοπής του ενεργειακά ισοδύναμου μη-συνεργατικού συστήματος δίνεται από τη σχέση (36) όπου οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι $(\mu_{eff}, \sigma_{eff})$ δίνονται από τη σχέση (56).

Στις εφαρμογές που ακολουθούν ισχύει $\mu_j = 0dB$ και $\mu_{w_j} = 0dB$ για κάθε j . Επίσης στα Σχήματα 4-8, 4-9 και 4-10 ο συντελεστής συσχέτισης λόγω σκίασης ρ_{ij} ακολουθεί το παρακάτω μοντέλο[18][19][30]:

$$\rho_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{\phi_{\Gamma}}{\phi_{ij}} \right)^{\alpha} \sqrt{\frac{L_i}{L_j}}, & (i, j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad i \neq j \cap (i, j) \neq (1, 4), (4, 1), (2, 3), (3, 2)) \\ \exp(-bd) & (i, j) = (1, 4), (4, 1), (2, 3), (3, 2) \end{cases} \quad (57)$$

όπου $L_j \geq L_i$, $\phi_{\Gamma} = 2 \sin^{-1}(L_c / 2L_i)$, $L_c = 20m$ είναι η απόσταση αποσυσχέτισης και $\alpha = 0.3$ είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος, ενώ d είναι η απόσταση μεταξύ των παράλληλων ζεύξεων 1 με 4 και 2 με 3 όπως αυτές εμφανίζονται στο Σχήμα 4-1, ενώ $b = 2 \cdot 10^{-3}$ είναι μια παράμετρος εξαρτώμενη από τις γεωμετρικές παραμέτρους του συστήματος και τον προσανατολισμό των ζεύξεων.

Στο Σχήμα 4-8 απεικονίζεται η πιθανότητα αποκοπής των τεχνικών SC και MRC του συνεργατικού συστήματος ρόμβου με απευθείας ζεύξη (diamond/direct) , που χρησιμοποιεί είτε τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA (πρωτόκολλο A) είτε το πρωτόκολλο SDMA (πρωτόκολλο B) συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης $\gamma_{th-norm}$. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι $\sigma_{direct} = \sigma_j = 6dB = 1.38Np$, $(j = 1, 2, 3, 4, 5)$, $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 2000m$ και $\phi_{13} = \phi_{24} = 30^\circ$.

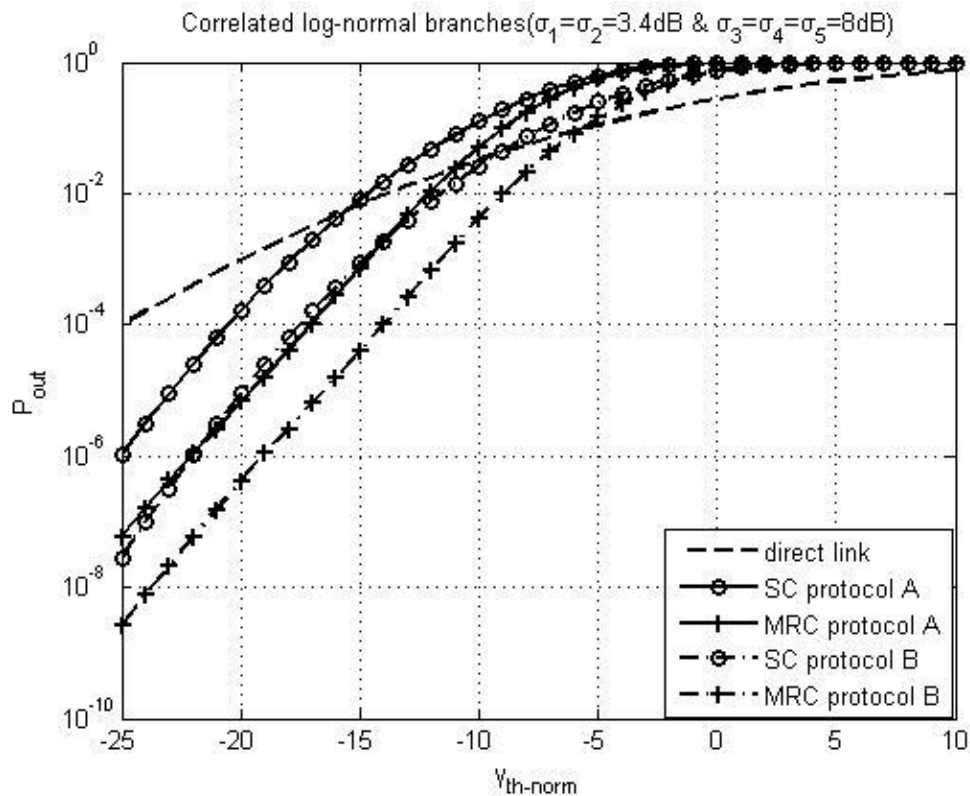


Σχήμα 4-8: Πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος ρόμβου (diamond/direct) και σύγκριση με την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη.

Από το διάγραμμα του σχήματος 4-8 αντιλαμβανόμαστε ότι αν σε όλες τις ζεύξεις οι μεταβλητότητες είναι ίσες, πράγμα που σημαίνει ότι όλες οι ζεύξεις υποφέρουν στο ίδιο ποσοστό από διαλείψεις η συνεργατική διαφορικότητα δεν προσφέρει καλύτερη επίδοση από την απευθείας ζεύξη αφού το ενεχόμενο να μην γίνει επιτυχής αποκωδικοποίηση σε έναν από τους αναμεταδότες είναι εξίσου πιθανό με το ενδεχόμενο της αποτυχημένης αποκωδικοποίησης κατά την απευθείας ζεύξη. Λόγω της χρήσης του Fixed Relaying η επίδοση του συστήματος περιορίζεται από την ποιότητα της ζεύξης και αυτό έχει σαν συνέπεια την υστέρηση του συνεργατικού συστήματος.

Στο Σχήμα 4-9 συγκρίνονται οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού συστήματος για τα πρωτόκολλα A και B και τις τεχνικές MRC και SC, ενώ φαίνεται και η επίδοση του ενεργειακά ισοδύναμου μη-συνεργατικού συστήματος. Οι παράμετροι του συστήματος είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο διάγραμμα εκτός από τις μεταβλητότητες που παίρνουν τις τιμές: $\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_{direct} = 8dB$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 3.4dB$ που αντιστοιχούν σε κόμβους S, R1, R2 τοποθετημένους στη στέγη κτιρίων (Above Roof Top – ART) και τον κόμβο

προορισμού D σε ύψος χαμηλότερο από αυτό των κτιρίων (Below Roof Top – BRT)[18].

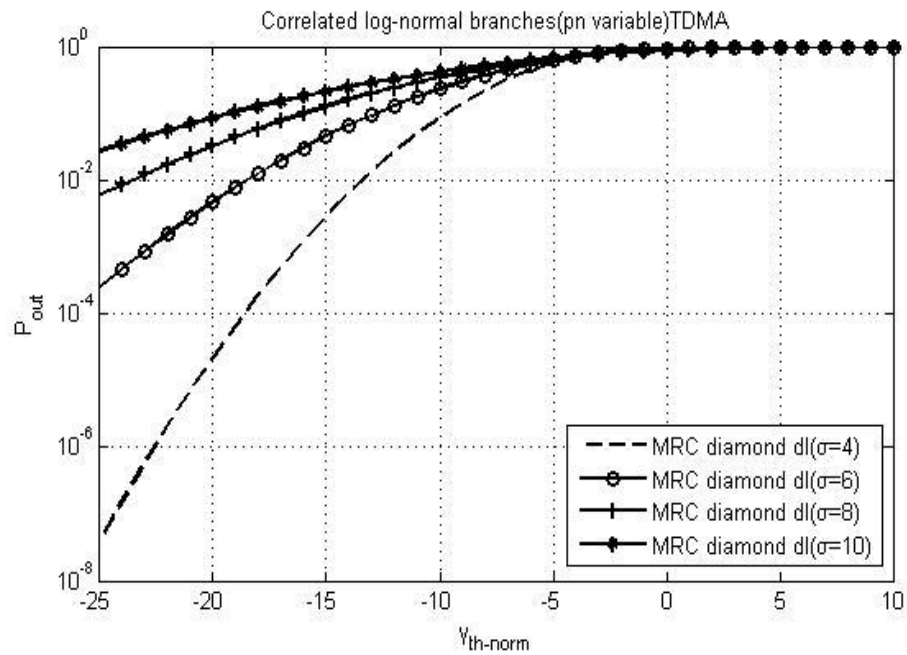


Σχήμα 4-9: Πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος με χρήση των πρωτοκόλλων A και B και των τεχνικών MRC και SC και σύγκριση με το ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα.

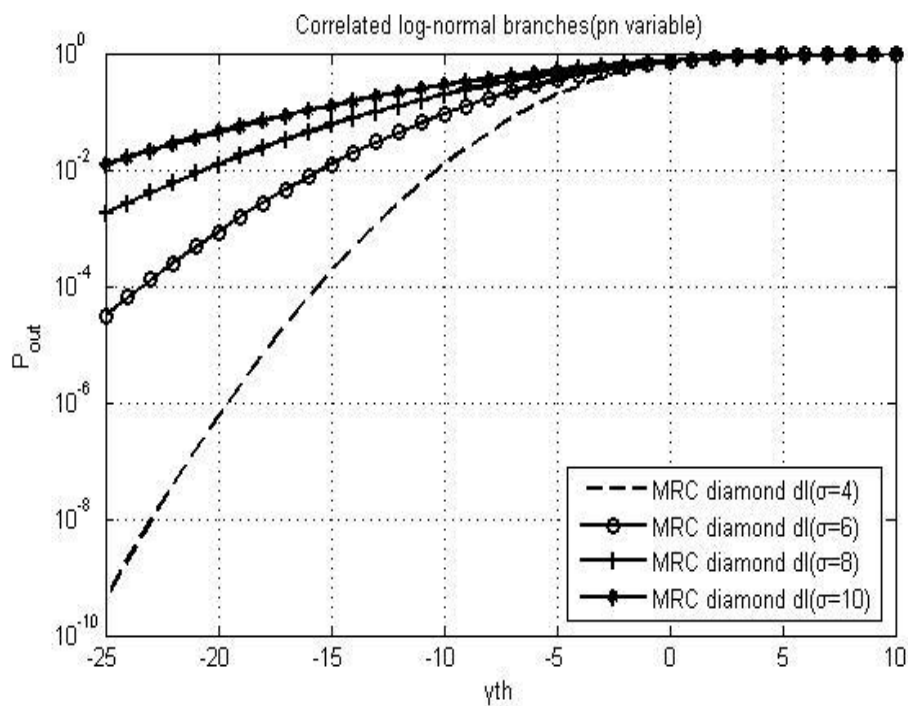
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό το συνεργατικό σύστημα «diamond/direct» για ένα πρακτικό εύρος τιμών του κανονικοποιημένου κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$, που αντιστοιχεί σε πιθανότητα αποκοπής μικρότερη από 0.1 και περίπου 0.01 για τη χρήση του πρωτοκόλλου B και A αντίστοιχα, παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από το ενεργειακά ισοδύναμο μη-συνεργατικό σύστημα. Παρατηρείται επίσης ότι για τιμές του κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$ μικρότερες από τα -10dB η τεχνική MRC παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την τεχνική SC για καθένα από τα δύο πρωτόκολλα A ή B. Τέλος ο πιο αποδοτικός συνδυασμός είναι, με σημαντική διαφορά ο συνδυασμός του πρωτοκόλλου B (SDMA) με την τεχνική διαφορικής λήψης MRC στο δέκτη.

Τέλος στο Σχήμα 4-10 συγκρίνονται οι επιδόσεις του συνεργατικού συστήματος για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ_j ($j = 1,2,3,4,5$) για τα πρωτόκολλα A και B χρησιμοποιώντας την τεχνική διαφορικής λήψης MRC στο δέκτη, που

όπως αποδείχθηκε από τα προηγούμενα διαγράμματα είναι πιο αποδοτική από την SC. Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν τις ίδιες τιμές όπως και στα προηγούμενα σχήματα.



(α)



(β)

Σχήμα 4-10: Σύγκριση της πιθανότητας αποκοπήσσει της τυπικής απόκλισης των ζεύξεων του συνεργατικού συστήματος με χρήση της τεχνικής MRC για (α)πρωτόκολλο A και για (β) το πρωτόκολλο B

Σε αυτά τα διαγράμματα βλέπουμε την επίδοση του συστήματος και για τα δύο πρωτόκολλα όταν όλες οι ζεύξεις του συστήματος χαρακτηρίζονται από την ίδια μεταβλητότητα και μάλιστα για διάφορες τιμές αυτής. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι όσο αυξάνεται η μεταβλητότητα τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα αποκοπής. Επίσης γίνεται φανερό ότι και για την τοπολογία diamond/direct το πρωτόκολλο B είναι πιο αποδοτικό από το πρωτόκολλο A.

4.4. Σύγκριση της επίδοσης των συνεργατικών συστημάτων με τοπολογία τριγώνου (triangle) , ρόμβου (diamond) και ρόμβου με απευθείας ζεύξη (diamond/direct)

Σε αυτήν την παράγραφο συγκρίνεται μέσω των κατάλληλων διαγραμμάτων η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων diamond/direct σε σχέση με τα άλλα συνεργατικά συστήματα που μελετήθηκαν όπως και με την απευθείας ζεύξη. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται και για τα δύο πρωτόκολλα A και B. Η τεχνική διαφορικής λήψης που χρησιμοποιείται στο δέκτη κάθε συστήματος είναι αυτή του μεγίστου λόγου ή αλλιώς MRC καθώς όπως αποδείχθηκε από την μελέτη που προηγήθηκε για όλα τα συστήματα είναι πιο αποδοτική της τεχνικής SC. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής κάθε τοπολογίας είναι, για το συνεργατικό σύστημα “triangle” ο τύπος (14) του τρίτου Κεφαλαίου, για το συνεργατικό σύστημα “diamond” ο τύπος (17) του τέταρτου Κεφαλαίου και για το συνεργατικό σύστημα “diamond/direct” ο τύπος (49) του τέταρτου Κεφαλαίου, ενώ για την απευθείας ζεύξη χρησιμοποιείται ο εξής:

$$P_{out} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(\gamma_{th-norm}) - \mu_{direct}}{\sigma_{direct} \sqrt{2}} \right) \quad (58)$$

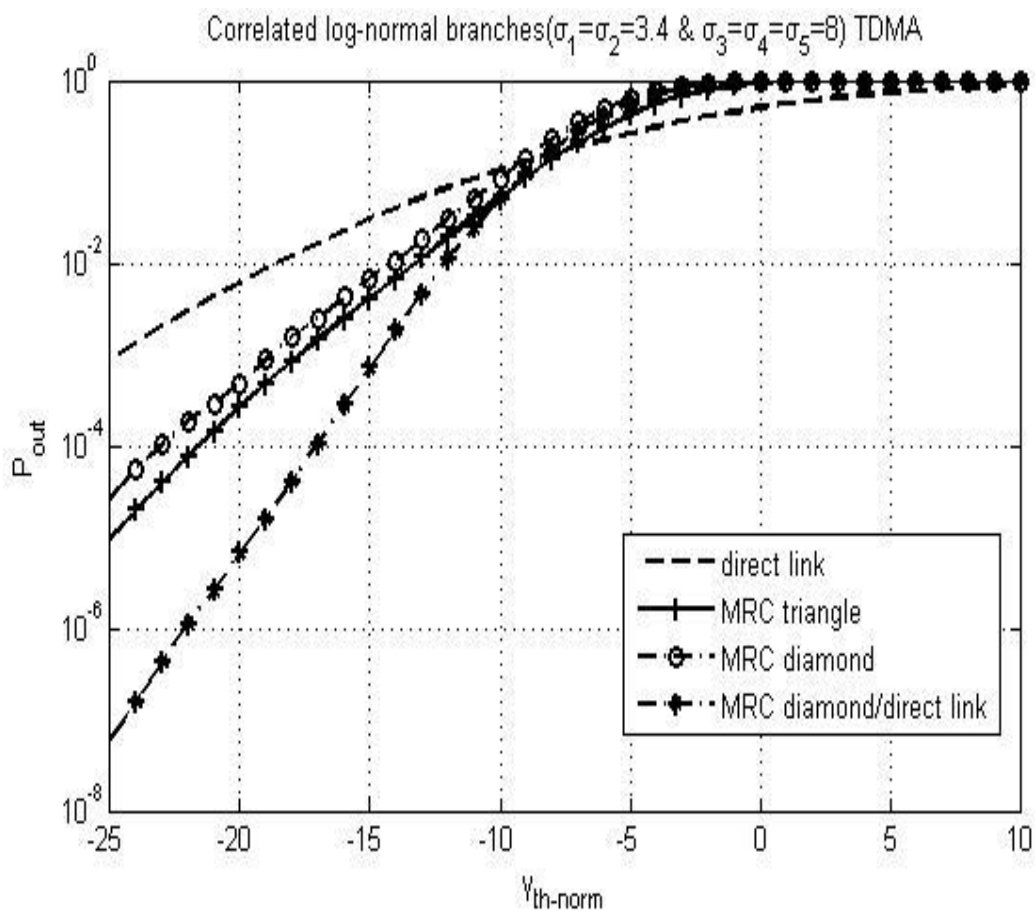
Όπου για τους υπολογισμούς που ακολουθούν οι τιμές των παραμέτρων θα είναι: $\mu_{direct} = \mu_5$ και $\sigma_{direct} = \sigma_5$.

Στο επόμενο διάγραμμα του Σχήματος 4-11 παρουσιάζεται η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων triangle , diamond , diamond/direct για το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης TDMA/FDMA ή όπως αναφέρεται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας πρωτόκολλο A. Οι παράμετροι των ζεύξεων που χρησιμοποιούνται έχουν ως εξής :

Triangle: $\mu_j = 0$, $j = 1,2,3$ και $\sigma_1 = \sigma_3 = 8dB$, $\sigma_2 = 3.4dB$ για τις ζεύξεις $j = 1,2,3$ όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα 3-1.

Diamond: $\mu_j = 0$, $j = 1,2,3,4$ και $\sigma_4 = \sigma_3 = 8dB$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 3.4dB$ για τις ζεύξεις $j = 1,2,3,4$ όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα 4-1.

Diamond/direct: $\mu_j = 0$, $j = 1,2,3,4,5$ και $\sigma_5 = \sigma_4 = \sigma_3 = 8dB$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 3.4dB$ για τις ζεύξεις $j = 1,2,3,4,5$ όπως αυτές φαίνονται στο σχήμα 4-6.

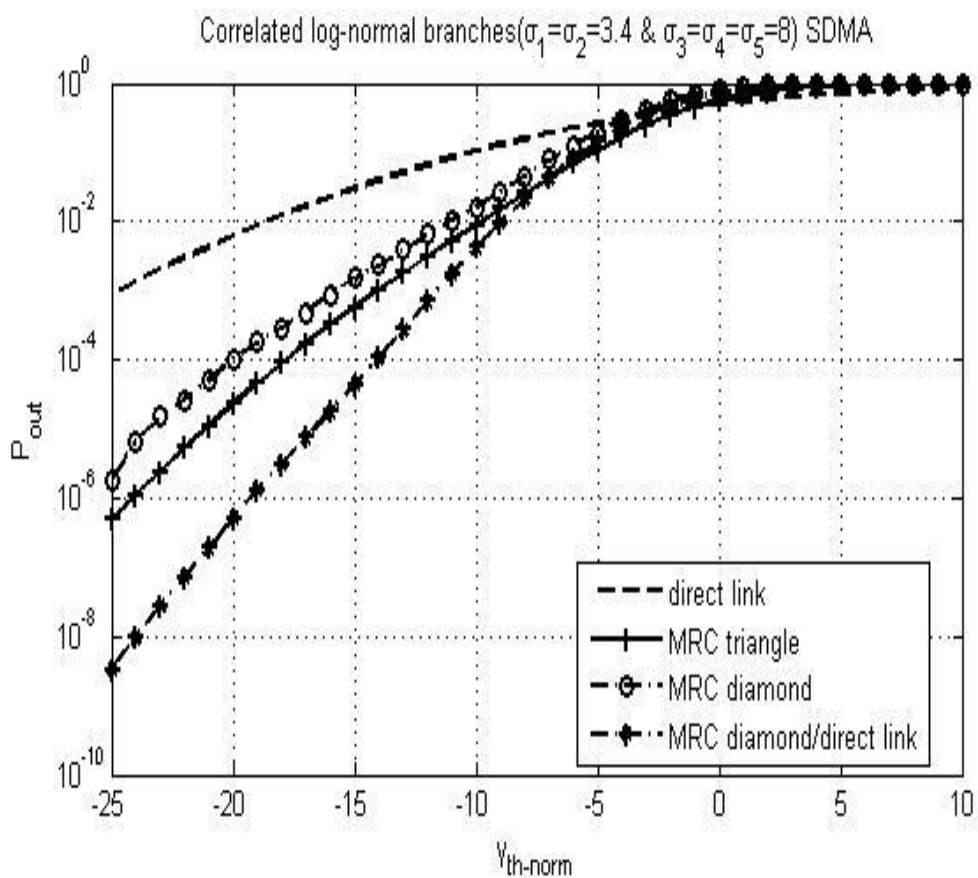


Σχήμα 4-11: Επίδοση συνεργατικών συστημάτων για το πρωτόκολλο A

Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να διακρίνουμε ότι για ένα πρακτικό εύρος τιμών του κανονικοποιημένου κατωφλίου $\gamma_{th-norm}$ (που αντιστοιχεί σε πιθανότητα αποκοπής μικρότερη από 0.1) και τα τρία συνεργατικά συστήματα που μελετώνται είναι πιο αποτελεσματικά από την απευθείας ζεύξη με το τμήμα όμως της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας. Λιγότερο αποτελεσματικό είναι το σύστημα «diamond», λίγο πιο αποδοτικό φαίνεται να είναι το σύστημα «triangle»

και το πιο αποδοτικό από τα τρία συστήματα είναι το «diamond/direct» που μάλιστα για τιμές του κατωφλίου που αντιστοιχούν σε πιθανότητα αποκοπής μικρότερη από 0.01 φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικά καλύτερη επίδοση από τα υπόλοιπα συστήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως ο δέκτης συνδυάζει 3 σήματα για τη δημιουργία του τελικού σήματος. Το γεγονός πως η τοπολογία «diamond» παρουσιάζει χειρότερη επίδοση από το σύστημα «triangle» εξηγείται από το γεγονός ότι λόγω χρήσης Fixed Relaying τα ενδεχόμενα αποκοπής για το diamond είναι: ανεπιτυχής αποκωδικοποίηση στον επαναλήπτη R1, ή στον επαναλήπτη R2, ή στον δέκτη D. Αντίθετα στην περίπτωση του «triangle» τα ενδεχόμενα αποκοπής είναι δύο: αποτυχία αποκωδικοποίησης στον R, ή στον D, ενώ και στις δύο περιπτώσεις τα σήματα που λαμβάνονται και συνδυάζονται από τον δέκτη είναι δύο.

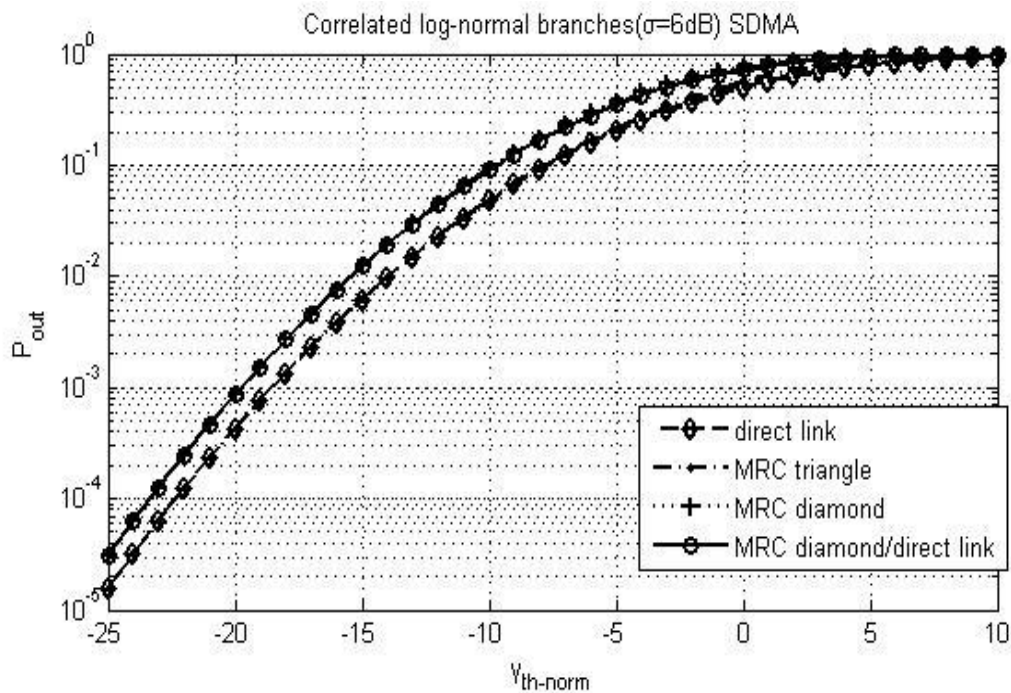
Στο επόμενο διάγραμμα του σχήματος 4-12 παρουσιάζεται η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων για το πρωτόκολλο SDMA. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του διαγράμματος είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στο διάγραμμα του σχήματος 4-11.



Σχήμα 4-12: Επίδοση συνεργατικών συστημάτων για το πρωτόκολλο B

Όπως και για το πρωτόκολλο A (Σχήμα 4-11) έτσι και για το πρωτόκολλο B το συνεργατικό σύστημα «diamond/direct» είναι το πιο αποδοτικό με το σύστημα «triangle» να ακολουθεί και το λιγότερο αποδοτικό να είναι το σύστημα «diamond» που όμως είναι πιο αποτελεσματικό από την απευθείας ζεύξη. Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους διαφαίνεται η καλύτερη επίδοση για όλες τις τοπολογίες του συνεργατικού συστήματος του πρωτοκόλλου B (SDMA) έναντι του πρωτοκόλλου A (TDMA/FDMA).

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η επίδοση των τριών συνεργατικών συστημάτων και της απευθείας ζεύξης για το πρωτόκολλο B, που από τα παραπάνω αποδείχθηκε πιο αποδοτικό, θεωρώντας πως σε όλες τις ζεύξεις η μεταβλητότητα ισούται με 6dB. Αυτό σημαίνει πως σε αυτή την περίπτωση όλες οι ζεύξεις υποφέρουν κατά το ίδιο ποσοστό από τις διαλείψεις.



Σχήμα 4-13: Επίδοση των συνεργατικών συστημάτων για το πρωτόκολλο B με όλες τις ζεύξεις να χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα $\sigma_j=6\text{dB}$ για $j=1,2,3,4,5$.

Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται ότι οι επιδόσεις απευθείας ζεύξης και συστήματος triangle ταυτίζονται όπως και οι επιδόσεις των συστημάτων diamond και diamond/direct με τις επιδόσεις των triangle και απευθείας ζεύξης να είναι καλύτερες. Αυτό εξηγείται από τη χρήση του πρωτοκόλλου Σταθερής Επανάληψης (Fixed Relaying) που έχει ως συνέπεια η επίδοση να περιορίζεται από την ποιότητα των ζεύξεων μεταξύ του κόμβου S και των επαναληπτών R1 και R2. Συμπεραίνεται

λοιπόν ότι για τη χρήση των συνεργατικών συστημάτων ώστε να βελτιώνεται η επίδοση της επικοινωνίας μεταξύ κόμβου πηγής S και κόμβου προορισμού D , πρέπει να εξασφαλίζεται η τοποθέτηση των επαναληπτών σε σημεία όπου η ποιότητα των ζεύξεων του κόμβου S με τους κόμβους $R, R1, R2$ δεν θα περιορίζεται από διαλείψεις. Δηλαδή, θέλουμε οι ζεύξεις ως προς τα Relays να έχουν μεγάλη διαθεσιμότητα.

Παράρτημα A : Κώδικας MATLAB

A.1. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων του 3^{ου} Κεφαλαίου

“triangle-shaped” αρχιτεκτονική:

script triangle.m :

```
clear all;
C=zeros(3,3);
%% ορισμός του πίνακα συσχέτισης με ρ=0.5
count=0;
for i=1:3
    for j=1:3
        if i==j
            C(i,j)=1;
        else
            C(i,j)=0.5;
        end
    end
end
%% ορισμός του πίνακα συσχέτισης για ρ εξαρτώμενους από την απόσταση
Lc=20;
L(2)=2000;
L(3)=L(2);
f=zeros(3,3);%ορισμός γωνιών
f(1,2)=75;
f(2,1)=f(1,2);
f(1,3)=f(1,2);
f(3,1)=f(1,3);
f(2,3)=30;
f(3,2)=f(2,3);
L(1)=4000*cosd(75);
for i=1:3
    fT(i)=2*asind(Lc/(2*L(i)));
end
for i=1:3
    for j=1:3
        if i==j
            Cp(i,j)=1;
        else
            if L(j)>=L(i)
                sqr(i,j)=sqrt(L(i)/L(j));
            else
                sqr(i,j)=sqrt(L(j)/L(i));
            end

            Cp(i,j)=((fT(i)/f(i,j)).^0.3).*sqr(i,j);
        end
    end
end
%% Επιλογή του πίνακα συσχέτισης που θα χρησιμοποιηθεί
pvariable=0;
```

```

if pvariable
    C=Cp;
end

%% ορισμός τυπικής απόκλισης και μέσης τιμής
S_db=[8 3.4 8];
m_db=[0 0 0];
ksi = 10/log(10);
S_Np=S_db./ksi;
m_Np=m_db./ksi;

    low=-10;%integral lower limit

    %% υπολογισμός Pout σε συνάρτηση με threshold(r)
r_min_dB = -30;
r_max_dB = +10;
irange_dB=[r_min_dB:1:r_max_dB];
irange = 10.^(irange_dB/10);%convert to linear scale
l=0;
k=0;
for ii=irange
    l=l+1;
    pout_scB(l)=pout_sc_triangle(ii,m_Np,S_Np,C,low);%protocol B
    r=ii.^2+2.*ii;%r=γth kai ii=γth.norm
    pout_scA(l)=pout_sc_triangle(r,m_Np,S_Np,C,low);%protocol A

    direct(l)=1-0.5*erfc(reallog(ii)/(S_Np(l)*sqrt(2)));
end

for jj=irange
    k=k+1;
    pout_mrcB(k)=pout_mrc_triangle(jj,m_Np,S_Np,C,low);%protocol B
    r=jj.^2+2.*jj;%r=γth kai jj=γth.norm
    pout_mrcA(k)=pout_mrc_triangle(r,m_Np,S_Np,C,low);%protocol A
end

%% Διάγραμμα Pout(r)

figure;
semilogy(irange_dB,pout_scB,'k+-.','linewidth',2);
hold on;
semilogy(irange_dB,pout_mrcB,'ro-.','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,direct,'k--','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_scA,'ro-','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_mrcA,'rd-','linewidth',2);
grid
title('Correlated log-normal branches');
xlabel('γ_{th.norm}');
ylabel('P_{out}');
legend('SC protocol B','MRC protocol B','direct','SC protocol A','MRC
protocol A')

```

script triangle_gain.m:


```

clear all;
C=zeros(3,3);

%% ορισμός της τυπικής απόκλισης και της μέσης τιμής
S_db=[8 3.4 8];
m_db=[0 0 0];
ksi = 10/log(10);
S_Np=S_db./ksi;
m_Np=m_db./ksi;

    low=-10;%integral lower limit

r_min_dB_search = -40;           % Lower limit of Poutage evaluation
in dB
r_max_dB_search = 10;           % Upper limit of Poutage evaluation
in dB

irange_min = 10.^(r_min_dB_search/10);
irange_max = 10.^(r_max_dB_search/10);

ref_pout=1e-4;
count=0;
    pn_range=[0.1:0.1:0.9 0.95];
for pn=pn_range;

for i=1:3
    for j=1:3
        if i==j
            C(i,j)=1;
        else
            C(i,j)=pn;
        end
    end
end

    count=count+1;
    [root_sc(count),ref_pout_sc(count),exitflag1] = fzero(@
(x) (pout_sc_triangle(x,m_Np,S_Np,C,low)-ref_pout), [irange_min
irange_max]);
    [root_eff(count),ref_pout_eff(count),exitflag2] = fzero(@
(y) (1-0.5*erfc(reallog(y)/(S_Np(1)*sqrt(2)))-ref_pout), [irange_min
irange_max]);
end
gain=10*log10(root_sc)-10*log10(root_eff);

figure;
plot(pn_range, gain, 'k-.', 'linewidth',2);

```

pout_sc_triangle.m :

```

function [ret]=pout_sc_triangle(r,m_Np,S_Np,C,lowerlimit)
desired_accuracy = 1e-15;
C_minus=C([1,3],[1,3]);
p=C([1,3],2);
Cinv=inv(C_minus);
%% υπολογισμός u10 u20 u30

if (r>0)
    u10=(reallog(r)-m_Np(1))/(S_Np(1));
    u20=(reallog(r)-m_Np(2))/(S_Np(2));
    u30=(reallog(r)-m_Np(3))/(S_Np(3));
else
    u10=-1e12;αντί -inf
    u20=-1e12;
    u30=-1e12;
end

ret=1-
0.5*erfc(u20/sqrt(2))+0.5*sc_doublequad(@(u1,u3) sunarthsh(u1,u3,C_min
us,Cinv,u20),lowerlimit,u30,lowerlimit,u10);

function [ret1]=sunarthsh(u1,u3,C_minus,Cinv,u20)%υπολογισμός της
συνάρτησης προς διπλή ολοκλήρωση

s2prime13=sqrt((p')*Cinv*p);
ret1=fulu3(u1,u3,C_minus,Cinv).*erfc((u20-
m2prime13(u1,u3,Cinv))/(sqrt(2)*s2prime13));

function [ret2]=m2prime13(u1,u3,Cinv)%υπολογισμός του m2/1,3
ret2=((Cinv*p)')*[u1;u3];
end

function [ret3]=fulu3(u1,u3,C_minus,Cinv)%υπολογισμός της
fulu3(u1,u3)
display([u1,u3]);
display([u1;u3]);
display(Cinv);
ret3=(1/sqrt((2*pi)^2*det(C_minus)))*exp(-
0.5*[u1,u3]*Cinv*[u1;u3]);
end

end
end

```

pout mrc triangle.m :

```

function [ret]=pout_mrc_triangle(r,m_Np,S_Np,C,lowerlimit)
desired_accuracy = 1e-15;
Cinv=inv(C);
%% υπολογισμός u10 u20

if (r>0)

```

```

u10=(reallog(r)-m_Np(1))/(S_Np(1));
u20=(reallog(r)-m_Np(2))/(S_Np(2));

else
    u10=-inf;
    u20=-inf;

end

ret=1-
0.5*erfc(u20/sqrt(2))+0.5*mrc_doublequad(@(u1,u3) sunarthsh(u1,u3,C,u2
0),lowerlimit,lowerlimit,u10,S_Np,m_Np,r);

function [ret1]=sunarthsh(u1,u3,C,u20) %υπολογισμός της συνάρτησης προς
διπλή ολοκλήρωση

s2prime13=sqrt((1-C(1,2)^2-C(1,3)^2-
C(2,3)^2+2*C(1,2)*C(1,3)*C(2,3))/(1-C(1,3)^2));
ret1=fulu3(u1,u3,C).*erfc((u20-
m2prime13(u1,u3,C))/(sqrt(2)*s2prime13));

function [ret2]=m2prime13(u1,u3,C) %υπολογισμός του m2/1,3
ret2=(u1.*(C(1,2)-C(1,3)*C(2,3))+u3.*(C(2,3)-C(1,2)*C(1,3)))/(1-
C(1,3)^2);
end

function [ret3]=fulu3(u1,u3,C) %υπολογισμός της fulu3(u1,u3)
C_minus=C([1,3],[1,3]);
ret3=1/sqrt((2*pi)^2*det(C_minus))*exp(-
0.5*(u1.*(u1.*Cinv(1,1)+u3.*Cinv(3,1))+u3.*(u1.*Cinv(1,3)+u3.*Cinv(3,
3))));
end

end
end

```

sc_doublequad.m:

```

function [ret]=sc_doublequad(fun,inlower,inhhigher,outlower,outhhigher)

dx=0.01;%βήμα υπολογισμού της συνάρτησης
dy=dx;%(dy=dx)
I=0;%αρχικοποίηση του αποτελέσματος
for x=outlower:dx:outhhigher %σαρώνουμε όλες τις δυνατές τιμές του x
    %
    y=inlower:dy:inhhigher; %σαρώνουμε το y
    s=fun(x,y);% συνάρτηση υπολογισμένη σε όλα τα δυνατά y
    S1=sum(s)*dy; % απλώς ολοκληρώνουμε (άθροιση * διαφορικό)
    %το παραπάνω block τριών γραμμών αποτελεί το εσωτερικό ολοκλήρωμα
    %% από εδώ και κάτω υπολογίζεται το εξωτερικό ολοκλήρωμα
    I=I+S1; %αθροίζεται η νέα προσφορά στο αποτέλεσμα
end

```

```

        if S1/I<1e-10 %αν έχουμε σύγκλιση κόβουμε την άθροιση

            break;
        end

end

ret=I*dy;

```

mrc doublequad.m :

```

function
[ret]=mrc_doublequad(fun,inlower,outlower,outhigher,S_Np,m_Np,r)

dx=0.01;% βήμα υπολογισμού της συνάρτησης
dy=dx;%( dy=dx)
I=0; % αρχικοποίηση του αποτελέσματος
for x=outlower:dx:outhigher % σαρώνουμε όλες τις δυνατές τιμές του x

    g1=exp(x*S_Np(1)+m_Np(1));
    r_g1=r-g1;
    r_g1=r_g1.*(r_g1>0);%όλες οι αρνητικές τιμές του(r-g1) ίσες με 0
    display(r_g1);
    ln=reallog(r_g1);
    if ln==-inf
        S1=0;
    else
        inhigher=(ln-m_Np(3))/(S_Np(3));

        y=inlower:dy:inhigher;
        s=fun(x,y);% συνάρτηση υπολογισμένη σε όλα τα δυνατά y
        S1=sum(s)*dy;% απλώς ολοκληρώνουμε (άθροιση * διαφορικό)
    end
    %το παραπάνω block τριών γραμμών αποτελεί το εσωτερικό ολοκλήρωμα
    %% από εδώ και κάτω υπολογίζεται το εξωτερικό ολοκλήρωμα
    I=I+S1; % αθροίζεται η νέα προσφορά στο αποτέλεσμα

    if S1/I<1e-10 % αν έχουμε σύγκλιση κόβουμε την άθροιση

        break;
    end

end

ret=I*dy;

```

A.2. Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων του 4^{ου} Κεφαλαίου

A.2.1. “diamond-shaped” αρχιτεκτονική :

script diamond.m :

```
clear all;
C=zeros(4,4);
for i=1:4
    for j=1:4
        if i==j
            C(i,j)=1;
        elseif (i==1&&j==4) || (i==4&&j==1) || (i==2&&j==3) || (i==3&&j==2)
            C(i,j)=0;
        else
            C(i,j)=0.5;
        end
    end
end

Lc=20;
L(1)=2000;
L(2)=L(1);
L(3)=L(1);
L(4)=L(1);
f=zeros(4,4);
f(1,2)=150;
f(2,1)=f(1,2);
f(1,3)=30;
f(3,1)=f(1,3);
f(2,4)=30;
f(4,2)=f(2,4);
f(3,4)=150;
f(4,3)=f(3,4);

for i=1:4
    fT(i)=2*asind(Lc/(2*L(i)));
end
for i=1:4
    for j=1:4
        if i==j
            Cp(i,j)=1;
        elseif (i==1&&j==4) || (i==4&&j==1) || (i==2&&j==3) || (i==3&&j==2)
            Cp(i,j)=0;
        else
            if L(j)>=L(i)
                sqr(i,j)=sqrt(L(i)/L(j));
            else
                sqr(i,j)=sqrt(L(j)/L(i));
            end
        end

        Cp(i,j)=((fT(i)/f(i,j)).^0.3).*sqr(i,j);
    end
end
```

```

        end
    end

    %% επιλογή για τη χρήση του πίνακα συσχέτισης
    pvariable=1;
    if pvariable
        C=Cp;
    end

    %% ορισμός τυπικής απόκλισης και μέσης τιμής
    S_db=[3.4 3.4 8 8];
    m_db=[0 0 0 0];
    ksi = 10/log(10);
    S_Np=S_db./ksi;
    m_Np=m_db./ksi;

    low=-10;%integral lower limit
    high=10;%integral higher limit

    %% υπολογισμός του Pout σε συνάρτηση με threshold(r)
    r_min_dB = -30;
    r_max_dB = +10;
    irange_dB=[r_min_dB:1:r_max_dB];
    irange = 10.^(irange_dB/10);%convert to linear scale
    l=0;
    k=0;
    if pvariable
        for ii=irange
            l=l+1;
            pout_scB(l)=pout_sc_diamond(ii,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol B
            r=ii.^2+2.*ii;%r=γth kai ii=γth.norm
            pout_scA(l)=pout_sc_diamond(r,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol A

        end

        for jj=irange
            k=k+1;
            pout_mrcB(k)=pout_mrc_diamond(jj,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol B
            r=jj.^2+2.*jj;%r=γth kai jj=γth.norm
            pout_mrcA(k)=pout_mrc_diamond(r,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol A
        end

    else
        for ii=irange
            l=l+1;
            pout_scB(l)=pout_sc_diamond(ii,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol B
            pout_mrcB(l)=pout_mrc_diamond(ii,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol B
        end

    end

    %% diagramma Pout(r)
    if pvariable
        figure;
        semilogy(irange_dB,pout_scB,'k+-','linewidth',2);
    end

```

```

hold on;
semilogy(irange_dB,pout_mrcB,'ro-','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_scA,'k--','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_mrcA,'ro-','linewidth',2);
grid
title('Correlated log-normal branches ');
xlabel('γth.norm');
ylabel('P{out}');
legend('SC protocol B','MRC protocol B','SC protocol A','MRC protocol
A');
else
figure;
semilogy(irange_dB,pout_scB,'k+-','linewidth',2);
hold on;
semilogy(irange_dB,pout_mrcB,'ro-','linewidth',2);
grid
title('Correlated log-normal branches');
xlabel('γth');
ylabel('P{out}');
legend('SC','MRC');

end

```

pout_mrc_diamond.m:

```

function [ret]=pout_mrc_diamond(r,m_Np,S_Np,C,lowerlimit,higherlimit)

    C_minus=C([2,3,4],[2,3,4]);
    p=C([2,3,4],1);
    Cinv=inv(C_minus);
    pn=C(1,2);
    desired_accuracy=1e-15;

    %% υπολογισμός u10 u20 u30 u40

    if (r>0)
        u10=(reallog(r)-m_Np(1))/(S_Np(1));
        u20=(reallog(r)-m_Np(2))/(S_Np(2));
        u30=(reallog(r)-m_Np(3))/(S_Np(3));
        u40=(reallog(r)-m_Np(4))/(S_Np(4));
    else
        u10=-1e12;
        u20=-1e12;
        u30=-1e12;
        u40=-1e12;
    end

    ret=
        1-0.5*erfc(u10/sqrt(2))+1-0.5*erfc(u20/sqrt(2))-
        quadl(@ (u2)AAA(u2,u10,pn),lowerlimit,u20,desired_accuracy)+0.5*mrc_tr
        iple-
        quad(@ (u2,u3,u4) sunarthsh(u2,u3,u4,C_minus,Cinv,u10),u20,higherlimit,
        lowerlimit,lowerlimit,u30,S_Np,m_Np,r);

    function [ret1]=sunarthsh(u2,u3,u4,C_minus,Cinv,u10) %υπολογισμός της
    συνάρτησης της τριπλής ολοκλήρωσης

```

```

s1prime234=sqrt((p')*Cinv*p);

ret1=fu2u3u4(u2,u3,u4,C_minus,Cinv).*erfc((u10-
m1prime234(u2,u3,u4,Cinv))/(sqrt(2)*s1prime234));

function [ret2]=m1prime234(u2,u3,u4,Cinv)%υπολογισμός του m1/234
    ret2=((Cinv*p)')*[u2;u3;u4];
end

function [ret3]=fu2u3u4(u2,u3,u4,C_minus,Cinv)%υπολογισμός της
fu2u3u4(u2,u3,u4)
    ret3=1/sqrt(((2*pi)^3)*det(C_minus))*exp(-0.5*[u2      u3
u4]*Cinv*[u2;u3;u4]);
end

end
function [ret4]=AAA(u2,u10,pn)
    ret4= fu2(u2).*(1-0.5*erfc((u10-pn*u2)/sqrt(2*(1-pn^2))));

function [ret5]=fu2(u2)
    ret5 = (1/sqrt(2*pi)) * exp(-(u2.^2)/2);
end

end
end

```

pout_sc_diamond.m:

```

function [ret]=pout_sc_diamond(r,m_Np,S_Np,C,lowerlimit,higherlimit)

    C_minus=C([2,3,4],[2,3,4]);
    p=C([2,3,4],1);
    Cinv=inv(C_minus);
    pn=C(1,2);
    desired_accuracy=1e-15;
    %% υπολογισμός u10 u20 u30 u40

    if (r>0)
        u10=(reallog(r)-m_Np(1))/(S_Np(1));
        u20=(reallog(r)-m_Np(2))/(S_Np(2));
        u30=(reallog(r)-m_Np(3))/(S_Np(3));
        u40=(reallog(r)-m_Np(4))/(S_Np(4));
    else
        u10=-1e12;
        u20=-1e12;
        u30=-1e12;
        u40=-1e12;
    end

    ret=
        1-0.5*erfc(u10/sqrt(2))+1-0.5*erfc(u20/sqrt(2))-
        quadl(@(u2)AAA(u2,u10,pn),lowerlimit,u20,desired_accuracy)+0.5*sc_tri

```



```

ple-
quad(@(u2,u3,u4) sunarthsh(u2,u3,u4,C_minus,Cinv,u10),u20,higherlimit,
lowerlimit,u40,lowerlimit,u30);

function [ret1]=sunarthsh(u2,u3,u4,C_minus,Cinv,u10)
slprime234=sqrt((p')*Cinv*p);

ret1=fu2u3u4(u2,u3,u4,C_minus,Cinv).*erfc((u10-
m1prime234(u2,u3,u4,Cinv))/(sqrt(2)*slprime234));

function [ret2]=m1prime234(u2,u3,u4,Cinv)
ret2=((Cinv*p)')*[u2;u3;u4];
end

function [ret3]=fu2u3u4(u2,u3,u4,C_minus,Cinv)
ret3=1/sqrt(((2*pi)^3)*det(C_minus))*exp(-0.5*[u2 u3
u4]*Cinv*[u2;u3;u4]);
end
end
function [ret4]=AAA(u2,u10,pn)

ret4= fu2(u2).*(1-0.5*erfc((u10-pn*u2)/sqrt(2*(1-pn^2))));

function [ret5]=fu2(u2)
ret5 = (1/sqrt(2*pi)) * exp(-(u2.^2)/2);
end

end
end

```

mrc triplequad.m:

```

function
[ret]=mrc_triplequad(fun,low1,high1,low2,low3,high3,S_Np,m_Np,r)
dx=0.2;
dy=dx;
dz=dy;
I=0;
for x=low3:dx:high3
g3=exp(x*S_Np(3)+m_Np(3));
r_g3=r-g3;
r_g3=r_g3.*(r_g3>0);
ln=reallog(r_g3);

high2=(ln-m_Np(4))/(S_Np(4));

for z=low2:dz:high2
for y=low1:dy:high1;
s=fun(x,y,z);
S1=s*dy*dz;
I=I+S1;

if S1/I<1e-15
break;

```

```
        end
    end
end
ret=I*dy;
```

sc triplequad.m :

```
function [ret]=sc_triplequad(fun,low1,high1,low2,high2,low3,high3)

dx=0.2;
dy=dx;
dz=dy;
I=0;
for x=low3:dx:high3

    for z=low2:dz:high2
        for y=low1:dy:high1;
            s=fun(x,y,z);
            S1=s*dy*dz;
            I=I+S1;

            if S1/I<1e-15
                break;
            end
        end
    end
end
ret=I*dy;
```

A.2.2. “diamond/direct-shaped” αρχιτεκτονική :

script diamond dl.m :

```
clear all;
C=zeros(5,5);
%% ορισμός του πίνακα συσχέτισης για σταθερό p=0.5
for i=1:5
    for j=1:5
        if i==j
            C(i,j)=1;
        elseif (i==1&&j==4) || (i==4&&j==1) || (i==2&&j==3) || (i==3&&j==2)
            C(i,j)=0.5;
        else
            C(i,j)=0.5;
        end
    end
end
```

```

Lc=20;
L(1)=2000;
L(2)=L(1);
L(3)=L(1);
L(4)=L(1);
L(5)=L(1)*2*cosd(75);
d=L(1)*cosd(30);%η απόσταση μεταξύ των L(1) και L(4) και L(2) L(3)
αντίστοιχα
a=2e-3; %συντελεστής της exponential
f=zeros(5,5);
f(1,2)=150;
f(2,1)=f(1,2);
f(1,3)=30;
f(3,1)=f(1,3);
f(2,4)=30;
f(4,2)=f(2,4);
f(3,4)=150;
f(4,3)=f(3,4);
f(1,5)=75;
f(5,1)=f(1,5);
f(3,5)=f(1,5);
f(5,3)=f(1,5);
f(4,5)=f(1,5);
f(5,4)=f(1,5);
f(2,5)=f(1,5);
f(5,2)=f(1,5);
b=-(a*d);

for i=1:5
    fT(i)=2*asind(Lc/(2*L(1)));

    for j=1:5
        if i==j
            Cp(i,j)=1;
        elseif (i==1&&j==4) || (i==4&&j==1) || (i==2&&j==3) || (i==3&&j==2)
            Cp(i,j)=exp(b);
        else

            if L(j)>=L(i)
                sqr(i,j)=sqrt(L(i)/L(j));
            else
                sqr(i,j)=sqrt(L(j)/L(i));
            end

            Cp(i,j)=((fT(i)/f(i,j)).^0.3).*sqr(i,j);

        end
    end
end

%%επιλογή για τη χρήση πίνακα συσχέτισης
pvariable=1;
if pvariable

    C=Cp;
end

```

```

%% ορισμός της τυπικής απόκλισης και της μέσης τιμής
S_db=[3.4 3.4 8 8 8];
m_db=[0 0 0 0 0];
ksi = 10/log(10);
S_Np=S_db./ksi; %convert to linear scale
m_Np=m_db./ksi; %convert to linear scale

    low=-10;%integral lower limit
    high=10;%integral higher limit

    %% υπολογισμός του Pout σε συνάρτηση με threshold(r)
r_min_dB = -25;
r_max_dB = +10;
irange_dB=[r_min_dB:1:r_max_dB];
irange = 10.^(irange_dB/10);%convert to linear scale
l=0;
k=0;
for ii=irange
    l=l+1;
    r=ii^2+2*ii;
    pout_scB(l)=pout_sc_diamond_dl(ii,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol B
    pout_mrcB(l)=pout_mrc_diamond_dl(ii,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol B
    pout_scA(l)=pout_sc_diamond_dl(r,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol A
    pout_mrcA(l)=pout_mrc_diamond_dl(r,m_Np,S_Np,C,low,high);%protocol A
    direct(l)=1-0.5*erfc((reallog(ii)-reallog(3))/(S_Np(5)*sqrt(2)));
end

%% διάγραμμα Pout(r)
figure;
semilogy(irange_dB,direct,'k--','linewidth',2);
hold on;
semilogy(irange_dB,pout_mrcA,'k+-','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_scA,'ko-','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_mrcB,'k+-','linewidth',2);
semilogy(irange_dB,pout_scB,'ko-','linewidth',2);
grid
title('Correlated log-normal
branches( $\sigma_1=\sigma_2=3.4\text{dB}, \sigma_3=\sigma_4=\sigma_5=8\text{dB}$ )');
xlabel('γ_{th-norm}');
ylabel('P_{out}');
legend('effective direct','MRC protocol A','SC protocol A','MRC pro-
tocol B','SC protocol B');

```

pout_sc_diamond_dl.m :

```

function
[ret]=pout_sc_diamond_dl(r,m_Np,S_Np,C,lowerlimit,higherlimit)

C_minus=C([2,3,4,5],[2,3,4,5]);
p=C([2,3,4,5],1);

```

```

Cinv=inv(C_minus);
pn=C(1,2);
desired_accuracy=1e-15;
%% υπολογισμός u10 u20 u30 u40 u50

if (r>0)
    u10=(reallog(r)-m_Np(1))/(S_Np(1));
    u20=(reallog(r)-m_Np(2))/(S_Np(2));
    u30=(reallog(r)-m_Np(3))/(S_Np(3));
    u40=(reallog(r)-m_Np(4))/(S_Np(4));
    u50=(reallog(r)-m_Np(5))/(S_Np(5));
else
    u10=-1e12;
    u20=-1e12;
    u30=-1e12;
    u40=-1e12;
end

ret=
    1-0.5*erfc(u10/sqrt(2))+1-0.5*erfc(u20/sqrt(2))-
    quadl(@ (u2)AAA(u2,u10,pn),lowerlimit,u20,desired_accuracy)+0.5*sc_4qu
    ad(@ (u2,u3,u4,u5) sunarthsh(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv,u10),u20,higherli
    mit,lowerlimit,u40,lowerlimit,u30,lowerlimit,u50);

function [ret1]=sunarthsh(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv,u10)
s1prime2345=sqrt((p')*Cinv*p);
ret1=fu2u3u4u5(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv).*erfc((u10-
m1prime2345(u2,u3,u4,u5,Cinv))/(sqrt(2)*s1prime2345));

function [ret2]=m1prime2345(u2,u3,u4,u5,Cinv)
ret2=((Cinv*p)')*[u2;u3;u4;u5];
end

function [ret3]=fu2u3u4u5(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv)
ret3=1/sqrt(((2*pi)^4)*det(C_minus))*exp(-0.5*[u2 u3 u4
u5]*Cinv*[u2;u3;u4;u5]);
end
end

%% η τομή του ενδεχομένου g1<gth και g2<th
function [ret4]=AAA(u2,u10,pn)
ret4= fu2(u2).*(1-0.5*erfc((u10-pn*u2)/sqrt(2*(1-pn^2))));
function [ret5]=fu2(u2)
ret5 = (1/sqrt(2*pi)) * exp(-(u2.^2)/2);
end
end
end

```

pout mrc diamond dl.m :

```

function
[ret]=pout_mrc_diamond_dl(r,m_Np,S_Np,C,lowerlimit,higherlimit)

C_minus=C([2,3,4,5],[2,3,4,5]);
p=C([2,3,4,5],1);
Cinv=inv(C_minus);

```

```

pn=C(1,2);
desired_accuracy=1e-15;
%% υπολογισμός u10 u20 u30 u40 u50
if (r>0)
    u10=(reallog(r)-m_Np(1))/(S_Np(1));
    u20=(reallog(r)-m_Np(2))/(S_Np(2));
    u30=(reallog(r)-m_Np(3))/(S_Np(3));
    u40=(reallog(r)-m_Np(4))/(S_Np(4));
    u50=(reallog(r)-m_Np(5))/(S_Np(5));
else
    u10=-1e12;
    u20=-1e12;
    u30=-1e12;
    u40=-1e12;
end
ret=
    1-0.5*erfc(u10/sqrt(2))+1-0.5*erfc(u20/sqrt(2))-
quadl(@ (u2)AAA(u2,u10,pn),lowerlimit,u20,desired_accuracy)+0.5*mrc_4q
uad(@ (u2,u3,u4,u5) sunarthsh(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv,u10),u20,higherl
imit,lowerlimit,lowerlimit,u30,lowerlimit,u40,S_Np,m_Np,r);

function [ret1]=sunarthsh(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv,u10)%υπολογισμός
της συνάρτησης προς τετραπλή ολοκλήρωση
s1prime2345=sqrt((p')*Cinv*p);
ret1=fu2u3u4u5(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv).*erfc((u10-
m1prime2345(u2,u3,u4,u5,Cinv))/(sqrt(2)*s1prime2345));

function [ret2]=m1prime2345(u2,u3,u4,u5,Cinv)%υπολογισμός του
m1/2,3,4,5
ret2=((Cinv*p)')*[u2;u3;u4;u5];
end

function [ret3]=fu2u3u4u5(u2,u3,u4,u5,C_minus,Cinv)
ret3=1/sqrt(((2*pi)^4)*det(C_minus))*exp(-0.5*[u2 u3 u4
u5]*Cinv*[u2;u3;u4;u5]);
end
end

%% η τομή του ενδεχομένου g1<gth και g2<th
function [ret4]=AAA(u2,u10,pn)
ret4= fu2(u2).*(1-0.5*erfc((u10-pn*u2)/sqrt(2*(1-pn^2))));

function [ret5]=fu2(u2)
ret5 = (1/sqrt(2*pi)) * exp(-(u2.^2)/2);
end
end
end

```

sc_4quad.m :

```

function
[ret]=sc_4quad(fun,low1,high1,low2,high2,low3,high3,low4,high4)

dx=0.2;

```

```

dy=dx;
dz=dx;
dv=dx;
I=0;
for x=low4:dx:high4
    for y=low3:dy:high3
        for z=low2:dz:high2
            for v=low1:dv:high1
                s=fun(x,y,z,v);
            S1=s*dy*dz*dv;
            I=I+S1;
                if S1/I<1e-15
                    break;
                end
            end
        end
    end
end
ret=I*dx;

```

mrc 4quad.m :

```

function
[ret]=mrc_4quad(fun,low1,high1,low2,low3,high3,low4,high4,S_Np,m_Np,r
)
dx=0.2;
dy=dx;
dz=dx;
dv=dx;
I=0;
for x=low4:dx:high4
    g3=exp(x*S_Np(3)+m_Np(3));
    r_g3=r-g3;
    r_g3=r_g3.*(r_g3>0);
    ln1=reallog(r_g3);
    high3=(ln1-m_Np(4))/(S_Np(4));
        for y=low3:dy:high3

            g4=exp(y*S_Np(4)+m_Np(4));
            r_g3_g4=r-g3-g4;           %g5=gth-g4-g3
            r_g3_g4=r_g3_g4.*(r_g3_g4>0);
            ln=reallog(r_g3_g4);
            high2=(ln-m_Np(5))/(S_Np(5));
                for z=low2:dz:high2
                    for v=low1:dv:high1
                        s=fun(x,y,z,v);
                    S1=s*dy*dz*dv;
                    I=I+S1;
                        if S1/I<1e-12
                            break;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
ret=I*dx;

```


Βιβλιογραφία

- [1] Μ.Ε. Θεοδόρου , “Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών”, Εκδόσεις Τζιόλα, Κεφάλαιο 2^ο, 2008
- [2] John G. Proakis. Digital Communications. McGraw-Hill, New York: 4th edition 2001
- [3] I. E. Telatar. (1995) Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels, Tech. Rep. Bell Labs, Lucent Technologies. [Online]. Available: <http://mars.bell-labs.com/papers/proof/proof.pdf>
- [4] -----, “Capacity of multi-antenna Gaussian channels” Europ. Trans.Telecommun.,vol. 10, ,Nov.-Dec. 1999
- [5] A. Narula, M. D. Trot, and G. W .Wornell, “Performance limits of coded diversity methods for transmitter antenna arrays, “IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45 Nov. 1999.
- [6] B. Sklar, “Raylight Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization”, IEEE Communications Magazine, pp. 90-100, July 1997.
- [7] Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, “ Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών”, εκδόσεις Παπασωτηρίου, κεφάλαιο 3^ο, Αθήνα 2008
- [8] B. Sklar, “Digital Communications: Fundamentals and Applications”, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1998.
- [9] B. Sklar, “Raylight Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II:Mitigation”, IEEE Communications Magazine, pp. 102-109, July 1997.
- [10] T. S. Rappaport. Wireless Communications. Prentice Hall, 2nd edition, 2002.
- [11] A. Papoulis, “Probability Random Variables and Stochastic Processes”, McGraw-Hill, New York, 1991.
- [12] H. Hashemi, “The indoor radio propagation channel,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 7, pp. 943–968, 1993.
- [13] J. R. Foerster, “The effects of multipath interference on the performance of UWB systems in an indoor wireless channel,” in *Proceedings of the 53rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '01)*, vol. 2, pp. 1176–1180, Rhodes, Greece, May 2001.
- [14] S. S. Ghassemzadeh, R. Jana, C. W. Rice, W. Turin, and V. Tarokh, “Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, pp. 1786–1796, 2004.

- [15] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2nd edition, 2001.
- [16] S. Wei and D. L. Goeckel, "Error statistics for average power measurements in wireless communication systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 9, pp. 1535–1545, 2002.
- [17] Z.Wang, E. K. Tameh, and A. R.Nix, "Joint shadowing process in urban peer-to-peer radio channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 52–64, 2008.
- [18] IEEE 802.16j-06/013r3, "Multi-Hop Relay System Evaluation Methodology," February 2007.
- [19] S. R. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1999.
- [20] Δ. Σκραπαρλής, «Τεχνικές πολλαπλών κεραιών (MIMO) και συνεργατικής διαφορικότητας σε ασύρματες επικοινωνίες», Διδακτορική Διατριβή, κεφάλαιο 2^ο, Αθήνα, Ιούλιος 2009
- [21] Β.Κ. Σακαρέλλος, «Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- [22] D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, "Outage Performance Analysis of Cooperative Diversity with MRC and SC in Correlated Lognormal Channels", *EURASIP Wireless Communications & Networking*, Vol. 2009, Article ID 707839, 2009.
- [23] V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, "Cooperative Diversity Performance in Correlated Lognormal Channels", COST 2100 TD(10)10083 contribution, Athens, Greece, 2010/Febr/3-5, 2010.
- [24] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, G.W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.50, no.12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [25] M. Alouini and M. Simon, "Dual diversity over correlated log-normal fading Channels ", *Communications, IEEE Transactions on*, 2002,50,pp. 1946-1959.
- [26] Takki Yu et al., Proposal for Full Duplex Relay, IEEE C802.16j08/106r4,15/05/2008,available online at: http://wirelessman.org/relay/contrib/C80216j-08_106r4.com.

[27] V. K. Sakarellos, K. Salogiannis, D. Skraparlis and A. D. Panagopoulos, "On the Performance of a Two-Relay Cooperative System in Correlated Lognormal Channels", COST 1004 TD(11)02035 contribution, Lisbon, Portugal, 2011/Oct/18-21.

[28] S.R. Saunders, (1999), Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-98609-7.

[29] S. K. Jayaweera, "Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 5, no. 5, pp. 984–989, May 2006.

[30] S. Szyszkowicz, H. Yanikomeroglu, J. S. Thomson, "On the Feasibility of Wireless Shadowing Correlation Models", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no.9, Nov. 2010.