



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

**Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε
Επίγεια και Εναέρια Κυψελωτά Δίκτυα Νέας Γενιάς**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Π. Ψυχογιός

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

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021



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

Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Επίγεια και Εναέρια Κυβελωτά Δίκτυα Νέας Γενιάς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Π. Ψυχογιός

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27 Σεπτεμβρίου 2021.

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

.....

Κωνσταντίνος Π. Ψυχογιός

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

Copyright © Κωνσταντίνος Π. Ψυχογιός, 2021.

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

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περιγραφή και μελέτη της επίδοσης των συνεργατικών επικοινωνιών και των τεχνικών προώθησης σε επίγεια και εναέρια συστήματα που αφορούν κυψελωτά δίκτυα νέας γενιάς.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς, στις εφαρμογές και οι μελλοντικές προεκτάσεις. Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται αναλυτικά τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά των συνεργατικών δικτύων, τα είδη των επαναληπτών, οι τεχνικές διαφορισμού και τέλος τα πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού.

Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται η μοντελοποίηση των κινητών δορυφορικών καναλιών και παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαλείψεις που υφίστανται ο ασύρματος διάυλος. Επιπλέον παρουσιάζονται οι βασικές κατανομές καθώς επίσης τα μοντέλα μονής κατάστασης και πολλαπλών καταστάσεων τα οποία περιγράφουν την συμπεριφορά των μεταβολών του λαμβανόμενου πλάτους του σήματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση της επίδοσης ενός συστημικού μοντέλου συνεργατικού διαφορισμού που χρησιμοποιεί έναν επίγειο αναγεννητικό επαναλήπτη και αναλύονται οι πιθανότητες αποκοπής του συστήματος τόσο για το συνεργατικό πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης όσο και για το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης. Το συνεργατικό σύστημα για κάθε πρωτόκολλο συγκρίνεται με την απευθείας ζεύξη λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικούς παραμέτρους των συνθηκών σκίασης και των γωνιών ανύψωσης.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και η ανάλυση της επίδοσης δυο συνεργατικών συστημάτων με δυο επαναλήπτες σε τοπολογία διαμαντιού και ρόμβου. και αναλύονται οι πιθανότητες αποκοπής του συστήματος τόσο για το πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης όσο και για το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης. Τα συνεργατικά συστήματα συγκρίνονται με την απευθείας ζεύξη αλλά και μεταξύ τους λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικούς παραμέτρους των συνθηκών σκίασης. Τέλος στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται νέες ιδέες και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και μελέτη.

Λέξεις Κλειδιά

Συνεργατικές επικοινωνίες, τεχνικές συνεργατικού διαφορισμού, πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού, πιθανότητα αποκοπής, επίδοση συστήματος, μη επίγειες επικοινωνίες, δορυφορικές επικοινωνίες, 5G, 6G, μη επανδρωμένα αεροσκάφη

Abstract

The subject of this thesis is the study and presentation of the performance of cooperative communication systems and radio relay techniques in terrestrial and aerial systems related to new generation cellular networks.

In the 1st Chapter a brief Introduction to the wireless communication systems and more specifically to the cooperative communication system is done. The 2nd Chapter is devoted to the general characteristics of the cooperative diversity networks, the types of repeaters, the diversity reception techniques and the cooperative diversity protocols. They are presented and analyzed in detail.

In the 3rd Chapter, the most known channel models for fading for the Land mobile satellite slant paths are presented. In addition, the basic statistical distributions as well as the single-state and multi-state models are presented, which describe the behavior of the changes concerning the received signal amplitude.

In the 4th Chapter the performance of a cooperative diversity system using a terrestrial regenerative repeater is studied. The outage probabilities for both Fixed Relaying and Selection Relaying protocols, are presented and analyzed. The cooperative system is compared for each protocol to the direct link taking into account various parameters of shadowing conditions and elevation angles.

In the 5th Chapter the performance of two cooperative systems with two repeaters in diamond and rhombus topologies are presented. The outage probabilities for both Fixed Relaying and Selection Relaying protocols, are presented and analyzed. The cooperative systems are compared for each protocol with the direct link but also with each other taking into account various parameters of the shadowing conditions. Finally, new ideas for further research and studies are presented in Chapter 6th.

Key Words

Cooperative radio communications, cooperative diversity techniques, cooperative diversity protocols, outage probability, system performance, non-terrestrial communications, satellite communications, 5G, 6G, unmanned aerial vehicles

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω και να περατώσω την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς επίσης και την ευκαιρία να ασχοληθώ εκτενέστερα με τις ασύρματες επικοινωνίες. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την συνεχή καθοδήγηση του καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Παναγιώτη και Χαρούλα και τα αδέρφια μου Νίκο και Δώρα για την πλήρη συμπαράσταση και υποστήριξη τους, ηθική και υλική καθ' όλο το διάστημα των σπουδών μου καθώς και για την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια. Μαζί με αυτούς θα ήθελα να ευχαριστήσω και αυτούς που είναι στο πλευρό μου κάθε στιγμή, τους φίλους μου, Γιώργο, Γιάννη, Δημήτρη, Αλέξανδρο, Στάθη, Μαριγιάννα, Μαίρη, Νικόλ, Όλγα.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγικό Κεφάλαιο	13
1.1. Εισαγωγή	13
2. Τεχνικές και Στρατηγικές Συνεργατικού Διαφορισμού	21
2.1. Συνεργατικός Διαφορισμός	21
2.2. Είδη επαναληπτών	23
2.3. Τεχνικές διαφορικής λήψης	25
2.4. Πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού	27
2.5. Επίδοση πρωτόκολλων συνεργατικού διαφορισμού	28
2.5.1. Απευθείας ζεύξη	29
2.5.2. Πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης	30
2.5.3. Πρωτόκολλο επιλεγόμενης επανάληψης	31
2.5.4. Πρωτόκολλο αυξανόμενης επανάληψης	33
2.5.5. Σύγκριση πιθανοτήτων αποκοπής	34
3. Μοντελοποίηση κινητών δορυφορικών καναλιών	37
3.1. Εισαγωγή	37
3.2. Κινητά Δορυφορικά Κανάλια	37
3.2.1. Απόσβεση λόγω βροχής	38
3.2.2. Διαλείψεις λόγω σκίασης	41
3.2.3. Διαλείψεις λόγω πολυόδευσης (multipath)	43
3.2.4. Μοντέλα μονής Κατάστασης	45
3.2.5. Μοντέλα πολλαπλών καταστάσεων	49
4. Ανάλυση συνεργατικού δορυφορικού και επίγειου συστήματος με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη	51
4.1. Εισαγωγή	51
4.2. Μοντελοποίηση του συστήματος	51
4.3. Φασματική απόδοση των σχημάτων TDMA/FDMA και SDMA	52
4.4. Ανάλυση πιθανοτήτων αποκοπής	53

4.4.1. Πρωτόκολλο Fixed Relaying(FR)	53
4.4.2. Πρωτόκολλο Selection Relaying(SR)	54
4.5. Προσομοίωση, αποτελέσματα και σχολιασμός	55
4.6. Συμπεράσματα	61
5. Ανάλυση συνεργατικού συστήματος με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες σε περιβάλλον με ασυσχέτιστες διαλείψεις σκίασης	63
5.1. Εισαγωγή	63
5.2. Συνεργατικό Σύστημα τοπολογίας ρόμβου	64
5.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος	64
5.2.2. Ανάλυση πιθανοτήτων αποκοπής	65
5.2.3. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός	67
5.3. Συνεργατικό Σύστημα τοπολογίας διαμαντιού	71
5.3.1. Μοντελοποίηση του συστήματος	71
5.3.2. Ανάλυση πιθανοτήτων αποκοπής	72
5.3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός	75
5.4. Σύγκριση των τοπολογιών ρόμβου και διαμαντιού του συνεργατικού συστήματος με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες	80
6. Προοπτικές για μελλοντική έρευνα	83
Βιβλιογραφία	85

1. Εισαγωγικό Κεφάλαιο

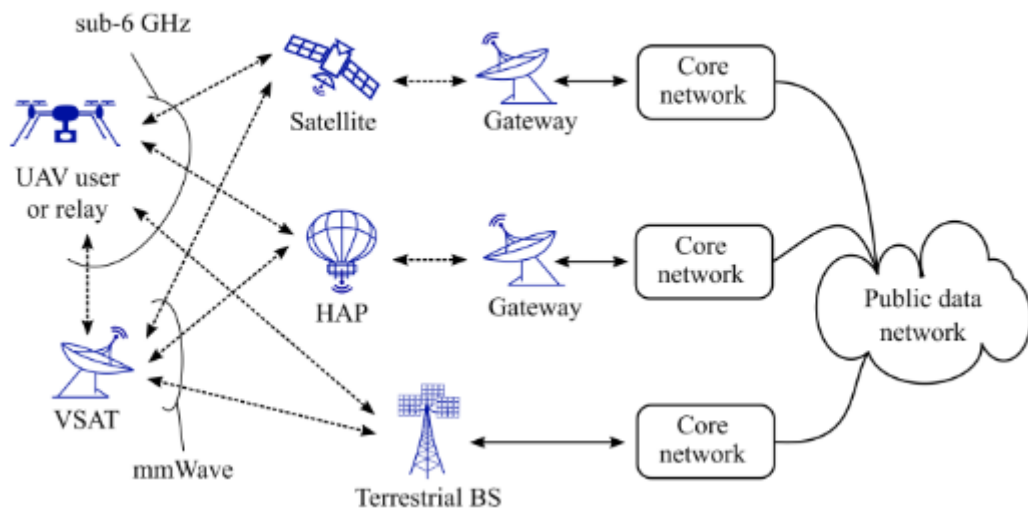
1.1. Εισαγωγή

Η ολοένα και αυξανόμενη χρησιμοποίηση των κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας στην σημερινή εποχή προσφέροντας σύγχρονες υπηρεσίες σε κινητούς χρήστες, έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη της ορθής διαχείρισης της χωρητικότητας του δικτύου, την αποτελεσματική χρήση του φάσματος, την βελτίωση της κάλυψης καθώς και της ποιότητας των απαιτούμενων συνδέσεων. Τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα θα χαρακτηρίζονται από πυκνές τοπολογίες και ποικίλες υπηρεσίες, που κυμαίνονται από εφαρμογές πολυμέσων υψηλής απόδοσης έως εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες για εφαρμογές Διαδικτύου των Αντικειμένων (Internet of Things - IoT).

Ξεκινώντας από το 4G-LTE, όπου παρείχε την κάλυψη της επικοινωνίας καθώς και την ενσωμάτωση των υπηρεσιών νέφους (cloud support), οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη και αποθήκευση δεδομένων ενώ επίσης και για παροχή υπηρεσιών στους κινητούς χρήστες (μέσα κοινωνικής δικτύωσης, βίντεο on demand, ανταλλαγή άμεσων μηνυμάτων), οι πρόσφατα αναδυόμενες υπηρεσίες 5G και εν συνεχεία του 6G, θα απαιτούν λύσεις πιο απαιτητικές σε σχέση με την προηγούμενη αρχιτεκτονική, αυτές της πανταχού διαθεσιμότητας της απαιτούμενης κάλυψης και χωρητικότητας του δικτύου, της επεκτασιμότητας των υπηρεσιών καθώς επίσης των καταστάσεων συμφόρησης. Και αν προηγουμένως τα επίγεια συστήματα (terrestrial systems) παρείχαν ικανοποιητική κάλυψη υπηρεσιών, τώρα δεν θα ισχύει το ίδιο τόσο στις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές όσο και στις περιοχές με δύσκολο γεωγραφικό περιβάλλον. Ενώ το 5G καταλαμβάνει την ζώνη χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (ζώνες συχνοτήτων πάνω από 30GHz) στις μπάντες Ka και μελλοντικά στην μπάντα W(70/90 GHz), η προσοχή των ερευνητών στρέφεται ήδη σε συχνότητες επιπέδου THz (100GHz–10THz) [1] όπου θα λάβει χώρα το 6G. Λόγω της μειωμένης περίθλασης οι επικοινωνίες επιπέδου THz οδηγούνται σε κανάλια Οπτικής επαφής (Line of Sight-LoS), το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Unmanned Aerial Vehicles-UAVs), σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης όπως οι ζευξείς ενός backhaul δικτύου όπου τα UAVs θα παίζουν τον ρόλο των Σταθμών Βάσης (Base Stations-BSs) [2]. Ωστόσο η κατανόηση των φαινομένων διάδοσης σε συχνότητες THz είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο καθώς δεν έχουν γίνει μετρήσεις και δεν υπάρχουν αξιόπιστα μοντέλα των καναλιών διάδοσης [3].

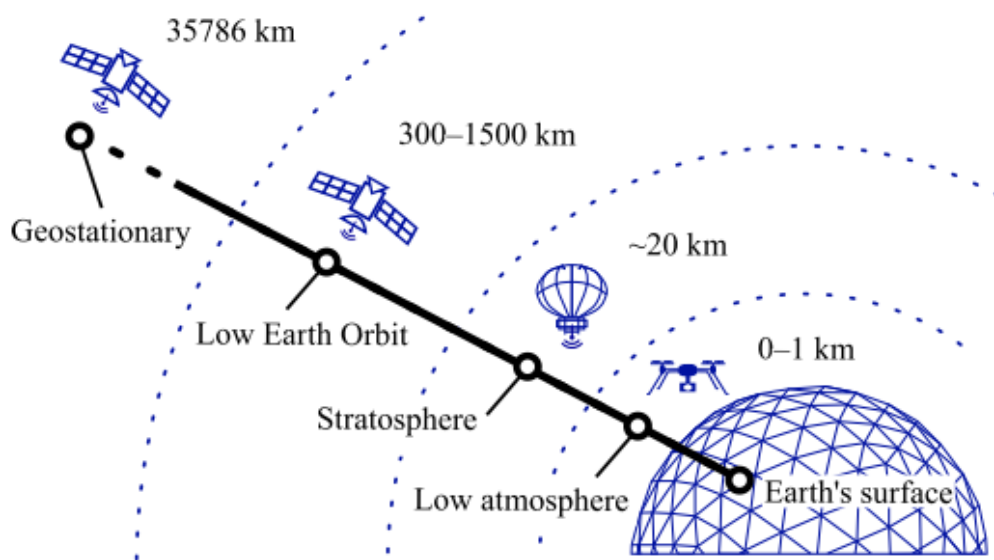
Τελευταία, στα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται οι τεχνικές συνεργατικού διαφορισμού (cooperative diversity techniques), όπου ο τελικός χρήστης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος μέσω συνεργατικών επαναληπτών και τις συνδυάζει δημιουργώντας το τελικό λαμβανόμενο σήμα. Οι συνεργατικές τεχνικές επικοινωνίας έχουν τις ρίζες τους στη θεωρία της πληροφορίας και αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της επίδοσης και της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, όπως π.χ. στην αύξηση της διαθεσιμότητας ή της ραδιοκάλυψης. Οι τεχνικές αυτές έχουν προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια, καθώς αυξάνουν σημαντικά την επίδοση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και καταφέρνουν να δώσουν λύσεις σε σύγχρονα προβλήματα που αφορούν τις αυξημένες διαλείψεις ενός καναλιού και τη βέλτιστη χρήση των πόρων ενός συστήματος, όπως είναι το φάσμα και η ισχύς. Τα συστήματα συνεργατικού διαφορισμού αποτελούνται από πολλαπλούς κόμβους/χρήστες οι οποίοι μοιράζονται τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους του συστήματος (φάσμα, κεραίες, ισχύς) δημιουργώντας πολλαπλά κανάλια διαφορισμού, που γενικά υποφέρουν από διαλείψεις. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ένα συνεργατικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εικονικό σύστημα MIMO (Πολλαπλής Εισόδου/Πολλαπλής Εξόδου–Multiple Input/Multiple Output), όπου κάθε κόμβος του συνεργατικού συστήματος παίζει το ρόλο μιας κεραίας ενός εικονικού συστήματος MIMO.

Τα δίκτυα νέας γενιάς θα εκμεταλλεύονται τις δορυφορικές, εναέριες και επίγειες πλατφόρμες από κοινού και με χρήση των συνεργατικών τεχνικών διαφορισμού θα προσπαθούν να βελτιώνουν τη διαθεσιμότητα και τη κάλυψη. Μια σύνοψη των παραπάνω συστημάτων που υλοποιούν ένα ολοκληρωμένο συνεργατικό δίκτυο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Επιπλέον θα υποστηρίζονται υπηρεσίες σύννεφου αιχμής και θα ενσωματώνονται έξυπνοι κόμβοι με τεχνητή νοημοσύνη σε εναέριες πλατφόρμες UAVs αλλά και σε δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit satellites – LEO sats), όπου το κάθε μέσο βρίσκεται σε διαφορετικά υψόμετρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, το οποίο του προσδίδει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.



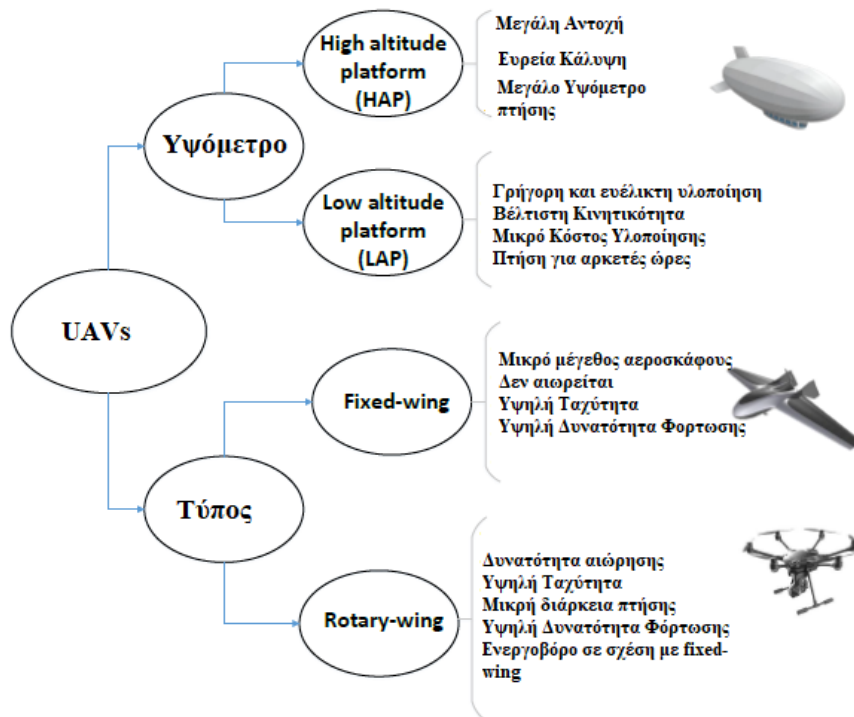
Σχήμα 1.1 Πιθανή γεωμετρική αρχιτεκτονική ενός ολοκληρωμένου συνεργατικού επίγειου-εναέριου-δορυφορικού δικτύου[4]

Τα δορυφορικά συστήματα μπορούν να παρέχουν πολύ μεγάλη κάλυψη λόγω του ύψους όπου βρίσκονται και διακρίνονται σε δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit-LEO), σε δορυφόρους ενδιάμεσης τροχιάς (Medium Earth Orbit-MEO) και σε γεωστατικούς δορυφόρους (Geostationary Earth Orbit- GEO). Στο πλαίσιο της συνεργασίας επίγειων και δορυφορικών συστημάτων πολλά ερευνητικά προγράμματα έχουν ασχοληθεί με την συνεργασία επίγειων και δορυφορικών δικτύων χαμηλής τροχιάς (LEO). Η επιλογή των LEO βασίζεται κυρίως στο χαμηλό κόστος παραγωγής και εκτόξευσης καθώς και στην σχετικά μικρή καθυστέρηση της επικοινωνίας (η καθυστέρηση μιας διαδρομής είναι περίπου 15ms) [5].



Σχήμα 1.2 Οι δορυφορικές και εναέριας πλατφόρμες τοποθετημένες στα υψόμετρα υλοποίησής τους.[4]

Σε χαμηλότερο υψόμετρο από τα δορυφορικά συστήματα λαμβάνουν χώρα τα UAVs τα οποία ανάλογα με την εφαρμογή και τον σκοπό υιοθετούν διαφορετικές απαιτήσεις που επιβάλλονται από την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών(Quality of Service-QoS), την φύση του περιβάλλοντος και τους νόμους της χώρας. Τα UAVs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το υψόμετρο και σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους. Ανάλογα με το υψόμετρο χωρίζονται στις πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου(High Altitude Platforms-HAPs) και στις πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου(Low Altitude Platforms-LAPs) [6]. Οι HAPs πετάνε σε υψόμετρο περίπου 17-20km σε αντίθεση με τα LAPs όπου πετάνε σε υψόμετρο από μερικές δεκάδες μέτρα έως 2km αναλόγως φυσικά και ισχύουσα νομοθεσία της κάθε χώρας. Σύμφωνα με τον τύπο τα UAVs χωρίζονται σε σταθερής πτέρυγας(Fixed-wing) και κινούμενης πτέρυγας(Rotary-wing). Στο Σχήμα 1.3 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας που αναφέραμε παραπάνω. Τα UAVs παρέχουν ευρεία κάλυψη περιοχής με πλεονεκτήματα έναντι των δορυφορικών συστημάτων στο πλαίσιο του κόστους, της ευκολίας ανάπτυξης του συστήματος, του μεγαλύτερου βάρους φόρτωσης, της μικρότερης καθυστέρησης καθώς και της εξασθένησης του σήματος.

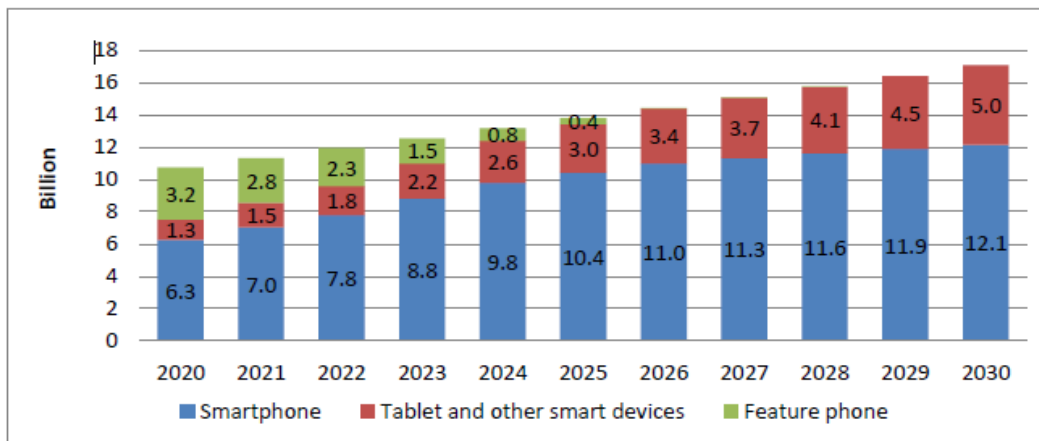


Σχήμα 1.3 Κατηγοριοποίηση των UAVs ανάλογα με το υψόμετρο πτήσης και τον τύπο του αεροσκάφους [6].

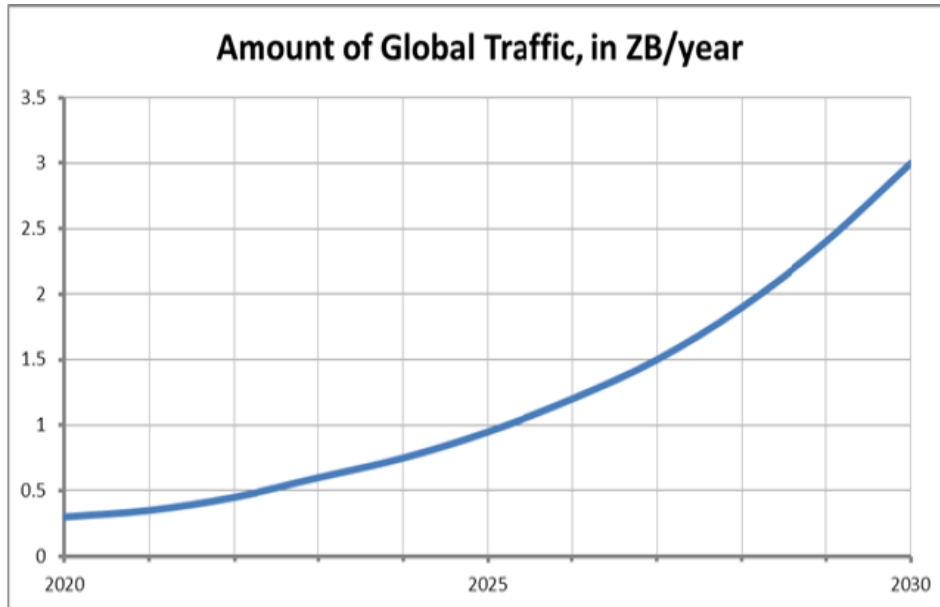
Η χρήση εναέριων δικτύων συνολικά προσδίδουν πλεονέκτημα έναντι των επίγειων σε τρεις τομείς, το υψηλό υψόμετρο, την υψηλή πιθανότητα Line of Sight (LOS) επικοινωνίας και την ικανότητα κινητικότητας. Στα επίγεια δίκτυα το τυπικό ύψος της κεραίας ενός σταθμού βάσης είναι 10-25m ενώ στα αντίστοιχα εναέρια το ύψος των σταθμών βάσης η των επαναληπτών βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη επίγεια κάλυψη. Το υψηλό υψόμετρο των εναέριων συστημάτων υιοθετεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά τα κανάλια επικοινωνίας αέρα-εδάφους σε σύγκριση με τα κανάλια επικοινωνίας των επίγειων συστημάτων. Συγκρίνοντας τα με τα επίγεια κανάλια τα οποία υποφέρουν από ισχυρές απώλειες διαδρομής (path loss) εξαιτίας της σκίασης (shadowing) αλλά και λόγω των φαινομένων της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), τα κανάλια αέρα-εδάφους αντιμετωπίζουν περιορισμένα φαινόμενα σκέδασης με αποτέλεσμα να επικρατεί κυρίως η LOS ζεύξη με μεγάλη πιθανότητα. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση αυτά τα δίκτυα είναι πιο ευαίσθητα σε παρεμβολές καθώς και υποκλοπές από κακόβουλους επίγειους δέκτες, επομένως εισάγεται ένα ακόμα θέμα ασφαλείας στο φυσικό

στρώμα της ζεύξης [7]. Επιπλέον η υψηλή κινητικότητα των εναέριων συστημάτων σε σύγκριση με τα σταθερά επίγεια μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των επικοινωνιών, αφού μπορούν να μετακινηθούν με μεγάλη ταχύτητα στον χώρο ανάλογα με την ζήτηση της κάθε περιοχής. Σε αντίθεση όμως με τα επίγεια δίκτυα επικοινωνίας όπου οι σταθμοί βάσης και οι επαναλήπτες καταναλώνουν σταθερή ισχύ, η χρήση UAVs και η συνεχής κινητικότητα τους θέτει κρίσιμα όρια στην αντοχή τους και στην ικανότητα επικοινωνίας. Αυτό συμβαίνει γιατί πέρα από την συμβατική κατανάλωση ενέργειας των πομποδεκτών, απαιτείται ενέργεια ώστε να διατηρούν το ύψος τους, την θέση τους, καθώς και να κινούνται στον αέρα ανάλογα με τον εκάστοτε σενάριο ζήτησης [8], [9].

Σύμφωνα με την ITU κάθε χρόνο όλο και περισσότεροι χρήστες συμμετέχουν στις επικοινωνίες μηχανής με μηχανή (machine to machine -M2M) [10] όπως μαρτυρά και το Σχήμα 1.4 αυξάνοντας δραματικά την μηνιαία κίνηση, η οποία από το 2020 έως το 2030 φαίνεται να αυξάνεται περίπου 54% ετησίως [10]. Αυτό φυσικά έχει τεράστιο αντίκτυπο στην χωρητικότητα του δικτύου η οποία φαίνεται να ακολουθεί και αυτή την ίδια πορεία. Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται μια εκτίμηση της παγκόσμιας αύξησης της χωρητικότητας σε Zettabyte (ZB) ανά χρονιά.

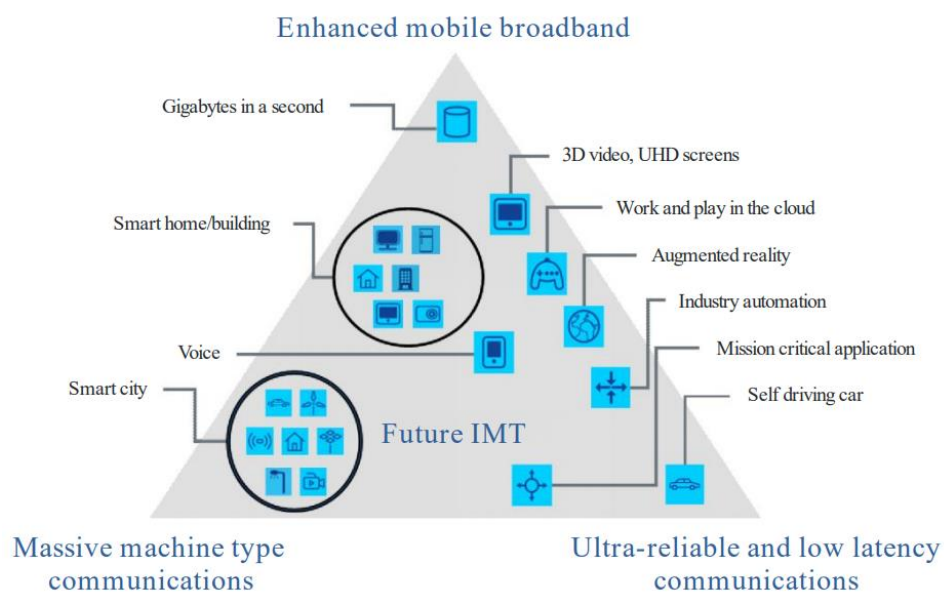


Σχήμα 1.4 Εκτίμηση των κινητών συνδρομητών παγκοσμίως για διαφορετικές κατηγορίες συσκευών [10]



Σχήμα 1.5 Εκτίμηση της παγκόσμιας ετήσιας αύξησης της χωρητικότητας σε ZB [10]

Αυτή την μεγάλη έκρηξη των συνδρομητών και της χωρητικότητας που απαιτείται στο δίκτυο, ενώ επίσης και νέες απαιτητικές εφαρμογές διαφορετικών απαιτήσεων καλείται να καλύψει το 5G και στην συνέχεια το 6G. Σε συνεργασία με τα UAVs, CubeSats και LEO sats τα οποία θα παρέχουν την απαιτούμενη ραδιοκάλυψη, καθώς επίσης και αύξηση της διαθεσιμότητας των επικοινωνιών η νέες γενιές δικτύων θα παρέχουν βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση, εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης εφαρμογές και μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής. Τα παραπάνω σενάρια χρήσης των Παγκόσμιων Κινητών Τηλεπικοινωνιών (International Mobile Telecommunications-IMT) αποτυπώνονται από την ITU στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Σενάρια χρήσης των IMT για την τεχνολογία 5G και 6G [10].

2. Τεχνικές και Στρατηγικές Συνεργατικού Διαφορισμού

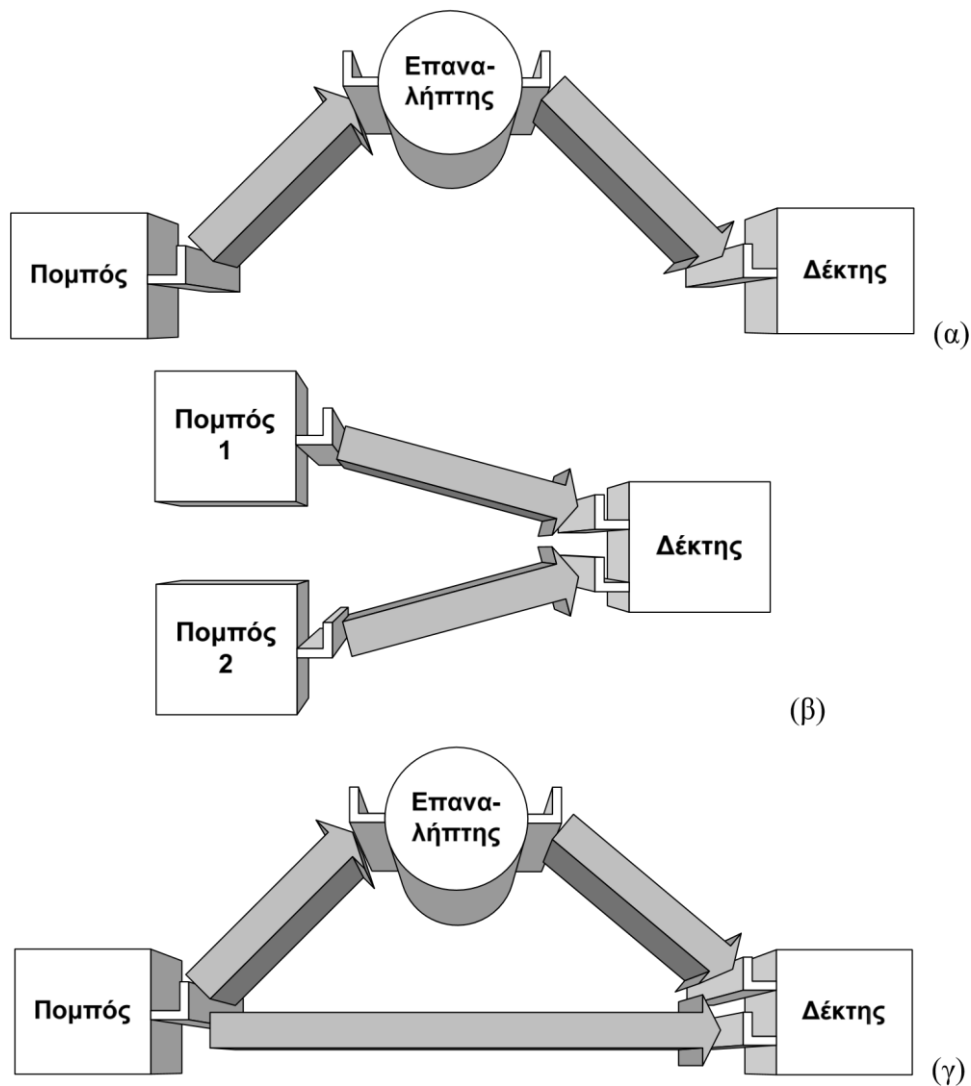
2.1. Συνεργατικός Διαφορισμός

Τα τελευταία χρόνια στα ασύρματα δίκτυα για να δοθεί λύση στα προβλήματα των διαλείψεων ενός καναλιού, της βέλτιστης χρήσης των πόρων (φάσμα, χωρητικότητα, ισχύς), χρησιμοποιούνται οι τεχνικές συνεργατικού διαφορισμού (cooperative diversity techniques) [11]. Αναφερόμαστε στο συνεργατικό διαφορισμό διότι τα εκάστοτε τερματικά μοιράζονται τις κεραιές τους και άλλους πόρους για να υλοποιήσουν μια εικονική συστοιχία δια μέσου της κατανεμημένης μετάδοσης της πληροφορίας καθώς και της επεξεργασίας σήματος. Ο χρήστης στον τελικό προορισμό λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος το οποίο εστάλη από την πηγή μέσω συνεργατικών επαναληπτών, τα συνδυάζει με τεχνικές διαφορικής λήψης και δημιουργεί το τελικό λαμβανόμενο σήμα. Επομένως η αναμετάδοση της πληροφορίας στον συνεργατικό διαφορισμό ουσιαστικά δημιουργεί μια εικονική συστοιχία κεραιών, η οποία λειτουργεί ως ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών η ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (multiple-input, multiple-output -MIMO).

Για την ανάλυση των συστημάτων συνεργατικού διαφορισμού πρέπει να θεωρήσουμε ότι το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από πολλαπλούς κόμβους οι οποίοι μοιράζονται μέρος των διαθέσιμων πόρων τους ώστε να βοηθήσουν την αναμετάδοση της πληροφορίας των υπόλοιπων ζεύξεων. Κατά τον σχεδιασμό των συνεργατικών συστημάτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι διαλείψεις των καναλιών του συστήματος, είτε είναι συσχετισμένες είτε ασυσχέτιστες, σε συνδυασμό με τα μεγέθη που περιγράφουν την επίδοση του συστήματος. Επομένως θα πρέπει να επιλεγούν κατάλληλα ο αριθμός των κόμβων καθώς και η θέση τους, ο τρόπος της επεξεργασίας του σήματος στον κάθε κόμβο, η εκπεμπόμενη ισχύς του κάθε κόμβου, το εύρος του φάσματος, τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης, τα πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού, τις συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης του σήματος, τον τύπο των κεραιών και την κατευθυντικότητα τους όπως επίσης και την ύπαρξη ενδοσυστημικών παρεμβολών. Στην συνέχεια για να επιλυθούν τα ζητήματα σχεδίασης θα πρέπει να μελετηθεί, το πως επηρεάζουν οι παραπάνω σχεδιαστικές επιλογές του συστήματος, τα μεγέθη που περιγράφουν την επίδοση του συστήματος όπως είναι η πιθανότητα αποκοπής, ο ρυθμός εσφαλμένου ψηφίου (Bit Error Ratio-BER), ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal to Noise Ratio-SNR) στην είσοδο του κάθε κόμβου, ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος του συστήματος, η φασματική απόδοση (spectral efficiency- R) καθώς και την πληροφορία κατάστασης καναλιού (Channel State Information-

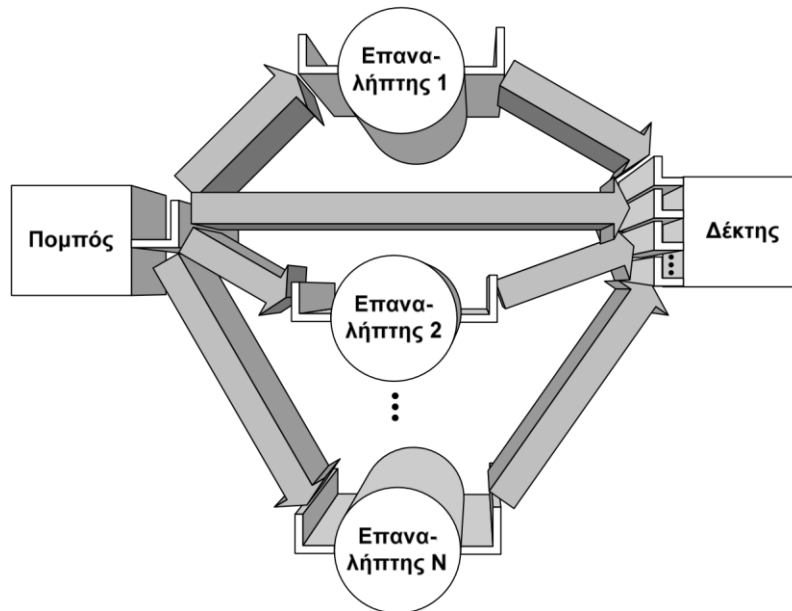
CSI). Επιπλέον είναι σημαντικό να ποσοτικοποιείται το κέρδος του εκάστοτε συνεργατικού συστήματος ανάλογα με τον προσδιορισμό των παραπάνω παραμέτρων που αναφέρθηκαν.

Η ιστορία της συνεργατικής επικοινωνίας βρίσκει τις ρίζες της στην πρωτοποριακή για την εποχή μελέτη του Van der Meulen ο οποίος εισήγαγε την έννοια του καναλιού αναμετάδοσης με ένα σύστημα που αποτελείται από την πηγή, τον προορισμό και τον επαναλήπτη [12]. Επιπλέον βασικά εργαλεία σύνθεσης πολύπλοκων συνεργατικών συστημάτων είναι το σύστημα διαφορικής λήψης [13], το απλό σύστημα με επαναλήπτη που περιλαμβάνει και την απευθείας ζεύξη [11] όπως φαίνονται αντιστοίχως στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Βασικές μικροαρχιτεκτονικές συνεργατικών συστημάτων: (α) απλό σύστημα με επαναλήπτη χωρίς την απευθείας ζεύξη, (β) σύστημα διαφορικής λήψης και (γ) στοιχειώδες συνεργατικό σύστημα [14].

Επιπλέον στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ένα πιο γενικό παράδειγμα συνεργατικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει την απευθείας ζεύξη καθώς και N παράλληλους επαναλήπτες οι οποίοι επανεκπέμπουν ταυτόχρονα το λαμβανόμενο σήμα προς τον δέκτη [14] ενώ στο Σχήμα 2.3 ένα γενικό παράδειγμα πολυβηματικού (multihop) συνεργατικού συστήματος με N επαναλήπτες τοποθετημένους σε σειρά.



Σχήμα 2.2: Σύστημα συνεργατικού διαφορισμού με N επαναλήπτες [14].

2.2. Είδη επαναληπτών

Οι παραπάνω βασικές μικροαρχιτεκτονικές συνεργατικών συστημάτων αποτελούνται από επαναλήπτες των οποίων τα κυριότερα είδη είναι οι αναγεννητικοί (regenerative) και οι μη-αναγεννητικοί (non-regenerative) επαναλήπτες.

Στους αναγεννητικούς επαναλήπτες χρησιμοποιείται η τεχνική της αποκωδικοποίησης και προώθησης (decode and forward -DF) κατά την οποία το λαμβανόμενο σήμα αποδιαμορφώνεται και αποκωδικοποιείται και στην συνέχεια αναδημιουργείται με διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Στην περίπτωση όπου υπάρχει αρκετή υπολογιστική ισχύ στον κόμβο του επαναλήπτη είναι ικανό να εφαρμοστεί κάποιος κώδικας διόρθωσης λαθών ώστε να βοηθήσει στην διόρθωση των λανθασμένων ψηφίων και το αναδιαμορφωμένο σήμα να επανεκπεμφθεί πλέον χωρίς λάθη στο επόμενο βήμα της ζεύξης.

Σε αυτό το σύστημα ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος δεν έχει υπόσταση αφού το σήμα αναγεννιέται και επανεκπέμπεται σε κάθε βήμα. Για αυτό το λόγο ορίζεται ένας ισοδύναμος σηματοθορυβικός που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής του συστήματος [15].

Ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος CNR_{reg} για ένα σύστημα με N αναγεννητικούς επαναλήπτες τοποθετημένους σε σειρά δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{reg} = \min(CNR_1, CNR_2, \dots, CNR_N, CNR_{N+1}) \quad (1.1)$$

Στον προηγούμενο τύπο, CNR_j είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του επαναλήπτη j ($j=1,2,\dots,N$) και αφορά το j -οστό βήμα, ενώ ο λόγος CNR_{N+1} αναφέρεται στο βήμα από το N -οστό επαναλήπτη μέχρι την είσοδο του τελικού δέκτη [14].

Στους μη αναγεννητικούς επαναλήπτες χρησιμοποιείται η τεχνική της ενίσχυσης και προώθησης (amplify and forward-AF). Όπως υποδηλώνει και το όνομα ο επαναλήπτης ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα και το προωθεί στο επόμενο βήμα της ζεύξης. Αυτή η τεχνική προτάθηκε από τους N. J. Laneman και G. W. Wornell, και είναι ιδανική για επαναλήπτες με ελάχιστη υπολογιστική ισχύ [16]. Ωστόσο το βασικό μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι μαζί με το σήμα πληροφορίας ενισχύεται και ο θόρυβος και επανεκπέμπεται στο επόμενο βήμα της ζεύξης.

Οι μη-αναγεννητικοί επαναλήπτες χωρίζονται στους επαναλήπτες με μεταβλητό κέρδος (adaptive gain) και στους επαναλήπτες σταθερού κέρδους (fixed gain). Όταν χρησιμοποιούμε έναν επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους το κέρδος του επαναλήπτη κυμαίνεται τόσο όσο η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς να παραμένει σταθερή. Ένας απλός επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους κάνει εκτίμηση του συνδυασμού της απόσβεσης του πρώτου καναλιού και του θορύβου και ενισχύει το σήμα που λαμβάνει στην είσοδό του χωρίς να ξεχωρίζει το σήμα πληροφορίας από το θόρυβο. Επομένως, η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς, δηλαδή το άθροισμα των ισχύων του σήματος και του θορύβου ενισχυμένο από τον επαναλήπτη, παραμένει σταθερή. Αντίθετα, ένας πιο σύνθετος επαναλήπτης μπορεί να εκτιμήσει την ακριβή απόσβεση του πρώτου καναλιού και να την αντισταθμίσει, μεταβάλλοντας κατάλληλα το κέρδος του, με αποτέλεσμα η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας να παραμένει σταθερή [15].

Όταν χρησιμοποιούμε έναν επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους αυτός ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα με ένα σταθερό κέρδος. Αυτή η τεχνική οδηγεί σε μικρότερη πολυπλοκότητα του συστήματος σε σχέση με έναν επαναλήπτη με μεταβλητό κέρδος αλλά έχει ως μειονέκτημα ότι η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας δεν είναι πλέον σταθερή αλλά κυμαίνεται. Όταν ο επαναλήπτης δεν μπορεί να αντισταθμίσει την απόσβεση του πρώτου βήματος και ο ενισχυτής λειτουργεί στην γραμμική περιοχή η ισχύς εκπομπής του μειώνεται όσο είναι η απόσβεση του πρώτου βήματος. Εάν ο επαναλήπτης βρίσκεται κοντά στην πηγή και η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ο επαναλήπτης είναι πολύ μεγάλη

τότε η εκπεμπόμενη ισχύς του ενισχυτή οδηγείται στην περιοχή του κόρου έτσι ο επαναλήπτης περιορίζει την ισχύ εκπομπής του και λειτουργεί πλέον ως επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους για να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα.

Ο συνολικός (end-to-end) σηματοθορυβικός λόγος ενός επιγείου συστήματος με ένα μη-αναγεννητικό επαναλήπτη έχει υπολογιστεί στη δημοσίευση [15]. Για ένα σύστημα με N μη αναγεννητικούς επαναλήπτες τοποθετημένους σε σειρά ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος, εκφρασμένος σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB, δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{non-reg}^{-1} = CNR_1^{-1} + CNR_2^{-1} + \dots + CNR_N^{-1} + CNR_{N+1}^{-1} \quad (2.2)$$

Στον προηγούμενο τύπο, CNR_j είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του επαναλήπτη j ($j=1,2,\dots,N$), που αφορά το j -οστό βήμα και CNR_{N+1} είναι ο σηματοθορυβικός λόγος του $(N+1)$ -οστού βήματος, δηλαδή από το N -οστό επαναλήπτη μέχρι την είσοδο του τελικού δέκτη.

2.3. Τεχνικές διαφορικής λήψης

Όπως είδαμε και στις προηγούμενες παραγράφους ένα σύστημα διαφορικής λήψης λαμβάνει στον προορισμό του πολλαπλές εκδοχές του σήματος πληροφορίας που είχε αποσταλεί από την πηγή. Για να παραχθεί το τελικό λαμβανόμενο σήμα συνδυάζονται οι πολλαπλές εκδοχές του σήματος πληροφορίας χρησιμοποιώντας συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης. Οι βασικές συνδυαστικές τεχνικές είναι ο Συνδυασμός με Εναλλαγή (Switched Combining – SWC) ή Συνδυασμός με Σάρωση (Scanning Combining – SC), ο Συνδυασμός με Επιλογή (Selection Combining - SC), ο Συνδυασμός Μεγίστου Λόγου (Maximal Ratio Combining - MRC) και ο Συνδυασμός Ίσων Κερδών (Equal Gain Combining - EGC)[13], [17].

Η τεχνική SWC είναι μια τεχνική εναλλαγής κατά την οποία ο δέκτης σαρώνει τα κανάλια σύμφωνα με μια προκαθορισμένη ακολουθία και επιλέγει το σήμα του οποίου ο σηματοθορυβικός λόγος υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Στην συνέχεια χρησιμοποιεί μόνο αυτό το σήμα έως ότου ο σηματοθορυβικός λόγος πέσει κάτω από το κατώφλι, όπου και συνεχίζει την σάρωση στο ίδιο μοτίβο, με προηγουμένως, έως ότου βρει το επόμενο σήμα που πληροί το κριτήριο. Για ένα σύστημα που λαμβάνει N διαφορετικά σήματα με σηματοθορυβικούς λόγους CNR_j ($j=1,2,\dots,N$) και CNR_T το κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου, ο τελικός σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{swc} = CNR_j \text{ όταν } CNR_j > CNR_T \quad (2.1)$$

Η τεχνική SC είναι και αυτή μια τεχνική εναλλαγής αλλά πιο εξελιγμένης μορφής. Σε αυτή την περίπτωση σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ο δέκτης επιλέγει τον καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο από τα λαμβανόμενα σήματα ή ισοδύναμα στην περίπτωση που θεωρήσουμε ίδια και ίση ισχύ θορύβου ανάμεσα στα αντίγραφα ο δέκτης επιλέγει το αντίγραφο με το υψηλότερο πλάτος καναλιού. Για ζεύξεις όπου έχουμε συνεχή μετάδοση αυτή η τεχνική δεν είναι πρακτική αφού θα πρέπει να γίνεται συνεχώς παρακολούθηση όλων των σηματοθορυβικών λόγων όλων των κλάδων του συστήματος. Τελικά ο σηματοθορυβικός λόγος του τελικού σήματος δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{SC} = \max(CNR_1, CNR_2, \dots, CNR_N) \quad (2.2)$$

Στην τεχνική MRC ο κάθε κλάδος διαφορισμού του συστήματος σταθμίζεται ανάλογα με τα αντίστοιχα σύνθετα κέρδη εξασθένησης και στην συνέχεια συνδυάζονται με σύμφωνο τρόπο (coherently). Ο σηματοθορυβικός λόγος του τελικού σήματος που προκύπτει, ισούται με το άθροισμα των σηματοθορυβικών λόγων των λαμβανόμενων σημάτων, όταν αυτά είναι εκφρασμένα σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB. Για ένα σύστημα που λαμβάνει N διαφορετικά σήματα με σηματοθορυβικούς λόγους CNR_j ($j=1,2,\dots,N$), ο τελικός σηματοθορυβικός λόγος σε γραμμική κλίμακα δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{MRC} = \sum_{j=1}^N CNR_j \quad (2.3)$$

Η τεχνική EGC, είναι όμοια με την MRC στο κομμάτι όπου τα σήματα συνδυάζονται με σύμφωνο τρόπο όμως διαφέρει στο γεγονός ότι τα αντίγραφα του σήματος σε αυτή την περίπτωση δεν πολλαπλασιάζονται με βάρη. Αντιθέτως ο δέκτης ενισχύει όλα τα λαμβανόμενα σήματα με το ίδιο κέρδος και στη συνέχεια τα προσθέτει. Ο σηματοθορυβικός λόγος του τελικού σήματος για ένα σύστημα με N λαμβανόμενα σήματα δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{EGC} = \frac{(\sum_{j=1}^N \sqrt{CNR_j})^2}{N} \quad (2.4)$$

2.4. Πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού

Τα πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού εξηγούν την διαδικασία προώθησης του λαμβανόμενου σήματος προς τον τελικό προορισμό αλλά και τους διαφορετικούς τρόπους συνδυαστικών τεχνικών διαφορικής λήψης. Τα παραπάνω πρωτόκολλα είναι το πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης (Fixed Relaying - FR), το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης (Selection Relaying - SR) και το πρωτόκολλο Ελάχιστης Αυξανόμενης Επανάληψης (Incremental Relaying - IR) [11].

Στο πρωτόκολλο Fixed Relaying-FR, οι επαναλήπτες ενός συνεργατικού συστήματος πάντα προωθούν το λαμβανόμενο σήμα προς τον προορισμό είτε με την τεχνική της ενίσχυσης και προώθησης (amplify and forward-AF) είτε με την τεχνική της αποκωδικοποίησης και προώθησης (decode and forward -DF). Και στις δυο περιπτώσεις το σύστημα εξαρτάται σημαντικά από τις ζεύξεις μεταξύ του πομπού και των επαναληπτών και αυτό γιατί στην πρώτη περίπτωση ένας χαμηλός σηματοθορυβικός λόγος μεταξύ πομπού και επαναλήπτη θα έχει σαν αποτέλεσμα την περεταίρω ενίσχυση του θορύβου από τους επαναλήπτες και τελικά την προώθηση του σήματος στον προορισμό όπου η αποκωδικοποίηση του στο δέκτη τελικά να επηρεάσει την επίδοση του συστήματος. Αντίστοιχα στην δεύτερη περίπτωση μια λανθασμένη αποκωδικοποίηση του λαμβανόμενου σήματος από τον επαναλήπτη θα οδηγήσει στην επανεκπομπή και προώθηση του λανθασμένου αυτού σήματος στον τελικό προορισμό επομένως το τελικό σήμα στο δέκτη δεν θα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σωστά.

Στο πρωτόκολλο Selection Relaying-SR οι επαναλήπτες ενός συνεργατικού συστήματος επιλέγουν το αν θα προωθήσουν η όχι το λαμβανόμενο σήμα προς τον προορισμό λαμβάνοντας υπόψιν τον συντελεστή εξασθένησης σε κάθε βήμα. Εάν ο συντελεστής εξασθένησης υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι τότε το σήμα προωθείται από την πηγή με οποιοδήποτε πρωτόκολλο συνεργατικού διαφορισμού ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό διαφορικό κέρδος. Στην περίπτωση που ο συντελεστής εξασθένησης είναι κάτω από το προκαθορισμένο κατώφλι η πηγή συνεχίζει την μετάδοση του σήματος μέσω της απευθείας ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη και στα δυο συχνοτικά παράθυρα ώστε στο τέλος να μπορεί να συνδυάσει δυο σήματα που έλαβε με την απευθείας ζεύξη από τον πομπό.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα δυο πρωτόκολλα FR και SR γίνεται μη αποδοτική χρήση του φάσματος του καναλιού, ειδικά σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης όπου οι επαναλήπτες επανεκπέμπουν σε όλη την διάρκεια. Έτσι στο πρωτόκολλο IR κατά την εκπομπή μέσω της απευθείας ζεύξης λαμβάνεται ανάδραση από τον τελικό δέκτη με χρήση ενός ψηφίου που υποδεικνύει την επιτυχία η όχι της απευθείας μετάδοσης. Σε περίπτωση που

η απευθείας ζεύξη αποτύχει τότε μόνο οι επαναλήπτες προωθούν το λαμβανόμενο σήμα προς τον προορισμό. Με αυτή την τεχνική έχουμε δραματική αύξηση της φασματικής απόδοσης σε σύγκριση με τις άλλες δυο τεχνικές αφού εάν η απευθείας ζεύξη δεν αποτύχει οι επαναλήπτες δεν κάνουν χρήση των πόρων του συστήματος.

2.5. Επίδοση πρωτόκολλων συνεργατικού διαφορισμού

Σε αυτή την παράγραφο θα χαρακτηρίσουμε την επίδοση των πρωτοκόλλων συνεργατικού διαφορισμού όσον αφορά τα διάφορα ενδεχόμενα και τις πιθανότητες αποκοπής. Δυο σημαντικοί παράμετροι του κάθε συστήματος είναι ο σηματοθορυβικός λόγος SNR και η φασματική απόδοση R . Ορίζουμε αυτές τις παραμέτρους σύμφωνα με ένα κανάλι συνεχούς χρόνου και εύρους ζώνης W , όπου στο μοντέλο διακριτού χρόνου το W περιλαμβάνει 2 σύμβολα ανά δευτερόλεπτο ($2D/s$). Έτσι ο σηματοθορυβικός λόγος χωρίς απόσβεση προκύπτει :

$$SNR = \frac{2P_c}{N_o W} = \frac{P}{N_o} \quad (2.5)$$

όπου P_c είναι η μέση ισχύ περιορισμού στο κανάλι συνεχούς χρόνου και η μέση ισχύς περιορισμού διακριτού χρόνου $P = 2P_c / W$. Η φασματική απόδοση ορίζεται ως:

$$R = \frac{2r}{W} b / s / Hz \quad (2.6)$$

όπου r είναι ο ρυθμός μετάδοσης σε ψηφία ανά δευτερόλεπτο. Τα αποτελέσματα μας γίνονται ακόμα πιο συμπαγή όταν παραμετροποιούμε το σύστημα μας από το ζευγάρι (SNR, R) σε (SNR_{norm}, R) ή (SNR, R_{norm}) όπου:

$$SNR_{norm} = \frac{SNR}{2^R - 1}, R_{norm} = \frac{R}{\log(1 + SNR \sigma_{s,d}^2)} \quad (2.7)$$

Η παραμετροποίηση αυτών των δυο ζευγαριών αποφέρει αντισταθμίσεις σε διαφορετικές πτυχές της απόδοσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα του (SNR_{norm}, R) αποφέρουν μια αντιστάθμιση μεταξύ του κανονικοποιημένου κέρδους του σηματοθορυβικού λόγου και της φασματικής απόδοσης του εκάστοτε πρωτοκόλλου, ενώ το ζευγάρι (SNR, R_{norm}) αποφέρει αντιστάθμιση μεταξύ της τάξης διαφορισμού και της κανονικοποιημένης φασματικής απόδοσης [11].

2.5.1. Απευθείας ζεύξη

Για να καθοριστεί η βασική απόδοση της απευθείας ζεύξης, η πηγή μεταδίδει μέσω του εξής καναλιού:

$$y_r[n] = \alpha_{s,r} x_s[n] + z_r[n] \quad (2.8)$$

όπου τα $a_{i,j}$ περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις των απωλειών διαδρομής, της σκίασης και την μη συχνοεπιλεκτική απόσβεση, τα z_j περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις του θορύβου του δέκτη και οποιαδήποτε άλλη παρεμβολή του συστήματος, ενώ τα $x_s[n]$, $y_r[n]$ είναι το σήμα που έχει σταλεί από την πηγή και το λαμβανόμενο σήμα από τον προορισμό αντίστοιχα.

Η μέγιστη μέση αμοιβαία πληροφορία μεταξύ εισόδου και εξόδου σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μέσω των ανεξάρτητων και κατανεμημένων μηδενικών μέσων τιμών, κυκλικά ανεξάρτητων σύνθετων Γκαουσιανών εισόδων και δίνεται μέσω μιας συνάρτησης του συντελεστή εξασθένησης $a_{s,d}$.

$$I_d = \log\left(1 + SNR |a_{(s,d)}|^2\right) \quad (2.9)$$

Το ενδεχόμενο αποκοπής για φασματική απόδοση R δίνεται για $I_d < R$ και είναι ισοδύναμο με το ενδεχόμενο

$$|a_{s,d}|^2 < \frac{(2^R - 1)}{SNR} \quad (2.10)$$

Για απόσβεση τύπου Rayleigh το $|a_{s,d}|^2$ κατανέμεται εκθετικά με την παράμετρο $\sigma_{s,d}^{-2}$, η πιθανότητα αποκοπής ικανοποιεί την συνάρτηση

$$\begin{aligned} P_D^{out}(SNR, R) &= Pr[I_d < R] = Pr\left[|a_{s,d}|^2 < \frac{2^R - 1}{SNR}\right] = 1 - \exp\left(-\frac{2^R - 1}{SNR \sigma_{s,d}^2}\right) \\ &\sim \frac{1}{\sigma_{s,d}^2} \cdot \frac{2^R - 1}{SNR} \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.5.2.Πρωτόκολλο σταθερής επανάληψης

Στην τεχνική ενίσχυσης και προώθησης παράγεται ένα ισοδύναμο μιας εισόδου και δυο εξόδων, σύνθετο Γκαουσιανό κανάλι με διαφορετικά επίπεδα θορύβου στις εξόδους. Η μέγιστη μέση αμοιβαία πληροφορία μεταξύ εισόδου και των δυο εξόδων σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μέσω των ανεξάρτητων και κατανεμημένων σύνθετων Γκαουσιανών εισόδων και δίνεται από:

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log \left(1 + SNR |a_{s,d}|^2 + f \left(SNR |a_{s,r}|^2, SNR |a_{r,d}|^2 \right) \right) \quad (2.12)$$

ως συνάρτηση των συντελεστών εξασθένησης όπου,

$$f(x, y) = \frac{xy}{x + y + 1} \quad (2.13)$$

Το ενδεχόμενο αποκοπής για φασματική απόδοση R δίνεται για $I_{AF} < R$ και είναι ισοδύναμο με το ενδεχόμενο

$$|a_{s,d}|^2 + \frac{1}{SNR} f(SNR |a_{s,r}|^2, SNR |a_{r,d}|^2) < \frac{2^{2R} - 1}{SNR} \quad (2.14)$$

Για απόσβεση τύπου Rayleigh το $|a_{i,j}|^2$ κατανέμεται εκθετικά με την παράμετρο $\sigma_{i,j}^{-2}$, η πιθανότητα αποκοπής προσεγγίζεται για την συμπεριφορά της σε υψηλό σηματοθορυβικό λόγο ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{AF}^{out}(SNR, R) &= Pr[I_{AF} < R] \\ &\sim \left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2} \frac{\sigma_{s,r}^2 + \sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2 \cdot \sigma_{r,d}^2} \right) \cdot \left(\frac{2^{2R} - 1}{SNR} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Στην τεχνική την αποκωδικοποίησης και προώθησης η μέγιστη μέση αμοιβαία πληροφορία δίνεται σαν συνάρτηση τυχαίων μεταβλητών απόσβεσης:

$$I_{DF} = \frac{1}{2} \min\{\log(1 + SNR |a_{s,r}|^2), \log(1 + SNR |a_{s,d}|^2 + SNR |a_{r,d}|^2)\} \quad (2.16)$$

Ο πρώτος όρος αναπαριστά τον μέγιστο ρυθμό στον οποίο ο επαναλήπτης μπορεί να αποκωδικοποιήσει αξιόπιστα το μήνυμα από την πηγή ενώ ο δεύτερος όρος αναπαριστά τον μέγιστο ρυθμό στον οποίο ο προορισμός μπορεί να αποκωδικοποιήσει αξιόπιστα το μήνυμα από την πηγή δεδομένων των επαναλήψεων μετάδοσης από τον επαναλήπτη και τον προορισμό. Απαιτούνται τόσο ο προορισμός όσο και ο επαναλήπτης για να αποκωδικοποιηθεί ολόκληρη η κωδική λέξη χωρίς λάθος. Το ενδεχόμενο αποκοπής για φασματική απόδοση R δίνεται για $I_{AF} < R$ και είναι ισοδύναμο με το ενδεχόμενο

$$\min\{|a_{s,r}|^2, |a_{s,d}|^2 + |a_{r,d}|^2\} < \frac{2^{2R} - 1}{SNR} \quad (2.17)$$

Για απόσβεση τύπου Rayleigh η πιθανότητα αποκοπής για την τεχνική την αποκωδικοποίησης και προώθησης υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{DF}^{out}(SNR, R) &= Pr[I_{AF} < R] = Pr[|a_{s,r}|^2 < g(SNR)] \\ &+ Pr[|a_{s,r}|^2 < g(SNR)] Pr[|a_{s,d}|^2 + |a_{r,d}|^2 < g(SNR)] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Όπου $g(SNR) = \frac{2^{2R} - 1}{SNR}$. Η πιθανότητα αποκοπής προσεγγίζεται για την συμπεριφορά της σε υψηλό σηματοθορυβικό λόγο υπολογίζοντας το όριο

$$\begin{aligned} \frac{1}{g(SNR)} P_{DF}^{out}(SNR, R) &\rightarrow \frac{1}{\sigma_{s,r}^2} \quad \text{όταν } SNR \rightarrow \infty \\ P_{DF}^{out}(SNR, R) &\sim \frac{1}{\sigma_{s,r}^2} \cdot \frac{2^{2R} - 1}{SNR} \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.5.3. Πρωτόκολλο επιλεγόμενης επανάληψης

Η αμοιβαία πληροφόρηση της επαναλαμβανόμενης κωδικοποίησης στον επαναλήπτη για το πρωτόκολλο Selection Relaying -SR δίνεται με χρήση των (2.9) και (2.16) και προκύπτει

$$I_{SDF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2(1 + 2SNR |a_{s,d}|^2) & |a_{s,r}|^2 < g(SNR) \\ \frac{1}{2} \log_2(1 + SNR |a_{s,d}|^2 + SNR |a_{r,d}|^2) & |a_{s,r}|^2 \geq g(SNR) \end{cases} \quad (2.20)$$

όπου $g(SNR) = \frac{2^{2R} - 1}{SNR}$. Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί στο ότι ο επαναλήπτης δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα και η πηγή επαναλαμβάνει την μετάδοση ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο επαναλήπτης αποκωδικοποιεί το σήμα και επαναλαμβάνει την μετάδοση της πηγής. Το ενδεχόμενο αποκοπής για φασματική απόδοση R δίνεται για $I_{SDF} < R$ και είναι ισοδύναμο με το ενδεχόμενο

$$\begin{aligned} & (\{|a_{s,r}|^2 < g(SNR)\} \cap \{2|a_{s,d}|^2 < g(SNR)\}) \cup \\ & (\{|a_{s,r}|^2 \geq g(SNR)\} \cap \{|a_{s,d}|^2 + |a_{r,d}|^2 < g(SNR)\}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Επειδή τα ενδεχόμενα είναι αλληλοαποκλειόμενα η πιθανότητα αποκοπής γίνεται άθροισμα

$$\begin{aligned} P_{DF}^{out}(SNR, R) &= Pr[I_{AF} < R] \\ &= Pr[|a_{s,r}|^2 < g(SNR)]Pr[2|a_{s,d}|^2 < g(SNR)] \\ &+ Pr[|a_{s,r}|^2 \geq g(SNR)]Pr[|a_{s,d}|^2 + |a_{r,d}|^2 < g(SNR)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

Η πιθανότητα αποκοπής προσεγγίζεται για την συμπεριφορά της σε υψηλό σηματοθορυβικό λόγο υπολογίζοντας το όριο

$$\begin{aligned} \frac{1}{g(SNR)} P_{SDF}^{out}(SNR, R) &\rightarrow \left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2} \cdot \frac{\sigma_{s,r}^2 + \sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2 \sigma_{r,d}^2} \right) \text{ όταν } SNR \rightarrow \infty \\ P_{SDF}^{out}(SNR, R) &\sim \left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2} \cdot \frac{\sigma_{s,r}^2 + \sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2 \sigma_{r,d}^2} \right) \cdot \left(\frac{2^{2R} - 1}{SNR} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.5.4.Πρωτόκολλο αυξανόμενης επανάληψης

Στο πρωτόκολλο Incremental Relaying - IR η ανάλυση της αποκοπής είναι περίπλοκη λόγω της μεταβλητότητας της φασματικής απόδοσης R. Όταν η μετάδοση πηγής-προορισμού είναι επιτυχής τότε η φασματική απόδοση παραμένει R ενώ όταν αυτή αποτύχει τότε ο επαναλήπτης αναλαμβάνει την επανεκπομπή του λαμβανόμενου σήματος από την πηγή επομένως η φασματική απόδοση μειώνεται σε R/2. Η πιθανότητα αποκοπής είναι συνάρτηση του σηματοθορυβικού λόγου και της φασματικής απόδοσης και δίνεται

$$\begin{aligned}
 P_{IAF}^{out}(SNR, R) &= Pr[I_D < R]Pr[I_{AF} < R/2 | I_D < R] \\
 &= Pr[I_{AF} < R/2] \\
 &= Pr[|a_{s,d}|^2 + \frac{1}{SNR} f(SNR | a_{s,r}|^2, SNR | a_{r,d}|^2) < g(SNR)]
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

Όπου $I_D, I_{AF}, f(\cdot, \cdot)$ δίνονται από τις (2.9), (2.12), (2.13) και $g(SNR) = \frac{2^R - 1}{SNR}$. Βέβαια

επειδή το R είναι μεταβλητό εξετάζουμε την πιθανότητα αποκοπής ως συνάρτηση του SNR και της αναμενόμενης φασματικής απόδοσης \bar{R} όπου

$$\begin{aligned}
 \bar{R} &= RPr[|a_{s,d}|^2 \geq \frac{2^R - 1}{SNR}] + \frac{R}{2} Pr[|a_{s,d}|^2 < \frac{2^R - 1}{SNR}] \\
 &= Rexp(-\frac{2^R - 1}{SNR}) + \frac{R}{2}[1 - exp(-\frac{2^R - 1}{SNR})] \\
 &= \frac{R}{2}[1 + exp(-\frac{2^R - 1}{SNR})] = h_{SNR}(R)
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Το R που θα μπει όμως στην (2.25) μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές δεδομένης μιας σταθερής τιμής της αναμενόμενης φασματικής απόδοσης \bar{R} γιατί εξαρτάται επίσης και από το SNR. Ορίζουμε μια συνάρτηση $\tilde{h}_{SNR}^{-1}(\bar{R}) = \min h_{SNR}^{-1}(\bar{R})$ όπου το $h_{SNR}^{-1}(\bar{R})$ είναι μια απεικόνιση με διαφορετικά σημεία από το R έως το \bar{R} . Για την πιθανότητα αποκοπής είναι προφανές ότι για μια δεδομένη τιμή του \bar{R} θέλουμε τη μικρότερη δυνατή τιμή του R. Για υψηλό SNR έχουμε

$$P_{IAF}^{out}(SNR, h_{SNR}^{-1}(\bar{R})) \sim \left(\frac{1}{2\sigma_{s,d}^2} \cdot \frac{\sigma_{s,r}^2 + \sigma_{r,d}^2}{\sigma_{s,r}^2 \sigma_{r,d}^2} \right) \cdot \left(\frac{2^{\bar{R}} - 1}{SNR} \right)^2 \tag{2.26}$$

2.5.5. Σύγκριση πιθανοτήτων αποκοπής

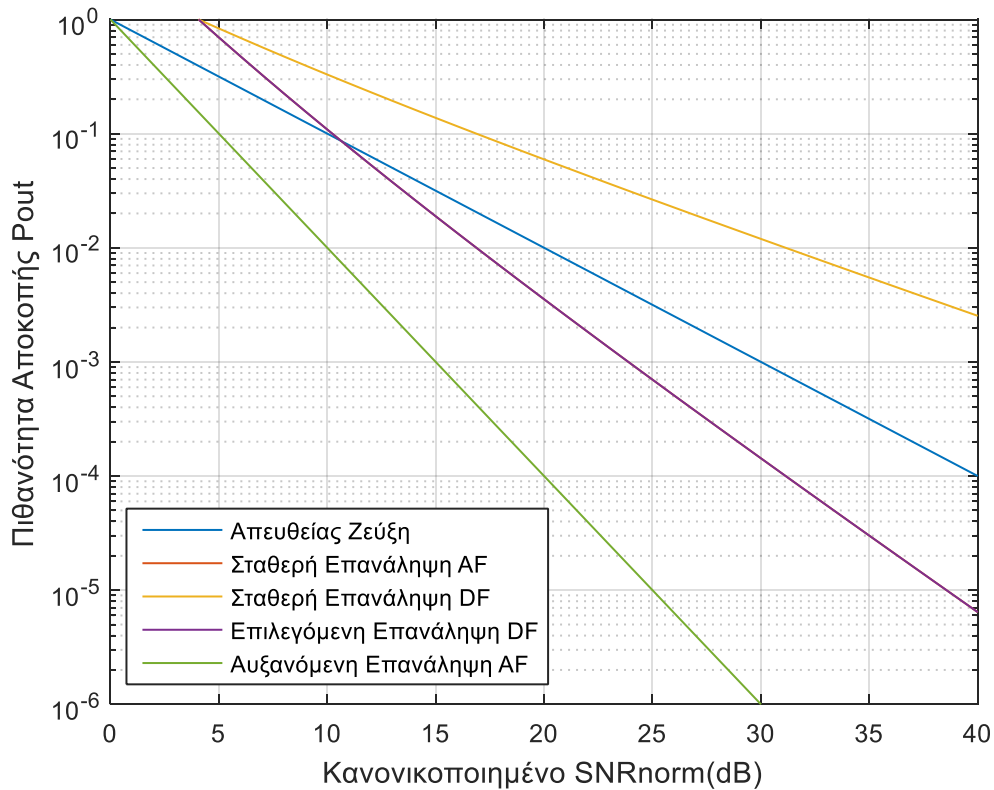
Σε αυτό το σημείο θα συγκρίνουμε τις πιθανότητες αποκοπής των παραπάνω πρωτοκόλλων για μπορέσουμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα ως προς την απόδοση του εκάστοτε πρωτοκόλλου ανάλογα με την παραμετροποίηση. Η σύγκριση θα γίνει για την περίπτωση των στατιστικά συμμετρικών δικτύων όπου $\sigma^2_{i,j} = 1$ και για τις κανονικοποιημένες τιμές του σηματοθορυβικού λόγου SNR_{norm} , επομένως στις πιθανότητες αποκοπής του κάθε πρωτοκόλλου των προηγούμενων παραγράφων θα πρέπει να αντικαταστήσουμε το SNR με $SNR = SNR_{norm}(2^R - 1)$ και θα λάβουμε τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στην μεσαία στήλη του Πίνακα 2.1. Ομοίως ενεργούμε για το ζευγάρι (SNR, R_{norm}) όπου $R = R_{norm} \log(1 + SNR)$ το οποίο είναι λίγο πιο πολύπλοκο λόγω του ότι το R μεταβάλλεται όταν το SNR αυξομειώνεται [11]. Επίσης στη σύγκριση χρησιμοποιούμε τις προσεγγίσεις των πιθανοτήτων αποκοπής λόγω της πολυπλοκότητας του υπολογισμού των ακριβής εκφράσεων των πιθανοτήτων αποκοπής.

Protocol	$P_{out}(SNR, R), \text{high SNR}$	$P_{out}(SNR_{norm}, R), \text{high SNR}_{norm}$	$P_{out}(SNR, R_{norm}), \text{high SNR}$
Direct Transmission	$\frac{2^R - 1}{SNR}$	$\frac{1}{SNR_{norm}}$	$\frac{1}{SNR^{(1-R_{norm})}}$
Amplify and Forward	$\left(\frac{2^{2R} - 1}{SNR}\right)^2$	$\frac{(2^R + 1)^2}{SNR_{norm}}$	$\frac{1}{SNR^{2(1-2R_{norm})}}$
Decode and Forward	$\frac{2^{2R} - 1}{SNR}$	$\frac{2^R + 1}{SNR_{norm}}$	$\frac{1}{SNR^{(1-2R_{norm})}}$
Selection Decode and Forward	$\left(\frac{2^{2R} - 1}{SNR}\right)^2$	$\frac{(2^R + 1)^2}{SNR_{norm}^2}$	$\frac{1}{SNR^{2(1-2R_{norm})}}$
Incremental Amplify and Forward	$\left(\frac{2^{\bar{R}} - 1}{SNR}\right)^2$	$\frac{1}{SNR_{norm}^2}$	$\frac{1}{SNR^{2(1-R_{norm})}}$

Πίνακας 2.1 Προσεγγίσεις των πιθανοτήτων αποκοπής των πρωτοκόλλων συνεργατικού διαφορισμού για στατιστικά συμμετρικά δίκτυα.

Στο Σχήμα 2.3 βλέπουμε τις πιθανότητες αποκοπής για τα διαφορετικά πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού. Το πρωτόκολλο Incremental Relaying - IR βλέπουμε να υπερτερεί των υπολοίπων πρωτοκόλλων σε όλο το εύρος των κανονικοποιημένων SNR ενώ για πιθανότητες

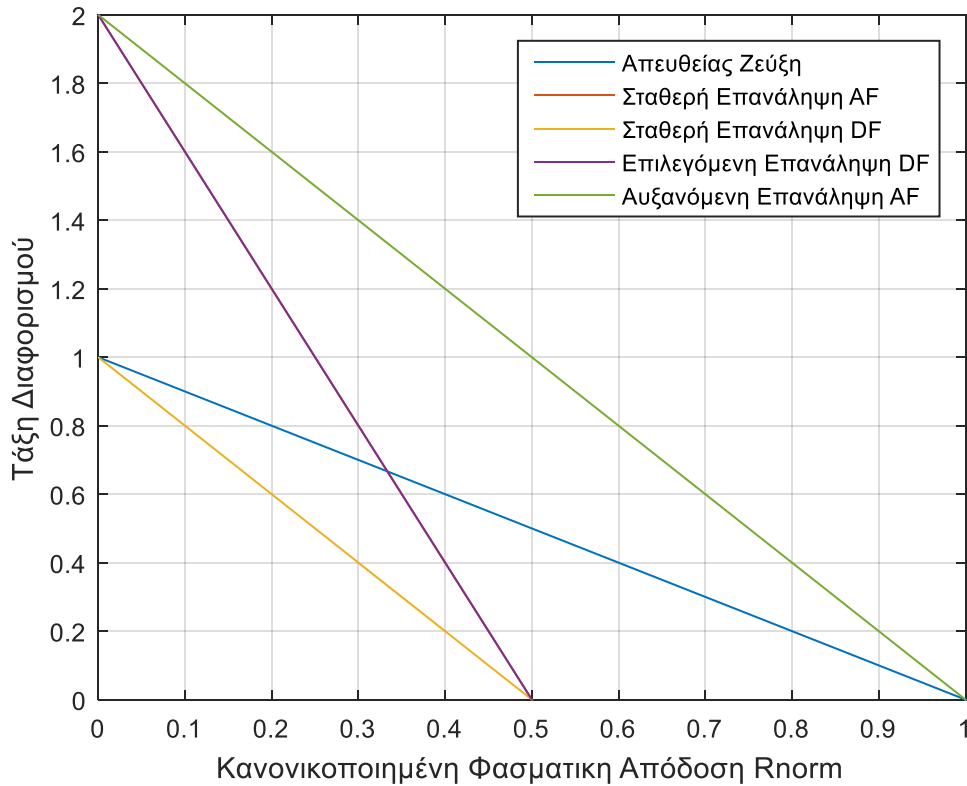
αποκοπής 10^{-2} επιτυγχάνει σε σχέση με την επιλεγόμενη επανάληψη, σταθερή επανάληψη AF, απευθείας ζεύξη και σταθερή επανάληψη DF, διαφορικό κέρδος 7dB, 7dB, 10dB, 21dB αντίστοιχα. Αν εξαιρέσουμε την περίπτωση της σταθερής επανάληψης AF στα πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού για μια μείωση της τάξης 100 στην πιθανότητα αποκοπής απαιτούμε 10dB SNR ενώ στην απευθείας ζεύξη για μείωση 10 στην πιθανότητα αποκοπής απαιτούμε 10dB SNR. Είναι φανερό ότι επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη απόδοση με τα πρωτόκολλα συνεργατικού διαφορισμού και για ίδια επίπεδα πιθανοτήτων αποκοπής μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 2.3: Πιθανότητες αποκοπής βάσει του κανονικοποιημένου SNR_{norm} των πρωτοκόλλων συνεργατικού διαφορισμού για στατιστικά συμμετρικά δίκτυα.

Όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου το σύστημα μας μπορεί να παραμετροποιηθεί βάσει του ζευγαριού (SNR, R_{norm}) εξετάζοντας το trade-off μεταξύ της τάξης διαφορισμού και της φασματικής απόδοσης $R = R_{norm} \log(1+SNR)$. Οι πιθανότητες αποκοπής συμπεριφέρονται όμοια όπως και στο ζευγάρι (SNR_{norm}, R) για υψηλά SNR ενώ για ακόμα ταχύτερη αύξηση όλες οι πιθανότητες τείνουν στο 1. Η μεγάλη τάξη διαφορισμού υποδεικνύει μεγάλη αντοχή στην απόσβεση δηλαδή ταχύτερη μείωση των πιθανοτήτων αποκοπής κατά την αύξηση του SNR, αλλά αύξηση του R_{norm} οδηγεί σε μείωση της τάξης διαφορισμού με ότι αυτό συνεπάγεται. Η τάξη διαφορισμού υπολογίζεται ως

$$\Delta(R_{norm}) = \lim_{SNR \rightarrow \infty} \frac{-\log P_{out}(SNR, R_{norm})}{\log SNR} [11] \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.4: Κέρδος διαφορισμού βάσει της κανονικοποιημένης φασματικής απόδοσης R_{norm} των πρωτοκόλλων συνεργατικού διαφορισμού .

Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 2.4 το πρωτόκολλο IR-AF παρουσιάζει την μεγαλύτερη τάξη διαφορισμού και κατ' επέκταση καλύτερη συμπεριφορά έναντι στην απόσβεση κάτι το οποίο υποδεικνύει και το προηγούμενο σχήμα με την απεικόνιση των πιθανοτήτων αποκοπής. Η καμπύλη της σταθερής επανάληψης AF ταυτίζεται με αυτή της επιλεγόμενης επανάληψης DF για αυτό το λόγο δεν φαίνεται στο σχήμα ευκρινέστατα. Σημαντικό συμπέρασμα από το σχήμα είναι ότι για $R_{norm} \sim 0.33$ η επιλογή της απευθείας ζεύξης υπερτερεί τόσο της σταθερής επανάληψης AF όσο και αυτή της επιλεγόμενης επανάληψης DF.

3. Μοντελοποίηση κινητών δορυφορικών καναλιών

3.1. Εισαγωγή

Τα κινητά δορυφορικά κανάλια (Land Mobile Satellite Channels-LMS) λαμβάνουν ιδιαίτερη προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω των πολλών σημαντικών εφαρμογών τους συμπεριλαμβανομένων των αμφίδρομων επικοινωνιών, της εκπομπής ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών υπηρεσιών, το παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης (Global Navigation Satellite System-GNSS) καθώς επίσης και των κυψελωτών επικοινωνιών μέσω των δικτύων 5G και των επερχόμενων 6G. Στο 3^ο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα σημαντικότερα μοντέλα καναλιού για τους κινητούς δορυφορικούς διαύλους για τις συνήθεις συχνότητες λειτουργίας L μπάντα (1/2GHz) και S (2/4GHz) αλλά και για υψηλότερες συχνότητες και πιο συγκεκριμένα για τις μπάντες Ku (12/14GHz), Ka (20/30GHz), Q/V (40/50GHz).

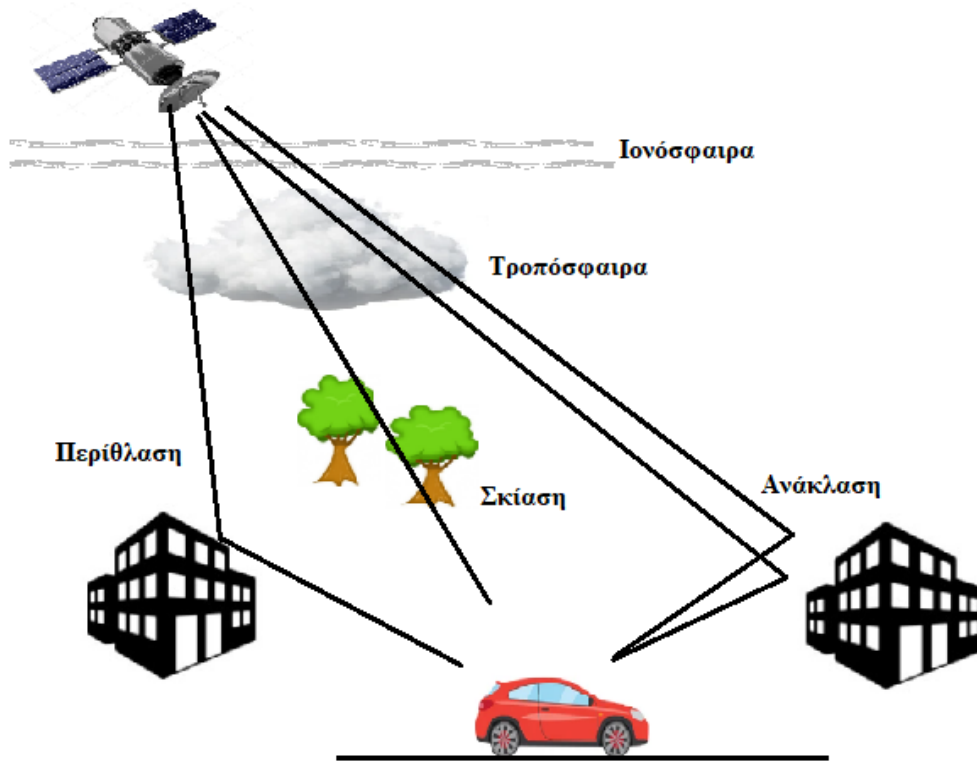
3.2. Κινητά Δορυφορικά Κανάλια

Στα LMS η ζεύξη διασχίζει τρία ξεχωριστά επίπεδα, την ιονόσφαιρα, την τροπόσφαιρα καθώς επίσης και το τοπικό περιβάλλον κοντά στο τερματικό σταθμό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Από τις πιο γνωστές επιπτώσεις που προκαλούνται κατά την έλευση των μεταδιδόμενων κυμάτων από την ιονόσφαιρα είναι ο σπινθηρισμός, η περιστροφή Faraday, η διασπορά και η καθυστέρηση. Ωστόσο όλες αυτές οι επιπτώσεις παίζουν αμελητέο ρόλο για τις εφαρμογές επικοινωνιών στις υψηλές συχνότητες των μπαντών Ku, Ka, Q.

Στην περίπτωση της τροπόσφαιρας εξακολουθούν να υπάρχουν οι παραπάνω επιπτώσεις οι οποίες είναι εξίσου αμελητέες. Σε αυτό το επίπεδο η βροχή αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα χειροτέρευσης της ποιότητας της ζεύξης μας. Η ύπαρξη μεταβλητών ποσοτήτων υγρασίας οδηγεί σε μεταβαλλόμενες συνθήκες διάθλασης ενώ επίσης η παρουσία οξυγόνου και υδρατμών οδηγεί εξίσου σε μεγάλα επίπεδα εξασθένησης του σήματος που μεταδίδεται.

Το τρίτο επίπεδο που επηρεάζει την ζεύξη οφείλεται στον τοπικό φυσικό αλλά και ανθρώπινο παράγοντα. Στερεά αντικείμενα όπως κτήρια, γέφυρες, σήραγγες εμποδίζουν το σήμα είτε προκαλούν ανακλάσεις ή περιθλάσεις του σήματος ενώ η βλάστηση προκαλεί σκίαση, ανακλάσεις ή περιθλάσεις του σήματος λόγω της διαφορετικής πυκνότητας φυλλώματος και κλαδιών στη διαδρομή μετάδοσης. Ο βαθμός των επιπτώσεων που επιφέρει η βλάστηση εξαρτάται καθαρά από το μήκος της διαδρομής που διανύει το σήμα μέσα από την μάζα της βλάστησης. Τέλος μικρότερα αντικείμενα που παίζουν το ρόλο σκεδαστών

όπως είναι τα οχήματα, οι πινακίδες, οι στύλοι ηλεκτροδότησης ακόμα και οι άνθρωποι προκαλούν ανακλάσεις και σκεδάσεις του σήματος.



Σχήμα 3.1: Φαινόμενα χειροτέρευσης της ποιότητας του σήματος κατά την επίγεια δορυφορική λήψη.

3.2.1. Απόσβεση λόγω βροχής

Η απόσβεση λόγω βροχής στα κινητά δορυφορικά κανάλια προσεγγίζεται με μια εύκολη μεθοδολογία μετατρέποντας τις στατιστικές εξασθένησης βροχής μιας σταθερής δορυφορικής ζεύξης σε κινητή δορυφορική ζεύξη όπως πρότεινε ο Matricciani [18]–[21]. Χρησιμοποιώντας το φυσικό/μαθηματικό μοντέλο της τεχνικής της συνθετικής καταιγίδας [22] μπορεί να αποδειχθεί ότι η στοχαστική διαδικασία του ποσοστού βροχόπτωσης που μετράται με τη χρήση ενός κινούμενου μετρητή βροχής έχει παρόμοια στατιστικά στοιχεία με εκείνη που μετράται χρησιμοποιώντας το ίδιο όργανο σε σταθερή θέση. Ο βασικός παράγοντας για τη μετατροπή σταθερών στατιστικών εξασθένησης της βροχής σε κινητά στατιστικά εξασθένησης βροχής είναι ο παράγοντας ταχύτητας ξ οποίος ορίζεται ως [18]–[21]:

$$\xi = \frac{u_R}{|u_M - u_R \cos \varphi|} \quad (3.1)$$

όπου u_M (km/h), u_R (km/h) είναι οι ταχύτητες των κινητών τερματικών και των βροχοπυρήνων αντίστοιχα, και φ είναι η γωνία μεταξύ αυτών των δυο διανυσμάτων. Η σημαντική συνεισφορά της προαναφερθείσας εργασίας είναι ότι η συμπληρωματική συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (complementary cumulative density function-CCDF) της τυχαίας διαδικασίας εξασθένησης βροχής για την κινητή περίπτωση α_M (dB), $P_M\{\alpha_M(t) \geq A_{th}\}$ σχετίζεται με τη CCDF της τυχαίας διαδικασίας εξασθένησης βροχής για την σταθερή περίπτωση α_F (dB), $P_F\{\alpha_F(t) \geq A_{th}\}$ μέσω της απλής σχέσης

$$P_M = \xi \cdot P_F \quad (3.2)$$

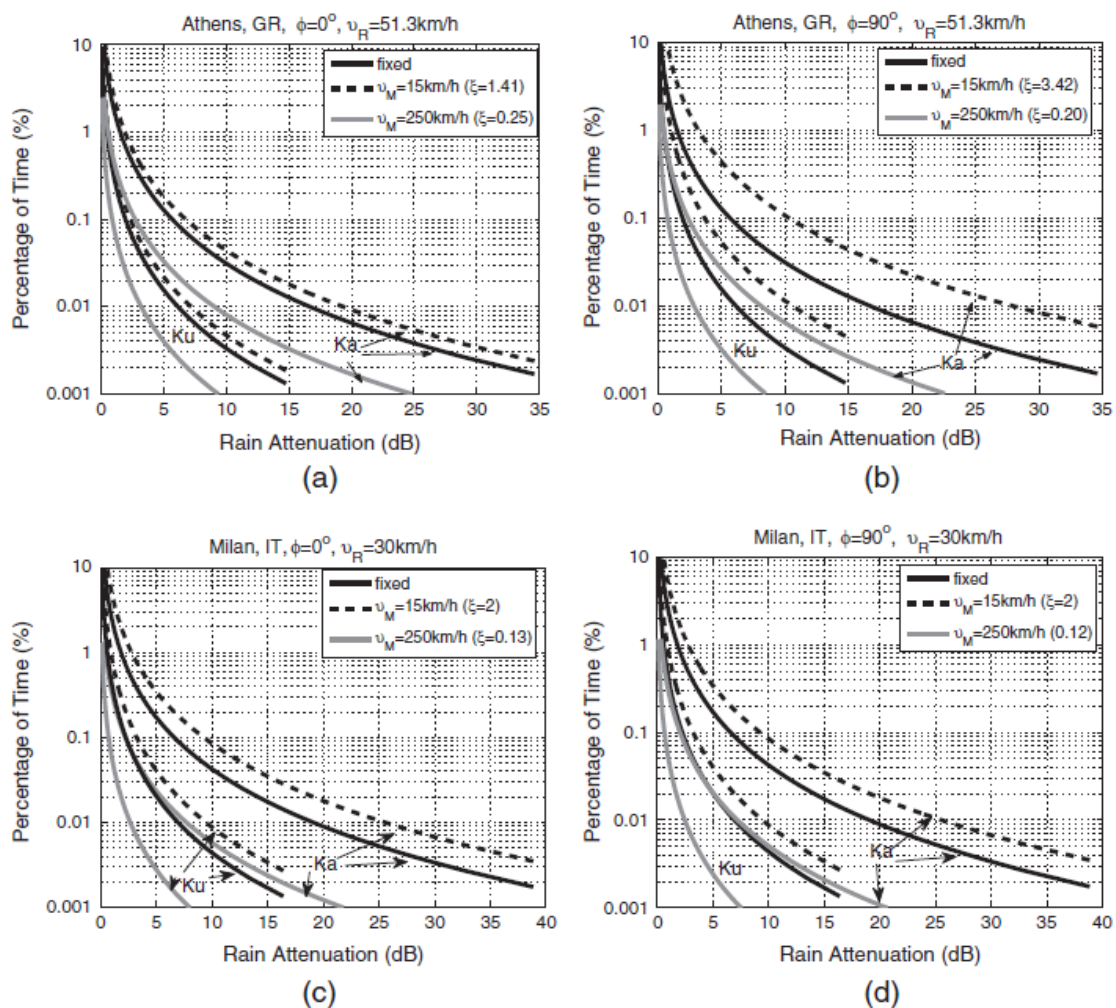
όπου A_{th} (dB) είναι το κατώφλι της απόσβεσης. Για να αποφύγουμε την υπέρβαση του άνω ορίου της πιθανότητας $P_F \leq 1$ θέτουμε ως περιορισμό $0 \leq \xi \leq 1/P_F$. Η P_F και κατ' επέκταση η P_M μπορεί να προκύψει με διάφορους τρόπους [23], όπως με απευθείας λήψη της κατανομής της P_F πραγματοποιώντας επιτόπου μετρήσεις της διάδοσης. Λόγω του ότι η παραπάνω τεχνική σπάνια αποτελεί μια επιλογή, η λύση προκύπτει εφαρμόζοντας το εμπειρικό μοντέλο CCDF του τομέα Ραδιοεπικοινωνιών της Παγκόσμιας Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union -ITU) με την πρόταση ITU-R P.618-13 [24]. Αυτό το μοντέλο ανταποκρίνεται με τον καλύτερο τρόπο με βάση την πειραματική βάση δεδομένων των στατιστικών εξασθένησης βροχής. Επιπλέον υπάρχει μια πιο φυσικό/αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος, η οποία ξεκινάει με την κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης, ο οποίος είναι ο φυσικός μηχανισμός της εξασθένησης της βροχής και χρησιμοποιούμε τη στατιστική κατανομή ώστε να μοντελοποιήσουμε την P_F . Μια εκτίμηση της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης σε όλο το κόσμο δίνεται από την σύσταση ITU-R P837-6 [25]. Τέλος είναι ευρέως αποδεκτό ανάμεσα στην ερευνητική κοινότητα ότι η πιο κατάλληλη στατιστική κατανομή για την προσέγγιση της P_F είναι η λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution) η οποία αποτελεί και πυρήνα της βασικής υπόθεσης για τα μακροπρόθεσμα στατιστικά στοιχεία εξασθένησης της βροχής μιας κινητής διαδρομής με κλίση, της εργασίας [23]. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function-PDF) της διαδικασίας θεωρείται

$$p_a(a_M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_M \cdot a_M} \exp\left[-\frac{(\ln a_M - \ln m_M)^2}{2\sigma_M^2}\right] \quad (3.3)$$

λαμβάνοντας υπόψιν ότι η CCDF προκύπτει από:

$$P_M = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln A_{th} - \ln m_M}{\sqrt{2}\sigma_M}\right) \quad (3.4)$$

Στις εξισώσεις (3.3) και (3.4) οι στατιστικές παράμετροι $\{m_M, \sigma_M\}$ της λογαριθμοκανονικής κατανομής σχετίζονται μέσω της (3.1) με τις $\{m_F, \sigma_F\}$, και η συνάρτηση $\operatorname{erfc}(\cdot)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση λάθους (complementary error function). Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το πως η καμπύλη P_F μετατοπίζεται όταν εισάγεται η κινητικότητα σε ένα δορυφορικό σύστημα επικοινωνίας. Στις καμπύλες του Σχήματος (3.3a) και (3.3c) το κινούμενο τρένο και η βροχή ταξιδεύουν προς την ίδια κατεύθυνση ($\varphi = 0^\circ$) ενώ στις καμπύλες του Σχήματος (3.3b) και (3.3d) ταξιδεύουν σε αντίθετες κατευθύνσεις ($\varphi = 90^\circ$). Επιπλέον λαμβάνονται υπόψιν τα κλιματικά χαρακτηριστικά της Αθήνας, Ελλάδας και του Μιλάνου, Ιταλίας με μέσες ταχύτητες βροχής $u_R = 51.3 \text{ km/h}$ και $u_R = 30 \text{ km/h}$ αντίστοιχα [23]. Τέλος χρησιμοποιούνται δυο ακραίες τιμές της ταχύτητας του κινητού τερματικού $u_M = 15 \text{ km/h}$, η οποία αντιστοιχεί στην χαμηλή ταχύτητα και $u_M = 250 \text{ km/h}$ στην υψηλή ταχύτητα, ενώ επίσης η γωνία ανύψωσης είναι 30° και οι μπάντες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται είναι οι Ku, Ka.



Σχήμα 3.1: Μακροπρόθεσμη συμπληρωματική αθροιστική συνάρτηση κατανομής της απόσβεσης της βροχής των σταθερών σε αντίθεση με τα κινητά δορυφορικά τερματικά [23].

3.2.2. Διαλείψεις λόγω σκίασης

Η εξασθένιση των σημάτων συχνά περιγράφεται ξεχωριστά από την απώλεια διαδρομής (path loss), τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading) και μικρής κλίμακας (small scale fading). Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι και μοντέλα για τη μοντελοποίηση του καναλιού LMS όπως είναι οι στατιστικές κατανομές, οι οποίες έχουν ενσωματωμένες παραδοχές σχετικά με τη φύση του φαινομένου διάδοσης και των συστατικών του. Οι τυπικές κατανομές οι οποίες χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση της διάδοσης των ραδιοκυμάτων και θα αναλυθούν παρακάτω είναι οι Log-normal, Inverse-Gaussian και Nakagami-m [26].

Η πιθανότητα σκίασης μπορεί να μειωθεί ανάλογα με την θέση των δορυφόρων για υψηλές γωνίες ανύψωσης ή με χρήση πολλαπλών δορυφόρων υλοποιώντας την τεχνική συνεργατικού διαφορισμού. Ωστόσο σε όλα τα επίπεδα των γωνιών ανύψωσης η σκίαση μπορεί να μειώσει σημαντικά το επίπεδο του σήματος, το οποίο απαιτεί αύξηση του περιθωρίου απόσβεσης κατά τον σχεδιασμό της ζεύξης.

Η αλλαγή της κατάστασης του σήματος από την ύπαρξη σκίασης ή μη, συχνά μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια, δύο, τρεις ή και περισσότερες καταστάσεις προσέγγισης. Κάθε κατάσταση μπορεί να περιγραφεί ξεχωριστά από στατιστικές των large scale fading και small scale fading.

Lognormal Κατανομή

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας συχνά μοντελοποιούνται με την λογαριθμοκανονική κατανομή εάν οι συμβολές των εξασθενήσεων κατά μήκος της διαδρομής δρουν ανεξάρτητα. Σε αυτή την περίπτωση η ολική εξασθένηση είναι ο πολλαπλασιασμός των ισχύων εξασθένησης του σήματος [27]. Εκφρασμένο σε dB αποτελεί το άθροισμα των εξασθενήσεων σε dB. Εάν αυτές οι συνεισφορές λαμβάνονται ως τυχαίες μεταβλητές, τότε το θεώρημα κεντρικού ορίου ικανοποιείται και ως εκ τούτου η σκίαση ακολουθεί μια log-normal (Gaussian) κατανομή [28]. Η Gaussian κατανομή είναι κανονική εκφρασμένη σε dB για αυτό το λόγο είναι γνωστή ως log-normal. Η κανονική κατανομή ορίζεται ως εξής [28]:

$$p(L_s) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{L_s^2}{2\sigma_L^2}\right) \quad (3.5)$$

όπου σ_L είναι η τυπική απόκλιση σκίασης και L_s οι απώλειες σκίασης σε dB. Οι τυπικές τιμές της σ_L κυμαίνονται από 4dB έως 12dB και εξαρτώνται από την γωνία ανύψωσης και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος [27].

Inverse-Gaussian Κατανομή

Για την περιγραφή του μοντέλου σκίασης εκτός από την lognormal κατανομή έχει προταθεί [29] και η Inverse-Gaussian (IG) κατανομή ως μια εναλλακτική λύση με μικρότερη πολυπλοκότητα έναντι της lognormal. Ο κύριος λόγος που προτάθηκε αυτή η κατανομή είναι η μικρή ακρίβεια της Gamma κατανομής που χρησιμοποιείται στην προσέγγιση της lognormal κατανομής όταν η τελευταία εμφανίζει μεγάλη διακύμανση ή μακριές ουρές. Έτσι

η κατανομή Rayleigh/Inverse-Gaussian μπορεί να χρησιμεύσει ως μια πιο αποδοτική προσέγγιση του προκατόχου Rayleigh/Lognormal. Η PDF της IG κατανομής δίνεται ως εξής [29]:

$$p_{\xi}(\xi) = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} \xi^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\lambda(\xi - \mu)^2}{2\mu^2\xi}\right) \quad \xi, \mu, \lambda > 0 \quad (3.6)$$

όπου μ, λ είναι η μέση τιμή και ο παράμετρος κλίμακας, αντίστοιχα. Για $\lambda \rightarrow \infty$ η IG κατανομή τείνει να γίνει μια Gaussian κατανομή.

3.2.3. Διαλείψεις λόγω πολυόδευσης (multipath)

Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται πολύ συχνά στο μοντέλο διαλείψεων μικρής κλίμακας στενής ζώνης (narrowband channel) στα κανάλια χωρίς οπτική επαφή (Non-Line-Of-Sight-NLOS). Επιπλέον συναντάται πολύ συχνά στις συνδυασμένες κατανομές. Την Rayleigh κατανομή μπορεί να τη δει κανείς από το μέτρο των σύνθετων γκαουσιανών (Gaussian) ανεξάρτητων και τυχαία κατανεμημένων αριθμών με μηδενικές μέσες τιμές. Η PDF για την κατανομή Rayleigh δίνεται ως εξής:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.7)$$

όπου r είναι το μέτρο της εξασθένησης, $r = |a| = \sqrt{x^2 + y^2}$, όπου x και y είναι οι πραγματικές και φανταστικές Gaussian τυχαίες μεταβλητές και α ο σύνθετος πολλαπλασιαστής εξασθένησης. Η παράμετρος σ είναι η τυπική απόκλιση είτε του πραγματικού ή του φανταστικού μέρους του α . Ακολούθως η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function-CDF) της κατανομής Rayleigh δίνεται ως εξής:

$$P_R(r) = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

Κατανομή Rice

Η κατανομή Rice χρησιμοποιείται συχνά στα μοντέλα στενής ζώνης σε συνθήκες LOS ή μερικώς LOS. Ενώ στην περίπτωση της Rayleigh κατανομής οι διαλείψεις οφείλονται στην ανάκλαση, την περίθλαση και την σκέδαση/διάχυση, στην περίπτωση της Rice κατανομής υπάρχει επιπλέον και μια LOS συνιστώσα που λαμβάνεται υπόψιν. Ο λόγος μεταξύ ισχύος της LOS συνιστώσας προς την ισχύ των πολυδιαδρομικών συνιστωσών είναι γνωστός ως παράγοντας Rice K . Όταν $K \rightarrow \infty$ τότε το κανάλι είναι καθαρά LOS χωρίς πολυδιαδρομικές συνιστώσες και η στάθμη του σήματος δεν εμφανίζει διακυμάνσεις, και όταν $K \rightarrow 0$ το κανάλι είναι καθαρά πολυδιαδρομικό και οι διαλείψεις γίνονται της μορφής Rayleigh. Οι τυπικές τιμές του K για το κινητό δορυφορικό κανάλι κυμαίνονται από -15dB έως +15dB [27]. Η PDF για την κατανομή Rice δίνεται ως εξής:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (3.9)$$

όπου σ είναι η τυπική απόκλιση του πραγματικού ή του φανταστικού μέρους των συνιστωσών και s το μέτρο της LOS συνιστώσας. Η συνάρτηση I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής και πρώτης τάξης. Ο παράγοντας Rice K δίνεται από:

$$K = \frac{s^2/2}{\sigma^2} = \frac{s^2}{2\sigma^2} \quad (3.10)$$

Κατανομή Nakagami

Μετά από αρκετές μελέτες στην πολυδιαδρομική διάδοση μεγάλης απόστασης διαμέσου της ιονόσφαιρας ή τροπόσφαιρας ο Nakagami πρότεινε την εν λόγω Nakagami- m κατανομή για να καλύψει την συνθήκη, όταν υπάρχουν δυο μονοπάτια με συγκρίσιμη μεταξύ τους ισχύ και ισχυρότερη από όλα τα υπόλοιπα μονοπάτια. Η PDF της Nakagami- m κατανομής δίνεται ως εξής:

$$P_N(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(\frac{-mr^2}{\Omega}\right) \quad m \geq \frac{1}{2}, r \geq 0 \quad (3.11)$$

όπου Ω είναι η μέση ισχύς του σήματος ($\Omega = E(r^2)$), $\Gamma(\cdot)$ αναπαριστά την συνάρτηση γάμμα και το m ορίζει το βάθος εξασθένησης. Υπό ορισμένες συνθήκες η κατανομή Nakagami- m περιλαμβάνει άλλες κατανομές ανάλογα με την τιμή του m . Για $m=1$ παίρνουμε αποτελέσματα για Rayleigh κατανομή, για $m = \frac{1}{2}$ έχουμε την μονόπλευρη Gaussian κατανομή, ενώ για μεγάλες τιμές του m προσεγγίζεται η lognormal κατανομή.

3.2.4. Μοντέλα μονής Κατάστασης

Ωστόσο οι απλές κατανομές που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο σε ορισμένες περιπτώσεις δεν μπορούν να περιγράψουν την συμπεριφορά των μεταβολών του λαμβανόμενου πλάτους του σήματος. Αυτός είναι και ο λόγος ο οποίος συχνά χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των κατανομών. Όπου υπάρχει συνδυασμός γρήγορων και αργών μεταβολών είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται κατανομές που απαιτούν 2, 3 ή παραπάνω παραμέτρους. Οι τυπικές κατανομές οι οποίες χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι τα μοντέλα Loo (1984), Suzuki (1977) και Corazza-Vatalaro (1994). Μερικές πιο σύνθετες προσεγγίσεις μπορούν να βρεθούν στα μοντέλα Hwang(1997), Patzold (1998), Xie και Fang (2000) και Abdi (2003) ενώ οι περισσότεροι παράμετροι απαιτούνται στο μοντέλο Vatalaro (2005). Συνοπτικά όλα τα συνδυαστικά μοντέλα αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.1 [30], [31].

Μοντέλο	Χρονιά	Σύνθεση Καναλιού $\tilde{r} = r_1 + jr_Q$	Κατανομές
Suzuki	1977	$\tilde{r} = RS \exp(j\varphi)$	R: Rayleigh, S: lognormal, ϕ : uniform
Loo	1984	$\tilde{r} = RS \exp(j\varphi_M) + S \exp(j\varphi_0)$	R: Rayleigh, S: lognormal, ϕ_M , ϕ_0 : uniform
Corazza-Vatalaro	1994	$\tilde{r} = RS \exp(j\theta)$	R: Rice, S: lognormal, θ : uniform
Vatalaro	1995	$\tilde{r} = RS \exp(j\theta) + x_1 + y_1$	R: Rice, S: lognormal,

			x_1, y_1 : Gaussian
Hwang	1997	$\tilde{r} = AS_1 \exp(j\varphi) + RS_2 \exp[j(\theta + \varphi)]$	R: Rayleigh, A: constant, S_1, S_2 : lognormal
Patzold	1998	$\tilde{r} = S \exp(j\theta) + x_1 + y_1$	S: lognormal, x_1, y_1 : Gaussian
Xie-Fang	2000	$\tilde{r} = RS \exp(j\theta)$	R: Beckmann, S: lognormal
Abdi	2003	$\tilde{r} = RS \exp(j\varphi_M) + S \exp(j\varphi_0)$	R: Rayleigh, S: Nakagami

Πίνακας 3.1: Συνδυαστικά μοντέλα κατανομών για LMS κανάλια [31].

Μοντέλο Suzuki

Το μοντέλο Suzuki είναι ένας πολλαπλασιαστικός συνδυασμός κατανομών, ο οποίος περιγράφει τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας στο επίπεδο των χερσαίων αστικών περιβάλλοντων. Συνδυάζει τη Rayleigh κατανομή για διαλείψεις μικρής κλίμακας και την log-normal κατανομή για τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Η PDF για την κατανομή του μοντέλου Suzuki δίνεται ως εξής:

$$p_R(r) = \int_0^{\infty} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma d} \exp\left(-\frac{(\ln \sigma - \mu)^2}{2d^2}\right) d\sigma \quad (3.12)$$

όπου r είναι η περιβάλλουσα της απόσβεσης, $2\sigma^2$ είναι η μέση Rayleigh ισχύς, d η τυπική απόκλιση της μεταβλητής της κανονικής σκίασης και μ είναι η μέση τιμή της μεταβλητής της κανονικής σκίασης.

Μοντέλο Loo

Το μοντέλο Loo είναι το άθροισμα του διανύσματος (phasor) της log-normal κατανομής με αυτό της Rayleigh όπως δείξαμε και στον Πίνακα 3.1 :

$$r = w \exp(j\varphi) + z \exp(j\varphi_0) \quad (3.13)$$

όπου w είναι κατανομημένη βάσει της Rayleigh και η z βάσει της log-normal. Οι φάσεις φ, φ_0 είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Εάν κρατήσουμε προσωρινά σταθερή την μεταβλητή z τότε η r γίνεται το διάνυσμα της Rice:

$$p(r|z) = \frac{r}{b_0} \exp\left(-\frac{(r^2 + z^2)}{2b_0}\right) I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) \quad (3.14)$$

όπου b_0 είναι η πολυδιαδρομική ισχύς και I_0 η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης. Συνδυάζοντας τη παραπάνω PDF με αυτή της log-normal κατανομής, προκύπτει η PDF της κατανομής του μοντέλου Loo:

$$p(r) = \frac{r}{b_0 \sqrt{2\pi d_0}} \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp\left(-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2d_0} - \frac{r^2 + z^2}{2b_0}\right) I_0\left(\frac{rz}{b_0}\right) dz \quad (3.15)$$

όπου $\sqrt{d_0}$ είναι η τυπική απόκλιση και μ είναι η μέση τιμή της log-normal κατανομής. Μπορεί ναδειχθεί ότι για μικρές τιμές της πολυδιαδρομικής ισχύς η r είναι log-normal, ενώ για μεγάλες τιμές Rayleigh [27].

Μοντέλο Corazza and Vatalaro

Το μοντέλο Rice-Log-Normal (RLN) αναπτύχθηκε από τους Corazza και Vatalaro και μπορεί να περιγραφεί ως το γινόμενο των phasor της log-normal και της Ricean κατανομής όπως αποτυπώσαμε και στον Πίνακα 3.1:

$$r = RS \exp(j\varphi) \quad (3.16)$$

όπου η μεταβλητή R είναι κατανομημένη ως προς την Rice και η S ως προς την log-normal κατανομή. Η φάση φ είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Η PDF του Ricean phasor προκύπτει δεσμευμένη από το πλάτος της log-normal S :

$$p(r|S) = 2(K+1) \frac{r}{S^2} \exp\left[-(K+1) \frac{r^2}{S^2} - K\right] I_0\left(2 \frac{r}{S} \sqrt{K(K+1)}\right) \quad (3.17)$$

όπου K είναι ο παράγοντας Rice. Συνδυάζοντας την (3.15) και το phasor της log-normal προκύπτει:

$$p_R(r) = 2(K+1) \frac{r}{\sqrt{2\pi}hd_0} \int_0^{\infty} \frac{1}{S^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln S - h\mu}{hd_0}\right)^2\right] \exp\left[-(K+1)\frac{r^2}{S^2} - K\right] I_0\left(2\frac{r}{S}\sqrt{K(K+1)}\right) dS \quad (3.18)$$

όπου $h = \ln 10 / 20$ και $(hd_0)^2$ είναι η διακύμανση και μ είναι η μέση τιμή της κανονικής κατανομής που σχετίζεται με τις log-normal διαλείψεις. Ο παράγοντας Rice K ορίζεται ως $r_s^2 / (2\sigma^2)$ όπου $r_s^2 / 2$ είναι η ισχύς της LOS συνιστώσας και σ^2 είναι η ισχύς που προκύπτει από τις πολυδιαδρομικές συνιστώσες. Όσο $K \rightarrow \infty$, η PDF της Ricean τείνει στον παλμό Dirac, ο οποίος βρίσκεται στο $R = 1$ και η PDF του μοντέλου RLN γίνεται log-normal. Για $K \rightarrow 0$ η Ricean διαδικασία γίνεται Rayleigh και η PDF του RLN γίνεται PDF του μοντέλου Suzuki. Τέλος για $K \rightarrow \infty$ και $d_0 \rightarrow 0$ οι διαλείψεις δεν έχουν υπόσταση.

Μοντέλο Abdi

Για να απλοποιηθεί η ανάλυση των στατιστικών μοντέλων προτάθηκε από τον Abdi al. [26] ένα εναλλακτικό μοντέλο του Loo. Όπως και στο μοντέλο Loo η πολυδιαδρομική συνιστώσα είναι κατανεμημένη σύμφωνα με την Rayleigh κατανομή αλλά το πλάτος της LOS συνιστώσας περιγράφεται από την κατανομή Nakagami- m αντί της lognormal. Το μοντέλο Abdi [26] είναι το άθροισμα του διανύσματος (phasor) της Nakagami κατανομής με αυτό της Rayleigh όπως δείξαμε και στον Πίνακα 3.1 :

$$r = RS \exp(j\varphi_M) + S \exp(j\varphi_0) \quad (3.19)$$

όπου R, S είναι τα πλάτη της πολυδιαδρομικής και της LOS συνιστώσας και ακολουθούν τις κατανομές Rayleigh και Nakagami αντίστοιχα. Οι φάσεις φ, φ_0 είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Η PDF του μοντέλου Abdi δίνεται ως εξής:

$$P_{Abdi}(r) = \left(\frac{2\sigma^2 m}{2\sigma^2 m + \Omega}\right)^m \cdot \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) \cdot {}_1F_1\left(m, 1, \frac{\Omega r^2}{2\sigma^2(2\sigma^2 m + \Omega)}\right) \quad r \geq 0 \quad (3.20)$$

όπου σ^2 είναι η μέση ισχύς της πολυδιαδρομικής συνιστώσας, Ω είναι η μέση ισχύς της LOS συνιστώσας, m είναι η παράμετρος Nakagami και ${}_1F_1$ η συρρέουσα υπεργεωμετρική συνάρτηση. Το μοντέλο Abdi έχει παρόμοια εφαρμογή με το μοντέλο Loo αλλά με λιγότερη υπολογιστική δυσκολία [31].

3.2.5. Μοντέλα πολλαπλών καταστάσεων

Για να αντιμετωπίσουμε το μεγάλο δυναμικό εύρος του λαμβανόμενου σήματος λόγω της κινητικότητας των τερματικών, τα στατιστικά μοντέλα LMS περιγράφουν διαφορετικές καταστάσεις που αντιστοιχούν σε αργές αλλαγές των συνθηκών του περιβάλλοντος στη διαδρομή μετάδοσης. Η χρονική ακολουθία των καταστάσεων μπορεί να περιγραφεί με τις Μαρκωβιανές αλυσίδες (Markov chains). Ο αριθμός των καταστάσεων για αυτά τα μοντέλα LMS κυμαίνονται από δυο έως και σε σενάρια με πέντε ή περισσότερες καταστάσεις. Σε αντίθεση με τα μοντέλα μονής κατάστασης, τα μοντέλα πολλαπλών καταστάσεων αποτελούνται από ένα μείγμα σταθμισμένων στατιστικών κατανομών (π.χ. Rayleigh, Rice) και ορισμένων μοντέλων μονής κατάστασης (π.χ. Loo, Suzuki). Ορισμένα από αυτά τα μοντέλα πολλαπλών καταστάσεων φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Προτάθηκε από:	Χρονιά	Δομή μοντέλου
Lutz et al.	1991	Rice+Suzuki
Wakana	1991	Rice+Rice/Rice
Barts&Stutzmann	1992	Rice+Loo
Karasawa et al.	1995	Rice+Loo+Rayleigh
Aktura&Vogel	1995	Rice+Loo+Loo ή Rayleigh
Perez-Fontan et al.	1997	Loo+Loo+Loo
Rice&Humpherys	1997	Rice/Rice+Suzuki
Mehrnia&Hashemi	1999	Rice+Hoyt
Perez-Fontan et al.	2007	Loo+Loo
Ming et al.	2008	Rice/Rice+Loo+Rayleigh/Rayleigh

Πίνακας 3.2: Διαθέσιμα μοντέλα πολλαπλών καταστάσεων για LMS κανάλια [31].

4. Ανάλυση συνεργατικού δορυφορικού και επίγειου συστήματος με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη

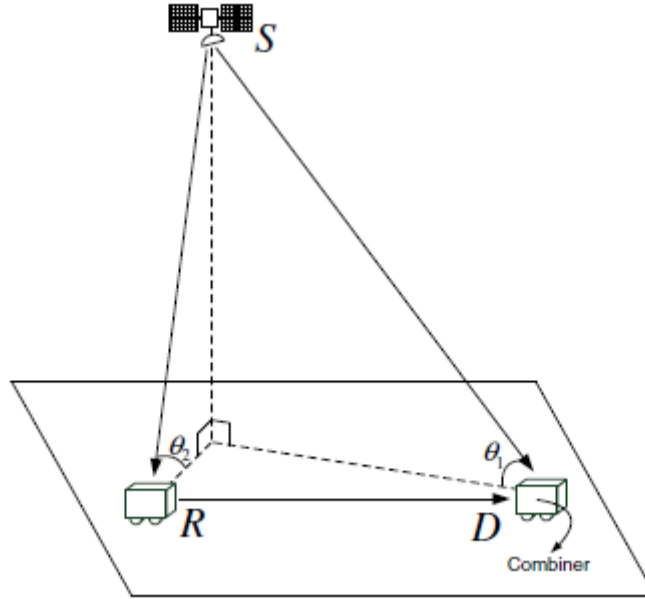
4.1. Εισαγωγή

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση της επίδοσης ενός μοντέλου συνεργατικού διαφορισμού που χρησιμοποιεί έναν επίγειο αναγεννητικό επαναλήπτη. Στην συνέχεια αναλύονται οι πιθανότητες αποκοπής του συστήματος LMS τόσο για το συνεργατικό πρωτόκολλο Fixed Relaying (FR) όσο και για το πρωτόκολλο Selection Relaying (SR). Και τα δυο LMS κανάλια υποφέρουν από διαλείψεις που ακολουθούν το μοντέλο του Abdi (shadowed Rician) ενώ η επίγεια ζεύξη από Nakagami-m διαλείψεις. Οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού LMS συστήματος υπολογίζονται μέσω υπολογισμού σχετικά εύκολων ολοκληρωμάτων ενώ επίσης μελετώνται εκτενώς οι επιπτώσεις των διάφορων περιβάλλοντων σκίασης στην απόδοση του συστήματος.

4.2. Μοντελοποίηση του συστήματος

Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Ο δορυφόρος (κόμβος εκπομπής S) εκπέμπει το ίδιο σήμα πληροφορίας τόσο προς το κινητό δορυφορικό τερματικό R όσο και προς τον κόμβο λήψης D. Το κινητό δορυφορικό τερματικό λειτουργεί ως αναγεννητικός επαναλήπτης R, χρησιμοποιώντας την τεχνική DF, αναγεννά το λαμβανόμενο σήμα και στη συνέχεια το επανεκπέμπει προς τον κόμβο λήψης D, δημιουργώντας μία ζεύξη διαφορικότητας. Ο κόμβος λήψης D συνδυάζει συμμασικά τα δυο σήματα, χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική διαφορικής λήψης SC είτε την τεχνική MRC είτε την τεχνική EGC, το σήμα της απευθείας ζεύξης και το λαμβανόμενο σήμα μέσω του επαναλήπτη, δημιουργώντας το τελικό σήμα. Σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική MRC η οποία είναι και η πιο αποδοτική [32]. Και τα δυο LMS κανάλια υποφέρουν από Rician διαλείψεις με σκίαση (shadowed Rician) ενώ η επίγεια ζεύξη από Nakagami-m διαλείψεις για αυτό το λόγο η ισχύς του σήματος ακολουθεί την κατανομή Gamma.

Οι γωνίες ανύψωσης των S-D και S-R μονοπατιών ορίζονται ως θ_j (deg), $j = 1, 2$. Δεδομένου ότι το επίγειο μονοπάτι R-D είναι συγκριτικά πολύ μικρό σε σχέση με τα δορυφορικά μονοπάτια S-R και R-D, οι δυο αυτές δορυφορικές ζεύξεις θεωρούνται παράλληλες και οι γωνίες ανύψωσης ίσες $\theta_1 = \theta_2$. Αυτή η υπόθεση δεν περιορίζει και δεν επηρεάζει την περαιτέρω εφαρμογή των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.



Σχήμα 4.1: Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος με ένα αναγεννητικό επαναλήπτη [32].

4.3. Φασματική απόδοση των σχημάτων TDMA/FDMA και SDMA

Η πρόσβαση των κόμβων στον ασύρματο δίαυλο επιτυγχάνεται μέσω των τεχνικών πολυπλεξίας στο χρόνο (Time Division Multiple Access-TDMA), στην συχνότητα (Frequency Division Multiple Access-FDMA), ή στον χώρο (Space Division Multiple Access-SDMA). Τα σχήματα TDMA και FDMA χρησιμοποιούν δυο βαθμούς ελευθερίας (Degrees Of Freedom-DOF) δηλαδή στη πρώτη χρονική/συχνοτική σχισμή η πηγή S εκπέμπει το σήμα τόσο στον αναμεταδότη R όσο και στον τελικό προορισμό D , ενώ την δεύτερη χρονική/συχνοτική σχισμή ο αναμεταδότης R επανεκπέμπει το σήμα στον τελικό προορισμό D . Στο σχήμα SDMA έχουμε μόνο ένα DOF, συνεπώς η πηγή S εκπέμπει το σήμα και ο αναμεταδότης R λαμβάνει ενώ στέλνει στο τελικό προορισμό D το προηγούμενο σήμα που είχε στείλει η πηγή S . Τέλος η πηγή λαμβάνει ταυτόχρονα τα σήματα από την πηγή S και τον αναμεταδότη R .

Τα σχήματα TDMA/FDMA οδηγούν σε μη αποδοτική χρήση του φάσματος λόγω των δυο DOF και η φασματική απόδοση μπορεί να ενσωματωθεί στην πιθανότητα αποκοπής της χωρητικότητας όπως φαίνεται στον τύπο:

$$P_{out(scheme)} = P\left(\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma_c) < \log_2(1+\gamma_{th.norm})\right) \quad (4.1)$$

όπου το γ_c είναι το SNR της κάθε ζεύξης ενώ το $\gamma_{th.norm}$ ένα κανονικοποιημένο κατώφλι του SNR της κάθε ζεύξης και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma_{th} = \begin{cases} \gamma_{th.norm}^2 + 2\gamma_{th.norm} & TDMA/FDMA \\ \gamma_{th.norm} & SDMA \end{cases} \quad (4.2)$$

4.4. Ανάλυση πιθανοτήτων αποκοπής

Η πιθανότητα αποκοπής σε ένα σύστημα LMS ορίζεται ως το κλάσμα του χρόνου όπου η συνολική αμοιβαία πληροφορία $I(bits(Hz \cdot sec))$ δεν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι $I_{th.norm}$:

$$P_{out} = P(I < I_{th.norm}) \quad (4.3)$$

4.4.1. Πρωτόκολλο Fixed Relaying(FR)

Όπως αναφέραμε και στο 2^ο Κεφάλαιο στο πρωτόκολλο FR ο επαναλήπτης R επανεκπέμπει πάντα το λαμβανόμενο σήμα για αυτό το λόγο, το πρωτόκολλο περιορίζεται βάσει της δορυφορικής ζεύξης S-R. Από την Σχέση (2.14) η αμοιβαία πληροφορία του FR που περιγράφει το ενδεχόμενο αποκοπής (4.1) δίνεται ως εξής:

$$I_{FR-DF} = \frac{1}{2} \min\{\log(1 + \gamma_2), \log(1 + \gamma_1 + \gamma_3)\} \quad (4.4)$$

όπου $\gamma_j, (j=1,2,3)$ αντιστοιχούν στο SNR των ζεύξεων S-D, S-R και R-D. Η κανονικοποιημένη τιμή του κατωφλίου $I_{th.norm}$ ενσωματώνει την φασματική ανεπάρκεια των 2 χρονικών σχισμών που χρησιμοποιούνται από το συνεργατικό πρωτόκολλο το οποίο περιγράφεται στην Σχέση (4.2) από τον όρο $\frac{1}{2}$. Το κατώφλι του SNR της κάθε ζεύξης γ_{th} σχετίζεται με το $I_{th.norm}$ και με ένα κανονικοποιημένο κατώφλι του SNR της κάθε ζεύξης $\gamma_{th.norm}$ [32] ως εξής:

$$\gamma_{th} = 2^{2I_{th.norm}} - 1 = 2^{2\log_2(1 + \gamma_{th.norm})} - 1 = \gamma_{th.norm}^2 + 2\gamma_{th.norm} \quad (4.5)$$

Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (4.1-4.3), τις κατανομές Rice για σκίαση από το μοντέλο Abdi $f_{\gamma_1}(\gamma_1)$ και $f_{\gamma_2}(\gamma_2)$, την κατανομή Gamma $f_{\gamma_3}(\gamma_3)$ καθώς και την πλήρη και ελλιπής συνάρτηση της κατανομής Gamma, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ και $\Gamma(\cdot)$ αντίστοιχα, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= P(\gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_2 \geq \gamma_{th})P(\gamma_1 + \gamma_3 < \gamma_{th}) \\
 &= \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \left(1 - \Gamma\left(m_3, \frac{m_3}{\Omega_3}(\gamma_{th} - \gamma_1)\right) / \Gamma(m_3) \right) d\gamma_1 \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

Οι παράμετροι της συνάρτησης Gamma για το επίγειο μονοπάτι συμβολίζονται ως m_3, Ω_3 ενώ η κατανομή Rice για σκίαση δίνεται από την Σχέση (3.20).

4.4.2. Πρωτόκολλο Selection Relaying (SR)

Στο πρωτόκολλο SR όπως αναλύσαμε στο 2^ο Κεφάλαιο, ο αναγεννητικός επαναλήπτης R επανεκπέμπει το σήμα μόνο στην περίπτωση όπου το λαμβανόμενο σήμα αποκωδικοποιείται σωστά. Εάν ο R δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα η πηγή συνεχίζει την μετάδοση του σήματος μέσω της απευθείας ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη και στα δυο συχνοτικά παράθυρα ώστε στο τέλος να μπορεί να συνδυάσει δυο σήματα που έλαβε με την απευθείας ζεύξη από τον πομπό. Η αμοιβαία πληροφορία από το πρωτόκολλο SR που περιγράφει το ενδεχόμενο (4.1) δίνεται από την Σχέση (2.18) ως εξής:

$$I_{SR-DF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_1) & \gamma_2 < \gamma_{th} \\ \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_1 + \gamma_3) & \gamma_2 \geq \gamma_{th} \end{cases} \quad (4.7)$$

Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (4.1), (4.2), (4.5), τις κατανομές Rice για σκίαση από το μοντέλο Abdi $f_{\gamma_1}(\gamma_1)$ και $f_{\gamma_2}(\gamma_2)$, την κατανομή Gamma $f_{\gamma_3}(\gamma_3)$ καθώς και την πλήρη και ελλιπής συνάρτηση της κατανομής Gamma, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ και $\Gamma(\cdot)$ αντίστοιχα, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

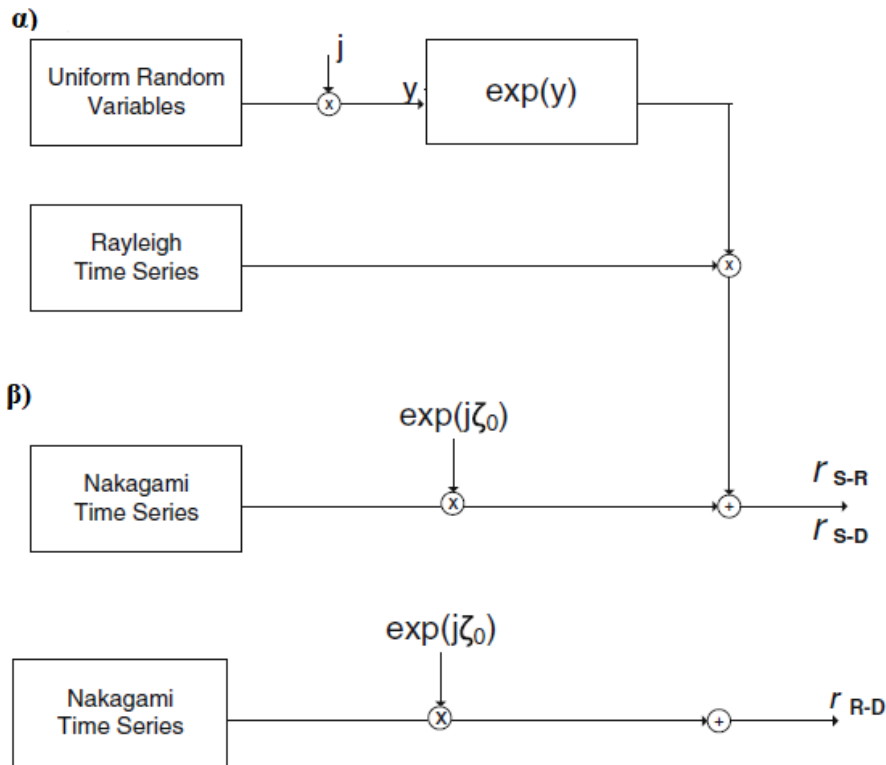
$$\begin{aligned}
P_{out} &= P(\gamma_2 < \gamma_{th})P(\gamma_1 < \gamma_{th}) + P(\gamma_2 \geq \gamma_{th})P(\gamma_1 + \gamma_3 < \gamma_{th}) \\
&= \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \cdot \\
&\quad \cdot \left(1 - \Gamma\left(m_3, \frac{m_3}{\Omega_3}(\gamma_{th} - \gamma_1)\right) / \Gamma(m_3) \right) d\gamma_1
\end{aligned} \tag{4.8}$$

4.5. Προσομοίωση, αποτελέσματα και σχολιασμός

Σε αυτή την παράγραφο θα επιβεβαιώσουμε την εγκυρότητα των παραπάνω πιθανοτήτων αποκοπής μέσω προσομοιώσεων με χρήση χρονοσειρών. Για την παραγωγή των χρονοσειρών των τριών ζεύξεων Source-Relay (S-R), Relay-Destination (R-D), Source-Destination (S-D) θα χρησιμοποιήσουμε το μπλοκ διάγραμμα της μελέτης [32] όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Πιο συγκεκριμένα για την παραγωγή των χρονοσειρών για τις ζεύξεις S-R, S-D χρησιμοποιούμε το μοντέλο Abdi όπου το λαμβανόμενο σήμα είναι ένα άθροισμα ενός διανύσματος Rayleigh και ενός Nakagami ως εξής:

$$r(t) = A(t) \exp(j\alpha(t)) + Z(t) \exp(j\zeta_0) \tag{4.9}$$

όπου $A(t)$ είναι κατανομημένο βάσει της Rayleigh κατανομής, $\alpha(t)$ είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο διάστημα $[0, 2\pi]$, $Z(t)$ είναι το πλάτος της απευθείας συνιστώσας που ακολουθεί την κατανομή Nakagami και ζ_0 όπου είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Τα δυο διανύσματα θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους ενώ η στιγμιαία ισχύς θεωρείται ως r^2 . Σε κάθε χρονική σχισμή τα παραγόμενα $A(t)$, $\alpha(t)$ και ζ_0 λαμβάνονται ανεξάρτητα σε αντίθεση με το $Z(t)$ το οποίο θεωρείται συσχετισμένο αφού αναπαριστά το πλάτος της απευθείας συνιστώσας η οποία βρίσκεται σε συνθήκες σκίασης. Η αυτοσυσχέτιση του $Z(t)$ λαμβάνεται βάσει της μελέτης [33] ενώ επίσης η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται κατά την παραγωγή των χρονοσειρών Nakagami για την προσομοίωση της επίγειας ζεύξης μεταξύ του επίγειου επαναλήπτη και του προορισμού. Στο Σχήμα 4.2α και 4.2β φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα όπου ακολουθήθηκε για την παραγωγή των χρονοσειρών με την βοήθεια του προγράμματος MATLAB.



Σχήμα 4.2 Μπλοκ διαγράμματα για την παραγωγή: α) Χρονοσειρών για το λαμβανόμενο σήμα των ζεύξεων S-R, S-D του συνεργατικού συστήματος, β) Χρονοσειρών για το λαμβανόμενο σήμα της επίγειας ζεύξης του συνεργατικού συστήματος.

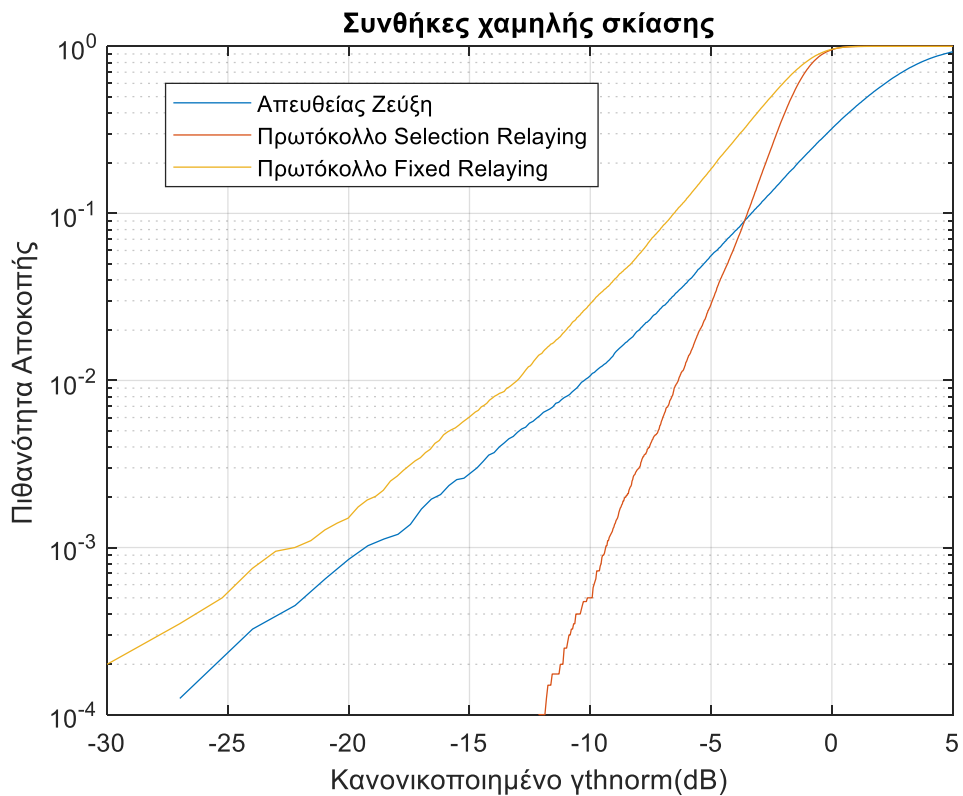
Αρχικά προσομοιώθηκε ένα συνεργατικό δορυφορικό και επίγειο σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη καθώς και η απευθείας ζεύξη έως τον τελικό προορισμό και παράχθηκαν οι πιθανότητες αποκοπής του συστήματος για τα δυο πρωτόκολλα SR και FR καθώς και η απευθείας ζεύξη από τον δορυφόρο έως τον τελικό προορισμό για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνθηκών σκίασης. Σύμφωνα με τις περιπτώσεις συνθηκών σκίασης χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι των κατανομών για το μοντέλο Abdi από την μελέτη [26] όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.1 .

Από τα αποτελέσματα που παράχθηκαν στα Σχήματα 4.3-4.5 συμπεραίνουμε ότι το πρωτόκολλο FR παρουσιάζει την χειρότερη συμπεριφορά σε σχέση με το πρωτόκολλο SR αλλά και με την απευθείας ζεύξη για όλες τις τιμές των κανονικοποιημένων κατωφλίων των σηματοθορυβικών λόγων $\gamma_{th, norm}$ και για όλες τις περιπτώσεις των συνθηκών σκίασης. Στις περιπτώσεις χαμηλής και κανονικής σκίασης θα επιλέγαμε το πρωτόκολλο SR για να επιτύχουμε την βελτίωση του συνεργατικού συστήματος LMS αφού επιτυγχάνει αισθητά καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το πρωτόκολλο FR για όλες τις τιμές των κανονικοποιημένων κατωφλίων των σηματοθορυβικών λόγων $\gamma_{th, norm}$. Επιπλέον το

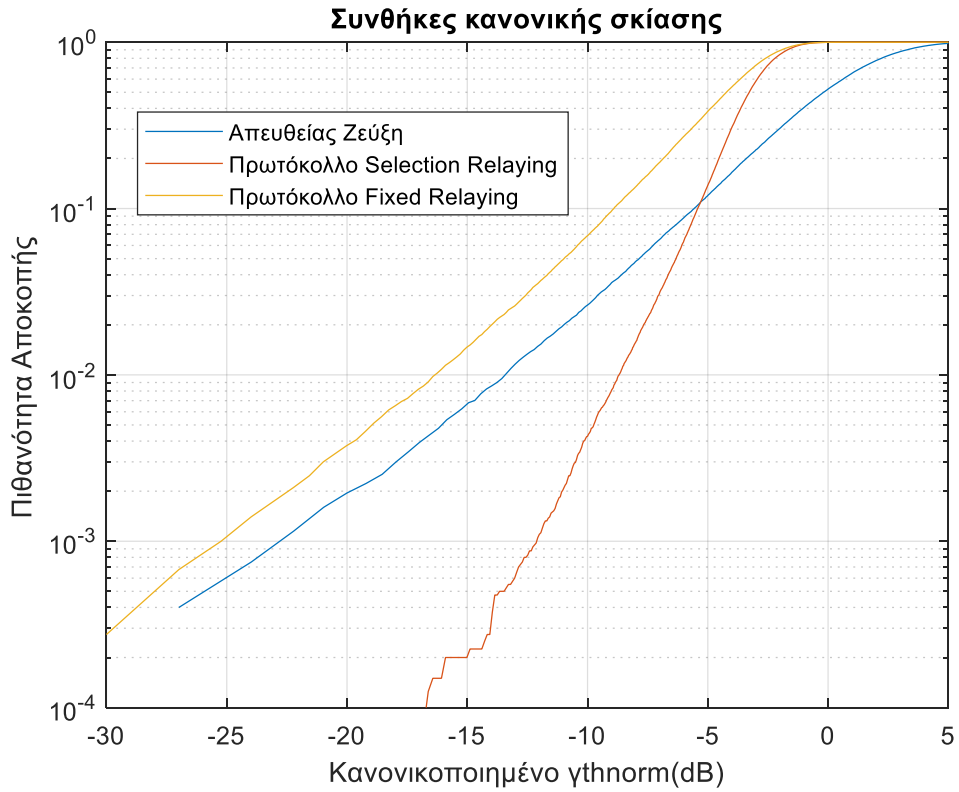
πρωτόκολλο SR εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά από την απευθείας ζεύξη ειδικά σε μικρές τιμές των πιθανοτήτων αποκοπής όπου εξασφαλίζει διαφορετικό κέρδος περίπου 18dB, 12dB για πιθανότητες αποκοπής 10^{-4} και 10^{-3} αντίστοιχα. Ακόμα και σε πιθανότητες αποκοπής 10^{-2} εμφανίζει διαφορετικό κέρδος περίπου 5dB. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονίσουμε ότι για συνθήκες ισχυρής σκίασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 το συνεργατικό σύστημα δεν επιφέρει καμία απολύτως βελτίωση στην συνολική εμπειρία επομένως σε αυτή την περίπτωση παραμένουμε στην χρήση της απευθείας ζεύξης.

Συνθήκες σκίασης	b_0	m	Ω
Χαμηλή σκίαση	0.158	19.4	1.29
Κανονική σκίαση	0.126	10.1	0.835
Ισχυρή σκίαση	0.063	0.739	$8.97 \cdot 10^{-4}$

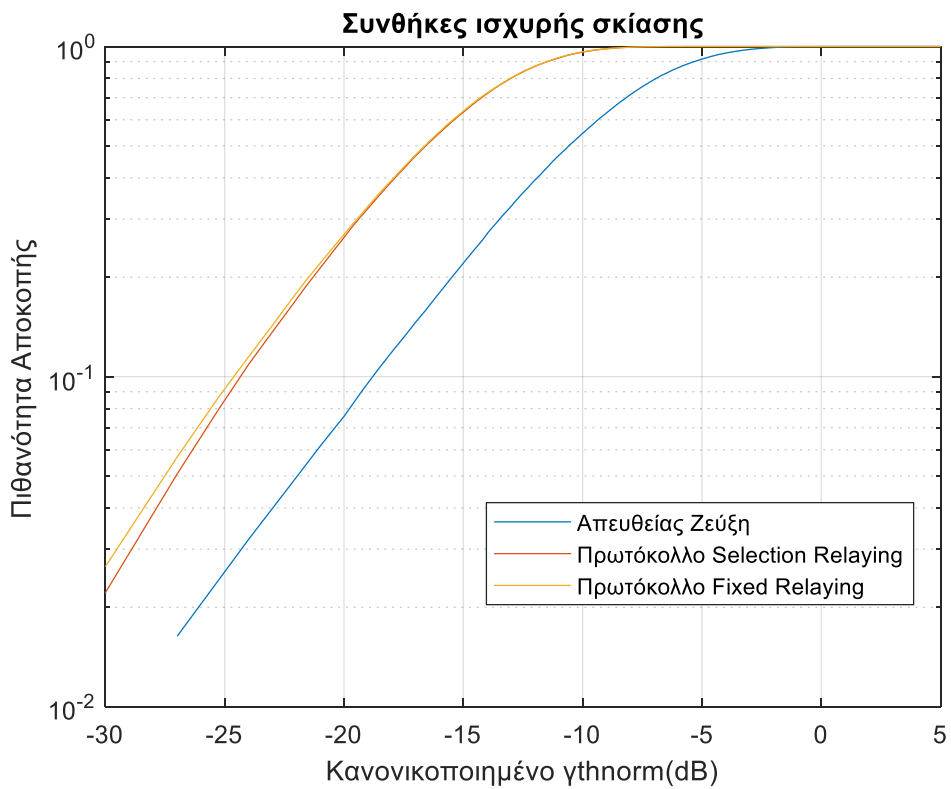
Πίνακας 4.1 Παράμετροι σκίασης που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του συστήματος [26].



Σχήμα 4.3 Πιθανότητα αποκοπής για τα διαφορετικά πρωτόκολλα LMS καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες χαμηλής σκίασης.



Σχήμα 4.4 Πιθανότητα αποκοπής για τα διαφορετικά πρωτόκολλα LMS καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες κανονικής σκίασης.

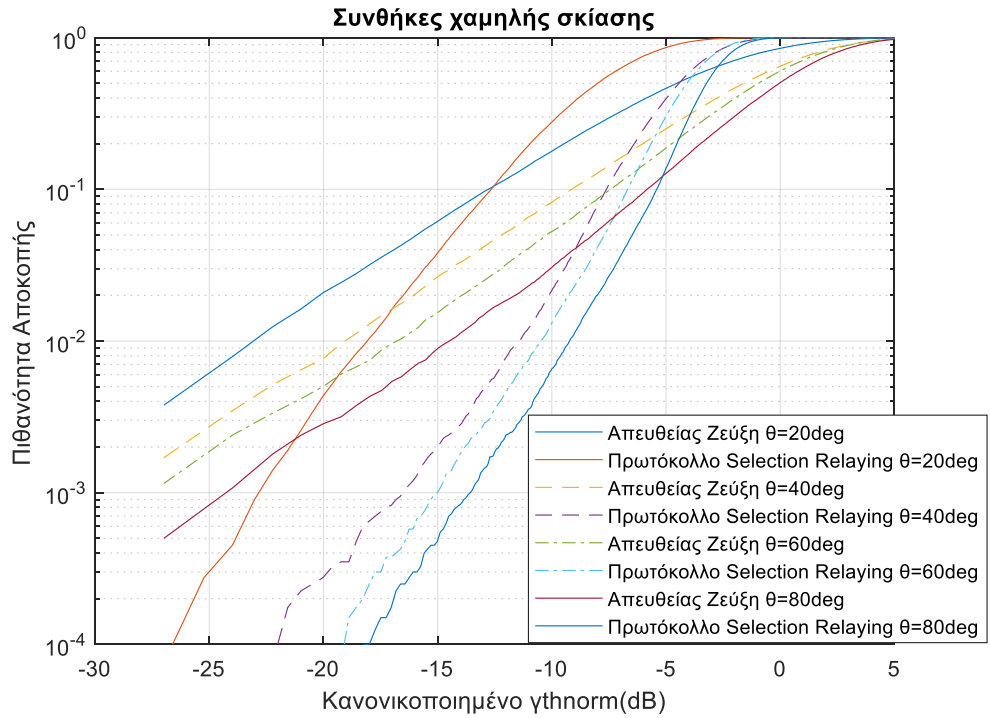


Σχήμα 4.5 Πιθανότητα αποκοπής για τα διαφορετικά πρωτόκολλα LMS καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες ισχυρής σκίασης.

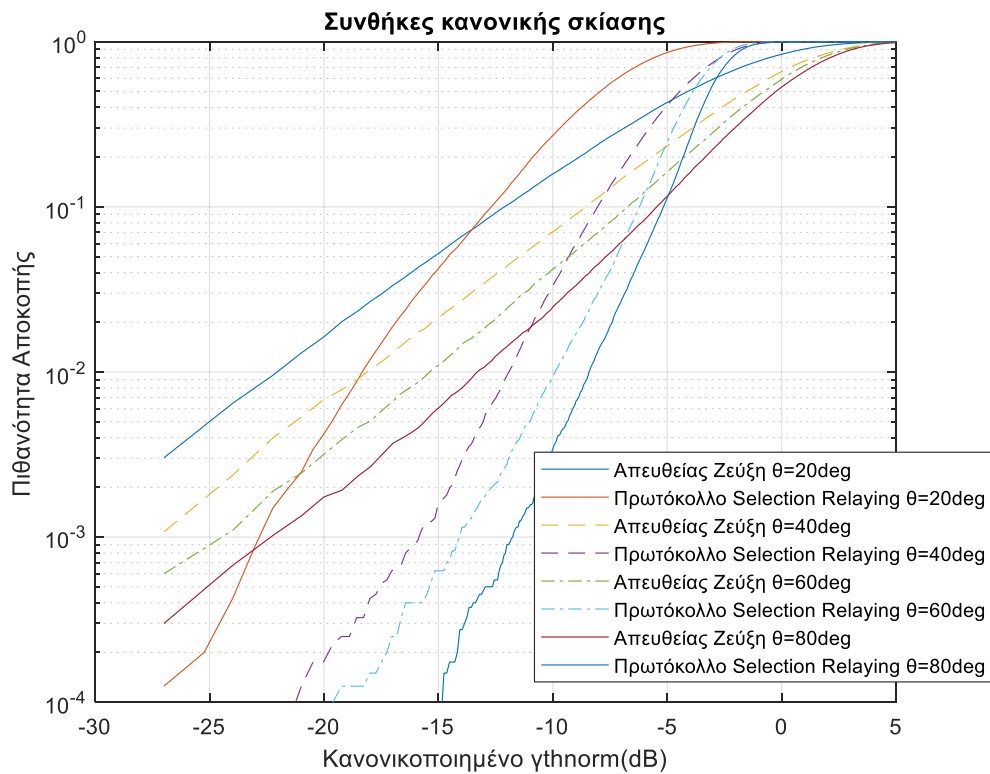
Στα Σχήματα 4.6-4.8 αποτυπώνονται οι πιθανότητες αποκοπής για το πρωτόκολλο SR του LMS καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες σκίασης για διαφορετικές γωνίες ανύψωσης θ όπου $20^\circ < \theta < 80^\circ$. Η επίγεια ζεύξη μεταξύ επαναλήπτη και τελικού προορισμού υποφέρει από διαφορετικές συνθήκες σκίασης με τιμές σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 ενώ οι παράμετροι b_0, m, Ω των δορυφορικών ζεύξεων μεταξύ δορυφόρου και επαναλήπτη αλλά και της απευθείας ζεύξης μεταξύ δορυφόρου και προορισμού εξαρτώνται από την γωνία ανύψωσης και υπολογίζονται βάσει των τύπων της μελέτης [26] όπως φαίνονται στην συνέχεια:

$$\begin{aligned} b_0(\theta) &= -4.7943 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 5.5784 \cdot 10^{-6} \theta^2 - 2.1344 \cdot 10^{-4} \theta + 3.2710 \cdot 10^{-2} \\ m(\theta) &= 6.3739 \cdot 10^{-5} \theta^3 + 5.8533 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 1.5973 \cdot 10^{-1} \theta + 3.5156 \\ \Omega(\theta) &= 1.4428 \cdot 10^{-5} \theta^3 - 2.3798 \cdot 10^{-3} \theta^2 + 1.2702 \cdot 10^{-1} \theta - 1.4864 \end{aligned} \quad (4.10)$$

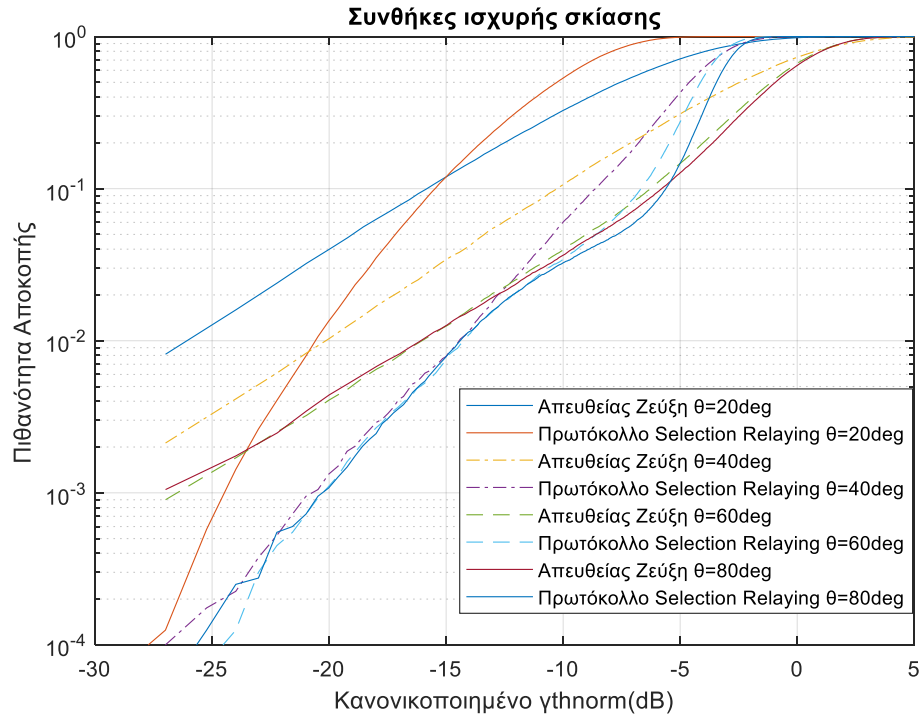
Παρατηρώντας τα Σχήματα 4.6-4.8 συμπεραίνουμε ότι οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού και επίγειου συστήματος μειώνονται καθώς αυξάνεται η γωνία ανύψωσης επομένως έχουμε βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς αυξάνουμε την γωνία ανύψωσης το σύστημα μας υποφέρει από συνεχώς μειούμενη σκίαση. Βέβαια είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η αύξηση της γωνίας ανύψωσης δεν οδηγεί σε σταθερή αύξηση του κέρδους του συστήματος αλλά σε συνεχώς μειούμενη αφού για μια δεδομένη πιθανότητα αποκοπής έχουμε διαφορετικό κέρδος σε ίδια αύξηση της γωνίας ανύψωσης σε διαφορετικά διαστήματα. Πιο συγκεκριμένα για πιθανότητα αποκοπής 10^{-2} αύξηση της γωνίας ανύψωσης από 20° σε 40° μας δίνει κέρδος περίπου 4dB ενώ αύξηση της γωνίας ανύψωσης από 60° σε 80° μας δίνει κέρδος περίπου 2dB. Σε συνθήκες χαμηλής η κανονικής σκίασης με χρήση του συνεργατικού συστήματος μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης με κέρδος που φτάνει περίπου έως 13dB.



Σχήμα 4.6 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες χαμηλής σκίασης για γωνίες ανύψωσης $20 < \theta < 80 \text{deg}$.



Σχήμα 4.7 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες κανονικής σκίασης για γωνίες ανύψωσης $20 < \theta < 80 \text{deg}$.



Σχήμα 4.8 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες ισχυρής σκίασης για γωνίες ανύψωσης $20 < \theta < 80 \text{deg}$.

Επιπλέον παρατηρώντας και τα τρία σχήματα όταν η επίγεια ζεύξη υποφέρει κάτω από οποιαδήποτε συνθήκη σκίασης το συνεργατικό σύστημα με το πρωτόκολλο SR εμφανίζει αισθητά καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την απευθείας ζεύξη για πιθανότητες έως και περίπου 10^{-1} . Επομένως υπό κανονικές συνθήκες το συνεργατικό σύστημα υπερνικά την απευθείας ζεύξη για γωνίες ανύψωσης $20^\circ < \theta < 80^\circ$.

4.6. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε την γεωμετρική διάταξη και αναλύσαμε την επίδοση ενός μοντέλου συνεργατικού διαφορισμού που χρησιμοποιεί έναν επίγειο αναγεννητικό επαναλήπτη. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν οι θεωρητικές εκφράσεις των πιθανοτήτων αποκοπής για τα πρωτόκολλα FR και SR του συνεργατικού διαφορικού συστήματος με έναν επίγειο επαναλήπτη ενώ στην συνέχεια υλοποίησα και παρουσίασα μια προσομοίωση του συνεργατικού συστήματος και της απευθείας ζεύξης κάτω από διαφορετικές συνθήκες σκίασης συγκρίνοντας τις πιθανότητες αποκοπής λαμβάνοντας υπόψιν διάφορα σενάρια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδοση του συνεργατικού συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το είδος των συνθηκών σκίασης τόσο των δορυφορικών αλλά και επίγειων ζεύξεων αλλά και από την επιλογή της γωνίας ανύψωσης στις δορυφορικές ζεύξεις. Το σημαντικότερο συμπέρασμα όμως είναι ότι στις περισσότερες

περιπτώσεις όπου είχαμε συνθήκες χαμηλής ή κανονικής σκίασης το συνεργατικό σύστημα έδειχνε καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την απευθείας ζεύξη προσδίδοντας ικανοποιητικές τιμές διαφορικού κέρδους, το οποίο είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό στις περιπτώσεις όπου θέλουμε να επιτύχουμε αύξηση της απόδοσης του συστήματος μας.

5. Ανάλυση συνεργατικού συστήματος με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες σε περιβάλλον με ασυσχέτιστες διαλείψεις σκίασης

5.1. Εισαγωγή

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση και ανάλυση δυο συνεργατικών συστημάτων με δυο επαναλήπτες σε τοπολογία διαμαντιού και ρόμβου. Επιπλέον παρουσιάζονται οι αναλυτικές εκφράσεις των πιθανοτήτων αποκοπής της κάθε τοπολογίας ενώ αναλύεται η επίδοση του κάθε συστήματος για διαφορετικές περιπτώσεις των συνθηκών σκίασης.

Και στις δυο τοπολογίες των συνεργατικών συστημάτων χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα FR και SR, σύμφωνα με το οποία οι επαναλήπτες ενός συνεργατικού συστήματος πάντα προωθούν το λαμβανόμενο σήμα προς τον προορισμό ή επιλέγουν το αν θα προωθήσουν ή όχι το λαμβανόμενο σήμα προς τον προορισμό λαμβάνοντας υπόψιν τον συντελεστή εξασθένησης σε κάθε βήμα αντίστοιχα, είτε με την τεχνική της ενίσχυσης και προώθησης (amplify and forward-AF) είτε με την τεχνική της αποκωδικοποίησης και προώθησης (decode and forward -DF). Στην περίπτωση μας οι αναμεταδότες είναι αναγεννητικοί και χρησιμοποιούν την τεχνική DF, όπου ο αναμεταδότης λαμβάνει το σήμα από την πηγή το αποδιαμορφώνει, το αποκωδικοποιεί, εφαρμόζει κώδικα διόρθωσης λαθών και στην συνέχεια το αποστέλλει στον προορισμό αφού πρώτα το κωδικοποιήσει και το επαναδιαμορφώσει.

Και στις δυο τοπολογίες τα κανάλια δορυφόρου επαναλήπτη υποφέρουν από Rician διαλείψεις. Ενώ πιο συγκεκριμένα οι ζεύξεις μεταξύ των αναμεταδοτών και του τελικού προορισμού περιγράφονται από τις shadowed Rician κατανομές του μοντέλου Abdi, το οποίο αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.3. Σύμφωνα με τις περιπτώσεις συνθηκών σκίασης χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι των κατανομών για το μοντέλο Abdi από την μελέτη [26] όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1 ενώ για τις Rician κατανομές ο παράγοντας Rice K είχε την τιμή $K = 20$.

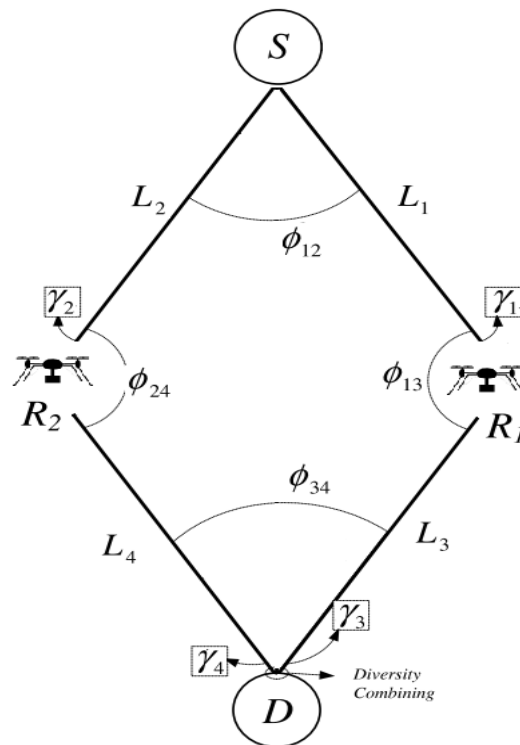
Συνθήκες σκίασης	b_0	m	Ω
Χαμηλή σκίαση	0.158	19.4	1.29
Κανονική σκίαση	0.126	10.1	0.835
Ισχυρή σκίαση	0.063	0.739	$8.97 \cdot 10^{-4}$

Πίνακας 5.1 Παράμετροι σκίασης που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση του συστήματος [26].

5.2. Συνεργατικό Σύστημα τοπολογίας ρόμβου

5.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος

Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Ο δορυφόρος (κόμβος εκπομπής) S εκπέμπει το ίδιο σήμα πληροφορίας τόσο προς το κινητό δορυφορικό τερματικό R_1 όσο και προς το κινητό δορυφορικό τερματικό R_2 . Τα κινητά δορυφορικά τερματικά λειτουργούν ως αναγεννητικοί επαναλήπτες R_1 , R_2 , χρησιμοποιώντας την τεχνική αποκωδικοποίησης-και-προώθησης, αναγεννούν το λαμβανόμενο σήμα και στη συνέχεια το επανεκπέμπουν προς τον κόμβο λήψης D , δημιουργώντας μία ζεύξη διαφορισμού. Ο κόμβος λήψης D συνδυάζει συμφασικά τα δυο σήματα, χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική SC είτε την τεχνική MRC είτε την τεχνική EGC, τα λαμβανόμενα σήματα μέσω των επαναληπτών, δημιουργώντας το τελικό σήμα. Σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική MRC η οποία έχει αξιολογηθεί και ως πιο αποδοτική [32]. Οι γωνίες ανύψωσης των $S-R_1$ και $S-R_2$ μονοπατιών ορίζονται ως ϕ_{ij} (deg), ($i, j = 1, 2, 3, 4$) και $i \neq j$ ενώ τα μήκη της κάθε ζεύξης ορίζονται ως $L_j(m)$ όπου ($j = 1, 2, 3, 4$)



Σχήμα 5.1: Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος με δυο αναγεννητικούς επαναλήπτες σε τοπολογία ρόμβου.

Η πρόσβαση των κόμβων στον ασύρματο δίαυλο επιτυγχάνεται μέσω των τεχνικών πολυπλεξίας στο χρόνο (Time Division Multiple Access-TDMA), στην συχνότητα (Frequency Division Multiple Access-FDMA), ή στον χώρο (Space Division Multiple Access-SDMA). Τα σχήματα TDMA και FDMA χρησιμοποιούν δυο βαθμούς ελευθερίας (Degrees Of Freedom-DOF) δηλαδή στη πρώτη χρονική/συχνοτική σχισμή η πηγή S εκπέμπει το σήμα και στους δυο αναμεταδότες R_1, R_2 ενώ την δεύτερη χρονική/συχνοτική σχισμή οι αναμεταδότες επανεκπέμπουν το σήμα στον τελικό προορισμό D . Στο σχήμα SDMA έχουμε μόνο ένα DOF, συνεπώς η πηγή S εκπέμπει ένα σήμα και οι δυο αναμεταδότες R_1, R_2 λαμβάνουν ενώ στέλνουν το προηγούμενο σήμα που είχε στείλει η πηγή S . Τέλος η πηγή λαμβάνει ταυτόχρονα τα σήματα και από τους δυο αναμεταδότες R_1, R_2 .

5.2.2. Ανάλυση πιθανοτήτων αποκοπής

Πρωτόκολλο Fixed Relaying(FR)

Σε αυτή την παράγραφο θα αναλυθούν οι εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος. Στην ακόλουθη ανάλυση απαιτείται τόσο οι επαναλήπτες R_1, R_2 όσο και ο προορισμός D να αποκωδικοποιήσουν σωστά το σήμα. Στον προορισμό D όταν χρησιμοποιείται η τεχνική διαφορικής λήψης MRC, το συνολικό SNR προκύπτει από τη σχέση:

$$\gamma_{MRC} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 + \gamma_4) \quad (5.1)$$

οι πρώτοι δυο όροι της έκφρασης (5.1) εκφράζει το γεγονός ότι οι επαναλήπτες R_1, R_2 αποκωδικοποίησαν επιτυχώς το λαμβανόμενο σήμα από την πηγή ενώ ο τρίτος όρος των δυο εκφράσεων αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι ο προορισμός D μπόρεσε να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς το λαμβανόμενο σήμα από τους επαναλήπτες.

Η πιθανότητα αποκοπής ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο το συνολικό SNR γ_c δεν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι γ_{th} :

$$P_{out} = P(\gamma_c < \gamma_{th}) \quad (5.2)$$

όπου το κατώφλι γ_{th} εξαρτάται από το σχήμα της πρόσβασης των κόμβων στο ασύρματο δίαυλο και αντιστοιχίζεται σε ένα κανονικοποιημένο κατώφλι ανάλογα με το κάθε

πρωτόκολλο βάσει της έκφρασης (4.2). Στο συγκεκριμένο σύστημα πρέπει η αποκωδικοποίηση και στους δυο αναμεταδότες R_1, R_2 αλλά και στον προορισμό D να είναι ορθή επομένως η πιθανότητα αποκοπής είναι :

$$P_{out} = P(\gamma_1 < \gamma_{th} \cup \gamma_2 < \gamma_{th} \cup (\gamma_3 + \gamma_4 < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th})) \quad (5.3)$$

και με χρήση των ιδιοτήτων της ένωσης δυο ενδεχομένων η έκφραση (5.3) γίνεται:

$$P_{out} = P(\gamma_1 < \gamma_{th}) + P(\gamma_2 < \gamma_{th}) - P(\gamma_2 < \gamma_{th} \cap \gamma_1 < \gamma_{th}) + P(\gamma_3 + \gamma_4 < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th}) \quad (5.4)$$

Χρησιμοποιώντας τις κατανομές Rice για σκίαση $f_{\gamma_1}(\gamma_1)$ και $f_{\gamma_2}(\gamma_2)$ καθώς και την κατανομή Rice από το μοντέλο Abdi $f_{\gamma_3}(\gamma_3), f_{\gamma_4}(\gamma_4)$, και αντικαθιστώντας $\gamma_4 = \gamma_{th} - \gamma_3$, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 - \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) f_{\gamma_4}(\gamma_{th} - \gamma_3) d\gamma_3 \quad (5.5)$$

Πρωτόκολλο Selection Relaying(SR)

Στο πρωτόκολλο SR όπως αναλύσαμε στο 2^ο Κεφάλαιο, οι αναγεννητικοί επαναλήπτες R_1, R_2 επανεκπέμπουν το σήμα μόνο στην περίπτωση όπου το λαμβανόμενο σήμα αποκωδικοποιείται σωστά. Εάν οι R_1, R_2 δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν το λαμβανόμενο σήμα τότε το σήμα χάνεται. Η πιθανότητα αποκοπής στο πρωτόκολλο SR προκύπτει ως εξής:

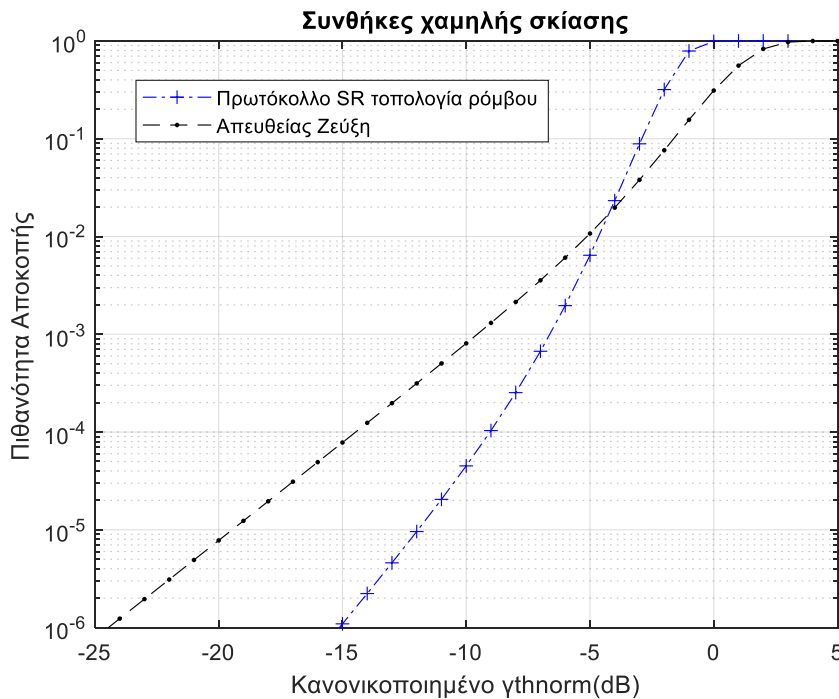
$$P_{out} = P(\gamma_1 < \gamma_{th})P(\gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 > \gamma_{th})P(\gamma_2 < \gamma_{th})P(\gamma_3 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 < \gamma_{th})P(\gamma_2 > \gamma_{th})P(\gamma_4 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 > \gamma_{th})P(\gamma_2 > \gamma_{th})P(\gamma_3 + \gamma_4 < \gamma_{th}) \quad (5.6)$$

Χρησιμοποιώντας τις κατανομές Rice για σκίαση $f_{\gamma_1}(\gamma_1)$ και $f_{\gamma_2}(\gamma_2)$ καθώς και την κατανομή Rice από το μοντέλο Abdi $f_{\gamma_3}(\gamma_3)$, $f_{\gamma_4}(\gamma_4)$, και αντικαθιστώντας $\gamma_4 = \gamma_{th} - \gamma_3$, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

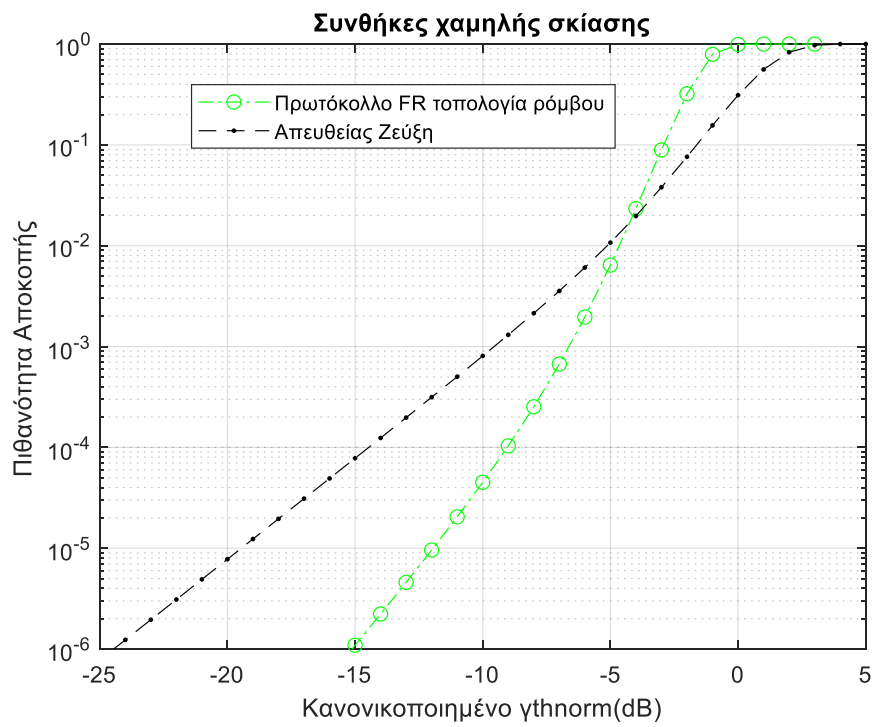
$$\begin{aligned}
 P_{out} = & \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) d\gamma_3 + \\
 & + \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_4}(\gamma_4) d\gamma_4 + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \\
 & \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) f_{\gamma_4}(\gamma_{th} - \gamma_3) d\gamma_3
 \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.2.3. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

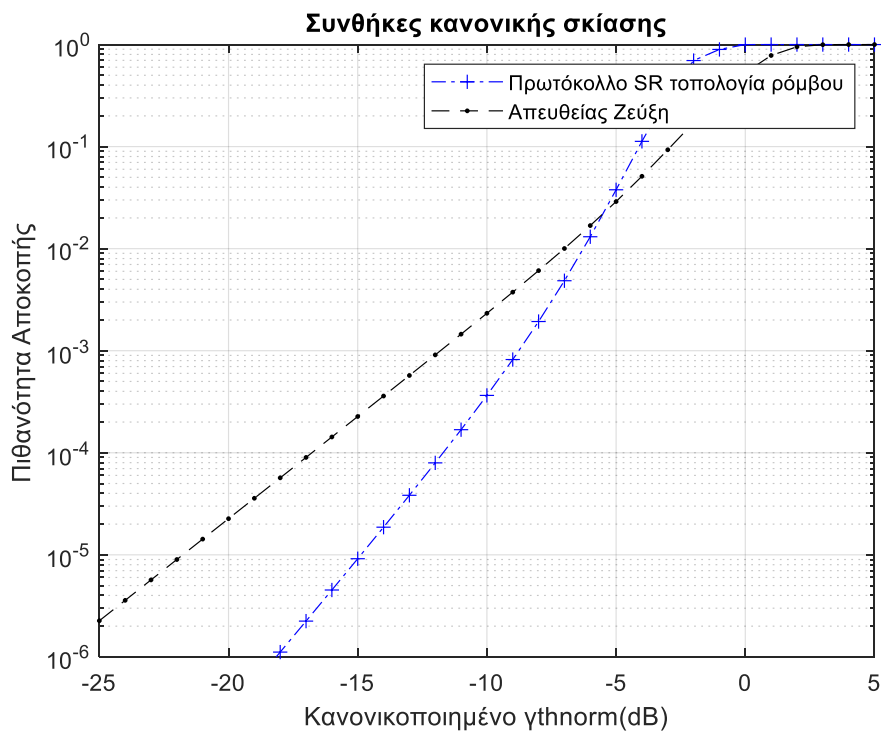
Από τα Σχήματα 5.2-5.7 που παράχθηκαν μετά τον θεωρητικό υπολογισμό των ολοκληρωμάτων στο υπολογιστικό πακέτο MATLAB απεικονίζονται οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού συστήματος τοπολογίας ρόμβου με χρήση των πρωτοκόλλων SR-FR συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης $\gamma_{th, norm}$. Επίσης σε συνθήκες χαμηλής και κανονικής σκίασης τα πρωτόκολλα LMS του συνεργατικού συστήματος εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την απευθείας ζεύξη μέχρι και πιθανότητες αποκοπής της τάξης του 10^{-2} .



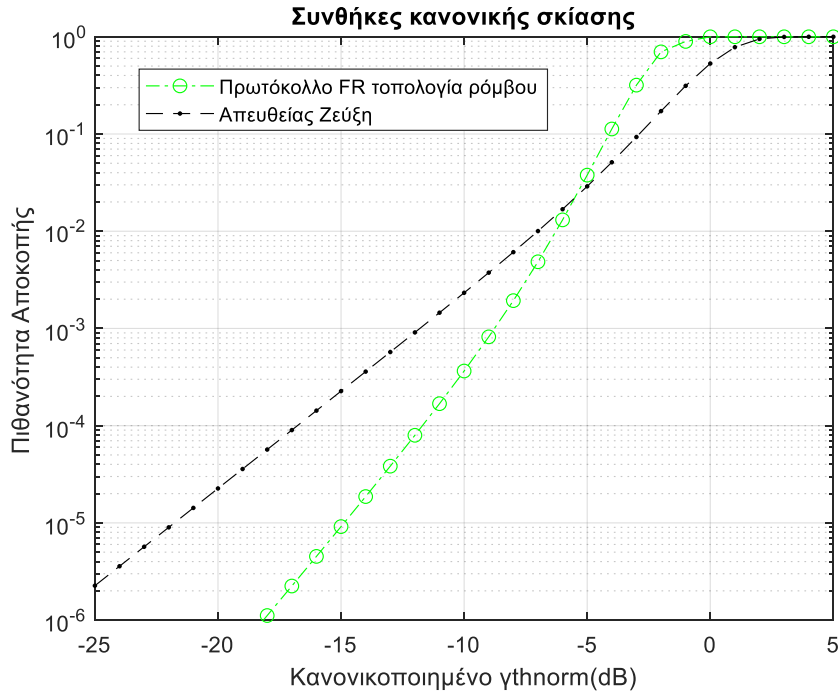
Σχήμα 5.2 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες χαμηλής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.



Σχήμα 5.3 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο FR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες χαμηλής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.

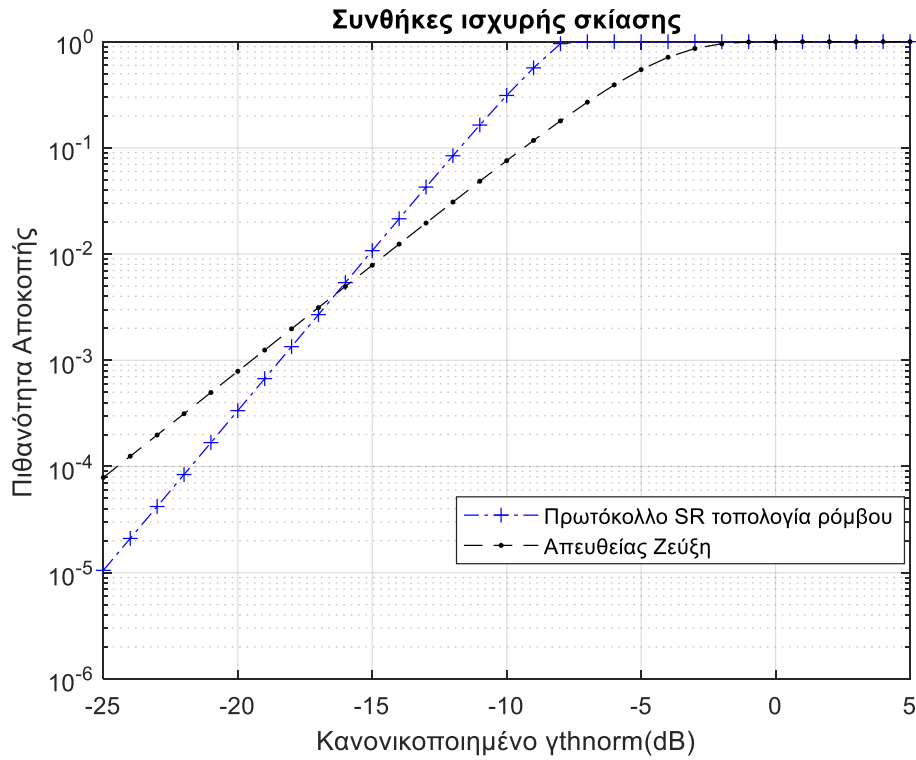


Σχήμα 5.4 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες κανονικής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.

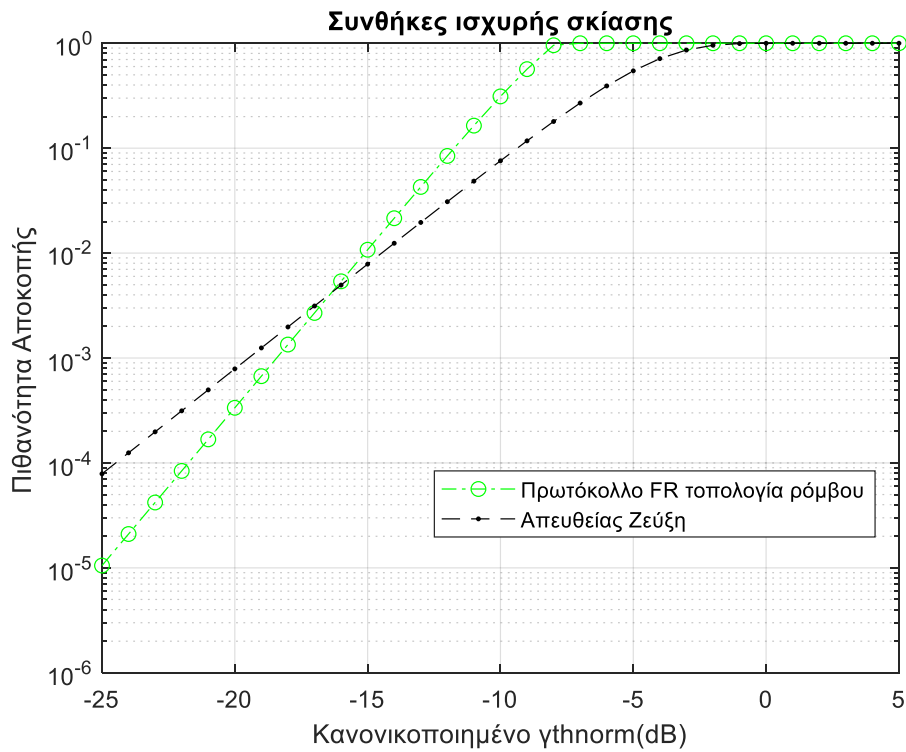


Σχήμα 5.5 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο FR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες κανονικής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.

Επιπλέον τα πρωτόκολλα SR-FR εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά από την απευθείας ζεύξη ειδικά σε μικρές τιμές των πιθανοτήτων αποκοπής όπου εξασφαλίζουν διαφορικό κέρδος περίπου 8dB για πιθανότητες αποκοπής 10^{-4} . Τέλος στα Σχήματα 5.6-5.7 βλέπουμε ότι η επίδοση του συνεργατικού συστήματος υπερνικά αυτό της απευθείας ζεύξης για μικρές τιμές των πιθανοτήτων αποκοπής και συγκεκριμένα για τιμές κάτω από 10^{-3} προσδίδοντας αντίστοιχα πολύ μικρό διαφορικό κέρδος 1-2dB ενώ για πιθανότητες αποκοπής μεγαλύτερες από 10^{-3} η απευθείας ζεύξη εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά.

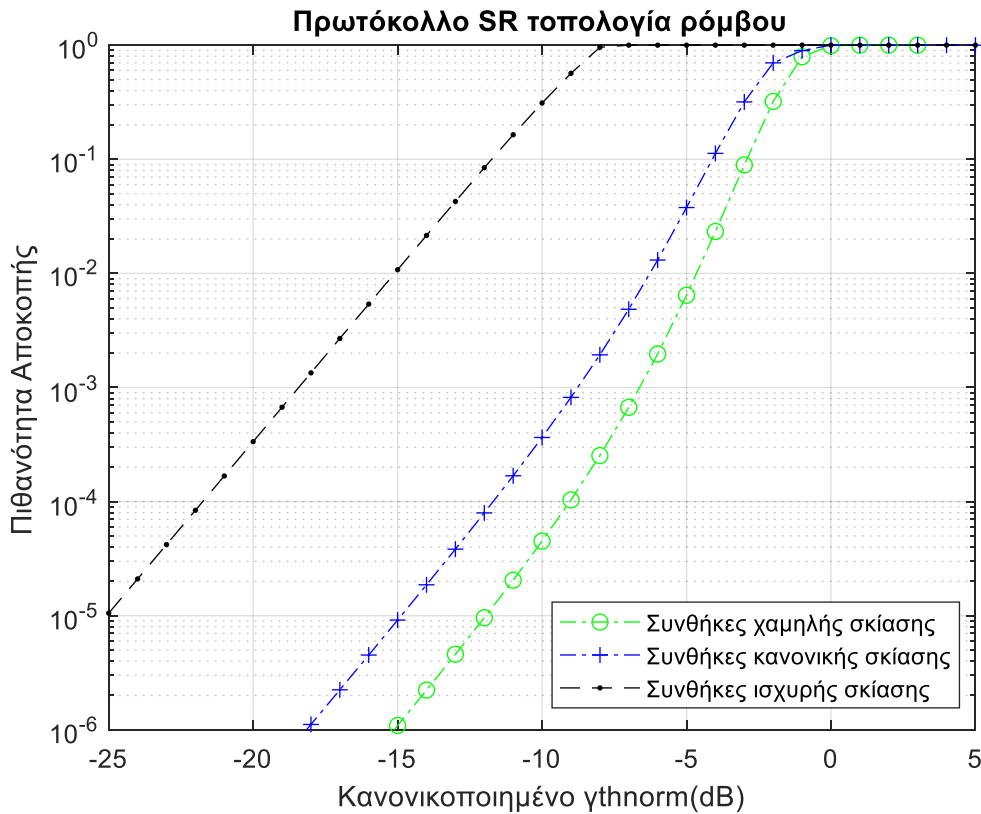


Σχήμα 5.6 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες ισχυρής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.



Σχήμα 5.7 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο FR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες ισχυρής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η επίπτωση των διαφορετικών συνθηκών σκίασης στις πιθανότητες αποκοπής για το πιο αποδοτικό πρωτόκολλο SR. Συμπερασματικά εάν θέλουμε να βελτιώσουμε την επίδοση του συστήματος η επιλογή του συνεργατικού συστήματος τοπολογίας ρόμβου μας δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για οποιοδήποτε πρωτόκολλο SR-FR επιλέξουμε για κανονικές συνθήκες σκίασης ενώ στην περίπτωση ισχυρών συνθηκών σκίασης το κέρδος είναι ελάχιστο.



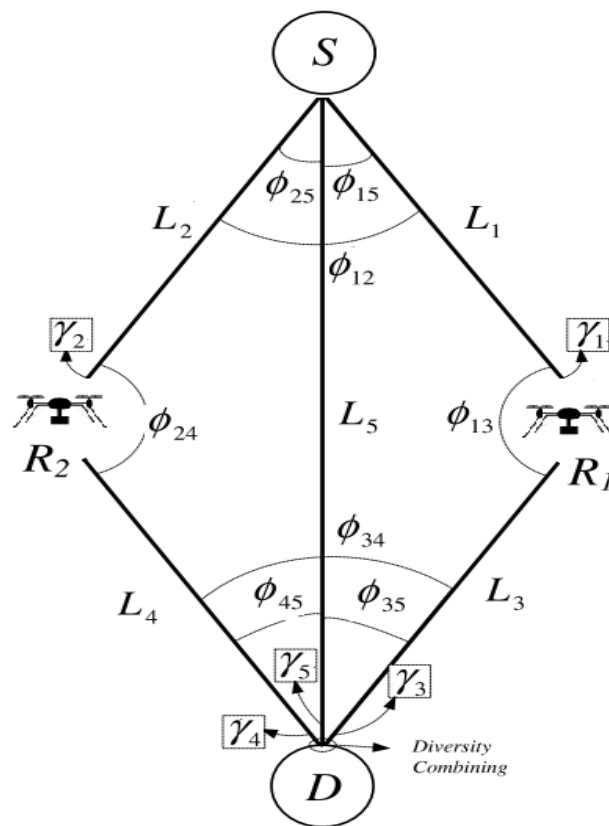
Σχήμα 5.8 Πιθανότητες αποκοπής για το πρωτόκολλο SR σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου.

5.3. Συνεργατικό Σύστημα τοπολογίας διαμαντιού

5.3.1. Μοντελοποίηση του συστήματος

Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Ο δορυφόρος (κόμβος εκπομπής S) εκπέμπει το ίδιο σήμα πληροφορίας τόσο προς το κινητό δορυφορικό τερματικό R_1 , στο κινητό δορυφορικό τερματικό R_2 , όσο και με απευθείας ζεύξη στον κόμβο λήψης D . Τα κινητά δορυφορικά τερματικά λειτουργούν ως αναγεννητικοί επαναλήπτες R_1 , R_2 , χρησιμοποιώντας την τεχνική αποκωδικοποίησης-και-προώθησης, αναγεννούν το λαμβανόμενο σήμα και στη συνέχεια το επανεκπέμπουν προς τον

κόμβο λήψης D, δημιουργώντας μία ζεύξη διαφορικότητας. Ο κόμβος λήψης D συνδυάζει συμμασικά τα τρία σήματα, χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική SC είτε την τεχνική MRC είτε την τεχνική EGC, τα λαμβανόμενα σήματα μέσω των επαναληπτών και της απευθείας ζεύξης δημιουργώντας το τελικό σήμα. Σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική MRC. Οι γωνίες ανύψωσης των $S-R_1$, $S-R_2$, $S-D$ μονοπατιών ορίζονται ως ϕ_{ij} (deg), ($i, j=1,2,3,4,5$) και $i \neq j$ ενώ τα μήκη της κάθε ζεύξης ορίζονται ως L_j (m) όπου ($j=1,2,3,4,5$).



Σχήμα 5.9: Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος με δυο αναγεννητικούς επαναλήπτες σε τοπολογία διαμαντιού.

5.3.2. Ανάλυση πιθανοτήτων αποκοπής

Πρωτόκολλο Fixed Relaying(FR)

Σε αυτή την παράγραφο θα αναλυθούν οι εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής του συνεργατικού συστήματος. Στην ακόλουθη ανάλυση απαιτείται τόσο οι επαναλήπτες

R_1, R_2 όσο και ο προορισμός D να αποκωδικοποιήσουν σωστά το σήμα. Στον προορισμό D όταν χρησιμοποιείται η τεχνική διαφορικής λήψης MRC, το συνολικό SNR προκύπτει από τη σχέση:

$$\gamma_{MRC} = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5) \quad (5.8)$$

Οι πρώτοι δυο όροι της έκφρασης (5.8) εκφράζει το γεγονός ότι οι επαναλήπτες R_1, R_2 αποκωδικοποίησαν επιτυχώς το λαμβανόμενο σήμα από την πηγή ενώ ο τρίτος όρος των δυο εκφράσεων αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι ο προορισμός D μπόρεσε να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς το λαμβανόμενο σήμα από τους επαναλήπτες καθώς και την απευθείας ζεύξη.

Η πιθανότητα αποκοπής ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο το συνολικό SNR γ_c δεν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι γ_{th} :

$$P_{out} = P(\gamma_c < \gamma_{th}) \quad (5.9)$$

όπου το κατώφλι γ_{th} εξαρτάται από το σχήμα της πρόσβασης των κόμβων στο ασύρματο δίκτυο και αντιστοιχίζεται σε ένα κανονικοποιημένο κατώφλι ανάλογα με το κάθε πρωτόκολλο βάσει της έκφρασης (4.2). Στο συγκεκριμένο σύστημα πρέπει η αποκωδικοποίηση και στους δυο αναμεταδότες R_1, R_2 αλλά και στον προορισμό D να είναι ορθή επομένως η πιθανότητα αποκοπής είναι :

$$P_{out} = P(\gamma_2 < \gamma_{th} \cup \gamma_1 < \gamma_{th} \cup (\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th})) \quad (5.10)$$

και με χρήση των ιδιοτήτων της ένωσης δυο ενδεχομένων η έκφραση (5.10) γίνεται:

$$P_{out} = P(\gamma_2 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 < \gamma_{th}) - P(\gamma_2 < \gamma_{th} \cap \gamma_1 < \gamma_{th}) + P(\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 < \gamma_{th} \cap \gamma_2 > \gamma_{th} \cap \gamma_1 > \gamma_{th}) \quad (5.11)$$

Χρησιμοποιώντας τις κατανομές Rice για σκίαση $f_{\gamma_1}(\gamma_1)$ και $f_{\gamma_2}(\gamma_2)$ καθώς και τις κατανομές Rice από το μοντέλο Abdi $f_{\gamma_3}(\gamma_3)$, $f_{\gamma_4}(\gamma_4)$, $f_{\gamma_5}(\gamma_5)$, και αντικαθιστώντας $\gamma_5 = \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4$, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
P_{out} = & \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 - \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 + \\
& + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_4 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) f_{\gamma_4}(\gamma_4) f_{\gamma_5}(\gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4) d\gamma_3
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Πρωτόκολλο Selection Relaying (SR)

Στο πρωτόκολλο SR όπως αναλύσαμε στο 2^ο Κεφάλαιο, οι αναγεννητικοί επαναλήπτες R_1, R_2 επανεκπέμπουν το σήμα μόνο στην περίπτωση όπου το λαμβανόμενο σήμα αποκωδικοποιείται σωστά. Εάν οι R_1, R_2 δεν μπορούν να αποκωδικοποιήσουν το λαμβανόμενο σήμα η πηγή συνεχίζει την μετάδοση του σήματος μέσω της απευθείας ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη και στα δυο συχνοτικά παράθυρα ώστε στο τέλος να μπορεί να συνδυάσει δυο σήματα που έλαβε με την απευθείας ζεύξη από τον πομπό. Η πιθανότητα αποκοπής στο πρωτόκολλο SR προκύπτει ως εξής:

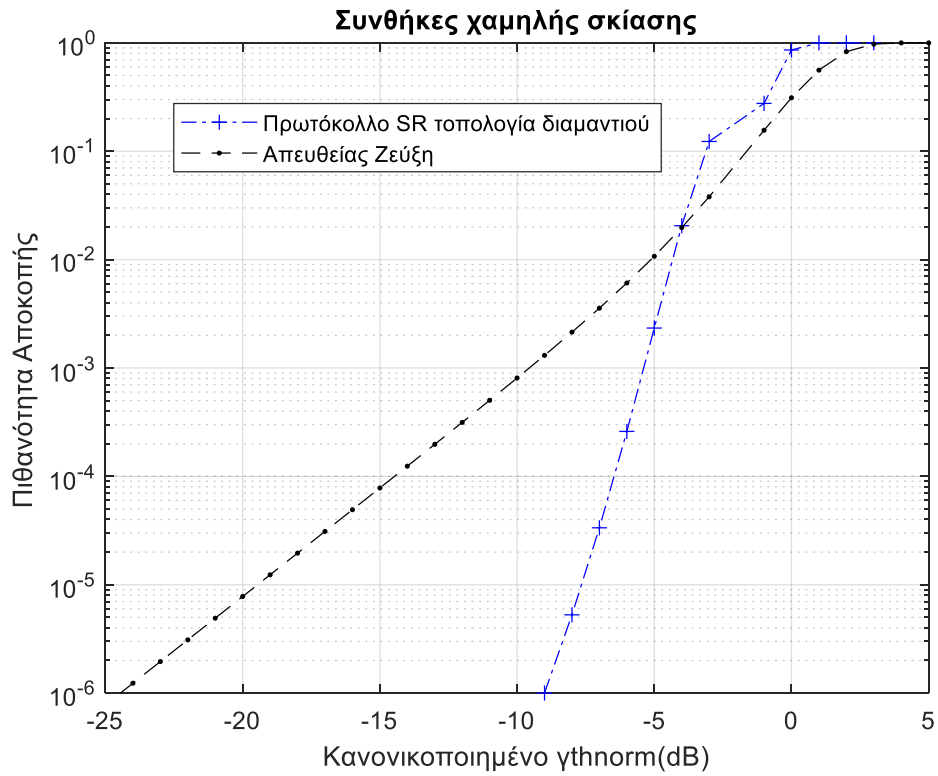
$$\begin{aligned}
P_{out} = & P(\gamma_1 < \gamma_{th})P(\gamma_2 < \gamma_{th})P(\gamma_5 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 > \gamma_{th})P(\gamma_2 < \gamma_{th}) \cdot \\
& \cdot P(\gamma_3 + \gamma_5 < \gamma_{th}) + P(\gamma_1 < \gamma_{th})P(\gamma_2 > \gamma_{th})P(\gamma_4 + \gamma_5 < \gamma_{th}) + \\
& + P(\gamma_1 > \gamma_{th})P(\gamma_2 > \gamma_{th})P(\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 < \gamma_{th})
\end{aligned} \tag{5.13}$$

Χρησιμοποιώντας τις κατανομές Rice για σκίαση $f_{\gamma_1}(\gamma_1)$ και $f_{\gamma_2}(\gamma_2)$ καθώς και τις κατανομές Rice από το μοντέλο Abdi $f_{\gamma_3}(\gamma_3)$, $f_{\gamma_4}(\gamma_4)$, $f_{\gamma_5}(\gamma_5)$, και αντικαθιστώντας $\gamma_5 = \gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4$, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

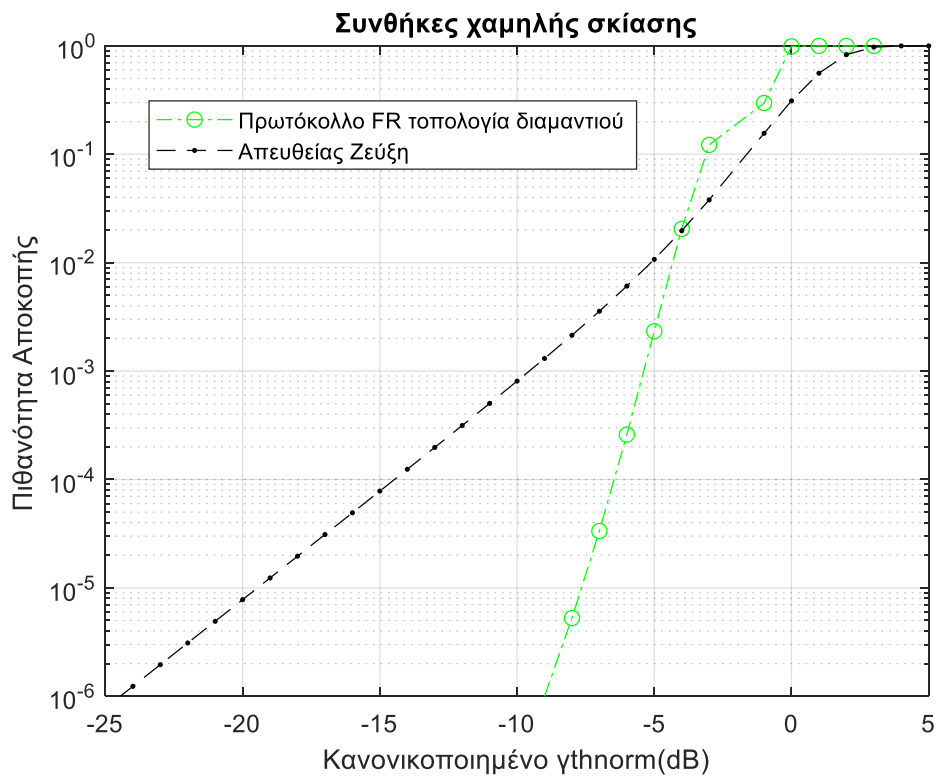
$$\begin{aligned}
P_{out} = & \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_5}(\gamma_5) d\gamma_5 + \\
& + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) f_{\gamma_5}(\gamma_{th} - \gamma_3) d\gamma_3 + \\
& + \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_4}(\gamma_4) f_{\gamma_5}(\gamma_{th} - \gamma_4) d\gamma_4 + \\
& + \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_4 \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) f_{\gamma_4}(\gamma_4) f_{\gamma_5}(\gamma_{th} - \gamma_3 - \gamma_4) d\gamma_3
\end{aligned} \tag{5.14}$$

5.3.3. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

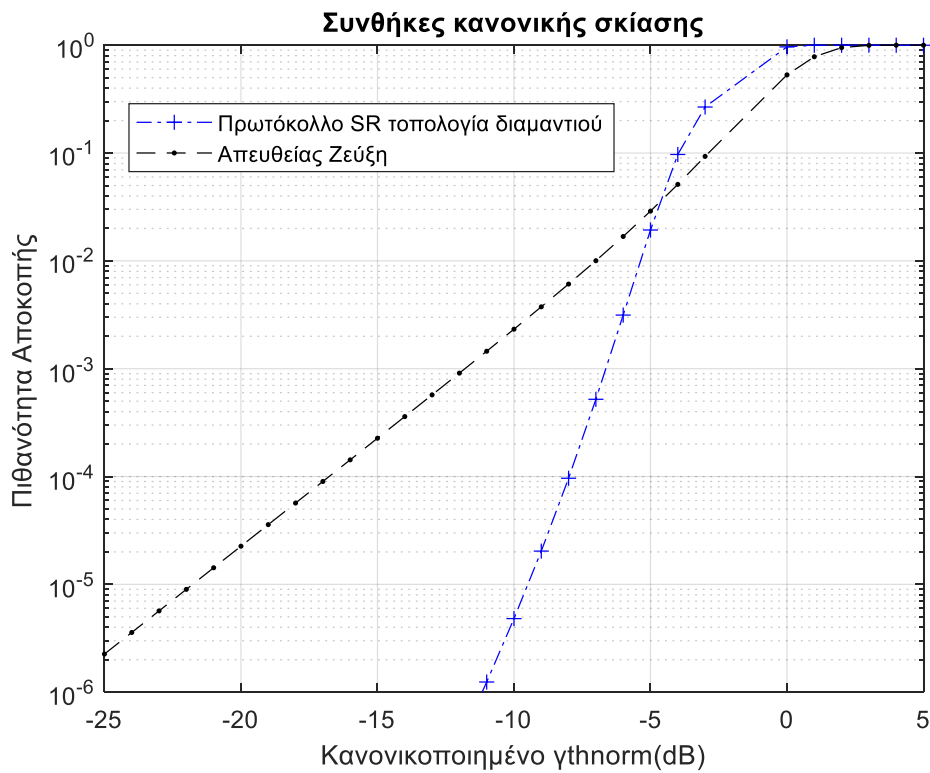
Στα Σχήματα 5.10-5.16 που παράχθηκαν μετά τον θεωρητικό υπολογισμό των ολοκληρωμάτων στο υπολογιστικό πακέτο MATLAB απεικονίζονται οι πιθανότητες αποκοπής του συνεργατικού συστήματος τοπολογίας διαμαντιού με χρήση των πρωτοκόλλων SR-FR συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης $\gamma_{th, norm}$. Και σε αυτή την τοπολογία φαίνεται ότι για οποιεσδήποτε συνθήκες σκίασης τα δυο πρωτόκολλα SR-FR εμφανίζουν πανομοιότυπη συμπεριφορά για όλο το εύρος τιμών του λόγου $\gamma_{th, norm}$. Οι καμπύλες διαφέρουν ελάχιστα σε σημείο που δεν μπορεί να το αντιληφθεί κανείς εάν δεν συγκρίνει τις τιμές των πιθανοτήτων αποκοπής καθεμία ξεχωριστά. Στο συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού φαίνεται από τα σχήματα ότι για οποιεσδήποτε συνθήκες σκίασης και αν επιβάλλονται στον δίαυλο τα πρωτόκολλα LMS εξασφαλίζουν αισθητά καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την απευθείας ζεύξη για πιθανότητες αποκοπής μικρότερες από 10^{-2} .



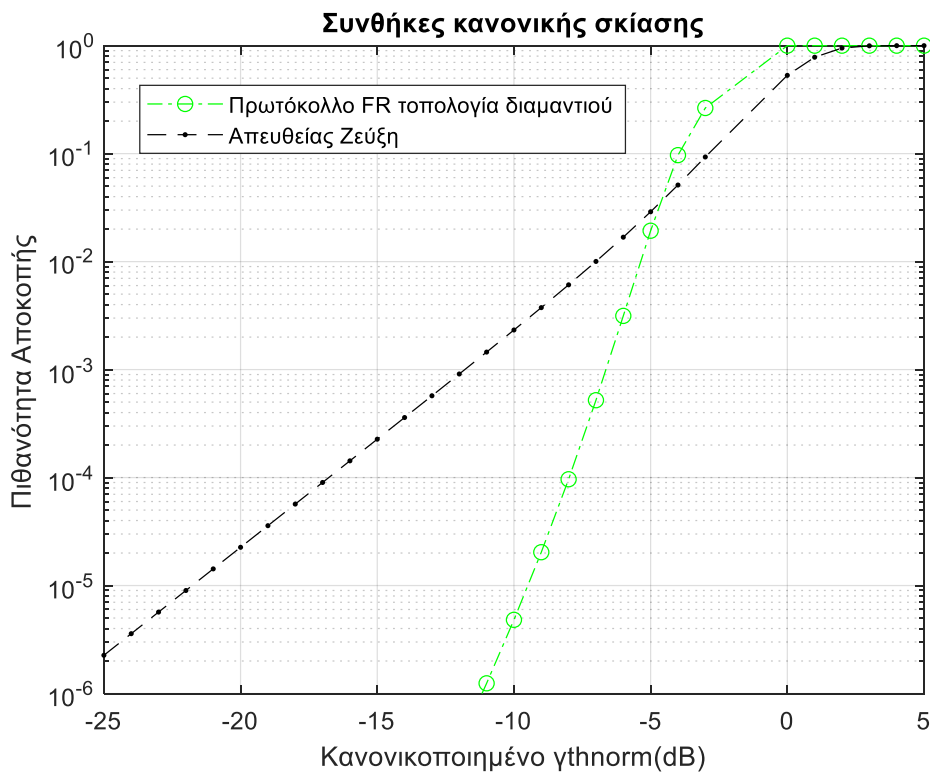
Σχήμα 5.10 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες χαμηλής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.



Σχήμα 5.11 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο FR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες χαμηλής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.

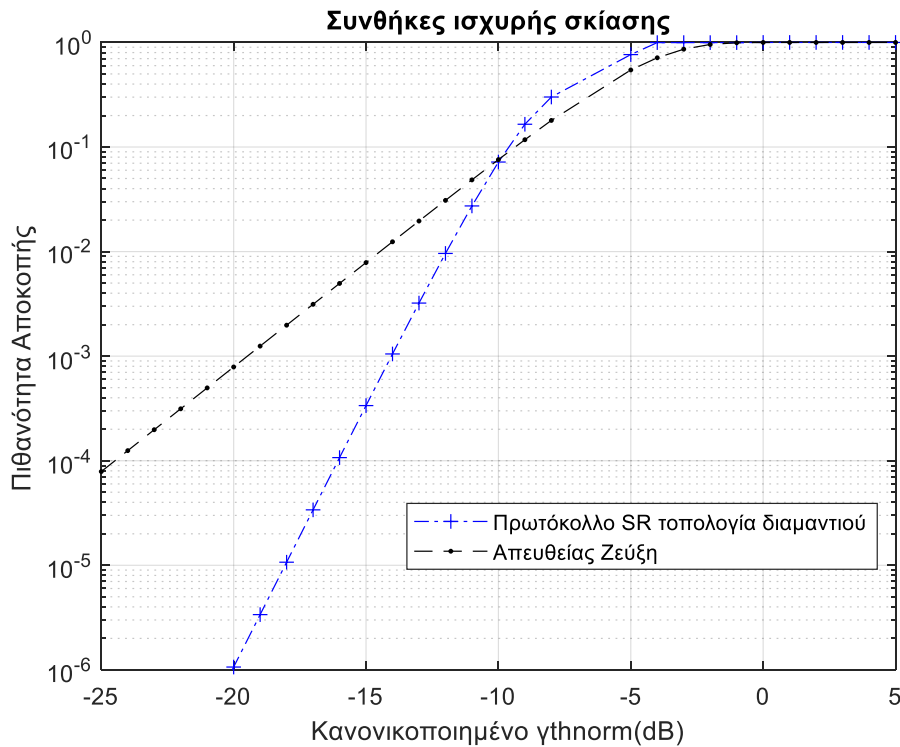


Σχήμα 5.12 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες κανονικής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.



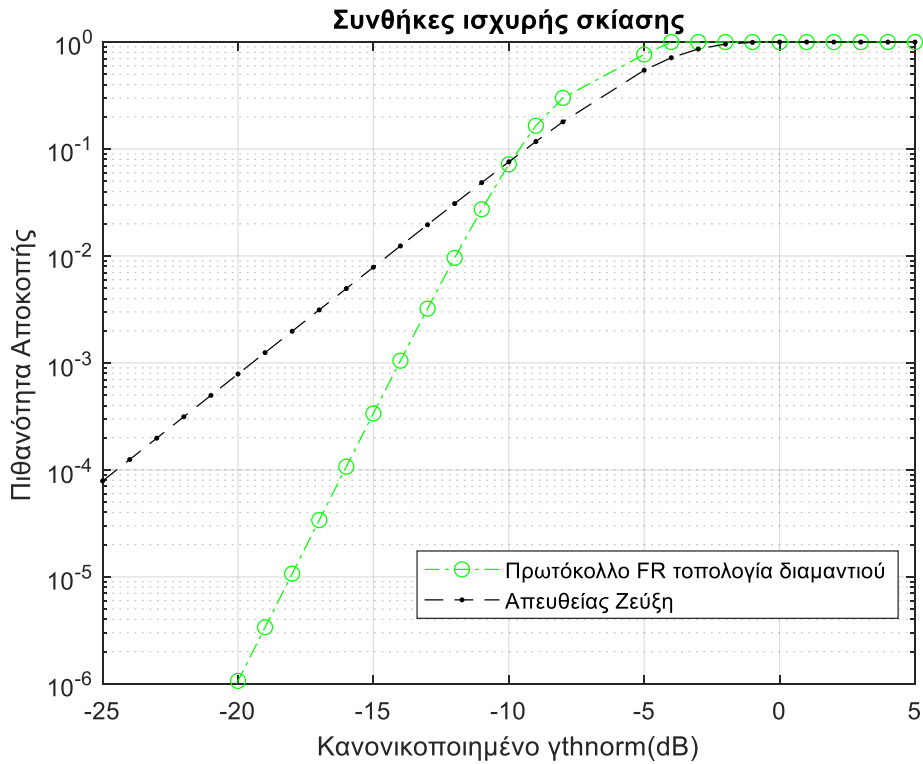
Σχήμα 5.13 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο FR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες κανονικής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.

Επιπλέον τα πρωτόκολλα SR-FR εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά από την απευθείας ζεύξη ειδικά σε μικρές τιμές των πιθανοτήτων αποκοπής όπου εξασφαλίζουν διαφορικό κέρδος περίπου 10dB και 15dB για πιθανότητες αποκοπής 10^{-4} και 10^{-5} αντίστοιχα. Τέλος σε όλα τα Σχήματα βλέπουμε ότι η επίδοση του συνεργατικού συστήματος εμφανίζει χειρότερη συμπεριφορά από την απευθείας ζεύξη για πολύ μεγάλες και μη πρακτικές τιμές των πιθανοτήτων αποκοπής μεγαλύτερες από 10^{-1} .

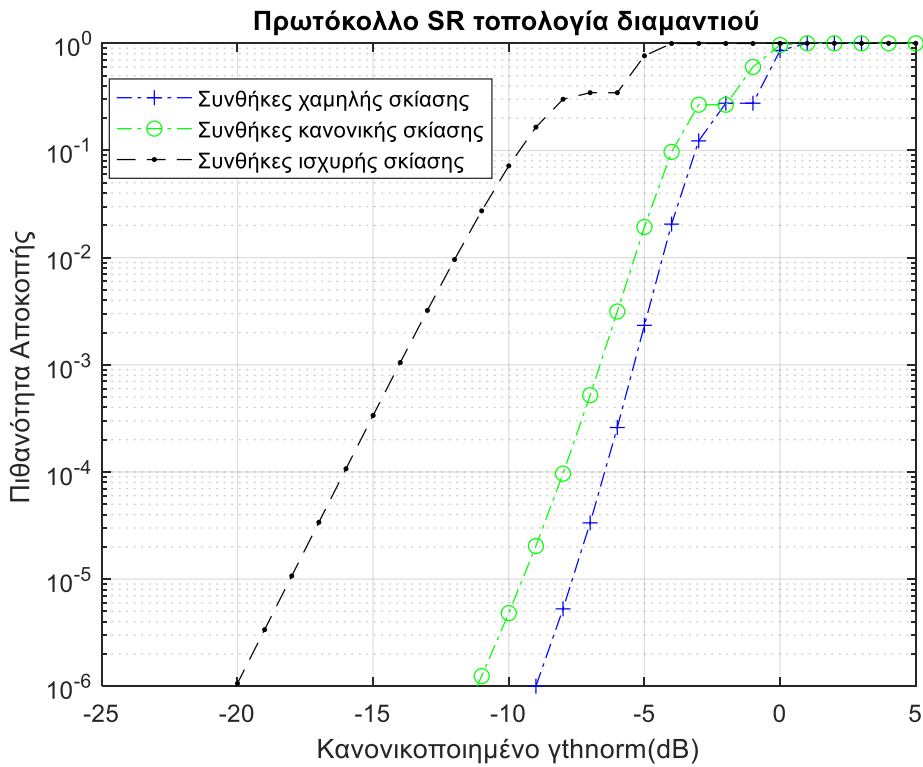


Σχήμα 5.14 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες ισχυρής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.

Στο Σχήμα 5.16 φαίνεται η επίπτωση των διαφορετικών συνθηκών σκίασης στις πιθανότητες αποκοπής για το πιο αποδοτικό πρωτόκολλο SR. Συμπερασματικά εάν θέλουμε να βελτιώσουμε την επίδοση του συστήματος η επιλογή του συνεργατικού συστήματος τοπολογίας διαμαντιού μας δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για οποιοδήποτε πρωτόκολλο SR-FR επιλέξουμε για οποιοσδήποτε συνθήκες σκίασης επιβάλλονται στον τηλεπικοινωνιακό διάλο.



Σχήμα 5.15 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο FR καθώς και της απευθείας ζεύξης σε συνθήκες ισχυρής σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.

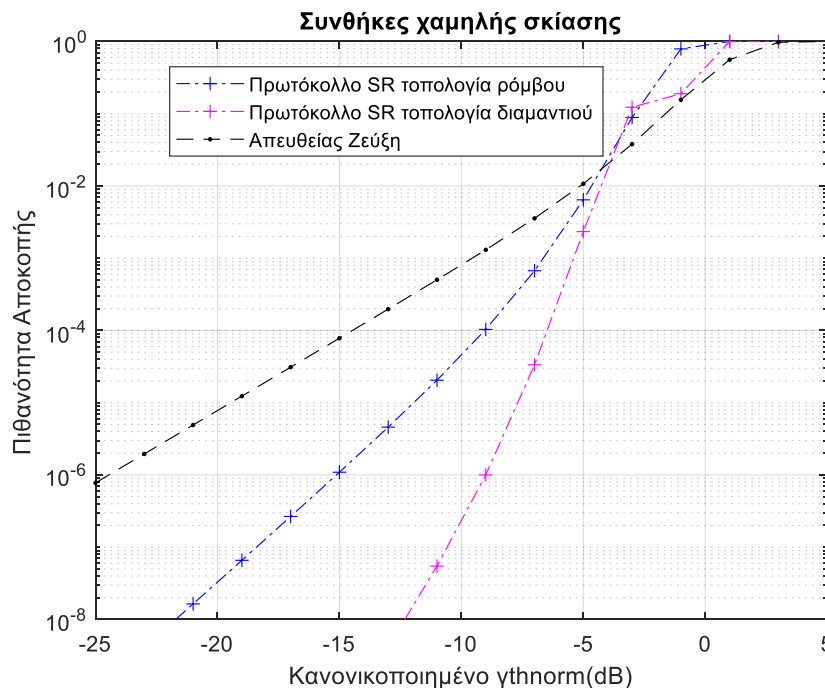


Σχήμα 5.16 Πιθανότητες αποκοπής για το πρωτόκολλο SR σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης για το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού.

5.4. Σύγκριση των τοπολογιών ρόμβου και διαμαντιού του συνεργατικού συστήματος με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες

Σε αυτή την παράγραφο συγκρίνονται, μέσω των παραχθέντων σχημάτων από το υπολογιστικό πακέτο MATLAB, η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας ρόμβου και διαμαντιού με την απευθείας ζεύξη. Η σύγκριση αυτή γίνεται για το πρωτόκολλο SR καθώς όπως παρατηρήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο οι πιθανότητες αποκοπής των δυο πρωτόκολλων συμπίπταν για όλο το εύρος τιμών του λόγου $\gamma_{th, norm}$. Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική MRC η οποία έχει αξιολογηθεί και ως η πιο αποδοτική [32].

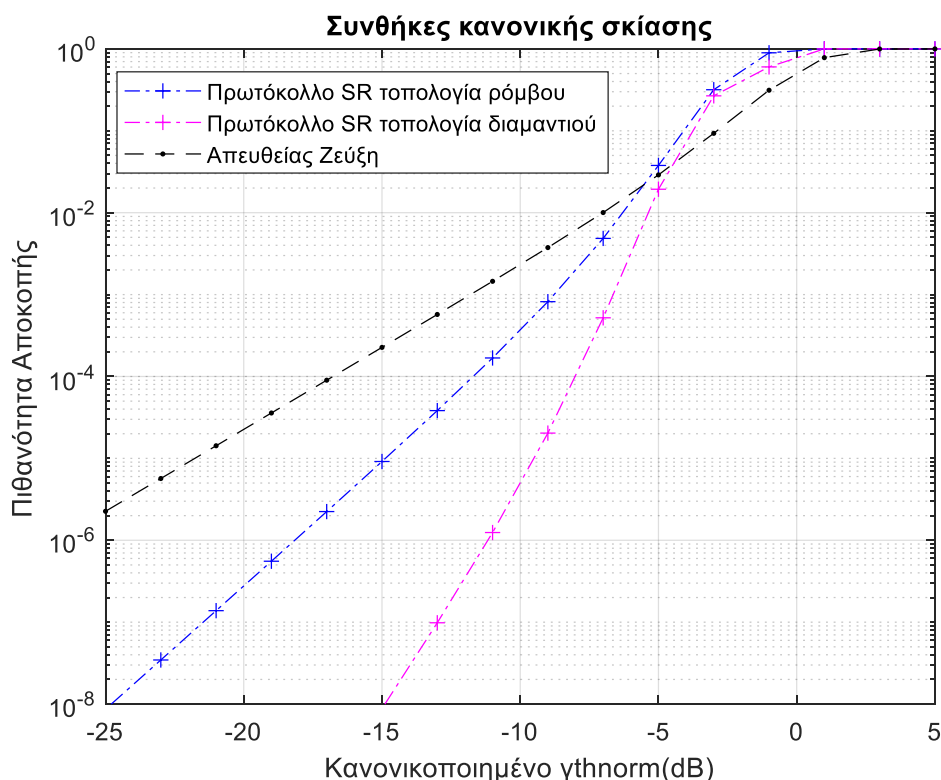
Από τα Σχήματα 5.17 και 5.18 φαίνεται ότι τα συνεργατικά συστήματα με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες στις περιπτώσεις χαμηλής και κανονικής σκίασης εμφανίζουν αισθητά καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την απευθείας ζεύξη για μεγάλο εύρος τιμών του λόγου $\gamma_{th, norm}$. Πιο συγκεκριμένα το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου είναι πιο αποδοτικό από την απευθείας ζεύξη για πιθανότητες αποκοπής μικρότερες από 10^{-2} ενώ το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού είναι το πιο αποδοτικό από τα τρία συστήματα. Για πρακτικές τιμές πιθανοτήτων αποκοπής όπως π.χ. 10^{-4} τα δυο συνεργατικά συστήματα τοπολογίας ρόμβου



Σχήμα 5.17 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR των συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας ρόμβου-διαμαντιού καθώς και της απευθείας ζεύξης για συνθήκες χαμηλής σκίασης.

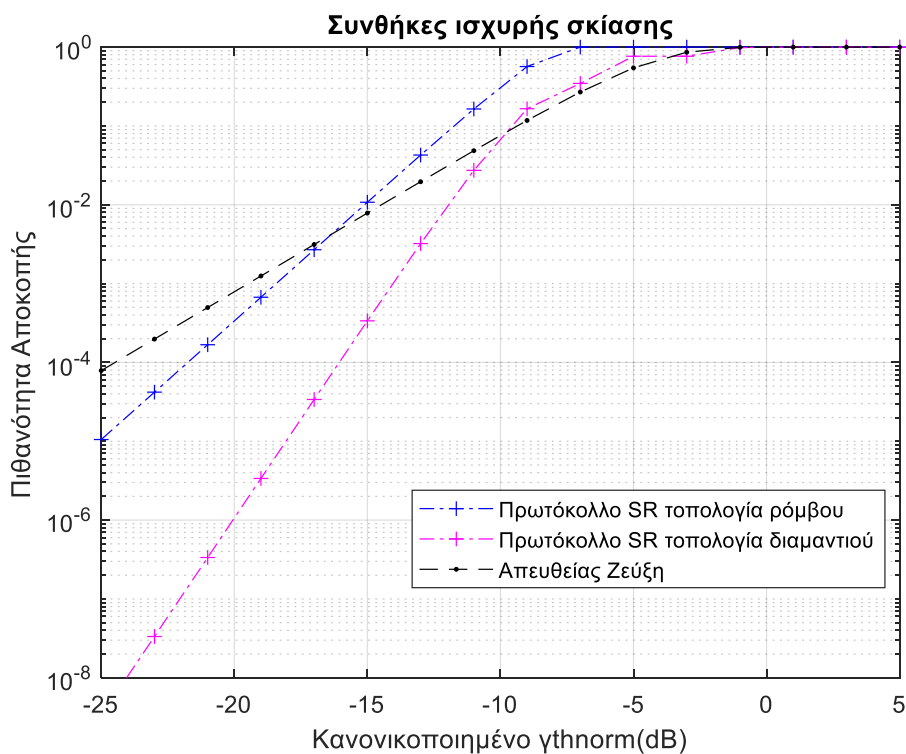
και διαμαντιού επιτυγχάνουν διαφορετικό κέρδος, σε σχέση με την απευθείας ζεύξη, περίπου 6dB και 8dB αντίστοιχα για συνθήκες χαμηλής σκίασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Από το Σχήμα 5.10 φαίνεται ότι για κανονικές συνθήκες σκίασης τα δυο συνεργατικά συστήματα επιτυγχάνουν διαφορετικό κέρδος περίπου 5dB και 10dB αντίστοιχα.

Για συνθήκες ισχυρής σκίασης από το Σχήμα 5.19 φαίνεται ότι η αποδοτικότητα του συνεργατικού συστήματος με τοπολογία διαμαντιού διατηρείται σε σύγκριση με την τοπολογία ρόμβου και την απευθείας ζεύξη ενώ η τοπολογία ρόμβου σε αυτή την περίπτωση εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά έναντι της απευθείας ζεύξης για εύρος τιμών του λόγου $\gamma_{th, norm}$ που αντιστοιχούν σε τιμές πιθανοτήτων αποκοπής μικρότερες από 10^{-3} . Επιπλέον πρέπει να τονίσουμε ότι το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας διαμαντιού για πιθανότητα αποκοπής 10^{-4} επιτυγχάνει και σε αυτή την περίπτωση διαφορετικό κέρδος περίπου 9dB ενώ το συνεργατικό σύστημα τοπολογίας ρόμβου επιτυγχάνει μειωμένο διαφορετικό κέρδος 3dB σε σχέσης με τις προηγούμενες συνθήκες σκίασης.



Σχήμα 5.18 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR των συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας ρόμβου-διαμαντιού καθώς και της απευθείας ζεύξης για συνθήκες κανονικής σκίασης.

Συμπερασματικά εάν θέλουμε να βελτιώσουμε την επίδοση της επικοινωνίας μεταξύ της πηγής S και του προορισμού D η επιλογή και των δυο συνεργατικών συστημάτων με δυο επαναλήπτες μας δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλα τα σενάρια συνθηκών σκίασης. Ωστόσο από τα διαγράμματα των πιθανοτήτων αποκοπής των Σχημάτων 5.17-5.19 φαίνεται ότι η πιο αποδοτική επιλογή είναι αυτή της τοπολογίας διαμαντιού η οποία εκτός από τα σήματα που λαμβάνει από τους δυο επαναλήπτες R_1, R_2 λαμβάνει και το σήμα από την απευθείας ζεύξη. Αυτός είναι και ο λόγος που τελικά υπερτερεί έναντι της τοπολογίας ρόμβου.



Σχήμα 5.19 Πιθανότητα αποκοπής για το πρωτόκολλο SR των συνεργατικών συστημάτων τοπολογίας ρόμβου-διαμαντιού καθώς και της απευθείας ζεύξης για συνθήκες ισχυρής σκίασης.

6. Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Τα συστήματα συνεργατικού διαφορισμού τα οποία μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική έχουν στρέψει πάνω τους τα τελευταία χρόνια όλο και μεγαλύτερο μέρος της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας αφού παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον βοηθώντας στην βελτίωση των γνωστών προβλημάτων των διαλείψεων των καναλιών διάδοσης καθώς και της βέλτιστης χρήσης των πόρων. Επομένως τα αποτελέσματα που παράχθηκαν μπορούν να μελετηθούν και να εξαχθούν συμπεράσματα που θα βοηθήσουν την επίλυση γνωστών αλλά και νέων ερευνητικών προβλημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική έγινε ανάλυση της επίδοσης των δορυφορικών συνεργατικών συστημάτων με έναν επίγειο επαναλήπτη (τοπολογία τριγώνου) αλλά επίσης έγινε ανάλυση της επίδοσης των δορυφορικών συνεργατικών συστημάτων με δυο εναέριους αναγεννητικούς επαναλήπτες (τοπολογία ρόμβου/διαμαντιού) τοποθετημένους παράλληλα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της επίδοσης του συνεργατικού συστήματος μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί και σε πιο πολύπλοκα συστήματα με χρήση N επαναληπτών οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν σε σειρά ή παράλληλα ή και σε συνδυασμό των δυο προηγούμενων τοπολογιών. Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων αποκοπής με χρήση N επαναληπτών θα περιλαμβάνει πολλαπλά ολοκληρώματα, η επίλυση των οποίων παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε ανάλυση της επίδοσης των συνεργατικών συστημάτων που υποφέρουν από διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας και χρησιμοποιήθηκαν στατιστικές κατανομές αλλά και μοντέλα, τα οποία συνδυάζουν στατιστικές κατανομές, ώστε να περιγράψουν τα φυσικά αυτά φαινόμενα. Συγκεκριμένα στο συνεργατικό σύστημα με τοπολογία τριγώνου για το κανάλι S-R και για την απευθείας ζεύξη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Abdi ενώ για την επίγεια ζεύξη η κατανομή Nakagami-m ενώ στο συνεργατικό σύστημα με τοπολογία ρόμβου/διαμαντιού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Abdi για τα κανάλια R-D και για την απευθείας ζεύξη ενώ για τα κανάλια S-R χρησιμοποιήθηκε η κατανομή Rice. Μελλοντική επέκταση της ανάλυσης της επίδοσης των συνεργατικών συστημάτων είναι περιγραφή του φαινομένου σκίασης με χρήση της κατανομής Inverse-Gaussian. Επιπλέον στην παρούσα διπλωματική οι διαλείψεις προσεγγίστηκαν σε ανεξάρτητα κανάλια, επομένως πρέπει μελλοντικά να μελετηθεί και να ενσωματωθεί στην μαθηματική ανάλυση ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των διαλείψεων των διαφορετικών καναλιών.

Τέλος στην παρούσα διπλωματική υπολογίστηκαν οι πιθανότητες αποκοπής των συνεργατικών συστημάτων διαφορισμού ως μέσο επίδοσης, ωστόσο υπάρχουν και άλλα μεγέθη που περιγράφουν την επίδοση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος όπως είναι η πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου (Bit Error Probability-BEP) , και μπορούν μελλοντικά να υπολογιστούν ώστε σε συνδυασμό με την πιθανότητα αποκοπής να οδηγήσουν σε πιο ασφαλή συμπεράσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, and M. Alouini, “Terahertz Band : The Last Piece of RF,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 1, no. November 2019, pp. 1–32, 2020.
- [2] H. Hamada *et al.*, “300 - GHz , 100 - Gb / s InP - HEMT Wireless Transceiver Using a 300 - GHz Fundamental Mixer,” *2018 IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp. - IMS*, pp. 1480–1483, 2018.
- [3] K. Tekbiyik, A. R. Ekti, G. K. Kurt, A. Gorcin, and H. Yanikomeroğlu, “A Holistic Investigation of Terahertz Propagation and Channel Modeling toward Vertical Heterogeneous Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 11, pp. 14–20, 2020.
- [4] G. Geraci *et al.*, “What Will the Future of UAV Cellular Communications Be? A Flight from 5G to 6G,” pp. 1–27, 2021.
- [5] F. Davoli, C. Kourogiorgas, M. Marchese, A. Panagopoulos, and F. Patrone, “Small satellites and CubeSats: Survey of structures, architectures, and protocols,” *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, vol. 37, no. 4, pp. 343–359, 2019.
- [6] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam, and M. Debbah, “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, 2019.
- [7] Q. Wu, W. Mei, and R. Zhang, “Safeguarding wireless network with UAVs: A physical layer security perspective,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 12–18, 2019.
- [8] Y. Zeng and R. Zhang, “Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, 2017.
- [9] Y. Zeng, J. Xu, and R. Zhang, “Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 4, pp. 2329–2345, 2019.
- [10] International Telecommunications Union, “IMT Traffic Estimates for the Years 2020 to 2030,” *Electron. Publ. Geneva*, vol. 0, pp. 1–51, 2015.
- [11] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, 2004.
- [12] Van Der Meulen E. C., “Three- terminal communication channels,” *Adv. Appl. Probab.*, vol. 3, no. 1, pp. 120–154, 1971.
- [13] G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*, vol. 9781461403. 2012.
- [14] V. K. Sakarellos, “Cooperative Diversity Performance of Satellite and Terrestrial Millimeter Wave Networks,” *Natl. Tech. Univ. Athens*, 2010.
- [15] V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos, and J. D. Kanellopoulos, “Outage performance analysis of a dual-hop radio relay system operating at frequencies above 10GHz,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 11, pp. 3104–3109, 2010.
- [16] J. N. Laneman, G. W. Wornell, and D. N. C. Tse, “An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Int. Symp. Inf. Theory - Proc.*, p. 294, 2001.
- [17] D. G. Brennan, “Linear diversity combining techniques,” *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 2, pp. 331–356, 2003.
- [18] E. Matricciani, “Transformation of Rain Attenuation Statistics from Fixed to

- Mobile Satellite Communication Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, no. 3, pp. 565–569, 1995.
- [19] E. Matricciani and S. Moretti, “Rain attenuation statistics useful for the design of mobile satellite communication systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, no. 2, pp. 637–648, 1998.
- [20] E. Matricciani, “from Radar Measurements Useful to Design Satellite Communication Systems for Mobile Terminals,” vol. 49, no. 5, pp. 1534–1546, 2000.
- [21] E. Matricciani and S. P. Selva, “Attenuation statistics estimated from radar measurements in MEO satellite communication systems for mobile terminals,” *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 167–185, 2002.
- [22] E. Matricciani, “Physical-mathematical model of the dynamics of rain attenuation based on rain rate time series and a two-layer vertical structure of precipitation,” *Radio Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 281–295, 1996.
- [23] P.-D. M. Arapoglou, K. P. Liolis, and A. D. Panagopoulos, “Railway satellite channel at Ku band and above: Composite dynamic modeling for the design of fade mitigation techniques,” *Int. J. Satell. Commun. Netw.*, pp. 1–17, 2012.
- [24] ITU-R Recommendation P.618-13, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems P Series Radiowave propagation,” *Geneva, Switzerland*, vol. 13, 2017.
- [25] ITU-R Recommendation P.837-6, “Characteristics of precipitation for propagation modelling P Series Radiowave propagation,” *Geneva, Switzerland*, vol. 6, 2012.
- [26] A. Abdi, W. C. Lau, M. S. Alouini, and M. Kaveh, “A new simple model for land mobile satellite channels: First- and second-order statistics,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 2, no. 3, pp. 519–528, 2003.
- [27] P. R. King, “Modelling and Measurement of the Land Mobile Satellite MIMO Radio Propagation Channel,” *Measurement*, no. April, 2007.
- [28] S. . Saunders, “Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2nd Edition,” *J. Wiley Sons*, pp. 1–10, 2007.
- [29] V. Gopal, “Inverse-Gaussian Distribution: A New Shadowing Model and Its Application to Communication Systems,” *Chalmers Univ. Technol.*, 2012.
- [30] A. G. Kanatas and A. D. Panagopoulos, *Radio wave propagation and channel modeling for earth-space systems*. 2017.
- [31] D. Arndt, “On Channel Modelling For Land Mobile Satellite Reception,” *Tech. Univ. Ilmenau*, 2015.
- [32] V. K. Sakarellos, C. Kourogiorgas, and A. D. Panagopoulos, “Cooperative Hybrid Land Mobile Satellite–Terrestrial Broadcasting Systems: Outage Probability Evaluation and Accurate Simulation,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 79, no. 2, pp. 1471–1481, 2014.
- [33] K. P. Liolis, J. Gómez-Vilardebó, E. Casini, and A. I. Pérez-Neira, “Statistical modeling of dual-polarized MIMO land mobile satellite channels,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 11, pp. 3077–3083, 2010.