



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

## **Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος

Αθήνα, Ιούλιος 2010





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

## Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ι. Δ. Κανελλόπουλος

Π. Γ. Κωττής

Χ. Ν. Καψάλης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 6<sup>η</sup> Ιουλίου 2010.

.....  
Ι. Δ. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Χ. Ν. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Δ. Παναγόπουλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Μ. Θεολόγου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γ. Κ. Καραγιαννίδης  
Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....  
Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος

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

Copyright © Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος, 2010.

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.

*Β. Κ. Σακαρέλλος – Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα.*

Στους γονείς μου

*Β. Κ. Σακαρέλλος – Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα.*

## **Προλογικό σημείωμα**

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της πολυετούς και δύσκολης προσπάθειας, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους εξαιρετικούς επιστήμονες με τους οποίους είχα την τύχη να συνεργαστώ αυτά τα χρόνια, αλλά και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου και με στήριζαν. Πρώτον από όλους, τον επιβλέποντα της διατριβής μου Καθηγητή κ. Ιωάννη Δ. Κανελλόπουλο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διατριβή και να ασχοληθώ ερευνητικά με τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις αστείρευτες επιστημονικές του γνώσεις και τις χρήσιμες συμβουλές και προτάσεις του που ήταν ιδιαίτερα σημαντικές κατά τη διάρκεια της έρευνας και πάντα οδηγούσαν στη βελτίωση των τελικών αποτελεσμάτων. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, τόσο ως νέο ερευνητή όσο και σε προσωπικό επίπεδο οδήγησαν σε μια άριστη συνεργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Λέκτορα κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο για τη σημαντική βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση, το ανήσυχο πνεύμα του, ο δυναμισμός του και το ήθος του αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για μένα και συντέλεσαν στη διαμόρφωση μου ως νέου ερευνητή. Η συνεργασία μαζί του, αλλά και με το συνάδελφο και φίλο Δρ. Δημήτριο Σκραπαρλή οδήγησαν στη δημιουργία μιας δυνατής ερευνητικής ομάδας που απέδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα και που εγγυάται τη συνέχιση της ερευνητικής μας δραστηριότητας στο μέλλον.

Επιπλέον, εξαιρετικοί συνάδελφοι και φίλοι ήταν για μένα όλοι οι ερευνητές της ομάδας Ασύρματων και Δορυφορικών Επικοινωνιών και ιδιαίτερα οι Δρ. Σωτήρης Κανελλόπουλος, Δρ. Παντελής Αράπογλου, Δρ. Μάρκος Αναστασόπουλος, Δρ. Θανάσης Δρούγκας, Δρ. Δημήτρης Στρατογιάννης, Δρ. Θανάσης Λαζαρόπουλος, Δρ. Διονυσία

Πετράκη, Κέλλυ Γεωργιάδου, Κώστας Λιόλης, Γιώργος Τσιρόπουλος, Αγγελική Σαράφη και Μαρία Χορτάτου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Κώστα και Μαρία, για το κίνητρο που μου έδωσαν να ασχοληθώ με την έρευνα, αλλά και για την πλήρη συμπαράσταση και υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια αυτής της δύσκολης πορείας. Την αδερφή μου Παναγιώτα, τον ξάδερφο μου Χρήστο και τους φίλους μου Δημήτρη, Λώρα, Βάσω, Τάσο, Γιώργο Σ., Γιώργο Ν. και Ματίνα για την ευχάριστη παρέα τους. Την Αγγελίνα για όλα όσα μοιραστήκαμε αυτά τα χρόνια.

Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος

Αθήνα, Ιούλιος 2010



## **Περίληψη**

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάλυση της επίδοσης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που χρησιμοποιούν τεχνικές συνεργατικής διαφορικότητας. Τα συνεργατικά συστήματα αποτελούνται από πολλαπλούς κόμβους, οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους δημιουργώντας πολλαπλά κανάλια διαφορικότητας που γενικά υποφέρουν από συσχετισμένες διαλείψεις. Επομένως, ο τελικός χρήστης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος πληροφορίας μέσω των συνεργατικών κόμβων και τις συνδυάζει κατάλληλα δημιουργώντας το τελικό σήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της επίδοσης και της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των συνεργατικών δικτύων, ενώ στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση του φυσικού στρώματος των καναλιών που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια. Οι αποσβέσεις λόγω βροχής (εκφρασμένες σε dB), που εισάγονται στα πολλαπλά κανάλια ενός συνεργατικού συστήματος που λειτουργεί σε συχνότητες τόσο από 10GHz ως 50GHz όσο και άνω των 50GHz, θεωρούνται συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές για περιοχές με ήπιες συνθήκες βροχόπτωσης. Αντίθετα, σε τροπικές περιοχές με ισχυρές συνθήκες βροχόπτωσης, οι αποσβέσεις λόγω βροχής θεωρούνται συσχετισμένες γάμμα τυχαίες μεταβλητές. Σε κάθε περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη το κατάλληλο μοντέλο που περιγράφει την οριζόντια και κατακόρυφη χωρική δομή του μέσου βροχόπτωσης. Τέλος, μελετώνται τα κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης, όπου ο σηματοθορυβικός λόγος εκφρασμένος σε γραμμική κλίμακα είναι μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο για την ανάλυση της ολικής (end-to-end) επίδοσης ενός συστήματος δύο βημάτων (dual-hop) με έναν επαναλήπτη που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10 GHz. Η πιθανότητα αποκοπής

ενός συστήματος με ένα μη-αναγεννητικό επαναλήπτη σταθερού ή μεταβλητού κέρδους, καθώς και με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή. Επίσης, παρουσιάζεται η ανάλυση ενός συστήματος με έναν επαναλήπτη που περιλαμβάνει έναν εκτιμητή καναλιού που προβλέπει την απόσβεση του δεύτερου βήματος της ζεύξης βασισμένος στην πληροφορία που λαμβάνει από το πρώτο βήμα της ζεύξης. Τα διάφορα είδη επαναλήπτη συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με ένα ισοδύναμο σύστημα απλής ζεύξης χωρίς επαναλήπτη, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική κατανάλωση ισχύος του κάθε συστήματος. Τέλος, το φυσικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται για τη μελέτη της βέλτιστης θέσης ενός επαναλήπτη ώστε να εξασφαλίζονται συγκεκριμένες απαιτήσεις επίδοσης του συστήματος.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος, που υποφέρει από διαλείψεις είτε λόγω βροχής είτε λόγω σκίασης. Το θεωρούμενο συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιεί έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, ενώ γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών πρωτόκολλων συνεργασίας, πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης και συνδυαστικών τεχνικών. Το συνεργατικό σύστημα συγκρίνεται με ένα μη συνεργατικό σύστημα που αποτελείται από μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία των διάφορων συστημάτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα υποδεικνύουν το εύρος τιμών του σηματοθορυβικού λόγου και των διάφορων παραμέτρων του συστήματος που η συνεργασία μεταξύ των κόμβων υπερτερεί ή αποτυγχάνει να δώσει κέρδος σε σχέση με την περίπτωση μη συνεργασίας.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αρχικά προτείνονται αναλυτικές εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος διπλής δορυφορικής διαφορικής λήψης που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής. Στη συνέχεια του Κεφαλαίου προτείνεται η συνεργασία μεταξύ δορυφορικών και επίγειων δικτύων με σκοπό να αποφευχθεί η χρήση πολλαπλών δορυφόρων και ταυτόχρονα να βελτιωθεί η επίδοση ενός συστήματος. Οι διαφορετικές συνδυαστικές τεχνικές συγκρίνονται μεταξύ τους καθώς και με μια απλή δορυφορική ή επίγεια ζεύξη. Τέλος, από τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η γεωμετρία του συστήματος παίζει σημαντικό ρόλο στην επίδοσή του.

## **Abstract**

The subject of this thesis is the study of the outage performance of wireless telecommunication systems that use cooperative diversity techniques. These systems use multiple cooperative nodes creating multiple diversity channels that generally suffer from correlated fading. Therefore, the destination node receives multiple versions of the same information signal through the cooperative nodes and properly combines them creating the final signal. As a result, the performance and the reliability of telecommunication systems are improved.

In the 1<sup>st</sup> Chapter, the general characteristics of cooperative networks are presented, while in the 2<sup>nd</sup> Chapter the physical layer channel models that will be used in the following Chapters are described. Rain attenuations (expressed in dB) induced in the multiple channels of a cooperative system operating at frequencies from 10GHz to 50GHz, as well as above 50GHz, are considered correlated lognormal random variables for regions with moderate rainfall conditions. On the contrary, the rain attenuations are considered to be correlated gamma random variables for tropical regions with heavy rainfall conditions. In each case, the appropriate model, describing the horizontal and vertical spatial structure of the rainfall medium, is taken into account. Finally, shadowing channels, where the carrier-to-noise ratio expressed in linear scale is a lognormal random variable, are also studied.

In the 3<sup>rd</sup> Chapter, a full physical model describing the end-to-end outage performance of a dual-hop system, using a radio relay and operating at frequencies above 10GHz, is presented. The outage probability is calculated using the joint lognormal distribution for a system with a non-regenerative adaptive or fixed gain relay, as well as with a regenerative one. The outage analysis of a system with a relay equipped with a channel estimator that predicts the fading of the second hop based on the first hop information is also presented. In addition, comparison between different relay types, as well

as with an effective direct link taking into account the power consumption of each system, is provided. Finally, the proposed physical model is used for the investigation of the optimum position of a relay ensuring the quality-of-service of a dual-hop system.

In the 4<sup>th</sup> Chapter, an analytical model for the calculation of the outage probability of a cooperative diversity system suffering either from rain attenuation or from shadowing is presented. The considered cooperative system uses a regenerative relay, while comparison between different cooperative diversity protocols, multiple access protocols and combining techniques, is also provided. The cooperative system is compared with a non-cooperative one that consists of an effective direct link, taking into account the energy and spectral efficiency of different systems. Numerical results investigate the regions of the values of the carrier-to-noise ratio and of system parameters where cooperation provides or fails to provide gain over the non-cooperation case.

In the 5<sup>th</sup> Chapter, analytical formulas are presented for the calculation of outage probability of dual satellite diversity reception system suffering from rain attenuation. In order to avoid the use of multiple satellites and increase the system performance at the same time, synergy between satellite and terrestrial networks is proposed. Comparison between different combining techniques, as well as with a single satellite or terrestrial link is also provided. Finally, the numerical results investigate the effect of the geometrical configuration on the system performance.

## **Περιεχόμενα**

<b>Προλογικό σημείωμα.....</b>	<b>7</b>
<b>Περίληψη.....</b>	<b>9</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>11</b>
<b>Περιεχόμενα .....</b>	<b>13</b>
<b>1. Γενικά χαρακτηριστικά συνεργατικών συστημάτων.....</b>	<b>17</b>
1.1. Εισαγωγή .....	17
1.2. Ασύρματα δίκτυα.....	17
1.3. Συστήματα συνεργατικής διαφορικότητας.....	19
1.4. Είδη επαναλήπτη .....	23
1.5. Συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης .....	25
1.6. Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης .....	26
1.7. Πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας.....	27
1.8. Αναδρομή στη βιβλιογραφία.....	29
<b>2. Μοντελοποίηση καναλιού .....</b>	<b>33</b>
2.1. Εισαγωγή .....	33
2.2. Απόσβεση λόγω βροχής σε συχνότητες από 10GHz ως 50GHz.....	33
2.2.1. Γενικά στοιχεία.....	33
2.2.2. Ειδική απόσβεση .....	34

2.2.3.	Μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής μίας ζεύξης.....	37
2.2.4.	Μοντελοποίηση των αποσβέσεων λόγω βροχής πολλαπλών ζεύξεων .....	39
2.3.	Απόσβεση λόγω βροχής σε συχνότητες άνω των 50GHz .....	40
2.3.1.	Γενικά στοιχεία.....	40
2.3.2.	Λογαριθμοκανονικό μοντέλο για συχνότητες άνω των 50GHz.....	41
2.3.3.	Συνδυαστικό στρωσιγενές-συνεκτικό μοντέλο .....	42
2.3.4.	Επίδραση του συντελεστή χωρικής ανομοιογένειας .....	46
2.4.	Απόσβεση λόγω βροχής σε τροπικά κλίματα.....	47
2.4.1.	Μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής σε τροπικά κλίματα.....	47
2.4.2.	Μονοδιάστατη γάμμα κατανομή .....	48
2.4.3.	Διδιάστατη γάμμα κατανομή.....	51
2.5.	Απόσβεση λόγω βροχής σε δορυφορικά συστήματα .....	52
2.6.	Κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις λόγω σκίασης .....	53
<b>3.</b>	<b>Ανάλυση χιλιοστομετρικών επίγειων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με επαναλήπτη .....</b>	<b>55</b>
3.1.	Εισαγωγή .....	55
3.2.	Μοντελοποίηση του συστήματος .....	56
3.3.	Μη-αναγεννητικός επαναλήπτης (ενίσχυση-και-προώθηση).....	58
3.3.1.	Επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους.....	59
3.3.2.	Επαναλήπτης σταθερού κέρδους.....	61
3.4.	Αναγεννητικός επαναλήπτης (αποκωδικοποίηση-και-προώθηση) .....	65
3.5.	Επαναλήπτης εξοπλισμένος με εκτιμητή καναλιού .....	67
3.6.	Λεπτομέρειες αριθμητικού υπολογισμού του γενικού τύπου (3.13).....	69
3.7.	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός.....	70
3.7.1.	Πιθανότητα αποκοπής.....	71
3.7.2.	Βέλτιστη θέση του επαναλήπτη .....	76
3.8.	Συμπεράσματα .....	89
<b>4.</b>	<b>Ανάλυση επίγειων συνεργατικών συστημάτων .....</b>	<b>91</b>
4.1.	Εισαγωγή .....	91

4.2.	Επίδοση χιλιοστομετρικών συνεργατικών συστημάτων .....	92
4.2.1.	Μοντελοποίηση του συστήματος .....	92
4.2.2.	Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης .....	94
4.2.3.	Πιθανότητα αποκοπής συστήματος Σταθερής Επανάληψης.....	95
4.2.4.	Πιθανότητα αποκοπής συστήματος Επιλεγόμενης Επανάληψης.....	98
4.2.5.	Ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία .....	100
4.2.6.	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	102
4.3.	Επίδοση συνεργατικών συστημάτων που υποφέρουν από διαλείψεις λόγω σκίασης.....	109
4.3.1.	Μοντελοποίηση του συστήματος .....	109
4.3.2.	Πιθανότητα αποκοπής συστήματος Επιλεγόμενης Επανάληψης.....	111
4.3.3.	Ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία .....	113
4.3.4.	Αριθμητικά αποτελέσματα .....	114
4.4.	Συμπεράσματα.....	120
<b>5.</b>	<b>Ανάλυση δορυφορικών συνεργατικών συστημάτων .....</b>	<b>123</b>
5.1.	Εισαγωγή .....	123
5.2.	Επίδοση της MRC δορυφορικής διαφορικής λήψης σε κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές και γάμμα διαλείψεις .....	126
5.2.1.	Μοντελοποίηση του συστήματος .....	126
5.2.2.	Πιθανότητα αποκοπής για λογαριθμοκανονικές αποσβέσεις.....	128
5.2.3.	Πιθανότητα αποκοπής για γάμμα αποσβέσεις .....	129
5.2.4.	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	130
5.3.	Συνεργασία δορυφορικών και επίγειων συστημάτων σε τροπικές περιοχές.....	134
5.3.1.	Μοντελοποίηση του συστήματος .....	134
5.3.2.	Πιθανότητα αποκοπής της τεχνικής MRC .....	136
5.3.3.	Πιθανότητα αποκοπής της τεχνικής SC .....	137
5.3.4.	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	137
5.4.	Επίδοση των συνεργατικών δορυφορικών – επίγειων δικτύων .....	139
5.5.	Συμπεράσματα.....	144

<b>6. Συμπεράσματα και προοπτικές για μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>147</b>
6.1. Συμπεράσματα .....	147
6.2. Προοπτικές για μελλοντική έρευνα .....	152
<b>Παράρτημα Α: Λογαριθμοκανονική κατανομή .....</b>	<b>157</b>
Μονοδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή .....	157
Διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή .....	159
N-διάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή.....	161
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>163</b>
<b>Δημοσιεύεις .....</b>	<b>175</b>
<b>Βιογραφικό σημείωμα .....</b>	<b>177</b>



## **1. Γενικά χαρακτηριστικά συνεργατικών συστημάτων**

### ***1.1.Εισαγωγή***

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της επίδοσης των συνεργατικών συστημάτων καθώς και των μικροαρχιτεκτονικών που αποτελούν τα βασικά εργαλεία σύνθεσης των συστημάτων αυτών. Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια γενικά χαρακτηριστικά των συνεργατικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των ασύρματων δικτύων και παρουσιάζονται τα οφέλη από τη συνεργασία των τερματικών ενός δικτύου. Επίσης, περιγράφονται τα διάφορα είδη επαναλήπτη που χρησιμοποιούνται στα συνεργατικά δίκτυα, οι συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης με τις οποίες ο τελικός δέκτης συνδυάζει τα διαφορετικά σήματα που λαμβάνει, τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης που επιτρέπουν στους χρήστες ενός δικτύου να μοιράζονται το μέσο διάδοσης καθώς και τα πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας που ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται οι κόμβοι ενός δικτύου. Τέλος, παρουσιάζεται μια γενική αναδρομή στην πρόσφατη βιβλιογραφία των συνεργατικών δικτύων.

### ***1.2.Ασύρματα δίκτυα***

Η όλο και αυξανόμενη ανάγκη για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, όπως π.χ. οι εφαρμογές πολυμέσων, έχει οδηγήσει στην εκτεταμένη χρήση των ασύρματων δικτύων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων είναι η εύκολη και φτηνή υλοποίησή τους σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα καθώς και η μεγάλη χωρική κάλυψη. Διακρίνονται διάφορα είδη ασύρματων δικτύων, όπως είναι τα κινητά δίκτυα (mobile networks), τα σταθερά ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα (fixed broadband wireless access networks), τα ασύρματα δίκτυα κορμού (backhaul networks) και τέλος τα δορυφορικά δίκτυα (satellite networks).

Τα κινητά δίκτυα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη σημερινή εποχή προσφέροντας σύγχρονες υπηρεσίες σε κινητούς χρήστες χωρίς να χρειάζονται σταθερή πρόσβαση και αποτελούνται από τα κυψελωτά (cellular) δίκτυα και τα μη δομημένα (ad-hoc) δίκτυα. Τα τοπικά δίκτυα (Local Area Networks - LANs) περιγράφονται από την οικογένεια προτύπων IEEE 802.11, τα μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Networks - MANs) περιγράφονται από τις οικογένειες προτύπων WiMAX, IEEE 802.16, IEEE 802.20, όπως π.χ. το πρότυπο IEEE 802.16e που προβλέπει χαμηλής ταχύτητας κινητούς χρήστες, ενώ τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας προσδιορίζονται ως συστήματα UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Τα σταθερά ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα [Rappaport96], [Soldani08] έχουν προταθεί για την σύνδεση των χρηστών με το βασικό τμήμα ενός υπάρχοντος δικτύου, π.χ. το τερματικό ενός χρήστη μετατρέπεται σε κόμβο εξυπηρέτησης δικτύου (server) προσφέροντας τη διασύνδεση σε τοπολογία πλέγματος (mesh network). Με αυτόν τον τρόπο, ένας νέος χρήστης που συνδέεται στο δίκτυο δεν είναι υποχρεωμένος να βρίσκεται σε οπτική επαφή (Line of Sight) με ένα σταθμό βάσης, καθώς ένας κόμβος εξυπηρέτησης του δικτύου διευκολύνει τη διασύνδεσή του, δημιουργώντας ένα σύστημα δύο βημάτων (dual hop system) με επαναλήπτη (relay) [Crane03], [Boyer04].

Τα ασύρματα δίκτυα κορμού παρέχουν τη διασύνδεση των σταθμών βάσης (base stations) των κυψελωτών ασύρματων δικτύων με το βασικό τμήμα του δικτύου (core network) [Wells09], [Chia09], [Little09], [Lockie09], [Capsoni09]. Για να μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, τελευταία σε αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούνται εξαιρετικά υψηλές συχνότητες, όπως οι χιλιοστομετρικές ζώνες των 71-76 GHz και 81-86 GHz [ECC Recommendation (05)07]. Τα πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων κορμού είναι η φτηνή και γρήγορη υλοποίησή τους σε σχέση με τα δίκτυα οπτικών ινών (fiber optics). Επίσης, χρησιμοποιώντας κεραιές υψηλής κατευθυντικότητας (“pencil beam antennas”) γίνονται πιο ασφαλή από τα ενσύρματα δίκτυα και επιπλέον αποφεύγονται οι παρεμβολές [Capsoni09] κάνοντας τη διαχείριση του φάσματος πιο εύκολη. Τέλος, ο εξοπλισμός των πομποδεκτών (transceivers) αυτών των δικτύων, π.χ. οι κεραιές, είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τον εξοπλισμό άλλων τεχνολογιών.

Τα δορυφορικά δίκτυα, που κυρίως περιγράφονται από το πρότυπο DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) [Morello06], παρέχουν πολύ μεγάλη κάλυψη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική λύση των άλλων ασύρματων δικτύων σε δυσπρόσιτες περιοχές. Παρέχουν υπηρεσίες τόσο σε σταθερούς (fixed satellite services) όσο και σε κινητούς χρήστες (mobile satellite services) 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). Λόγω των αυξημένων διαλείψεων στις δορυφορικές επικοινωνίες, συχνά χρησιμοποιούνται συνδυαστικές τεχνικές διαφορετικής λήψης (receive diversity combining techniques) είτε με χρήση πολλαπλών δορυφόρων (orbital diversity), είτε με χρήση πολλαπλών επίγειων δεκτών (site diversity). Επίσης, πρόσφατα έχει προταθεί η συνεργασία δορυφορικών και επίγειων δικτύων (satellite-terrestrial synergy) [Matricciani03], [Khan08].

### ***1.3. Συστήματα συνεργατικής διαφορικότητας***

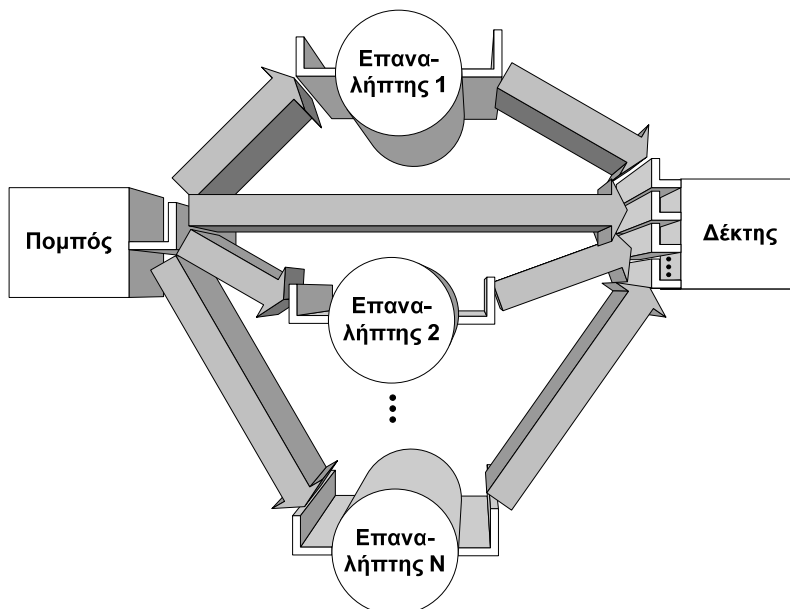
Τελευταία, στα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται οι τεχνικές συνεργατικής διαφορικότητας (cooperative diversity techniques) [Laneman04], [Sendonaris03], όπου ο τελικός χρήστης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος μέσω συνεργατικών επαναληπτών και τις συνδυάζει δημιουργώντας το τελικό λαμβανόμενο σήμα. Οι συνεργατικές τεχνικές επικοινωνίας έχουν τις ρίζες τους στη θεωρία πληροφοριών και αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της επίδοσης και της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, όπως π.χ. στην αύξηση της διαθεσιμότητας ή της χωρικής κάλυψης. 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 συνεργατικής διαφορικότητας αποτελούνται από πολλαπλούς κόμβους/χρήστες οι οποίοι μοιράζονται τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους του συστήματος (φάσμα, κεραίες, ισχύς) δημιουργώντας πολλαπλά κανάλια διαφορικότητας, 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.

Η ανάλυση των συνεργατικών τεχνικών απαιτεί τη θεώρηση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος όχι ως ένα ανεξάρτητο σύνολο κόμβων και σημειακών ζεύξεων αλλά ως ένα σύστημα όπου οι κόμβοι αφιερώνουν μέρος των πόρων τους για την αναμετάδοση πληροφορίας των υπόλοιπων ζεύξεων. Επομένως, για την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού συνεργατικών συστημάτων απαιτείται η μελέτη της επίδρασης της επιλογής των τηλεπικοινωνιακών παραμέτρων στα μεγέθη που περιγράφουν την επίδοση ενός συστήματος, όπως είναι η πιθανότητα αποκοπής, ο συνολικός (end-to-end) σηματοθορυβικός λόγος, η πιθανοτική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου και η χωρητικότητα του συστήματος. Παραδείγματα παραμέτρων που επηρεάζουν την επίδοση του συνεργατικού συστήματος είναι το εύρος φάσματος που απαιτείται για τη μετάδοση της πληροφορίας σε κάθε κόμβο, η εκπεμπόμενη και καταναλισκόμενη ισχύς, η αρχιτεκτονική και η πολυπλοκότητα του συστήματος, δηλαδή ο αριθμός των κόμβων και η θέση τους, ο τρόπος συνεργασίας των κόμβων (επεξεργασία σήματος), ο τρόπος της πολλαπλής πρόσβασης, η ύπαρξη ενδοσυστημικών παρεμβολών καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των δεκτών, όπως η κατευθυντικότητα των κεραιών και η ευαισθησία του δέκτη.

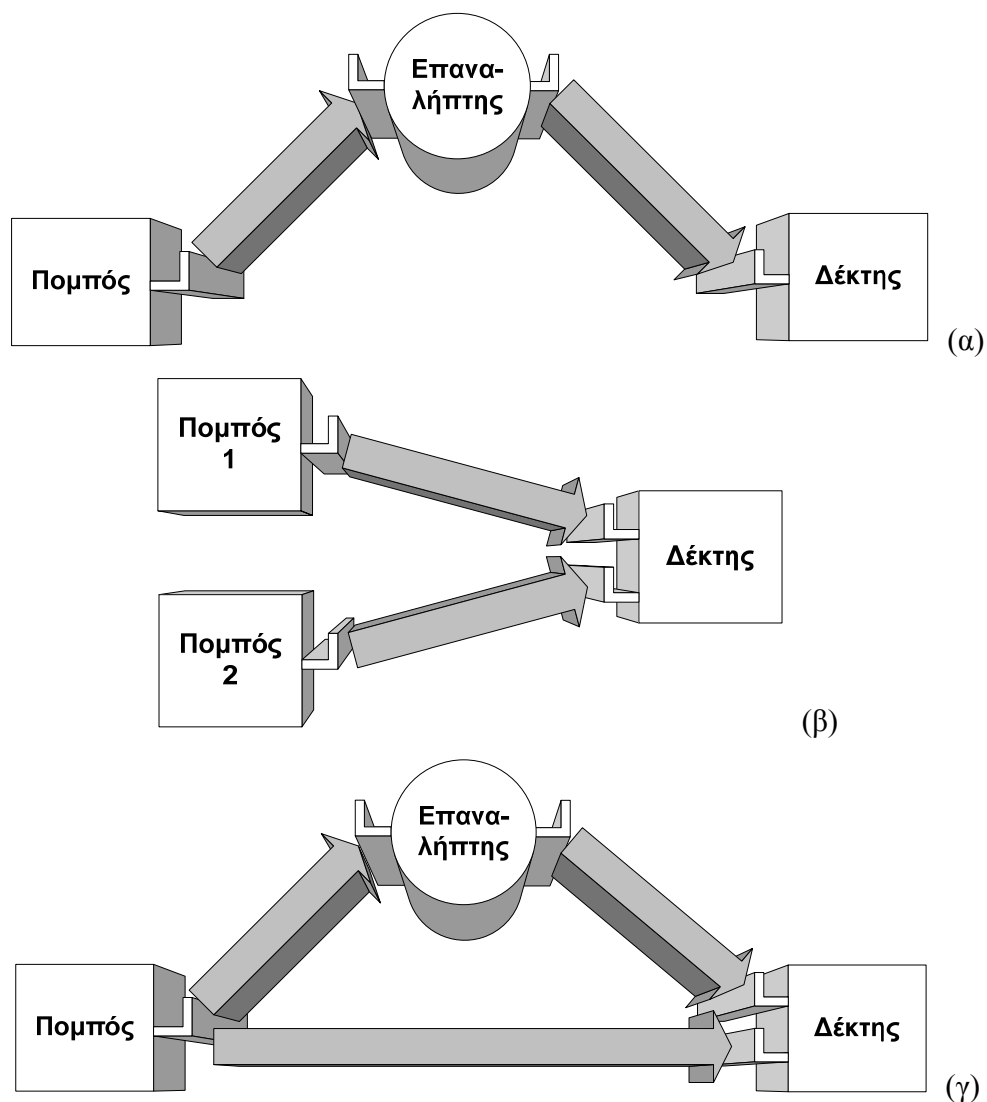
Επίσης, ο σχεδιασμός των συνεργατικών συστημάτων απαιτεί το βέλτιστο συμψηφισμό των τηλεπικοινωνιακών αυτών παραμέτρων λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό στρώμα (μέσο διάδοσης) και πιο συγκεκριμένα την πιθανοτική κατανομή των διαλείψεων των καναλιών του συστήματος, ιδιαίτερα όταν αυτές είναι συσχετισμένες. Για παράδειγμα, ένα από τα βασικά προβλήματα σχεδίασης ενός συνεργατικού δικτύου είναι η βέλτιστη ανακατανομή της ενέργειας και του φάσματος, ικανοποιώντας δεδομένους τεχνικούς περιορισμούς. Δεδομένου ότι οι κόμβοι ενός συνεργατικού συστήματος μοιράζονται τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους, είναι σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση κάθε παραμέτρου σε κάθε κόμβο χωριστά, στο συνολικό σύστημα αλλά και στις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος. Επιπλέον, απαιτείται ο προσδιορισμός του εύρους των παραμέτρων που η συνεργασία μεταξύ των κόμβων του συστήματος επιφέρει κέρδος σε σύγκριση με τη μη συνεργασία, η ποσοτικοποίηση του κέρδους αυτού και τα όρια του καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνεργαζόμενων κόμβων.

Ένα γενικό παράδειγμα συνεργατικού συστήματος με  $N$  επαναλήπτες φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Ο πομπός εκπέμπει ταυτόχρονα το ίδιο σήμα πληροφορίας απευθείας στον τελικό δέκτη αλλά και στους  $N$  επαναλήπτες, οι οποίοι με τη σειρά τους επανεκπέμπουν το λαμβανόμενο σήμα προς τον δέκτη. Στη συνέχεια ο δέκτης δημιουργεί το τελικό σήμα, συνδυάζοντας το απευθείας σήμα και τα υπόλοιπα σήματα που έχει λάβει από τους επαναλήπτες. Τα κανάλια μετάδοσης χαρακτηρίζονται από διαλείψεις, που σε πολλές περιπτώσεις είναι συσχετισμένες, οι οποίες προκαλούν σφάλματα στη μετάδοση της πληροφορίας και έχουν ως αποτέλεσμα τη μειωμένη διαθεσιμότητα του συστήματος. Γενικά η στιγμιαία τιμή των διαλείψεων διαφέρει σε κάθε ζεύξη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο δέκτης να λαμβάνει πολλαπλές διαφορετικές εκδοχές του ίδιου σήματος πληροφορίας. Αυτή η επιπλέον πληροφορία χρησιμοποιείται από το δέκτη για να βελτιώσει την εκτίμηση του σήματος που έλαβε από τον πομπό μέσω της απευθείας ζεύξης. Επομένως, η ύπαρξη των επαναληπτών παρέχει συνεργατική διαφορικότητα στο σύστημα. Επιπλέον, όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.1, η απευθείας ζεύξη πομπού-δέκτη καθώς και οι ζεύξεις από τους  $N$  επαναλήπτες στο δέκτη δημιουργούν ένα εικονικό σύστημα MIMO τάξεως  $N+1$ , όπου ο κάθε επαναλήπτης αντιστοιχεί σε μία κεραία αυτού του συστήματος MIMO.



Σχήμα 1.1: Σύστημα συνεργατικής διαφορικότητας με  $N$  επαναλήπτες.

Για να μελετηθεί ένα πολύπλοκο συνεργατικό σύστημα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι βασικές μικροαρχιτεκτονικές που το απαρτίζουν. Τα βασικά εργαλεία σύνθεσης των συνεργατικών συστημάτων, που φαίνονται στο Σχήμα 1.2, είναι: (α) το απλό σύστημα με επαναλήπτη χωρίς την απευθείας ζεύξη [Van Der Meulen71], (β) το σύστημα συνδυαστικής διαφορικής λήψης (receive diversity combining) [Stuber01] και (γ) το στοιχειώδες συνεργατικό σύστημα που αποτελείται από την απευθείας ζεύξη σε συνδυασμό με έναν επαναλήπτη [Laneman04].



Σχήμα 1.2: Βασικές μικροαρχιτεκτονικές συνεργατικών συστημάτων: (α) απλό σύστημα με επαναλήπτη χωρίς την απευθείας ζεύξη, (β) σύστημα διαφορικής λήψης και (γ) στοιχειώδες συνεργατικό σύστημα.

### **1.4.Είδη επαναλήπτη**

Τα κυριότερα είδη επαναληπτών είναι οι αναγεννητικοί (regenerative) και οι μη-αναγεννητικοί (non-regenerative) ή αλλιώς διαφανείς (transparent) επαναλήπτες. Οι αναγεννητικοί επαναλήπτες χρησιμοποιούν την τεχνική αποκωδικοποίησης-και-προώθησης (decode-and-forward). Το σήμα που λαμβάνει ο επαναλήπτης από το πρώτο τμήμα της ζεύξης αναγεννιέται χρησιμοποιώντας ολόκληρη τη διαδικασία επεξεργασίας σήματος πομπού-δέκτη, δηλαδή αποδιαμορφώνεται και αποκωδικοποιείται, στη συνέχεια διαμορφώνεται και κωδικοποιείται και τέλος επανεκπέμπεται προς τον τελικό πομπό, δηλαδή προωθείται στο δεύτερο τμήμα της ζεύξης.

Για ένα σύστημα με αναγεννητικό επαναλήπτη δεν μπορεί να υπολογιστεί ένας συνολικός (end-to-end) σηματοθορυβικός λόγος (Carrier-to-Noise Ratio - CNR). Παρόλα αυτά, μπορεί να ορισθεί ένας ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής του συστήματος, δηλαδή το ενδεχόμενο ο σηματοθορυβικός λόγος να πέσει κάτω από μία συγκεκριμένη στάθμη. Επεκτείνοντας την ανάλυση των δημοσιεύσεων [Sakarellos10a] και [Sakarellos10b] σε ένα σύστημα με  $N$  αναγεννητικούς επαναλήπτες τοποθετημένους σε σειρά, δηλαδή σε ένα σύστημα με  $N+1$  βήματα (hops), ο ισοδύναμος συνολικός σηματοθορυβικός λόγος  $CNR_{reg}$  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. Επίσης, από την σχέση (1.1), μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο μικρότερος σηματοθορυβικός λόγος είναι αυτός που χαρακτηρίζει από άποψη διαθεσιμότητας ένα πολυβηματικό (multi-hop) σύστημα με αναγεννητικούς επαναλήπτες.

Οι μη-αναγεννητικοί επαναλήπτες χρησιμοποιούν την τεχνική ενίσχυσης-και-προώθησης (amplify-and-forward). Σε αυτήν την περίπτωση, ο επαναλήπτης ενισχύει, με σταθερό ή μεταβλητό κέρδος ενισχυτή, το σήμα που έχει λάβει από το πρώτο τμήμα της ζεύξης και το προωθεί στο δεύτερο τμήμα της ζεύξης χωρίς να το αποκωδικοποιήσει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο θόρυβος από το πρώτο τμήμα της ζεύξης να ενισχύεται και να επανεκπέμπεται στο δεύτερο τμήμα της ζεύξης μαζί με το σήμα πληροφορίας.

Οι μη-αναγεννητικοί επαναλήπτες χωρίζονται στους επαναλήπτες με μεταβλητό κέρδος (adaptive gain) και στους επαναλήπτες σταθερού κέρδους (fixed gain). Οι επαναλήπτες μεταβλητού κέρδους ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα μεταβάλλοντας το κέρδος του ενισχυτή έτσι ώστε η 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 [Sakarellos10a].

Οι μη-αναγεννητικοί επαναλήπτες σταθερού κέρδους (fixed gain) ενισχύουν το λαμβανόμενο σήμα με ένα σταθερό κέρδος του ενισχυτή. Οι επαναλήπτες αυτού του είδους έχουν μικρότερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τους επαναλήπτες μεταβλητού κέρδους, αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι το σήμα που εκπέμπουν έχει μεταβλητή ισχύ. Οι επαναλήπτες σταθερού κέρδους δεν μπορούν να αντισταθμίσουν εξ ολοκλήρου την απόσβεση του πρώτου τμήματος της ζεύξης και η ισχύς εκπομπής τους μειώνεται κατά το μέγεθος αυτής της απόσβεσης όταν ο ενισχυτής λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αναδίπλωση της ισχύος του ενισχυτή (amplifier's back-off effect). Αν η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ο επαναλήπτης είναι μεγάλη, ο ενισχυτής μπορεί να οδηγηθεί στον κόρο. Σε αυτή την περίπτωση, για να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα λόγω της μη γραμμικής λειτουργίας στον κόρο, όπως η παραμόρφωση σήματος, ο επαναλήπτης περιορίζει την ισχύ εκπομπής του και λειτουργεί πλέον ως επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους.

Ο συνολικός (end-to-end) σηματοθορυβικός λόγος ενός επιγείου συστήματος με ένα μη-αναγεννητικό επαναλήπτη έχει υπολογιστεί στη δημοσίευση [Sakarellos10a], ενώ ο αντίστοιχος σηματοθορυβικός λόγος για ένα δορυφορικό σύστημα με διαφανή αναμεταδότη έχει παρουσιαστεί στο βιβλίο [Maral98]. Για ένα σύστημα με  $N$  μη-αναγεννητικούς επαναλήπτες τοποθετημένους σε σειρά, επομένως με  $N+1$  βήματα, ο



συνολικός σηματοθορυβικός λόγος, εκφρασμένος σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB, δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{non-reg}^{-1} = CNR_1^{-1} + CNR_2^{-1} + \dots + CNR_N^{-1} + CNR_{N+1}^{-1} \quad (1.2)$$

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. Σημειώνεται ότι οι σηματοθορυβικοί λόγοι από το δεύτερο βήμα μέχρι το βήμα  $N+1$  ορίζονται ως η αποσβενύμενη ισχύς του σήματος πληροφορίας που εκπέμπει ο κάθε επαναλήπτης προς το θόρυβο και όχι ως η αποσβενύμενη συνολική εκπεμπόμενη ισχύς, που περιλαμβάνει το σήμα πληροφορίας και το θόρυβο, προς το θόρυβο, όπως ορίζονται στη δημοσίευση [Hasna03]. Αν χρησιμοποιηθεί ένας σύνθετος μη-αναγεννητικός επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους, όπως αυτός περιγράφηκε παραπάνω, οι εκπεμπόμενες ισχύεις των σημάτων πληροφορίας από τους επαναλήπτες είναι σταθερές, επομένως και οι σηματοθορυβικοί λόγοι της εξίσωσης (1.2) είναι σταθεροί. Αντίθετα, στις περιπτώσεις των απλών επαναληπτών μεταβλητού κέρδους και των επαναληπτών σταθερού κέρδους, οι ισχύεις αυτές δεν είναι σταθερές και απαιτείται περαιτέρω υπολογισμός των σηματοθορυβικών λόγων της εξίσωσης (1.2). Αναλυτικότερα, η εξίσωση (1.2) υπολογίζεται στη δημοσίευση [Sakarellos10a] και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 για την περίπτωση ενός συστήματος με έναν επαναλήπτη.

### **1.5. Συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης**

Σε ένα σύστημα διαφορικής λήψης, ο τελικός χρήστης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος πληροφορίας και δημιουργεί το τελικό λαμβανόμενο σήμα χρησιμοποιώντας συνδυαστικές τεχνικές (combining techniques). Οι κυριότερες συνδυαστικές τεχνικές είναι ο Συνδυασμός Μεγίστου Λόγου (Maximal Ratio Combining - MRC), ο Συνδυασμός Ίσων Κερδών (Equal Gain Combining - EGC) και ο Συνδυασμός με Επιλογή (Selection Combining - SC) [Stuber01].

Στην τεχνική MRC, ο δέκτης ενισχύει τα λαμβανόμενα σήματα, το καθένα από αυτά αναλογικά με τη στάθμη του, και στη συνέχεια τα προσθέτει. 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:

$$CNR_{MRC} = \sum_{j=1}^N CNR_j \quad (1.3)$$

Στην τεχνική EGC, 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:

$$CNR_{EGC} = \left( \sum_{j=1}^N \sqrt{CNR_j} \right)^2 / N \quad (1.4)$$

Στον προηγούμενο τύπο, οι σηματοθορυβικοί λόγοι  $CNR_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ) εκφράζονται και πάλι σε γραμμική κλίμακα. Τέλος στην τεχνική SC, ο δέκτης επιλέγει το καλύτερο από τα λαμβανόμενα σήματα από άποψη CNR και επομένως ο σηματοθορυβικός λόγος του τελικού σήματος δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{SC} = \max(CNR_1, CNR_2, \dots, CNR_N) \quad (1.5)$$

### **1.6. Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης**

Γενικά, σε ένα συνεργατικό σύστημα οι ρόλοι πομπού, επαναλήπτη και δέκτη μπορούν να εναλλάσσονται δυναμικά λαμβάνοντας υπόψη το σχεδιασμό της πολλαπλής πρόσβασης (multiple access protocol) στο μέσο διάδοσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης είναι η πολυπλεξία στο χρόνο (Time Division Multiple Access - TDMA), η πολυπλεξία στη συχνότητα (Frequency Division Multiple Access - FDMA), η πολυπλεξία στο χώρο (Space Division Multiple Access - SDMA) και τέλος η πολυπλεξία με χρήση κωδικών (Code Division Multiple Access - CDMA).

Όταν χρησιμοποιείται η πολυπλεξία χρόνου/συχνότητας (TDMA/ FDMA), π.χ. στο συνεργατικό σύστημα του Σχήματος 1.1, στο πρώτο χρονικό/συχνοτικό παράθυρο (time/frequency slot) ο πομπός εκπέμπει ένα σήμα τόσο στον τελικό δέκτη όσο και στους  $N$  επαναλήπτες. Στο δεύτερο χρονικό/συχνοτικό παράθυρο, οι επαναλήπτες επανεκπέμπουν (προωθούν) το λαμβανόμενο σήμα στον τελικό δέκτη. Επομένως, αυτά τα πρωτόκολλα δεσμεύουν δύο βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom - DOF) χρησιμοποιώντας

διπλάσιο χρόνο ή εύρος φάσματος σε σχέση με την απευθείας ζεύξη. Η λειτουργία ενός τέτοιου επαναλήπτη ονομάζεται ‘half-duplex’.

Αντίθετα, στην πολυπλεξία χώρου (SDMA) οι επαναλήπτες λαμβάνουν ένα σήμα από τον πομπό ενώ ταυτοχρόνως επανεκπέμπουν προς στο δέκτη το σήμα που έλαβαν από τον πομπό την αμέσως προηγούμενη στιγμή. Επομένως, το πρωτόκολλο αυτό δεσμεύει μόνο ένα βαθμό ελευθερίας και είναι το ίδιο αποδοτικό από άποψη χρήσης φάσματος με μια απευθείας ζεύξη. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι ενδεχόμενες παρεμβολές αποφεύγονται με τη χρήση ‘έξυπνων’ κεραιών (smart antennas) ή κεραιών με μεγάλη κατευθυντικότητα ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται υψηλές συχνότητες. Η λειτουργία ενός τέτοιου επαναλήπτη χαρακτηρίζεται ως ‘full-duplex’. Εκτός της καλύτερης διαχείρισης φάσματος η πολυπλεξία χώρου έχει και άλλα πλεονεκτήματα σε σχέση με την πολυπλεξία χρόνου/συχνότητας, καθώς αποφεύγεται η διαδικασία εναλλαγής της λειτουργίας του επαναλήπτη μεταξύ εκπομπής και λήψης [Yu08].

Η ‘full-duplex’ λειτουργία μπορεί να προκαλέσει ενδοσυστημική παρεμβολή στον επαναλήπτη, δηλαδή παρεμβολή από την κεραία του δέκτη στην κεραία του πομπού του επαναλήπτη. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες υλοποιήσεις ενός επαναλήπτη μπορούν να εξασφαλίσουν επαρκή απομόνωση μεταξύ των δύο καναλιών, ιδιαίτερα για συγκεκριμένα περιβάλλοντα διάδοσης. Ακόμα, η ενδοσυστημική παρεμβολή μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Τέλος, περισσότερες πληροφορίες για τη συγκεκριμένη λειτουργία του επαναλήπτη παρέχονται στις δημοσιεύσεις [Sakarellos10c], [Skraparlis09a] και ιδιαίτερα στις [Yu08], [Weng07] και [Riihonen08].

### ***1.7. Πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας***

Τα πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας (cooperative diversity protocols) περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο οι επαναλήπτες ενός συνεργατικού συστήματος προωθούν το αρχικό σήμα πληροφορίας προς τον τελικό χρήστη, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο ο τελικός αυτός χρήστης συνδυάζει τα λαμβανόμενα σήματα. Τα πρωτόκολλα αυτά περιγράφονται στη δημοσίευση [Laneman04] και περιλαμβάνουν το πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης (Fixed Relaying - FR), το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης

(Selection Relaying - SR) και το πρωτόκολλο Αυξανόμενης Επανάληψης (Incremental Relaying - IR).

Στο πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης, οι επαναλήπτες ενός συνεργατικού συστήματος πάντα προωθούν το λαμβανόμενο σήμα προς τον τελικό χρήστη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το συγκεκριμένο σύστημα να περιορίζεται από τις πιθανές διαλείψεις των ζεύξεων μεταξύ αρχικού πομπού και επαναληπτών. Σε ένα σύστημα με αναγεννητικούς επαναλήπτες, αν οι επαναλήπτες δεν αποκωδικοποιήσουν σωστά το λαμβανόμενο σήμα, τότε ούτε και το τελικό σήμα στο δέκτη θα μπορέσει να αποκωδικοποιηθεί. Επομένως, μια επιτυχημένη μετάδοση απαιτεί ότι τόσο ο τελικός δέκτης όσο και οι επαναλήπτες αποκωδικοποίησαν σωστά το λαμβανόμενο σήμα. Σε ένα σύστημα με μη-αναγεννητικούς επαναλήπτες, αν ο σηματοθορυβικός λόγος των σημάτων των ζεύξεων πομπού-επαναληπτών είναι χαμηλός, τότε ο θόρυβος αυτών των ζεύξεων θα ενισχυθεί πολύ από τους επαναλήπτες και θα προωθηθεί στον τελικό δέκτη επηρεάζοντας την τελική επίδοση του συστήματος. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα περιορίζεται σημαντικά από τις ζεύξεις μεταξύ πομπού και επαναληπτών.

Για να ξεπεραστεί το μειονέκτημα αυτό του πρωτοκόλλου Σταθερής Επανάληψης, χρησιμοποιείται συνήθως το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης. Σε αυτήν την περίπτωση, αν οι αναγεννητικοί επαναλήπτες δεν μπορέσουν να αποκωδικοποιήσουν το λαμβανόμενο σήμα ή αν ο σηματοθορυβικός λόγος που λαμβάνουν οι μη-αναγεννητικοί επαναλήπτες πέσει κάτω από μία στάθμη, τότε οι επαναλήπτες δεν προωθούν το λαμβανόμενο σήμα προς τον τελικό δέκτη. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση, το συνεργατικό σύστημα επιλέγει να μη συνεργαστεί και μετατρέπεται σε ένα σύστημα απευθείας ζεύξης μεταξύ αρχικού πομπού και τελικού δέκτη. Στην περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης TDMA ή FDMA και ο τελικός δέκτης συνδυάζει τα σήματα σύμφωνα με την τεχνική MRC ή EGC, το δεύτερο χρονικό ή συχνοτικό παράθυρο, που αρχικά προοριζόταν για να εκπέμψουν οι επαναλήπτες, μπορεί να αξιοποιηθεί από τον αρχικό πομπό για να επανεκπέμψει το ίδιο σήμα πληροφορίας. Επομένως, ο δέκτης συνδυάζει τα δύο σήματα που έλαβε απευθείας από τον αρχικό πομπό, βελτιώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την επίδοσή του.

Στο πρωτόκολλο Αυξανόμενης Επανάληψης, το συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιεί αρχικά την εκπομπή μέσω της απευθείας ζεύξης από τον αρχικό πομπό στον

τελικό δέκτη και μόνο όταν αυτή αποτύχει, οι επαναλήπτες προωθούν το σήμα στο δέκτη. Η ενημέρωση των κόμβων κάθε φορά μπορεί να γίνει μόνο με την αποστολή ενός bit που δηλώνει την σωστή ή λανθασμένη αποκωδικοποίηση του σήματος της απευθείας ζεύξης από τον πομπό. Το πρωτόκολλο αυτό κάνει βέλτιστη χρήση των ενεργειακών και φασματικών πόρων του συνεργατικού συστήματος συγκρινόμενο με τα άλλα δύο, καθώς αν η απευθείας εκπομπή είναι αρκετή οι επαναλήπτες δεν χρησιμοποιούνται.

### ***1.8. Αναδρομή στη βιβλιογραφία***

Η πρόσφατη βιβλιογραφία σε συνεργατικά συστήματα και σε συστήματα βασικών μικροαρχιτεκτονικών, που αποτελούν εργαλεία σύνθεσης των συνεργατικών συστημάτων, αφορά κυρίως κανάλια που χαρακτηρίζονται από στατιστικά ανεξάρτητες διαλείψεις. Αναλυτικότερα, αποτελέσματα για την πιθανοτική κατανομή της χωρητικότητας για ένα σύστημα με πολλαπλούς αναγεννητικούς επαναλήπτες και κανάλια που υποφέρουν από στατιστικά ασυσχέτιστες διαλείψεις Rayleigh έχουν παρουσιαστεί στις δημοσιεύσεις [Zhao05], [Beaulieu06]. Για τα ίδια κανάλια, η ολική επίδοση για αναγεννητικό ή μεταβλητού κέρδους επαναλήπτη μελετάται στη δημοσίευση [Hasna03a], ενώ οι επαναλήπτες με σταθερό κέρδος παρουσιάζονται στη δημοσίευση [Hasna04a] όπου μελετώνται και τα φαινόμενα κόρου του επαναλήπτη. Παρόμοια αποτελέσματα καθώς και όρια για κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις Nakagami παρουσιάζονται στις δημοσιεύσεις [Hasna03b], [Hasna04b], [Yang05], [Karagiannidis06a] και [Karagiannidis06b]. Επιπλέον, ένα πολυβηματικό σύστημα με κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις λόγω σκίασης (shadowing) μελετάται στη δημοσίευση [Hasna03c], όπου οι σηματοθορυβικοί λόγοι των καναλιών (εκφρασμένοι σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB) μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητες λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές.

Στις δημοσιεύσεις [Alouini02], [Slimane01] και [Tellambura08] παρέχονται φράγματα για την πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος διπλής διαφορικής λήψης που χρησιμοποιεί τις τεχνικές MRC και EGC και αφορά συσχετισμένα λογαριθμοκανονικά κανάλια (εκφρασμένα σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB) χωρίς να διακρίνεται η επίδοση μεταξύ των συνδυαστικών τεχνικών αυτών. Στη δημοσίευση [Skraparlis09b] η πιθανότητα αποκοπής ενός N-διάστατου συστήματος διαφορικής λήψης υπολογίζεται αναλυτικά για αυτά τα κανάλια και για τις ίδιες συνδυαστικές τεχνικές, ενώ στις δημοσιεύσεις

[AbuDayya94] και [Ho95] παρέχονται προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας μία μόνο λογαριθμοκανονική μεταβλητή. Αντίστοιχα, για την τεχνική SC με δύο κανάλια λήψης, αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη δημοσίευση [Alouini02], για  $N$  κανάλια λήψης στη δημοσίευση [Piboonngun04], ενώ ένας πιο απλός τύπος προτείνεται στο [Skrparlis09b] και για  $N$  κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις με την ίδια συσχέτιση στη δημοσίευση [Zhang01]. Για το ίδιο σύστημα και για δύο ή τρία κανάλια λήψης με την ίδια συσχέτιση και ομοίως κατανομημένες διαλείψεις αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στη δημοσίευση [Tellambura08]. Στη δημοσίευση [Skrparlis10a] προτείνεται ότι δύο συσχετισμένα λογαριθμοκανονικά κανάλια μπορούν να προσεγγιστούν με δύο ασυσχέτιστα αλλά με τροποποιημένες τυπικές αποκλίσεις, χρησιμοποιώντας τη ροπογεννήτρια συνάρτηση [Mehta07]. Τέλος, στη δημοσίευση [Skrparlis10b] μελετάται η χωρητικότητα ενός συστήματος διπλής διαφορικής λήψης για κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις.

Η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων σε συνεργατικές τεχνικές αφορά κανάλια που υποφέρουν από στατιστικά ανεξάρτητες διαλείψεις Rayleigh τόσο σε κυψελωτά (cellular) [Sendonaris03] όσο και σε μη δομημένα (ad-hoc) δίκτυα [Laneman01], [Laneman03] και [Laneman04]. Στην τελευταία δημοσίευση παρουσιάζεται η επίδραση των πρωτοκόλλων αποτελεσματικής χρήσης φάσματος στην πιθανότητα αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος, ενώ στη δημοσίευση [Boyer04] μελετώνται τα πρωτόκολλα αποτελεσματικής χρήσης της ενέργειας. Οι χρήστες ενός συνεργατικού συστήματος μοιράζονται την ενέργεια του συστήματος και τη χωρητικότητα των καναλιών, που μεταβάλλονται με τον αριθμό των χρηστών στο σύστημα, και σε περιπτώσεις χαμηλού SNR επιλέγουν να μην συνεργαστούν [Laneman01]. Τα όρια της πιθανότητας αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος για κανάλια που υποφέρουν από ανεξάρτητες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις (σε γραμμική κλίμακα) παρουσιάζονται στη δημοσίευση [Safari08], ενώ αναλυτικοί τύποι για συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές διαλείψεις υπολογίζονται στη δημοσίευση [Skrparlis09a].

Στις δημοσιεύσεις [Nosratinia04] και [Stefanov04] συγκρίνονται οι μέθοδοι ενίσχυσης-και-προώθησης (amplify-and-forward), υβριδικής αποκωδικοποίησης-και-προώθησης (hybrid decode-and-forward) καθώς και συνεργασίας με κωδικοποίηση (coded cooperation) και αποδεικνύεται ότι όλες οι μέθοδοι συνεργασίας μπορούν να προσφέρουν

καλύτερες επιδόσεις από την περίπτωση μη συνεργασίας ακόμη και όταν το κανάλι μεταξύ των δυο συνεργαζόμενων τερματικών είναι χειρότερο από τα υπόλοιπα κανάλια του συστήματος. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ακόμη και χρήστες με καλύτερο κανάλι ζεύξης προς το δέκτη έχουν όφελος από τη συνεργασία.

Στις δημοσιεύσεις [Jing06] και [Dohler06] αναλύεται το πρόβλημα τις επιλογής επαναληπτών από ένα σύνολο πολλών διαθέσιμων, λαμβάνοντας υπόψη συμψηφισμούς που καθορίζουν την επίδοση του συστήματος. Η τεχνική συνεργασίας είναι η διανεμημένη κωδικοποίηση χώρου-χρόνου (distributed Space-Time coding) [Laneman03], [Janani04], [Nabar04]. Για παράδειγμα, στη δημοσίευση [Jing06] αναφέρεται ότι για ένα συνεργατικό δίκτυο με πολλούς επαναλήπτες και συνολικό περιορισμό στη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ, ο βέλτιστος διαμοιρασμός των εκπεμπόμενων ισχύων είναι η μισή ισχύς στον πομπό και η μισή στους επαναλήπτες. Στη δημοσίευση [Mheidat06] αναλύεται η διαφορικότητα σε ένα συνεργατικό σύστημα υπό περιορισμένη εκπεμπόμενη ισχύ, ενώ στη δημοσίευση [Michalopoulos08] αναζητείται ο βέλτιστος διαμοιρασμός ισχύος σε ένα σύστημα συνεργατικής διαφορικότητας. Στη δημοσίευση [Nabar04] διερευνάται η σχέση μεταξύ της διαφορικότητας και του ελέγχου της εκπεμπόμενης ισχύος για διάφορα είδη συνεργατικών δικτύων. Στη δημοσίευση [Ding07] αναλύεται ο συμψηφισμός αξιοπιστίας με τη διαμεταγωγή του συστήματος. Στη δημοσίευση [Bolcskei06] αναλύεται η επίδραση του μεγέθους του συστήματος των επαναληπτών στη διαφορικότητα. Τέλος, προβλήματα συγχρονισμού στο συνεργατικό σύστημα με επιλογές επαναληπτών μελετώνται στις δημοσιεύσεις [Lo09], [Wei07], ενώ ο συμψηφισμός ισχύος και εύρους φάσματος για κανάλια με ανεξάρτητες διαλείψεις Rayleigh αναλύεται στη δημοσίευση [Oyman07].

Ωστόσο η θεωρητική ανάλυση των συνεργατικών τεχνικών με εργαλεία της θεωρίας πληροφοριών αποτελεί ακόμη ένα άλυτο πρόβλημα, ακόμη και για συστήματα με χαμηλό αριθμό κόμβων [Kramer05]. Επιπλέον, σε μια ολοκληρωμένη μελέτη των συνεργατικών τεχνικών απαιτείται να ληφθεί υπόψη ο από κοινού σχεδιασμός και συμψηφισμός των τηλεπικοινωνιακών πόρων όπως η ισχύς και η χρονική καθυστέρηση, όπως επισημαίνεται στη δημοσίευση [Andrews08]. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η βιβλιογραφία αδυνατεί να παράγει κλειστούς μαθηματικούς τύπους που να περιγράφουν επαρκώς το συμψηφισμό των τηλεπικοινωνιακών παραμέτρων και να καταλήγουν σε βέλτιστες λύσεις.

*Β. Κ. Σακαρέλλος – Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα.*



## **2. Μοντελοποίηση καναλιού**

### **2.1.Εισαγωγή**

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση του φυσικού στρώματος των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια. Αρχικά, περιγράφεται η διάδοση σε συχνότητες άνω των 10GHz (τόσο από 10GHz ως 50GHz, όσο και άνω των 50GHz), όπου ένα σύστημα υποφέρει κυρίως από διαλείψεις λόγω βροχής. Η απόσβεση λόγω βροχής μοντελοποιείται ως μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή όταν αυτή είναι εκφρασμένη σε dB. Οι αποσβέσεις σε δύο διαφορετικές ζεύξεις είναι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που θεωρούνται ότι ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Η συσχέτιση μεταξύ των τυχαίων αυτών μεταβλητών στη στατική περίπτωση (που περιλαμβάνει κατανομές μεγάλου χρονικού διαστήματος), περιγράφεται από τα μοντέλα χωρικής ανομοιογένειας του μέσου διάδοσης. Επίσης, οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής υπολογίζονται για κάθε γεωγραφικό σημείο της γης. Στη συνέχεια, εξετάζεται και η περίπτωση της απόσβεσης λόγω βροχής σε τροπικά κλίματα, όπου η απόσβεση αυτή μοντελοποιείται ως μία γάμμα τυχαία μεταβλητή. Για τα δορυφορικά συστήματα, η κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης περιγράφεται από το μοντέλο του Crane [Crane 03]. Τέλος, μελετώνται τα κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης, όπου ο σηματοθορυβικός λόγος εκφρασμένος σε γραμμική κλίμακα είναι μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή.

### **2.2.Απόσβεση λόγω βροχής σε συχνότητες από 10GHz ως 50GHz**

#### **2.2.1. Γενικά στοιχεία**

Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα (π.χ. IEEE 802.16, WiMAX) χρησιμοποιούν ευρυζωνικά κανάλια για να μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης

δεδομένων, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα συνθήκες οπτικής επαφής (Line of Sight conditions - LOS). Επομένως, είναι επιθυμητή στη σημερινή εποχή η λειτουργία των ασύρματων δικτύων σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz, ενώ τα δίκτυα αυτά επηρεάζονται από μία σειρά φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τη διάδοση των ραδιοκυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας και προκαλούν εξασθένηση των διαδιδόμενων σημάτων [Crane03]. Συγκεκριμένα, σε αυτές τις συχνότητες η βροχή είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός απόσβεσης των σημάτων και το μόνο ατμοσφαιρικό φαινόμενο που παρουσιάζει σημαντική χωρική ανομοιογένεια μέσα στις αποστάσεις που μας ενδιαφέρουν [Hendrantoro02]. Η χωρική δομή της βροχής περιγράφεται από το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων, που αναφέρεται κυρίως σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης ( $R > 10mm/hr$ ) [Panagopoulos07]. Ειδικά όμως για πολύ υψηλές συχνότητες (άνω των 50GHz) θα χρησιμοποιηθεί ένα γενικότερο συνδυαστικό στρωσιγενές-συνεκτικό μοντέλο, που ισχύει για κάθε ρυθμό βροχόπτωσης. Περαιτέρω, η μη δεσμευμένη (unconditional) λογαριθμοκανονική κατανομή προσεγγίζει πολύ καλά τη στατιστική τόσο του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης όσο και της απόσβεσης της βροχής εκφρασμένη σε dB. Η μη δεσμευμένη κατανομή αναφέρεται στον ολικό χρόνο που περιλαμβάνει τόσο το χρόνο στον οποίο βρέχει όσο και το χρόνο στον οποίο δεν βρέχει. Οι αποσβέσεις λόγω βροχής που εισάγονται σε δύο ή περισσότερα μικροκυματικά κανάλια θεωρούνται επίσης συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή [Panagopoulos07]. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η σύσταση της ITU-R για τους χάρτες βροχής [ITU-R P.837-5] και οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης υπολογίζονται για κάθε τοποθεσία της γης χρησιμοποιώντας τη γνωστή μέθοδο παλινδρόμησης (regression fitting).

### **2.2.2. Ειδική απόσβεση**

Η απόσβεση λόγω βροχής  $A(dB)$  ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται σε μία ζεύξη μήκους  $L$  θεωρούμε ότι είναι μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή [Lin75] και υπολογίζεται από την ειδική απόσβεση  $A_0(dB/km)$  ολοκληρώνοντας σε όλο το μήκος της διαδρομής σύμφωνα με τον τύπο:

$$A = \int_0^L A_0 dl \quad (2.1)$$

Η ειδική απόσβεση  $A_0$  ορίζεται ως η απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ανά μονάδα μήκους ομογενούς μέσου βροχής και υπολογίζεται από το ρυθμό βροχόπτωσης  $R(mm/hr)$ , που επίσης είναι μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή [Lin75], ως εξής:

$$A_0 = \alpha R^b \quad (2.2)$$

Οι παράμετροι  $\alpha, b$  της σχέσης (2.2) εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας, το είδος της πόλωσης του κύματος, τη θερμοκρασία και την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων της βροχής [ITU-R P.838-3]. Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι για ένα χωρικά ομογενές μέσο βροχόπτωσης μήκους  $L$  η συνολική απόσβεση είναι ανάλογη του συνολικού μήκους της ζεύξης:

$$A = \alpha R^b L \quad (2.3)$$

Οι παράμετροι  $\alpha, b$  της ειδικής απόσβεσης υπολογίζονται από τη σύσταση [ITU-R P.838-3] για συχνότητες από 1GHz ως 1THz και για κυκλική ή γραμμική πόλωση σύμφωνα με τους τύπους:

$$\alpha = [\alpha_H + \alpha_V + (\alpha_H - \alpha_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)] / 2 \quad (2.4)$$

$$b = [\alpha_H b_H + \alpha_V b_V + (\alpha_H b_H - \alpha_V b_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)] / 2\alpha \quad (2.5)$$

Στις προηγούμενες εξισώσεις,  $\theta$  είναι η γωνία ανύψωσης για μια δορυφορική ζεύξη και επομένως  $\theta = 0^\circ$  για μια επίγεια ζεύξη,  $\tau$  είναι η γωνία πόλωσης ως προς τον ορίζοντα για γραμμική πόλωση, ενώ  $\tau = 45^\circ$  για κυκλική πόλωση και  $a_H, a_V, b_H, b_V$  είναι οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha, b$  για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα, που επίσης μπορούν να υπολογιστούν από τη σύσταση [ITU-R P.838-3] από τους τύπους:

$$\log_{10} a = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_a \log_{10} f + c_a \quad (2.6)$$

$$b = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_b \log_{10} f + c_b \quad (2.7)$$

Στις εξισώσεις (2.6) και (2.7),  $\alpha, b$  είναι είτε οι συνιστώσες  $a_H, b_H$  για οριζόντια πόλωση, είτε οι συνιστώσες  $a_V, b_V$  για κατακόρυφη πόλωση και  $f$  (GHz) είναι η συχνότητα λειτουργίας. Οι τιμές των συντελεστών των σχέσεων (2.6) και (2.7) για κάθε συνιστώσα δίνονται στη σύσταση [ITU-R P.838-3] από τους ακόλουθους Πίνακες:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1**

**Συντελεστές για  $a_H$**

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_a$	$c_a$
1	-5.33980	-0.10008	1.13098	-0.18961	0.71147
2	-0.35351	1.26970	0.45400		
3	-0.23789	0.86036	0.15354		
4	-0.94158	0.64552	0.16817		

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2**

**Συντελεστές για  $a_V$**

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_a$	$c_a$
1	-3.80595	0.56934	0.81061	-0.16398	0.63297
2	-3.44965	-0.22911	0.51059		
3	-0.39902	0.73042	0.11899		
4	0.50167	1.07319	0.27195		

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3**

**Συντελεστές για  $b_H$**

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_b$	$c_b$
1	-0.14318	1.82442	-0.55187	0.67849	-1.95537
2	0.29591	0.77564	0.19822		
3	0.32177	0.63773	0.13164		
4	-5.37610	-0.96230	1.47828		
5	16.1721	-3.29980	3.43990		

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4**

**Συντελεστές για  $b_V$**

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_b$	$c_b$
1	-0.07771	2.33840	-0.76284	-0.053739	0.83433
2	0.56727	0.95545	0.54039		
3	-0.20238	1.14520	0.26809		
4	-48.2991	0.791669	0.116226		
5	48.5833	0.791459	0.116479		

### 2.2.3. Μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής μίας ζεύξης

Η κατανομή της απόσβεσης της βροχής, όπως και η κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης, σύμφωνα με το μοντέλο του Lin [Lin75], προσεγγίζονται πολύ καλά από τη λογαριθμοκανονική κατανομή, ιδιαίτερα για τις περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - pdf) της απόσβεσης  $A$  δίνεται από τον τύπο [ITU-R P.1057-1]:

$$f_A(A) = \frac{1}{S_a A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln A - \ln A_m)^2}{2S_a^2}\right) \quad (2.8)$$

Η λογαριθμοκανονική κατανομή της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει από την κανονική κατανομή  $N(\mu, \sigma)$  [Papoulis91], που έχει μέση τιμή  $\mu = \ln A_m$  και τυπική απόκλιση  $\sigma = S_a$ , χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό  $u = \ln A$  ή εναλλακτικά από την κανονική κατανομή  $N(0,1)$  με χρήση του μετασχηματισμού  $u = (\ln A - \ln A_m)/S_a$ . Περισσότερες πληροφορίες για τη λογαριθμοκανονική κατανομή παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Επίσης, οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής  $A_m$ ,  $S_a$  υπολογίζονται συναρτήσει των παραμέτρων  $R_m$ ,  $S_r$  του ρυθμού βροχόπτωσης  $R$  από τους τύπους [Panagopoulos07]:

$$S_a^2 = \ln\left[1 + \frac{H_1}{L^2}(\exp(b^2 S_r^2) - 1)\right] \quad (2.9)$$

$$A_m = a R_m^b L \exp\left[\frac{(b^2 S_r^2 - S_a^2)}{2}\right] \quad (2.10)$$

Στις εξισώσεις (2.9) και (2.10),  $L(km)$  είναι το μήκος της ζεύξης, ενώ οι παράμετροι  $a, b$  της ειδικής απόσβεσης δίνονται από τους τύπους (2.4)-(2.7) και τους αντίστοιχους Πίνακες. Οι παράμετροι  $R_m$ ,  $S_r$  του ρυθμού βροχόπτωσης  $R$  υπολογίζονται για κάθε μέρος της γης από τοπικές μετρήσεις του ρυθμού βροχόπτωσης ή από τα δεδομένα που προέρχονται από τους χάρτες βροχής της σύστασης [ITU-R P.837-5], χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων (regression fitting). Επιπλέον, ο συντελεστής  $H_1$  εκφράζει τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής σε μία ζεύξη και ορίζεται από τον τύπο:

$$H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho_0(d = |x - y|) dx dy \quad (2.11)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης  $\rho_0$  μεταξύ της ειδικής απόσβεσης  $A_0(z_i)$  και  $A_0(z_j)$  δύο διαφορετικών σημείων της συγκεκριμένης ζεύξης εξαρτάται από την απόσταση  $d = |z_i - z_j|$  μεταξύ των δύο αυτών σημείων και από τη χωρική μορφή της βροχόπτωσης. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων και θεωρώντας ισοτροπικό μοντέλο διάδοσης [Lin75], ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_0(d(z_i, z_j)) = \begin{cases} G/\sqrt{G^2 + d^2(z_i, z_j)}, & d(z_i, z_j) \leq D_r \\ G/\sqrt{G^2 + D_r^2}, & d(z_i, z_j) > D_r \end{cases} \quad (2.12)$$

Στον προηγούμενο τύπο, οι σταθερές  $G(km)$  και  $D_r(km)$  (μέση διάμετρος βροχοπυρήνων) εξαρτώνται από τη μακροσκοπική δομή του μέσου βροχής της θεωρούμενης γεωγραφικής περιοχής. Οι πρακτικές τιμές της παραμέτρου  $G$  κυμαίνονται από 0.75 ως 3km και οι τιμές της παραμέτρου  $D_r$  κυμαίνονται από 15 ως 30km [Lin75]. Η απόσταση  $d$  υπολογίζεται ως  $d(z_i, z_j) = |z_i - z_j|$ .

Χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις (2.11) και (2.12), ο συντελεστής  $H_1$  υπολογίζεται ως εξής [Panagoroulos07]:

$$H_1 = \begin{cases} 2LG \sinh^{-1}(L/G) + 2G^2 \left[ 1 - \sqrt{(L/G)^2 + 1} \right], & L \leq D_r \\ 2LG \sinh^{-1}(D_r/G) + 2G^2 \left[ 1 - \sqrt{(D_r/G)^2 + 1} \right] + \frac{G(L - D_r)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}}, & L > D_r \end{cases} \quad (2.13)$$

Τέλος, οι ροπές της τυχαίας μεταβλητής της απόσβεσης της βροχής υπολογίζονται από τη ροπογεννήτρια συνάρτηση μιας κανονικής τυχαίας μεταβλητής [Papoulis91]:

$$m_k = E[A^k] = E[e^{kU}] = A_m^k \exp\left(\frac{k^2 S_a^2}{2}\right) \quad (2.14)$$

Από τη σχέση (2.14), υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μιας λογαριθμοκανονικής τυχαίας μεταβλητής:

$$\mu_A = A_m \exp(S_a^2 / 2) \quad (2.15)$$

$$\sigma_A = \sqrt{A_m^2 \exp(S_a^2) (\exp(S_a^2) - 1)} \quad (2.16)$$

## 2.2.4. Μοντελοποίηση των αποσβέσεων λόγω βροχής πολλαπλών

### ζεύξεων

Οι αποσβέσεις της βροχής δύο ή περισσότερων ζεύξεων είναι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που θεωρούμε ότι ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Η αντίστοιχη N-διάστατη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται στο Παράρτημα Α, ενώ η διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή δίνεται από τον τύπο:

$$f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) = \frac{1}{2\pi A_1 A_2 S_{a_1} S_{a_2} \sqrt{1 - \rho_n^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1 - \rho_n^2)} \left[ \left( \frac{\ln A_1 - \ln A_{m_1}}{S_{a_1}} \right)^2 + \left( \frac{\ln A_2 - \ln A_{m_2}}{S_{a_2}} \right)^2 - 2\rho_n \left( \frac{\ln A_1 - \ln A_{m_1}}{S_{a_1}} \right) \left( \frac{\ln A_2 - \ln A_{m_2}}{S_{a_2}} \right) \right] \right\} \quad (2.17)$$

Στην εξίσωση (2.17),  $A_{m_j}, S_{a_j}$  ( $j=1,2$ ) είναι οι παράμετροι των αποσβέσεων  $A_j$  ( $j=1,2$ ) και  $\rho_n$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των κανονικών τυχαίων μεταβλητών  $\ln A_j$  ( $j=1,2$ ). Η κατανομή της έκφρασης (2.17) προκύπτει από τη διδιάστατη κανονική κατανομή [Papoulis91] χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = (\ln A_j - \ln A_{m_j}) / S_{a_j} \quad (j=1,2) \quad (2.18)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  δίνεται από τον τύπο [Panagoroulos07]:

$$\rho_n = \frac{1}{S_{a_1} S_{a_2}} \ln \left( 1 + \rho \sqrt{(\exp(S_{a_1}^2) - 1)(\exp(S_{a_2}^2) - 1)} \right) \quad (2.19)$$

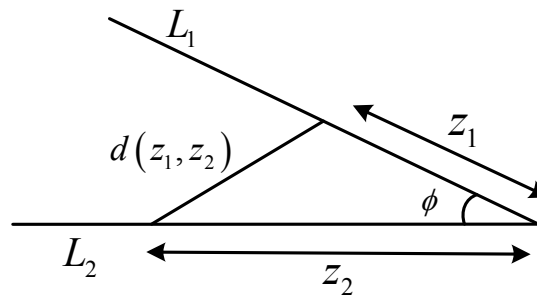
όπου  $\rho$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των λογαριθμοκανονικών τυχαίων μεταβλητών  $A_j$  ( $j=1,2$ ) και υπολογίζεται από τον τύπο [Panagoroulos07]:

$$\rho = \frac{H_2}{\sqrt{H_{11} \cdot H_{12}}} \quad (2.20)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, οι συντελεστές  $H_{1j}$  ( $j=1,2$ ) δίνονται από τον τύπο (2.13) για τις δύο ζεύξεις αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής  $H_2$  υπολογίζεται ανάλογα με τη γεωμετρία της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, για δύο τεμνόμενες ζεύξεις (Σχήμα 2.1), ο συντελεστής  $H_2$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H_2 = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_0(d(z_1, z_2)) dz_1 dz_2 \quad (2.21)$$

Στον προηγούμενο τύπο,  $L_j$  ( $j=1,2$ ) είναι το μήκος της κάθε ζεύξης και  $\rho_0$  ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των ειδικών αποσβέσεων  $A_{0,1}$  και  $A_{0,2}$  δύο σημείων των δύο ζεύξεων που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d(z_1, z_2) = \sqrt{z_1^2 + z_2^2 - 2z_1z_2 \cos \phi}$  (βλ. Σχήμα 2.1) και δίνεται πάλι από τον τύπο (2.12).



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία δύο τεμνόμενων ζεύξεων.

### **2.3. Απόσβεση λόγω βροχής σε συχνότητες άνω των 50GHz**

#### **2.3.1. Γενικά στοιχεία**

Στα ασύρματα δίκτυα κορμού, που παρέχουν τη διασύνδεση των σταθμών βάσης με το βασικό τμήμα του δικτύου, χρησιμοποιούνται τελευταία εξαιρετικά υψηλές συχνότητες, όπως οι χιλιοστομετρικές ζώνες των 71-76 GHz και 81-86 GHz. Τα δίκτυα αυτά καθώς και τα πλεονεκτήματά τους περιγράφηκαν στην παράγραφο 1.2. Η επίδραση όμως της βροχής, των σύννεφων και των αερίων της ατμόσφαιρας στη λειτουργία των ζεύξεων σε συχνότητες άνω των 50GHz, από ένα σταθερό σημείο σε ένα άλλο (point-to-point), είναι πολύ σημαντική και πρέπει να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια για να σχεδιαστεί αξιόπιστα μία ζεύξη. Τελευταία κάποια πειράματα έχουν διεξαχθεί και τα αποτελέσματά τους έχουν παρουσιαστεί στις δημοσιεύσεις [Timms05], [Kvicera07] και [Tjelta09]. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για τον υπολογισμό της στατιστικής της απόσβεσης της βροχής σε συχνότητες διάδοσης άνω των 50 GHz [Sakarellos10d].



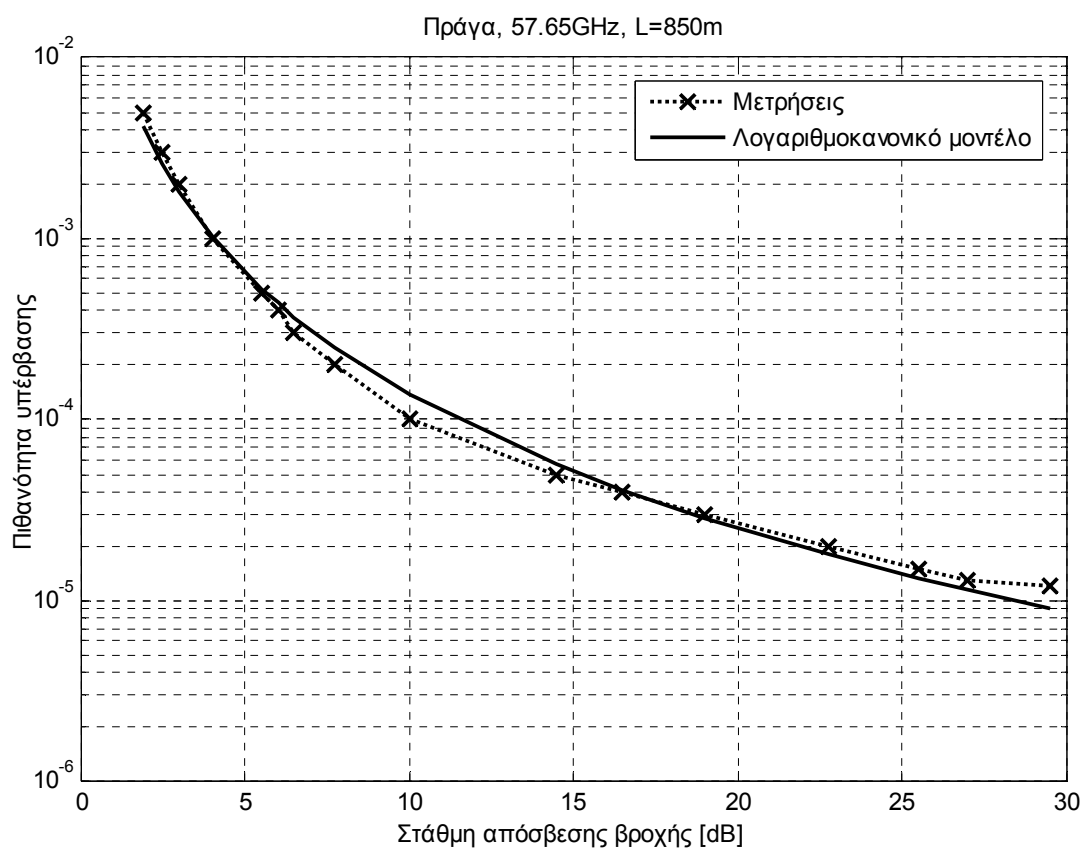
### **2.3.2. Λογαριθμοκανονικό μοντέλο για συχνότητες άνω των 50GHz**

Σε αυτή την παράγραφο, η λογαριθμοκανονική κατανομή προτείνεται για την πρόβλεψη της πιθανότητας υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής (εκφρασμένη σε dB) σε ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 50GHz, όπως έχει επίσης προταθεί στη δημοσίευση [Kvicera07]. Για να υποστηριχθεί αυτή η υπόθεση, η λογαριθμοκανονική κατανομή, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.2.3, προσαρμόζεται μέσω της τεχνικής της παλινδρόμησης (fitting analysis) στα πειραματικά δεδομένα της απόσβεσης λόγω βροχής που παρουσιάζονται στη δημοσίευση [Kvicera07]. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη κατανομή αναπαριστά τη μη δεσμευμένη λογαριθμοκανονική κατανομή που περιλαμβάνει τόσο το ποσοστό του χρόνου που βρέχει, όσο και το ποσοστό του χρόνου που δεν βρέχει. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής της λογαριθμοκανονικής κατανομής παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2 για μία ζεύξη που βρίσκεται στην Πράγα με μήκος  $L=850\text{m}$  και λειτουργεί στη συχνότητα των 57.65GHz. Οι τιμές των λογαριθμοκανονικών παραμέτρων που προέκυψαν από τη διαδικασία προσαρμογής είναι οι ακόλουθες:  $(A_m, S_a)=(0.0257, 1.6385)$ .

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.2, τα δεδομένα των μετρήσεων προσεγγίζονται πολύ καλά από τη λογαριθμοκανονική κατανομή για όλο το εύρος των στάθμεων της απόσβεσης της βροχής. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η ζεύξη έχει μικρό μήκος ώστε το μέσο βροχής να θεωρείται χωρικά ομογενές. Στη γενική όμως περίπτωση που εξετάζονται ζεύξεις με μεγαλύτερα μήκη, τόσο ο στρωσιγενής όσο και ο συνεκτικός τύπος βροχόπτωσης [Kanellopoulos91], [Panagoroulos05] πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή ενός κατάλληλου φυσικού μοντέλου. Ο στρωσιγενής τύπος βροχόπτωσης είναι κυρίαρχος για χαμηλές τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης, ενώ ο συνεκτικός τύπος είναι κυρίαρχος για ρυθμούς βροχόπτωσης μεγαλύτερους από μία συγκεκριμένη στάθμη [Stutzman82]. Στην επόμενη παράγραφο θα παρουσιαστεί ένα συνδυαστικό φυσικό μοντέλο για την πρόβλεψη της κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής σε συχνότητες άνω των 50 GHz.

Επιπλέον, για τον υπολογισμό της από κοινού στατιστικής της απόσβεσης της βροχής προτείνεται η από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή που παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.2.4 και στο Παράρτημα Α. Χρησιμοποιώντας το λογαριθμοκανονικό μοντέλο για συστήματα με πολλαπλές ζεύξεις, τα αποτελέσματα των επόμενων Κεφαλαίων που αφορούν συχνότητες από 10-50GHz βρίσκουν εφαρμογή και στις συχνότητες άνω των

50GHz. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για την περιγραφή της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης, της μονοδιάστατης και της από κοινού στατιστικής της απόσβεσης της βροχής σε επίγειες ή δορυφορικές ζεύξεις, είναι γενικά αποδεκτή για συχνότητες κάτω των 30GHz [Panagopoulos02a], [Panagopoulos03a] και έχει ελεγχθεί με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Για υψηλότερες συχνότητες όμως, περισσότερα πειραματικά δεδομένα απαιτούνται για τον έλεγχο της αξιοπιστίας, ειδικά της από κοινού λογαριθμοκανονικής κατανομής.



Σχήμα 2.2: Προσαρμογή λογαριθμοκανονικού μοντέλου σε μετρήσεις.

### 2.3.3. Συνδυαστικό στρωσιγενές-συνεκτικό μοντέλο

Το αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι η διερεύνηση της επίδρασης του στρωσιγενούς τύπου βροχόπτωσης στην πρόβλεψη της κατανομής της απόσβεσης της βροχής σε συχνότητες άνω των 50 GHz και η κατασκευή ενός κατάλληλου συνδυαστικού

μοντέλου στρωσιγενών-συνεκτικών βροχοπυρήνων [Panagoroulos05]. Από ανάλυση διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων προκύπτει ότι ο ρυθμός βροχόπτωσης μπορεί να θεωρηθεί στρωσιγενής μέχρι περίπου την τιμή  $R_S=10-20\text{mm/hr}$  [Stutzman82]. Για μεγαλύτερες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης, η βροχόπτωση περιγράφεται καλύτερα από το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων. Η στάθμη της απόσβεσης της βροχής που αντιστοιχεί στην τιμή μετάβασης του ρυθμού βροχόπτωσης από τη στρωσιγενή στη συνεκτική βροχόπτωση δίνεται από τον τύπο [Kanelloroulos91], [Panagoroulos05]:

$$A_{S\_thr}(dB) = \alpha R_S^b L \quad (2.22)$$

Στην προηγούμενη έκφραση,  $L$  είναι το μήκος της ζεύξης και οι παράμετροι  $\alpha, b$  της ειδικής απόσβεσης δίνονται από τις εξισώσεις (2.4) ως (2.7).

Ως συνέπεια της ανωτέρω θεώρησης, η πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης της βροχής δίνεται από τον ακόλουθο γενικό τύπο:

$$P_{\text{single}} = \Pr(A \geq A_{thr}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln A_{thr} - \ln A_m}{\sqrt{2} S_a} \right) \quad (2.23)$$

Στον τύπο (2.23),  $\operatorname{erfc}()$  είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (complementary error function) που ορίζεται στο Παράρτημα Α, ενώ οι παράμετροι  $A_m, S_a$  υπολογίζονται από τους αναλυτικούς τύπους (2.9) και (2.10), ενώ ο συντελεστής χωρικής ανομοιογένειας  $H_1$  δίνεται από τον γενικό τύπο (2.11). Πιο συγκεκριμένα, για τιμές της απόσβεσης  $A \leq A_{S\_thr}$ , η βροχόπτωση θεωρείται στρωσιγενής και ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης  $\rho_0$  της εξίσωσης (2.11) δίνεται από τον τύπο [Kanelloroulos91]:

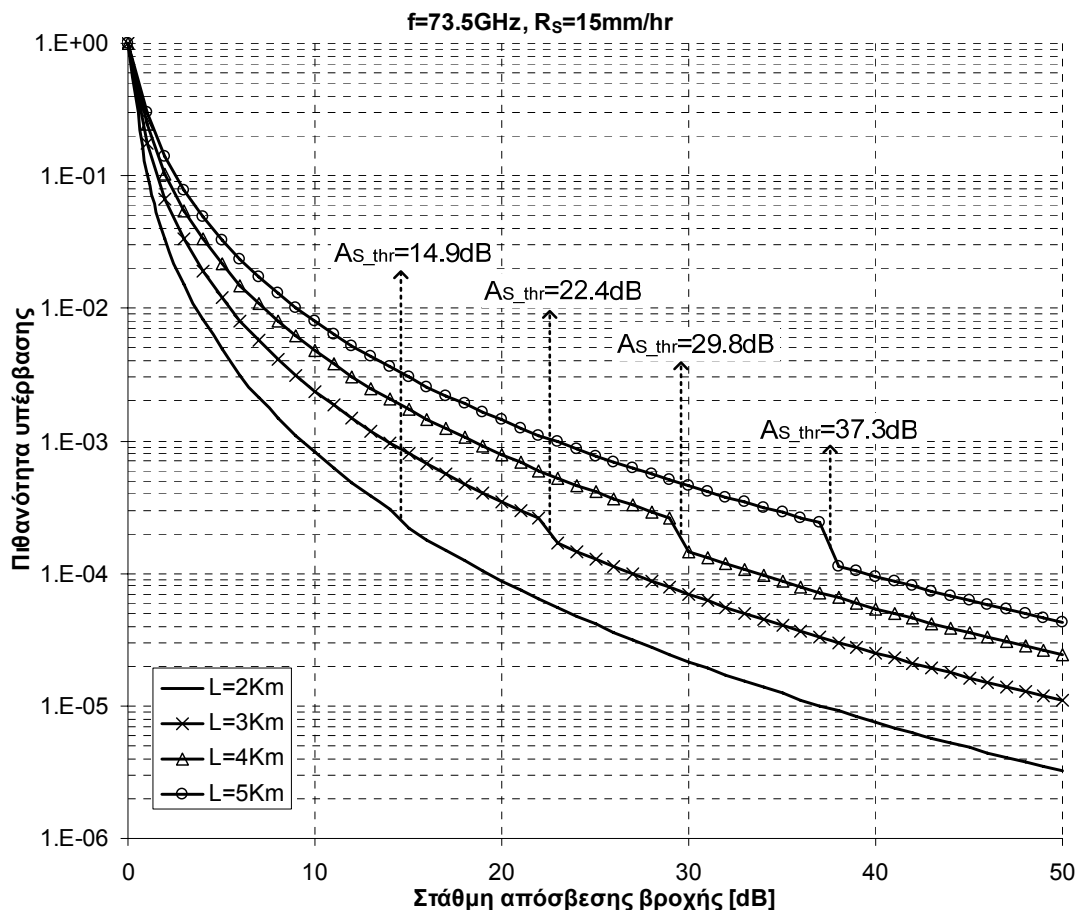
$$\rho_{ust} = \frac{P(1,2;d)}{P(0)} \frac{e^{b^2 S_r^2}}{e^{b^2 S_r^2} - 1} - \frac{1}{e^{b^2 S_r^2} - 1} \quad (2.24)$$

Στην προηγούμενη έκφραση, η παράμετρος  $S_r$  είναι η μία από τις δύο στατιστικές παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης που υπολογίζονται για κάθε μέρος της γης από τους χάρτες βροχής [ITU-R P.837-5],  $P(0)$  είναι η ετήσια πιθανότητα ότι θα βρέξει σε ένα σημείο και  $P(1,2;d)$  είναι η πιθανότητα ότι θα βρέξει ταυτοχρόνως σε δύο σημεία που απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $d$ . Η τελευταία πιθανότητα υπολογίζεται από τη σχέση [Kanelloroulos91]:

$$P(1,2;d) = (P(0) - P(0)^2) e^{-q\sqrt{d}} + P(0)^2 \quad (2.25)$$

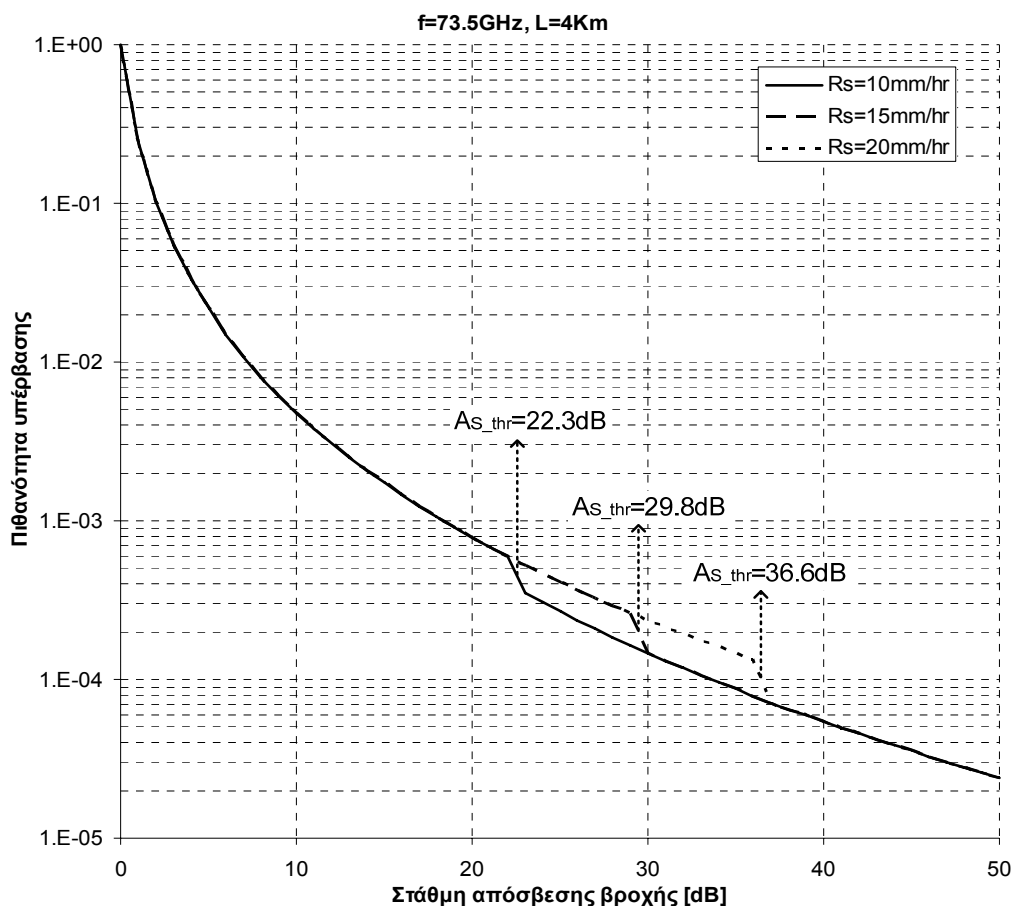
Στην εξίσωση (2.25), η παράμετρος  $q$  ( $\text{km}^{-1/2}$ ) χαρακτηρίζει τη χωρική δομή του στρωσιγενούς μέσου βροχόπτωσης. Ο υπολογισμός του συντελεστή  $H_1$  γίνεται στην περίπτωση αυτή με αριθμητική ολοκλήρωση. Αντίθετα, για τιμές της απόσβεσης  $A > A_{S\_thr}$ , η βροχόπτωση θεωρείται συνεκτική και ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης  $\rho_0$  δίνεται από τον τύπο (2.12). Χρησιμοποιώντας τους τύπους (2.11) και (2.12), ο συντελεστής  $H_1$  υπολογίζεται τελικά από τον τύπο (2.13).

Στα Σχήματα 2.3 και 2.4, η πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης της βροχής έχει σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας το συνδυαστικό μοντέλο στρωσιγενών-συνεκτικών βροχοπυρήνων για μια ζεύξη που λειτουργεί στην περιοχή Hampshire, UK ( $P(0)=5.977\%$ ,  $q=0.06 \text{ km}^{-1/2}$ ,  $R_m=0.03787$ ,  $S_r=1.7358$  [Panagoroulos05]) σε συχνότητα λειτουργίας  $f=73.5 \text{ GHz}$ .



Σχήμα 2.3: Πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης της βροχής χρησιμοποιώντας το συνδυαστικό στρωσιγενές-συνεκτικό μοντέλο για διάφορα μήκη ζεύξης.

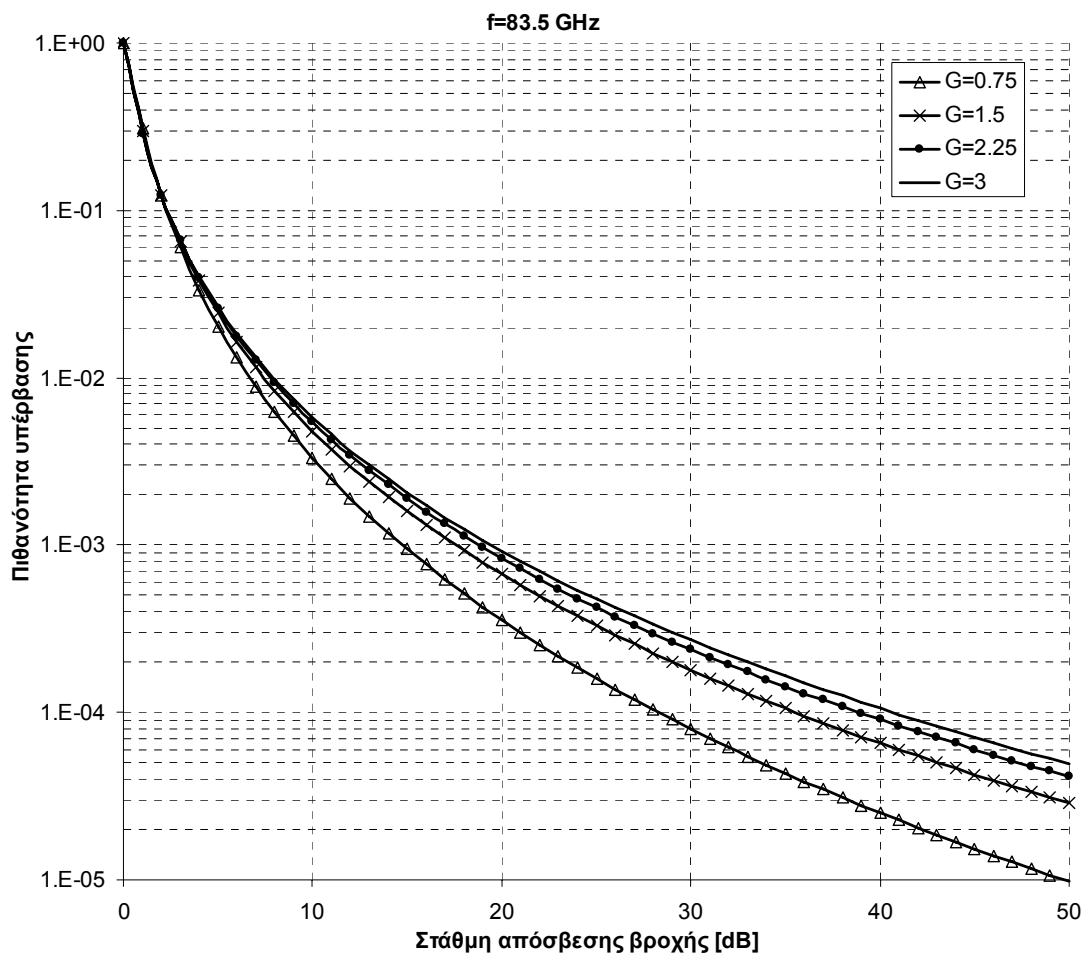
Το Σχήμα 2.3 απεικονίζει την επίδραση του μήκους της ζεύξης, που κυμαίνεται από 2km μέχρι 5km, στην πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης της βροχής θεωρώντας στάθμη κατωφλίου του ρυθμού βροχόπτωσης  $R_S=15\text{mm/hr}$ . Όπως είναι προφανές, το πρώτο τμήμα αυτών των καμπυλών για χαμηλές τιμές της απόσβεσης της βροχής αντιστοιχεί στη στρωσιγενή βροχή, ενώ το δεύτερο τμήμα για υψηλές τιμές της απόσβεσης της βροχής ( $A > A_{S\_thr}$ ) αντιστοιχεί στη συνεκτική βροχή. Καθώς το μήκος της ζεύξης αυξάνεται, η επίδραση της στρωσιγενούς βροχής στην πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης γίνεται σημαντική, ενώ αντίθετα για  $L=2\text{km}$  η επίδραση της θεώρησης του στρωσιγενούς μοντέλου είναι σχετικά μικρή. Στο Σχήμα 2.4, η πιθανότητα υπέρβασης έχει σχεδιαστεί για μήκος ζεύξης  $L=4\text{km}$  και για διαφορετικές στάθμες κατωφλίου του ρυθμού βροχόπτωσης  $R_S$ . Καθώς η στάθμη  $R_S$  αυξάνεται, η επίδραση της στρωσιγενούς βροχής στην ολική πιθανότητα υπέρβασης γίνεται επίσης σημαντική.



Σχήμα 2.4: Πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης της βροχής χρησιμοποιώντας το συνδυαστικό στρωσιγενές-συνεκτικό μοντέλο για διάφορες στάθμες κατωφλίου του ρυθμού βροχόπτωσης  $R_S$ .

### 2.3.4. Επίδραση του συντελεστή χωρικής ανομοιογένειας

Στο Σχήμα 2.5, θεωρείται μόνο το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων και μελετάται η επίδραση του συντελεστή χωρικής ανομοιογένειας  $G$  (βλέπε σχέση (2.12)), στην πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης της βροχής. Το σύστημα λειτουργεί τώρα στη συχνότητα  $f=83.5$  GHz και θεωρείται ότι βρίσκεται πάλι στην περιοχή Hampshire, UK. Όπως είναι προφανές, καθώς ο συντελεστής  $G$  μειώνεται, η πιθανότητα υπέρβασης επίσης μειώνεται, ειδικά για χαμηλές τιμές του συντελεστή  $G$  που προσεγγίζουν τη στρωσιγενή βροχή. Επομένως, η επιλογή της τιμής του συντελεστή  $G$  επηρεάζει σημαντικά την πρόβλεψη της κατανομής της απόσβεσης της βροχής. Ως ένα γενικό συμπέρασμα, περισσότερα πειραματικά δεδομένα απαιτούνται, σε πολλές τοποθεσίες της γης, ώστε να θεσπιστούν κάποιοι γενικοί κανόνες για την επιλογή του συντελεστή  $G$ .

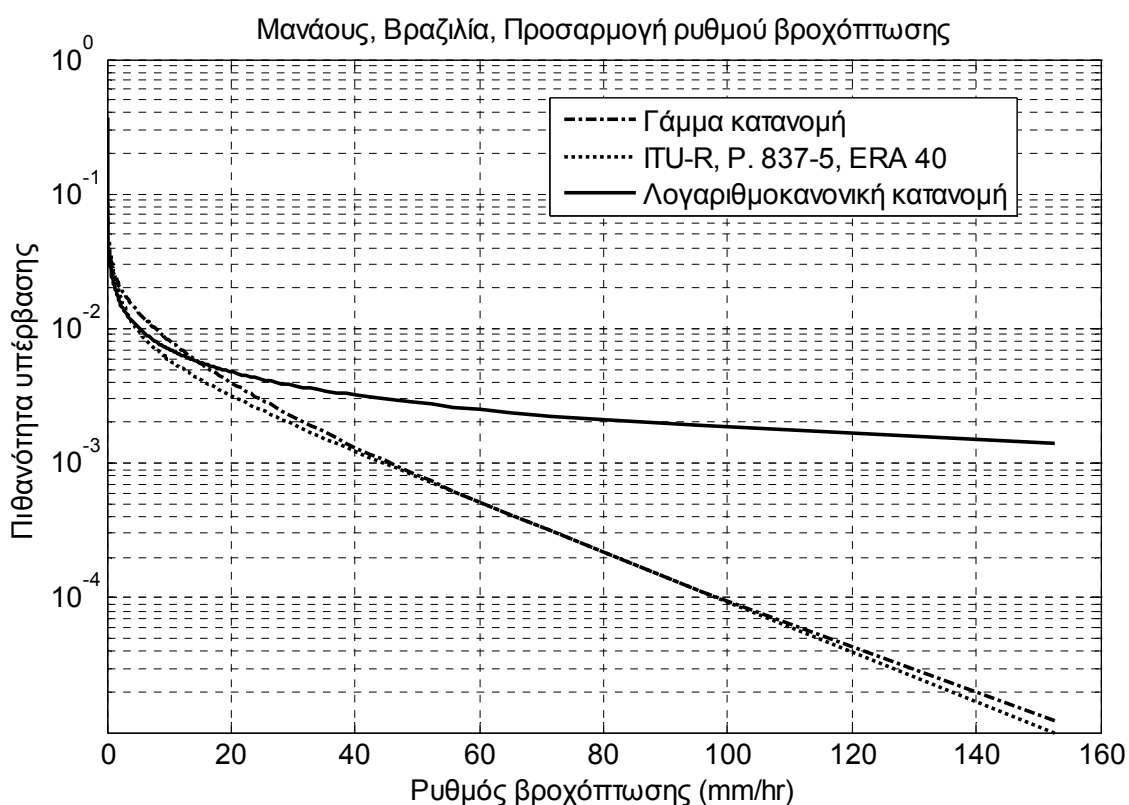


Σχήμα 2.5: Επίδραση του συντελεστή χωρικής ανομοιογένειας  $G$ .

## 2.4. Απόσβεση λόγω βροχής σε τροπικά κλίματα

### 2.4.1. Μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής σε τροπικά κλίματα

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα της [ITU-R P.837-5] για την πιθανότητα υπέρβασης του ρυθμού βροχόπτωσης για την περιοχή του Μανάους (Manaus), Αμαζόνιος, Βραζιλία (3.06°S, 60.01°W). Επιπλέον στο ίδιο Σχήμα, σχεδιάζονται και οι θεωρητικές καμπύλες που αφορούν τη γάμμα και τη λογαριθμοκανονική κατανομή και προέκυψαν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παλινδρόμησης (regression fitting) στα προηγούμενα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.6: Σύγκριση της πιθανότητας υπέρβασης του ρυθμού βροχόπτωσης των δεδομένων των χαρτών βροχής της ITU-R με τη γάμμα και τη λογαριθμοκανονική κατανομή.

Όπως φαίνεται από αυτό το Σχήμα, το μοντέλο της γάμμα κατανομής παρέχει πολύ καλή προσέγγιση στα πειραματικά δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης για αυτήν την περιοχή σε αντίθεση με το λογαριθμοκανονικό μοντέλο. Όπως έχει αποδειχθεί σε πολλές

περιπτώσεις, αυτό ισχύει γενικά για τροπικές κλιματικές περιοχές με ισχυρά φαινόμενα βροχόπτωσης όπως η Νότια Αμερική, η Κεντρική Αφρική και η Νοτιοανατολική Ασία. Αντίθετα, το λογαριθμοκανονικό μοντέλο προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα για εύκρατες περιοχές με ήπια φαινόμενα βροχόπτωσης, όπως π.χ. η Μεσόγειος, η Κεντρική Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική. Επομένως, η στατιστική τόσο του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης, όσο και της απόσβεσης λόγω βροχής (εκφρασμένης σε dB), σε τροπικές περιοχές μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας τη μη δεσμευμένη γάμμα κατανομή [Panagopoulos02b]. Επιπλέον, η θεώρηση αυτή έχει επιβεβαιωθεί με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα στις δημοσιεύσεις [Panagopoulos03b] και [Kanellopoulos90]. Επίσης, η απόσβεση λόγω βροχής στις συγκεκριμένες περιοχές παρουσιάζει σημαντική οριζόντια χωρική ανομοιογένεια, για τις αποστάσεις που μας ενδιαφέρουν [Panagopoulos02b], η οποία μοντελοποιείται ακολουθώντας το μοντέλο Morita-Higutti [Morita76] που έχει προκύψει από μετρήσεις σε περιοχές τις Ιαπωνίας. Ως επέκταση της μονοδιάστατης κατανομής θεωρούμε ότι οι αποσβέσεις λόγω βροχής σε δύο διαφορετικές ζεύξεις είναι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την από κοινού γάμμα κατανομή [Kanellopoulos90]. Τέλος, οι στατιστικές παράμετροι του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης υπολογίζονται για κάθε μέρος της γης από τους χάρτες βροχής [ITU-R P.837-5] μέσω κατάλληλης παλινδρομικής ανάλυσης.

#### **2.4.2. Μονοδιάστατη γάμμα κατανομή**

Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, τόσο ο ρυθμός βροχόπτωσης όσο και η απόσβεση της βροχής σε τροπικά κλίματα μοντελοποιούνται ως μία γάμμα τυχαία μεταβλητή [Panagopoulos02b] και η στατιστική κατανομή της δίνεται από [Papoulis91]:

$$f_X(x) = \frac{\beta^\nu}{\Gamma(\nu)} x^{\nu-1} e^{-\beta x} \quad (2.26)$$

όπου  $\Gamma(\nu)$  είναι η συνάρτηση γάμμα που ορίζεται από τον τύπο [Abramovitz65]:

$$\Gamma(\nu) = \int_0^{\infty} t^{\nu-1} e^{-t} dt \quad (2.27)$$

Οι παράμετροι  $\nu_a$  και  $\beta_a$  της γάμμα κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής υπολογίζονται συναρτήσει των αντίστοιχων παραμέτρων  $\nu_R, \beta_R$  του ρυθμού βροχόπτωσης, από τους παρακάτω τύπους [Panagopoulos02b]:



$$\nu_a = \frac{L^2}{H_1} \cdot \frac{\Gamma^2(\nu_R + b)}{(\Gamma(\nu_R)\Gamma(\nu_R + 2b) - \Gamma^2(\nu_R + b))} \quad (2.28)$$

$$\beta_a = \frac{\beta_R^b L}{aH_1} \cdot \frac{\Gamma(\nu_R)\Gamma(\nu_R + b)}{(\Gamma(\nu_R)\Gamma(\nu_R + 2b) - \Gamma^2(\nu_R + b))} \quad (2.29)$$

Στους παραπάνω τύπους,  $L(km)$  είναι το μήκος της ζεύξης, ενώ οι παράμετροι  $a, b$  της ειδικής απόσβεσης δίνονται από τους τύπους (2.4)-(2.7) και τους αντίστοιχους Πίνακες. Οι παράμετροι  $\nu_R, \beta_R$  του ρυθμού βροχόπτωσης  $R$ , όπως ήδη αναφέρθηκε, υπολογίζονται για κάθε μέρος της γης από τοπικές μετρήσεις του ρυθμού βροχόπτωσης ή από τα δεδομένα που προέρχονται από τους χάρτες βροχής της σύστασης [ITU-R P.837-5], χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων (regression fitting). Επιπλέον, ο συντελεστής  $H_1$  που εκφράζει τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής σε μία ζεύξη, ορίζεται από τον τύπο (2.11):

$$H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho_0(d = |x - y|) dx dy \quad (2.30)$$

Στην παραπάνω έκφραση, ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης  $\rho_0$  μεταξύ της ειδικής απόσβεσης  $A_0(z_i)$  και  $A_0(z_j)$  δύο διαφορετικών σημείων της συγκεκριμένης ζεύξης εξαρτάται από την απόσταση  $d = |z_i - z_j|$  μεταξύ των δύο αυτών σημείων καθώς και από τη χωρική μορφή της βροχόπτωσης. Για τροπικά κλίματα, ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [Morita76]:

$$\rho_0(d(z_i, z_j)) = \begin{cases} \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{d(z_i, z_j)}) & , d(z_i, z_j) \leq D_r \\ \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{D_r}) & , d(z_i, z_j) > D_r \end{cases} \quad (2.31)$$

Στον προηγούμενο τύπο, η σταθερά  $\alpha_s$  εξαρτάται από τη μακροσκοπική δομή του μέσου βροχής της θεωρούμενης γεωγραφικής περιοχής, με τιμές που κυμαίνονται από 0.2 ως 0.3  $km^{-1/2}$ , ενώ η σταθερά  $D_r$  έχει οριστεί στην παράγραφο 2.2.3 και οι τιμές της κυμαίνονται από 15 ως 30km.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, ο συντελεστής  $H_1$  τελικά υπολογίζεται ως εξής [Panagopoulos02b]:

$$H_1 = \begin{cases} 4 \frac{\left( \alpha_s^2 L - 6 + 2(3 + 3\alpha_s \sqrt{L} + \alpha_s^2 L) \cdot \exp(-\alpha_s \sqrt{L}) \right)}{\alpha_s^4}, & L \leq D_r \\ 4 \frac{\left( \alpha_s^2 L - 6 + (\alpha_s^3 (D_r - L) \sqrt{D_r} + \alpha_s^2 (3D_r - L) + 6 + 6\alpha_s \sqrt{D_r}) \exp(-\alpha_s \sqrt{L}) \right)}{\alpha_s^4} + \\ \quad + \exp(-\alpha_s \sqrt{D_r}) + (L - D_r)^2, & L > D_r \end{cases} \quad (2.32)$$

Η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής  $a$  μιας γάμμα τυχαίας μεταβλητής υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$P(X \geq a) = 1 - P(X \leq a) \quad (2.33)$$

Ολοκληρώνοντας τη γάμμα κατανομή της σχέσης (2.26), η πιθανότητα υπέρβασης τελικά υπολογίζεται:

$$P(X \geq a) = 1 - \frac{\gamma(\nu_a, \beta_a a)}{\Gamma(\nu_a)} = 1 - \Gamma(\nu_a, \beta_a a) \quad (2.34)$$

Η ατελής γάμμα συνάρτησης (incomplete gamma function) [Abramovitz65] ορίζεται ως:

$$\gamma(\nu, x) = \int_0^x t^{\nu-1} e^{-t} dt \quad (2.35)$$

ή εναλλακτικά ως:

$$\Gamma(\nu, x) = \frac{\gamma(\nu, x)}{\Gamma(\nu)} \quad (2.36)$$

Στους παραπάνω τύπους, οι συναρτήσεις  $\gamma()$  και  $\Gamma()$  υπολογίζονται αριθμητικά με κατάλληλους αλγόριθμους [Press07].

Τέλος, η πιθανότητα του ενδεχομένου ( $a \leq X \leq b$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$P(a \leq X \leq b) = \frac{\gamma(\nu_a, \beta_a b)}{\Gamma(\nu_a)} - \frac{\gamma(\nu_a, \beta_a a)}{\Gamma(\nu_a)} = \Gamma(\nu_a, \beta_a b) - \Gamma(\nu_a, \beta_a a) \quad (2.37)$$

### 2.4.3. Διδιάστατη γάμμα κατανομή

Θεωρούμε δύο τυχαίες μεταβλητές  $X_1$  και  $X_2$  που η κάθε μία από αυτές ακολουθεί τη γάμμα κατανομή με παραμέτρους  $(\nu_1, \beta_1)$  και  $(\nu_2, \beta_2)$  αντίστοιχα και έχουν μεταξύ τους συντελεστή συσχέτισης  $\rho$ . Η από κοινού γάμμα κατανομή ορίζεται για τυχαίες μεταβλητές  $X_1$  και  $X_2$  με παρόμοιες τιμές των στατιστικών παραμέτρων  $\nu_1 \approx \nu_2$  [Kanellopoulos90]:

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \frac{(1-\rho)^\nu}{\Gamma(\nu)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(\nu+i)}{i!} f_{X_i}(x) f_{Y_i}(y) \quad (2.38)$$

όπου η παράμετρος  $\nu$  ορίζεται ως:

$$\nu = \sqrt{\nu_1 \nu_2} \approx \nu_1 \approx \nu_2 \quad (2.39)$$

Στην έκφραση (2.38), οι τυχαίες μεταβλητές  $X_i$  και  $Y_i$  ακολουθούν επίσης τη γάμμα κατανομή με παραμέτρους  $(\nu+i, \beta_1/(1-\rho))$  και  $(\nu+i, \beta_2/(1-\rho))$  αντίστοιχα. Ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  υπολογίζεται από τον τύπο [Panagopoulos02b]:

$$\rho = \frac{H_2}{\sqrt{H_{11} \cdot H_{12}}} \quad (2.40)$$

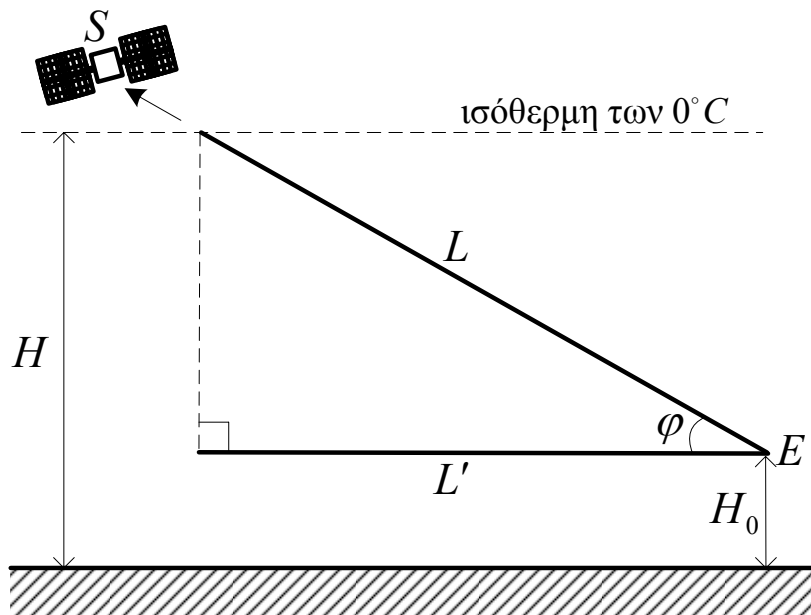
Στον παραπάνω τύπο, οι συντελεστές  $H_{1_j}$  ( $j=1,2$ ) δίνονται από τον τύπο (2.32) για κάθε ζεύξη αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής  $H_2$  υπολογίζεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.4, χρησιμοποιώντας όμως το σημειακό συντελεστή συσχέτισης  $\rho_0(d(z_i, z_j))$  για τροπικά κλίματα [Morita76] που δίνεται από τη σχέση (2.31).

Τέλος, η από κοινού πιθανότητα υπέρβασης των στάθμεων  $a_1$  και  $a_2$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} P(X_1 \geq a_1, X_2 \geq a_2) &= \int_{a_1}^{\infty} \int_{a_2}^{\infty} f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{(1-\rho)^\nu}{\Gamma(\nu)} \sum_{i=0}^{\infty} \Gamma(\nu+i) \frac{\rho^i}{i!} \int_{a_1}^{\infty} f_{X_i}(x) dx \int_{a_2}^{\infty} f_{Y_i}(y) dy = \\ &= \frac{(1-\rho)^\nu}{\Gamma(\nu)} \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \Gamma(\nu+i) \frac{\rho^i}{i!} \left[ 1 - \Gamma\left(\nu+i, \frac{a_1 \beta_1}{(1-\rho)}\right) \right] \left[ 1 - \Gamma\left(\nu+i, \frac{a_2 \beta_2}{(1-\rho)}\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.41)$$

## 2.5. Απόσβεση λόγω βροχής σε δορυφορικά συστήματα

Η γεωμετρία μιας δορυφορικής ζεύξης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7. Ο δορυφόρος S επικοινωνεί με τον επίγειο σταθμό E. Η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου σημειώνεται ως  $\varphi$  (deg), ενώ το υψόμετρο του επίγειου σταθμού ως  $H_0$ .



Σχήμα 2.7: Ενεργό ύψος βροχής και ενεργό μήκος δορυφορικής ζεύξης.

Γίνεται η υπόθεση ότι το εκπεμπόμενο σήμα υφίσταται απόσβεση λόγω της επίδρασης της βροχής στο τμήμα της ζεύξης από τον επίγειο σταθμό μέχρι το υψόμετρο της ισόθερμης των  $0^{\circ}C$ . Στο τμήμα της ζεύξης πάνω από την ισόθερμη των  $0^{\circ}C$ , το νερό έχει τη μορφή χιονιού και παγοκρυστάλλων και θεωρείται ότι δεν εισάγει απόσβεση σε σήματα με συχνότητα μικρότερη των 60GHz [Crane03]. Το υψόμετρο της ισόθερμης των  $0^{\circ}C$  ονομάζεται ενεργό ύψος βροχής  $H$  και δίνεται από τη σύσταση [ITU-R P.839-3]. Το μήκος  $L$  του τμήματος της δορυφορικής ζεύξης που βρίσκεται κάτω από το ενεργό ύψος βροχής ονομάζεται ενεργό μήκος της ζεύξης και για γωνίες ανύψωσης μεγαλύτερες των  $10^{\circ}$ , που καλύπτουν τις περιπτώσεις που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, δίνεται από τη γεωμετρία του Σχήματος 2.7:

$$L = \frac{H - H_0}{\sin \varphi} \quad (2.42)$$

Χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη θεώρηση του Crane για ομοιόμορφη κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης [Crane03], ο υπολογισμός της απόσβεσης κατά μήκος μιας δορυφορικής ζεύξης ανάγεται σε πρόβλημα υπολογισμού της απόσβεσης κατά μήκος μιας υποθετικής επίγεια ζεύξης, με μήκος ίσο με την προβολή πάνω στη γη του ενεργού μήκους  $L$  :

$$L' = L \cos(\varphi) \quad (2.43)$$

Η απόσβεση λόγω βροχής που εισάγεται στην υποθετική αυτή επίγεια ζεύξη, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παραπάνω θεώρηση από τον τύπο:

$$A' = A \cos(\varphi) \quad (2.44)$$

Η απόσβεση αυτή  $A'$  μοντελοποιείται ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες ως μία λογαριθμοκανονική ή μία γάμμα τυχαία μεταβλητή σύμφωνα με τις παραγράφους 2.2-2.4, χρησιμοποιώντας ως μήκος της ζεύξης το μήκος  $L'$ . Στην περίπτωση δύο τεμνόμενων δορυφορικών ζεύξεων με γωνίες ανύψωσης  $\varphi_j$  ( $j = 1, 2$ ) και γωνιακή απόσταση  $\theta$  μεταξύ τους, η γωνία μεταξύ των προβολών των δορυφορικών ζεύξεων στην επιφάνεια της γης  $\Delta\theta$ , που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή  $H_2$  (εξίσωση (2.21)), υπολογίζεται από τη γεωμετρία του συστήματος:

$$\cos \Delta\theta = \frac{\cos \theta - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2}{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2} \quad (2.45)$$

## **2.6. Κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις λόγω σκίασης**

Η ισχύς ενός σήματος που διαδίδεται μέσα σε ένα ασύρματο κανάλι, υπόκειται σε τυχαίες μεταβολές λόγω σκίασης από αντικείμενα που βρίσκονται κατά μήκος της ζεύξης, οδηγώντας σε τυχαίες μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος σε μια δεδομένη απόσταση. Τέτοιες τυχαίες μεταβολές προκαλούνται επίσης από μεταβολές των ανακλαστικών επιφανειών και των αντικειμένων που προκαλούν σκέδαση. Τόσο η θέση, το μέγεθος αλλά και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων που προκαλούν σκίαση, όσο και οι μεταβολές των ανακλαστικών επιφανειών και των αντικειμένων που προκαλούν σκέδαση είναι γενικά τυχαίες. Επομένως, η απόσβεση που προκαλείται από αυτά τα φαινόμενα πρέπει να μοντελοποιηθεί στοχαστικά. Το πιο κοινό στοχαστικό μοντέλο για τα φαινόμενα σκίασης, το οποίο έχει επιβεβαιωθεί εμπειρικά, είναι το λογαριθμοκανονικό, όπου η

απόσβεση λόγω σκίασης, εκφρασμένη σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB όπως στην περίπτωση της βροχής, μοντελοποιείται ως μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή [Goldsmith05]. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση της διάδοσης ενός σήματος τόσο σε εσωτερικούς χώρους [Hashemi93, Foerster01 και Ghassemzadeh04], όσο και σε εξωτερικούς χώρους [Stuber01, παράγραφος 4.2.1], [Wei02 και αναφορές που περιλαμβάνει]. Επίσης, λόγω των ιδιοτήτων και της γεωμετρίας των εμποδίων που προκαλούν σκίαση σε διαφορετικές ζεύξεις, οι αποσβέσεις που εισάγονται σε αυτές μπορούν να θεωρηθούν συσχετισμένες [Wang08, IEEE 802.16j-2007, Saunders99 και αναφορές που περιλαμβάνουν].

Η λογαριθμοκανονική κατανομή της απόσβεσης λόγω σκίασης  $a$  δίνεται στο Παράρτημα A, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της αντίστοιχης κανονικής τυχαίας μεταβλητής  $(\mu, \sigma)$  εκφρασμένες σε Neper ( $1Np = \xi dB = 10 / \ln(10) dB$ ). Αν η απόσβεση λόγω σκίασης  $a$  είναι λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή, τότε τόσο η λαμβανόμενη ισχύς:

$$P_R(W) = P_T a \quad (2.46)$$

όσο και ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος (σε γραμμική κλίμακα):

$$\gamma = \frac{P_T}{N_0} a \quad (2.47)$$

είναι επίσης λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές, καθώς προκύπτουν από πολλαπλασιασμό της τυχαίας μεταβλητής με σταθερό αριθμό [Goldsmith05]. Στους παραπάνω τύπους  $P_T(W)$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς και  $N_0(W)$  είναι η ισχύς του θορύβου. Η μέση τιμή  $\mu$ , που περιλαμβάνει επίσης τις απώλειες ελευθέρου χώρου [Goldsmith05], και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  της λογαριθμοκανονικής απόσβεσης λόγω σκίασης, καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  μεταξύ των αποσβέσεων δύο διαφορετικών ζεύξεων υπολογίζονται είτε από μετρήσεις, είτε από εμπειρικούς αναλυτικούς τύπους [IEEE 802.16j-2007, Saunders99].

### **3. Ανάλυση χιλιοστομετρικών επίγειων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων με επαναλήπτη**

#### **3.1.Εισαγωγή**

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο για την ανάλυση της ολικής (end-to-end) επίδοσης ενός συστήματος δύο βημάτων (dual-hop) με έναν επαναλήπτη που λειτουργεί στις χιλιοστομετρικές συχνότητες πάνω από 10 GHz, λαμβάνοντας υπόψη τις συσχετισμένες διαλείψεις λόγω βροχής των δύο καναλιών του συστήματος. Τα πρώτα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρουσιάστηκαν στη δημοσίευση [Sakarellos07], όπου έγινε σύγκριση ανάμεσα στα συστήματα που χρησιμοποιούν σύνθετους μη-αναγεννητικούς επαναλήπτες με μεταβλητό κέρδος και στα συστήματα που χρησιμοποιούν αναγεννητικούς επαναλήπτες. Στη δημοσίευση [Sakarellos10a] η ανάλυση εμπλουτίζεται με τη μελέτη των μη-αναγεννητικών επαναληπτών σταθερού κέρδους και των απλών μη-αναγεννητικών επαναληπτών μεταβλητού κέρδους. Μαθηματικοί τύποι απλών ολοκληρωμάτων προτείνονται για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή, ενώ υπολογίζονται οι αντίστοιχοι σηματοθορυβικοί λόγοι. Οι τελικοί εξαγόμενοι τύποι που αφορούν την επίδοση ενός διβηματικού συστήματος ενσωματώνουν ένα ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο που περιγράφει την χωρική ανομοιογένεια της βροχής και περιλαμβάνει απώλειες ελεύθερου χώρου και διάφορες παραμέτρους του επαναλήπτη όπως η θέση του, η ισχύς εκπομπής αλλά και τα φαινόμενα κόρου και αναδίπλωσης ισχύος του ενισχυτή. Επίσης, παρουσιάζεται η ανάλυση ενός συστήματος με έναν επαναλήπτη που περιλαμβάνει έναν εκτιμητή καναλιού που προβλέπει την απόσβεση του δεύτερου βήματος της ζεύξης βασισμένος στην πληροφορία που λαμβάνει από το πρώτο βήμα της ζεύξης. Η επίδραση διάφορων γεωγραφικών,

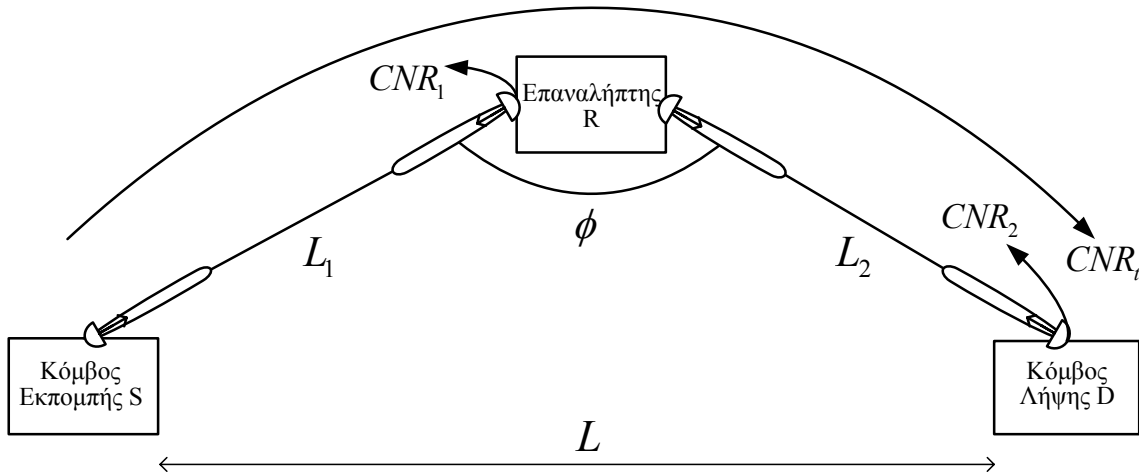
γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων στην επίδοση και στην αξιοπιστία ενός συστήματος με επαναλήπτη παρουσιάζεται επίσης μέσω εκτενών αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τέλος, τα διάφορα είδη επαναλήπτη συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με ένα ισοδύναμο σύστημα απλής ζεύξης χωρίς επαναλήπτη, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική κατανάλωση ισχύος κάθε συστήματος και επομένως την ενεργειακή ισοδυναμία μεταξύ των δύο συστημάτων.

Στη συνέχεια του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, το φυσικό αυτό μοντέλο χρησιμοποιείται για τη μελέτη της βέλτιστης θέσης ενός επαναλήπτη σε ασύρματα χιλιοστομετρικά δίκτυα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μια συγκεκριμένη πιθανότητα αποκοπής του διβηματικού συστήματος, όπως παρουσιάστηκε στη δημοσίευση [Sakarellos09]. Η βέλτιστη θέση ενός επαναλήπτη ορίζεται ως εκείνη η γεωμετρική διάταξη ενός ασύρματου δικτύου, όπου επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος ολικός σηματοθορυβικός λόγος, ή ισοδύναμα η μικρότερη πιθανότητα αποκοπής, για τα ίδια χαρακτηριστικά εκπομπής των κόμβων. Αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της επίδοσης ενός συστήματος χρησιμοποιούνται τέλος για την εξαγωγή ισομετρικών καμπυλών του σηματοθορυβικού λόγου στο επίπεδο της διάταξης του συστήματος, παρέχοντας ένα πολύ χρήσιμο θεωρητικό εργαλείο στους σχεδιαστές ενός ασύρματου δικτύου.

### ***3.2. Μοντελοποίηση του συστήματος***

Στο θεωρούμενο διβηματικό σύστημα με επαναλήπτη του Σχήματος 3.1, ο κόμβος εκπομπής S (source node) επικοινωνεί με τον κόμβο λήψης D (destination node) μέσω του επαναλήπτη R (relay node) που προωθεί τα σήματα πληροφορίας από το πρώτο βήμα (first hop) του συστήματος στο δεύτερο (second hop). Το σύστημα λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz και υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής. Ο επαναλήπτης R μπορεί να λαμβάνει και να εκπέμπει σήματα ταυτοχρόνως, αποφεύγοντας τη χρήση επιπλέον βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom - DOF), π.χ. ενός επιπλέον χρονικού ή συχνοτικού παράθυρου. Επιπλέον, οι κόμβοι του συστήματος είναι επαρκώς απομακρυσμένοι στο χώρο. Αυτό μπορεί εύκολα να επιτευχθεί στις χιλιοστομετρικές συχνότητες με χρήση κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας με αμελητέους πλευρικούς λοβούς που μπορούν σε μεγάλο βαθμό να υποβαθμίσουν τα φαινόμενα παρεμβολής.





Σχήμα 3.1: Γεωμετρική διάταξη ενός διβηματικού συστήματος με επαναλήπτη.

Το μήκος του βήματος (hop)  $j$  ( $j=1,2$ ) του συστήματος υποδηλώνεται ως  $L_j$ (km), ενώ η απόσταση μεταξύ του πομπού S και του δέκτη D υποδηλώνεται ως  $L$ (km). Οι δύο ζεύξεις SR και RD σχηματίζουν στον επαναλήπτη μια γωνία  $\phi$ (deg). Ο σηματοθορυβικός λόγος CNR (dB) του λαμβανόμενου σήματος στο τμήμα  $j$  του συστήματος σε συνθήκες διαλείψεων λόγω βροχής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$CNR_{j,r}(dB) = P_j + G_{j,tr} + G_{j,rec} - PL_j - N_j - A_j \quad , (j=1,2) \quad (3.1)$$

Στον παραπάνω τύπο,  $P_j$  (dBW) ( $j=1,2$ ) είναι η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας του κάθε βήματος του συστήματος. Τα κέρδη των κεραιών του πομπού και του δέκτη του βήματος  $j$  υποδηλώνονται ως  $G_{j,tr}$  (dBi) και  $G_{j,rec}$  (dBi), αντίστοιχα. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου και η ισχύς του θερμικού θορύβου του  $j$ -οστού βήματος υπολογίζονται ως  $PL_j(dBW) = 20 \log(4\pi L_j / \lambda)$  και  $N_j(dBW) = 10 \log(kT_j B)$ , αντίστοιχα. Το μήκος κύματος υποδηλώνεται ως  $\lambda$ , ενώ  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  (J/K) είναι η σταθερά του Boltzmann,  $B$  (Hz) είναι το εύρος φάσματος και  $T_j$  (K) είναι η θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του δέκτη του  $j$ -οστού βήματος. Τέλος, οι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές  $A_j$ (dB), ( $j=1,2$ ) εκφράζουν την απόσβεση λόγω βροχής του κάθε βήματος του συστήματος αντίστοιχα και θεωρούμε ότι ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή, όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Οι παράμετροι  $A_{m_j}, S_{a_j}$  ( $j=1,2$ ) που αναφέρονται στις κατανομές των  $A_j$  δίνονται από τους τύπους (2.9)

και (2.10), ενώ ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  μεταξύ των κανονικών τυχαίων μεταβλητών  $\ln A_j (j=1,2)$  δίνεται από τον τύπο (2.19). Στις επόμενες παραγράφους εξετάζονται αναλυτικά διάφορες περιπτώσεις επαναληπτών.

### **3.3. Μη-αναγεννητικός επαναλήπτης (ενίσχυση-και-προώθηση)**

Ένας μη-αναγεννητικός (non-regenerative) επαναλήπτης χρησιμοποιεί την τεχνική ενίσχυσης-και-προώθησης (amplify-and-forward) και επομένως ενισχύει τα λαμβανόμενα σήματα από το πρώτο βήμα του συστήματος και τα προωθεί στον κόμβο λήψης D, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1. Ο σκοπός αυτού του Κεφαλαίου είναι ο αναλυτικός υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής που στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος  $CNR_{t,r}$  (dB) δεν υπερβαίνει μια συγκεκριμένη στάθμη  $CNR_{th}$ :

$$P_{out} = P(CNR_{t,r} < CNR_{th}) \quad (3.2)$$

Στην προηγούμενη σχέση, ο λόγος  $CNR_{t,r}$  ενός συστήματος με ένα μη-αναγεννητικό επαναλήπτη, συμπεριλαμβανομένης της απόσβεσης λόγω βροχής, δίνεται από το γενικό τύπο (1.2) για  $N=1$ . Εκφράζοντας κατόπιν τα μεγέθη σε dB, ο λόγος  $CNR_{t,r}$  υπολογίζεται συναρτήσει των σηματοθορυβικών λόγων των δύο βημάτων, από τον τύπο:

$$CNR_{t,r} = -10 \log(10^{-CNR_{1,r}/10} + 10^{-CNR_{2,r}/10}) \quad (3.3)$$

Στο συγκεκριμένο σύστημα, η ισχύς του εκπεμπόμενου από τον επαναλήπτη σήματος πληροφορίας εξαρτάται από το κέρδος του ενισχυτή  $G$  (dB) ως ακολούθως:

$$P_2(dBW) = P_1 + G_{1,tr} + G_{1,rec} + G - PL_1 - A_1 \quad (3.4)$$

Η ισχύς του θορύβου του πρώτου βήματος ενισχύεται επίσης από τον επαναλήπτη και στη συνέχεια επανεκπέμπεται στο δεύτερο βήμα. Επομένως, η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς από τον επαναλήπτη, συμπεριλαμβανομένου του θορύβου, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_T(dBW) = 10 \log(10^{P_2/10} + 10^{(N_1+G)/10}) \quad (3.5)$$

Παρακάτω εξετάζονται δύο ειδικές περιπτώσεις μη-αναγεννητικών επαναληπτών.

### 3.3.1. Επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους

Όταν χρησιμοποιείται ένας απλός επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους, το κέρδος του ενισχυτή  $G$  μεταβάλλεται έτσι ώστε η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς, που δίνεται από την (3.5), να παραμένει σταθερή. Αντικαθιστώντας τις (3.4), (3.5) και (3.1) στην (3.3), ο ολικός σηματοθορυβικός λόγος ενός διβηματικού συστήματος υπολογίζεται ως:

$$CNR_{t,r} = -10 \log \left( 10^{(A_1 - CNR_{1,cs})/10} + 10^{(A_2 - TNR)/10} + 10^{(A_1 + A_2 - CNR_{1,cs} - TNR)/10} \right) = Z(A_1, A_2) \quad (3.6)$$

Στην προηγούμενη σχέση, ο σηματοθορυβικός λόγος του κάθε βήματος υπό συνθήκες καθαρού ουρανού υπολογίζεται από την έκφραση (3.1) για  $A_j = 0$ :

$$CNR_{j,cs} = P_j + G_{j,tr} + G_{j,rec} - PL_j - N_j, (j=1,2) \quad (3.7)$$

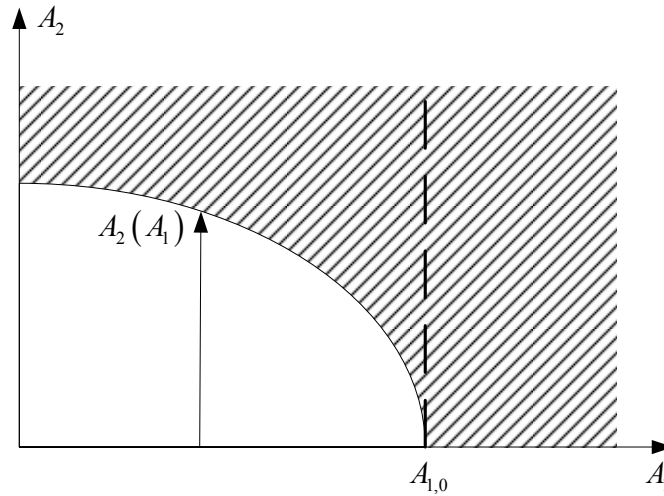
Επιπλέον, ο λόγος της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος του δεύτερου βήματος προς τον αντίστοιχο θόρυβο, ο οποίος είναι διαφορετικός από το σηματοθορυβικό λόγο  $CNR_{2,cs}$ , εκφράζεται ως:

$$TNR = P_T + G_{2,tr} + G_{2,rec} - PL_2 - N_2 \quad (3.8)$$

Το ενδεχόμενο αποκοπής του συστήματος, του οποίου η πιθανότητα δίνεται από τον τύπο (3.2), εκφράζεται γραφικά στο επίπεδο  $(A_1, A_2)$  από τη γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 3.2. Αυτή η περιοχή ορίζεται από την καμπύλη  $Z(A_1, A_2) = CNR_{th}$ . Στο Σχήμα 3.2,  $A_{1,0}$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, 0) = CNR_{th}$  εξασφαλίζοντας ότι πάντα πρέπει να ισχύει  $A_{1,0} \geq 0$ , ενώ  $A_2(A_1)$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, A_2(A_1)) = CNR_{th}$ :

$$A_{1,0} = CNR_{1,cs} + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{-TNR}{10}} \right) - 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{-TNR}{10}} \right) \quad (3.9)$$

$$A_2(A_1) = TNR + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right) - 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right) \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.2: Ενδεχόμενο αποκοπής ενός συστήματος με επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους.

Ολοκληρώνοντας τη διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{A_1, A_2}(A_1, A_2)$ , που δίνεται από τον τύπο (2.17), στη γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 3.2, η πιθανότητα αποκοπής της εξίσωσης (3.2) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$P_{out} = \int_0^{A_{1,0}} dA_1 \int_{A_2(A_1)}^{\infty} dA_2 f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) + \int_{A_{1,0}}^{\infty} dA_1 f_{A_1}(A_1) \quad (3.11)$$

Στην παραπάνω σχέση,  $f_{A_1}(A_1)$  είναι η μονοδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή της απόσβεσης  $A_1$ , που δίνεται από τη σχέση (2.8). Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = (\ln A_j - \ln A_{m_j}) / S_{a_j} \quad (j=1,2) \quad (3.12)$$

και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91], που δίνεται στο Παράρτημα Α, η πιθανότητα αποκοπής της έκφρασης (3.11) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \int_{-\infty}^{D_1} du_1 f_{u_1}(u_1) \cdot \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{D_2 - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(D_1 / \sqrt{2}\right) \quad (3.13)$$

Στον παραπάνω τύπο,  $f_{u_1}(u_1)$  είναι η κανονική κατανομή [Papoulis91]. Επίσης:

$$D_1 = u_{1,0} = (\ln A_{1,0} - \ln A_{m_1}) / S_{a_1} \quad (3.14)$$

$$D_2 = u_2(u_1) = (\ln(A_2(A_1)) - \ln A_{m_2}) / S_{a_2} \quad (3.15)$$

Όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, ο τύπος (3.13) είναι γενικός και ισχύει για κάθε είδος επαναλήπτη, επιλέγοντας κάθε φορά τα κατάλληλα όρια  $D_1$  και  $D_2$ .

Στην παραπάνω ανάλυση, ο επαναλήπτης κάνει απλά εκτίμηση του συνδυασμού της απόσβεσης λόγω βροχής και του θορύβου και ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα χωρίς να ξεχωρίζει το θόρυβο από το αποσβενύμενο σήμα. Αντίθετα, αν χρησιμοποιηθεί ένας σύνθετος επαναλήπτης, ο οποίος μπορεί να εκτιμήσει την ακριβή απόσβεση του πρώτου βήματος, τότε η απόσβεση  $A_1$  μπορεί να αντισταθμιστεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος πληροφορίας  $P_2$ , καθώς και ο λόγος  $CNR_{2,cs}$  να παραμένουν σταθερά αντί της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύς  $P_T$  και του λόγου  $TNR$ , αντίστοιχα. Επομένως, η έκφραση (3.6) απλοποιείται:

$$CNR_{t,r} = -10 \log \left( 10^{(A_1 - CNR_{1,cs})/10} + 10^{(A_2 - CNR_{2,cs})/10} \right) \quad (3.16)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, τα όρια των ολοκληρωμάτων της πιθανότητας αποκοπής  $P_{out}$ , που δίνονται από τις εκφράσεις (3.9) και (3.10), επίσης απλοποιούνται:

$$A_{1,0} = CNR_{1,cs} + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{-CNR_{2,cs}}{10}} \right) \quad (3.17)$$

$$A_2(A_1) = CNR_{2,cs} + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right) \quad (3.18)$$

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι όταν χρησιμοποιείται ο σύνθετος επαναλήπτης και ισχύουν οι εκφράσεις (3.16)-(3.18), δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στον αριθμητικό υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής σε σχέση με την απλή περίπτωση, για πρακτικές τιμές των λόγων  $CNR_{j,cs}$  ( $j=1,2$ ) πάνω από 15 dB.

### **3.3.2. Επαναλήπτης σταθερού κέρδους**

Στην περίπτωση του μη-αναγεννητικού επαναλήπτη σταθερού κέρδους, ο επαναλήπτης  $R$  ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα με σταθερό κέρδος  $G$ . Αυτή η στρατηγική οδηγεί σε μια διάταξη χαμηλότερης πολυπλοκότητας σε σχέση με τον επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους, αλλά έχει το μειονέκτημα ότι η συνολική ισχύς εξόδου του επαναλήπτη  $P_T$  είναι μεταβλητή. Η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος πληροφορίας  $P_2$  του επαναλήπτη σταθερού κέρδους μπορεί να υπολογιστεί πάλι από την έκφραση (3.4), αλλά για σταθερή τιμή του κέρδους του ενισχυτή  $G$ . Εφόσον το κέρδος του ενισχυτή δεν είναι μεταβλητό και ο επαναλήπτης δεν μπορεί να αντισταθμίσει την απόσβεση του πρώτου

βήματος, η ισχύς  $P_2$  μειώνεται (αναδίπλωση της ισχύος του ενισχυτή) τόσο κατά την τιμή της απόσβεσης  $A_1$  όσο και κατά την τιμή των απωλειών ελευθέρου χώρου  $PL_1$  του πρώτου βήματος, όταν ο ενισχυτής λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Αν ο επαναλήπτης είναι κοντά στον κόμβο εκπομπής  $S$ , η ολική ισχύς εξόδου του λαμβανόμενου σήματος από το πρώτο βήμα μπορεί να είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα η ισχύς  $P_T$  του τύπου (3.5) να υπερβαίνει την εκπεμπόμενη ισχύ  $P_{sat}$  του σημείου του κόρου του ενισχυτή. Σε αυτή την περίπτωση, για να αποφευχθούν τα ανεπιθύμητα φαινόμενα του κόρου όπως είναι η παραμόρφωση σήματος, ο επαναλήπτης πρέπει να περιορίσει την ισχύ εκπομπής του στην τιμή  $P_{sat}$  και επομένως να λειτουργήσει με χαρακτηριστικά επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους.

Αντικαθιστώντας την έκφραση (3.4) στην (3.1) για μια σταθερή τιμή του κέρδους  $G$ , όταν ο επαναλήπτης λειτουργεί στη γραμμική περιοχή, ο σηματοθορυβικός λόγος του δεύτερου βήματος σε συνθήκες βροχής υπολογίζεται ως εξής:

$$CNR_{2,r} = CNR_{2,cs} - A_1 - A_2 \quad , \text{για } P_T < P_{sat} \quad (3.19)$$

Χρησιμοποιώντας την έκφραση (3.3), ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος του επαναλήπτη σταθερού κέρδους σε συνθήκες βροχής δίνεται από τη σχέση:

$$CNR_{t,r} = \begin{cases} -10 \log \left( 10^{(A_1 - CNR_{1,cs})/10} + 10^{(A_1 + A_2 - CNR_{2,cs})/10} \right) = Z'(A_1, A_2), & \text{για } P_T < P_{sat} \\ Z(A_1, A_2), & \text{για } P_T \geq P_{sat} \end{cases} \quad (3.20)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις, ο λόγος  $CNR_{2,cs}$  σε συνθήκες καθαρού ουρανού, που δίνεται από τις σχέσεις (3.4) και (3.7) για  $A_1 = 0$ , εξαρτάται μόνο από τις απώλειες ελευθέρου χώρου των δύο βημάτων. Ο δεύτερος κλάδος της (3.20) είναι προφανώς ίδιος με τη σχέση (3.6) του επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους.

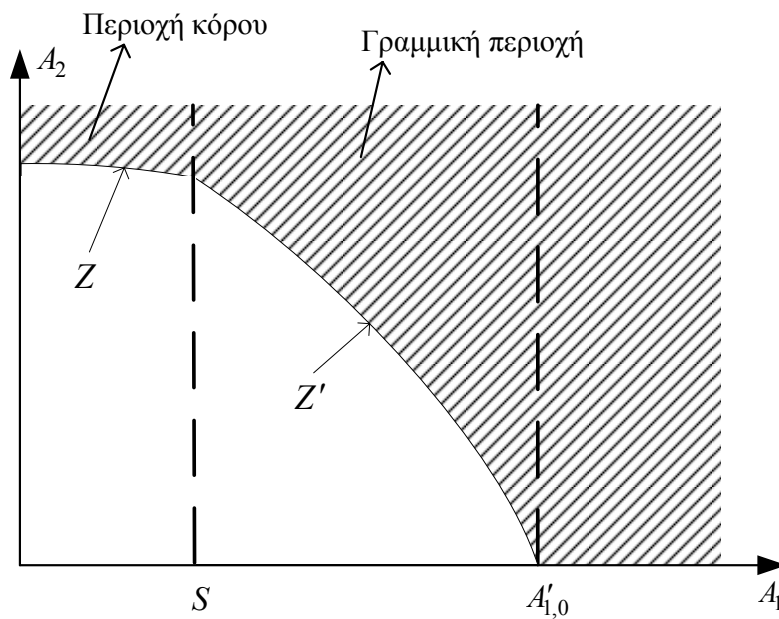
Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία με την περίπτωση μεταβλητού κέρδους, η πιθανότητα αποκοπής της (3.2) για ένα σύστημα σταθερού κέρδους υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές τιμές των  $A'_{1,0}$ ,  $A_{1,0}$  και  $S$ . Οι τιμές αυτές ορίζονται ως ακολούθως: η τιμή  $A_{1,0}$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, 0) = CNR_{th}$  εξασφαλίζοντας ότι  $A_{1,0} \geq 0$  και δίνεται από τη σχέση (3.9), ενώ η τιμή  $A'_{1,0}$  είναι η ρίζα της εξίσωσης

$Z'(A_1, 0) = CNR_{th}$  εξασφαλίζοντας ότι  $A'_{1,0} \geq 0$  και τέλος η στάθμη του κόρου  $S$  είναι η λύση ως προς  $A_1$  της εξίσωσης  $P_T = P_{sat}$  λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3.4) και (3.5):

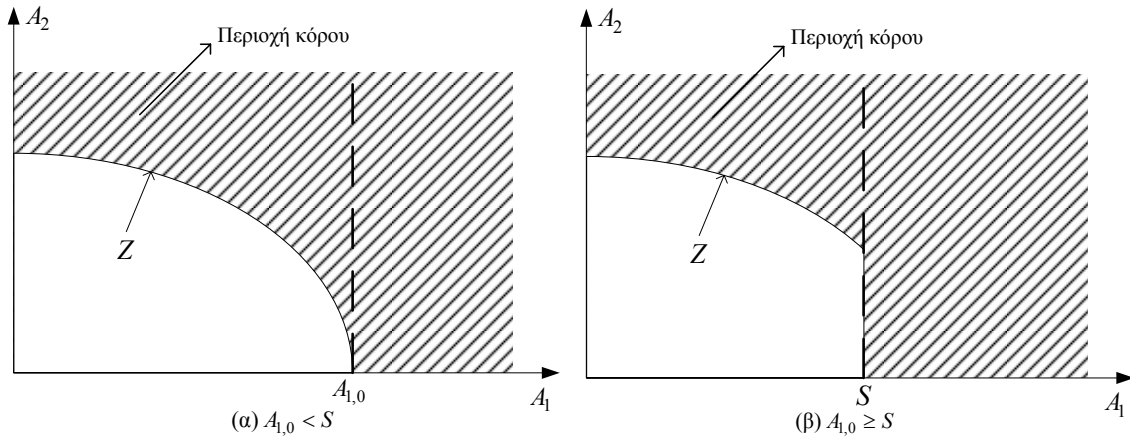
$$A'_{1,0} = -CNR_{th} - 10 \log \left( 10^{-CNR_{1,cs}/10} + 10^{-CNR_{2,cs}/10} \right) \quad (3.21)$$

$$S = P_1 + G_{1,tr} + G_{1,rec} + G - PL_1 - 10 \log \left( 10^{P_{sat}/10} - 10^{(N_1+G)/10} \right) \quad (3.22)$$

Στα Σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται οι περιοχές που εκφράζουν το ενδεχόμενο αποκοπής για διάφορες τιμές των  $A'_{1,0}$ ,  $A_{1,0}$  και  $S$ . Η περιοχή που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής για  $S < A'_{1,0}$  φαίνεται στο Σχήμα 3.3, ενώ για  $S \geq A'_{1,0}$  η περιοχή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 3.4 για δύο περιπτώσεις  $A_{1,0} < S$  (Σχήμα 3.4α) και  $A_{1,0} \geq S$  (Σχήμα 3.4β).



Σχήμα 3.3: Ενδεχόμενο αποκοπής ενός συστήματος σταθερού κέρδους για  $S < A'_{1,0}$ .



Σχήμα 3.4: Ενδεχόμενο αποκοπής ενός συστήματος σταθερού κέρδους για  $S \geq A'_{1,0}$ .

Ολοκληρώνοντας τη διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{A_1 A_2}(A_1, A_2)$ , που δίνεται από τον τύπο (2.17), στις γραμμοσκιασμένες περιοχές των Σχημάτων 3.3 και 3.4 και λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές τιμές των  $A'_{1,0}$ ,  $A_{1,0}$  και  $S$ , η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_{out} = \begin{cases} \int_0^S dA_1 \int_{A_2(A_1)}^\infty dA_2 f_{A_1 A_2}(A_1, A_2) + \int_S^{A'_{1,0}} dA_1 \int_{A_2(A_1)}^\infty dA_2 f_{A_1 A_2}(A_1, A_2) + \\ \int_{A'_{1,0}}^\infty dA_1 f_{A_1}(A_1) \quad , S < A'_{1,0} \\ \int_0^{\min(S, A_{1,0})} dA_1 \int_{A_2(A_1)}^\infty dA_2 f_{A_1 A_2}(A_1, A_2) + \int_{\min(S, A_{1,0})}^\infty dA_1 f_{A_1}(A_1) \quad , S \geq A'_{1,0} \end{cases} \quad (3.23)$$

Στην σχέση (3.23),  $f_{A_1}(A_1)$  είναι η μονοδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή της απόσβεσης  $A_1$ , που δίνεται από τη σχέση (2.8),  $A_2(A_1)$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, A_2(A_1)) = CNR_{th}$  που δίνεται από την έκφραση (3.10), ενώ  $A'_2(A_1)$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z'(A_1, A'_2(A_1)) = CNR_{th}$ :

$$A'_2(A_1) = CNR_{2,cs} - A_1 + 10 \log \left( 10^{-CNR_{th}/10} - 10^{(A_1 - CNR_{1,cs})/10} \right) \quad (3.24)$$

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό (3.12) και εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91], που δίνεται στο Παράρτημα Α, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως:

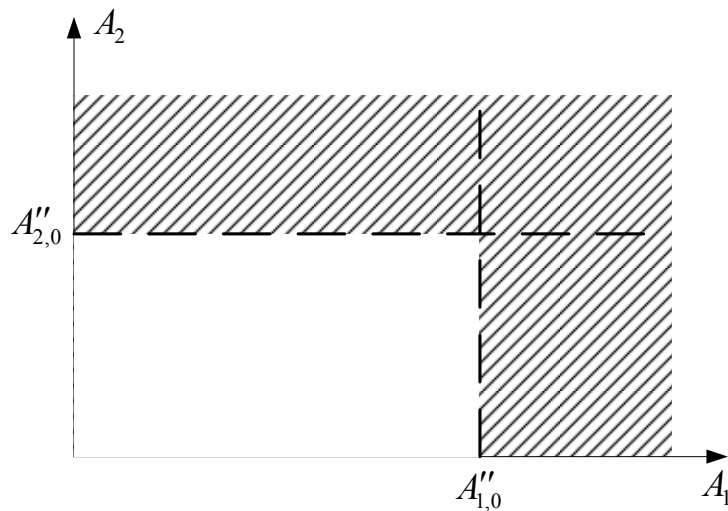




Όπως είναι φανερό, στη συγκεκριμένη περίπτωση το ελάχιστο των  $CNR_{1,r}$  και  $CNR_{2,r}$ ,  $\min(CNR_{1,r}, CNR_{2,r})$  χαρακτηρίζει την επίδοση του συστήματος και αντιστοιχεί σε έναν ισοδύναμο σηματοθορυβικό λόγο που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής αυτού του συστήματος. Το ενδεχόμενο αυτό απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 3.5, όπου:

$$A''_{j,0} = CNR_{j,cs} - CNR_{th}, (j=1,2) \quad (3.29)$$

Στη σχέση (3.29) πρέπει να εξασφαλιστεί ότι  $A''_{j,0} \geq 0$ , ενώ οι λόγοι  $CNR_{j,cs}$  ( $j=1,2$ ) σε συνθήκες καθαρού ουρανού δίνονται από την έκφραση (3.7). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η ισχύς εκπομπής του σήματος πληροφορίας  $P_2$  του αναγεννητικού επαναλήπτη είναι σταθερή σε αντίθεση με το μη-αναγεννητικό επαναλήπτη που πρέπει να υπολογιστεί από την εξίσωση (3.4).



Σχήμα 3.5: Ενδεχόμενο αποκοπής ενός αναγεννητικού συστήματος.

Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία με την περίπτωση του μη-αναγεννητικού επαναλήπτη, δηλαδή ολοκληρώνοντας τη διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{A_1, A_2}(A_1, A_2)$ , που δίνεται από την έκφραση (2.17), στη γραμμοσκιασμένη περιοχή του Σχήματος 3.5, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \int_0^{A''_{1,0}} dA_1 \int_{A''_{2,0}}^{\infty} dA_2 f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) + \int_{A''_{1,0}}^{\infty} dA_1 f_{A_1}(A_1) \quad (3.30)$$

Χρησιμοποιώντας και πάλι το μετασχηματισμό (3.12) και εφαρμόζοντας στη συνέχεια το θεώρημα Bayes [Papoulis91], η πιθανότητα αποκοπής της (3.30) μπορεί να υπολογιστεί από τη γενική έκφραση (3.13), όπου:

$$D_j = u''_{j,0} = \left( \ln A''_{j,0} - \ln A_{m_j} \right) / S_{a_j}, (j=1,2) \quad (3.31)$$

### 3.5. Επαναλήπτης εξοπλισμένος με εκτιμητή καναλιού

Όπως θα φανεί και στα αριθμητικά παραδείγματα, οι αποσβέσεις λόγω βροχής των δύο βημάτων ενός συστήματος με επαναλήπτη είναι συσχετισμένες με υψηλό συντελεστή συσχέτισης [Crane03], [Hendrantoro02] και [Panagoroulos07]. Επομένως, ο επαναλήπτης μπορεί να προβλέψει την τιμή της απόσβεσης  $A_2$  βασιζόμενος στη γνώση των τιμών της απόσβεσης  $A_1$ , χρησιμοποιώντας έναν εκτιμητή ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (least mean square error estimator) [Papoulis91]. Έχοντας γνώση αυτής της πληροφορίας, ο επαναλήπτης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα σύστημα ελέγχου της ισχύος (power control system) και να αντισταθμίσει την εκτίμηση  $\hat{A}_2$  της απόσβεσης του δευτέρου βήματος μέχρι μία μέγιστη στάθμη  $M$  (dB).

Αν χρησιμοποιηθεί ένας μη γραμμικός εκτιμητής, η εκτίμηση της απόσβεσης  $A_2$  που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση [Papoulis91]:

$$\hat{A}_2 = E[A_2 | A_1] = \int_0^\infty A_2 f_{A_2}(A_2 | A_1) dA_2 \quad (3.32)$$

Στην παραπάνω σχέση,  $E[A_2 | A_1]$  είναι η μέση τιμή υπό συνθήκη της  $A_2$  και  $f_{A_2}(A_2 | A_1)$  είναι η δεσμευμένη κατανομή της  $A_2$ . Η εκτίμηση  $\hat{A}_2$  της (3.32) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό (3.12) και τη δεσμευμένη κανονική κατανομή που δίνεται στο Παράρτημα Α:

$$\hat{A}_2 = \int_{-\infty}^\infty A_{m_2} \exp(S_{a_2} u_2) f_{u_2}(u_2 | u_1) du_2 \quad (3.33)$$

Ύστερα από απλές αλγεβρικές πράξεις και χρησιμοποιώντας πάλι το μετασχηματισμό (3.12), καταλήγουμε στην έκφραση:

$$\hat{A}_2 = A_{m_2} \exp\left[\left(1 - \rho_n^2\right) S_{a_2}^2 / 2 - \rho_n \ln A_{m_1} S_{a_2} / S_{a_1}\right] A_1^{\rho_n S_{a_2} / S_{a_1}} \quad (3.34)$$

Αντίθετα, αν χρησιμοποιηθεί ένας γραμμικός εκτιμητής, η εκτίμηση που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δίνεται απευθείας από την έκφραση [Papoulis91]:

$$\hat{A}_2 = \mu_2 + \rho\sigma_2(A_1 - \mu_1) / \sigma_1 \quad (3.35)$$

Στην έκφραση (3.35),  $\mu_j, \sigma_j$  ( $j=1,2$ ) είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των δύο αποσβέσεων  $A_j, (j=1,2)$  (σχέσεις (2.15) και (2.16)), ενώ  $\rho$  είναι ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισής τους (σχέση (2.20)).

Αν ένας γραμμικός ή μη γραμμικός εκτιμητής ενσωματωθεί σε έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, ο σηματοθορυβικός λόγος του δεύτερου βήματος και το όριο  $A''_{2,0}$  για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής, αντί των (3.1) και (3.29) αντίστοιχα, δίνονται από τις παρακάτω εκφράσεις, εξασφαλίζοντας ότι  $CNR_{th} \leq CNR_{2,cs}$ :

$$CNR_{2,r} = \begin{cases} CNR_{2,cs} + \hat{A}_2 - A_2, & \hat{A}_2 \leq M \\ CNR_{2,cs} + M - A_2, & \hat{A}_2 > M \end{cases} \quad (3.36)$$

$$A''_{2,0} = \begin{cases} CNR_{2,cs} + \hat{A}_2 - CNR_{th}, & \hat{A}_2 \leq M \\ CNR_{2,cs} + M - CNR_{th}, & \hat{A}_2 > M \end{cases} \quad (3.37)$$

Στην περίπτωση ενός μη-αναγεννητικού επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους εξοπλισμένου με ένα γραμμικό ή μη γραμμικό εκτιμητή, η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς στην έξοδο του επαναλήπτη δίνεται τώρα από:

$$P'_T = \begin{cases} P_T + \hat{A}_2, & \hat{A}_2 \leq M \\ P_T + M, & \hat{A}_2 > M \end{cases} \quad (3.38)$$

όπου  $P_T$  είναι η ισχύς του επαναλήπτη χωρίς τον εκτιμητή (σχέση (3.5)). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος να δίνεται από τη σχέση:

$$CNR_{t,r} = \begin{cases} Z(A_1, A_2 - \hat{A}_2), & \hat{A}_2 \leq M \\ Z(A_1, A_2 - M), & \hat{A}_2 > M \end{cases} \quad (3.39)$$

Εξασφαλίζοντας ότι η στάθμη  $CNR_{th}$  είναι μικρότερη του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου σε συνθήκες καθαρού ουρανού, χρησιμοποιείται πάλι η γενική

έκφραση (3.13) για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής με το όριο  $A_{1,0}$  που είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, -M) = CNR_{th}$  να δίνεται από:

$$A_{1,0} = CNR_{1,cs} + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{-M-TNR}{10}} \right) - 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{-M-TNR}{10}} \right) \quad (3.40)$$

Αντίστοιχα, το νέο όριο  $A_2(A_1)$  για  $\hat{A}_2 \leq M$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, A_2(A_1) - \hat{A}_2) = CNR_{th}$ , ενώ για  $\hat{A}_2 > M$  είναι η ρίζα της εξίσωσης  $Z(A_1, A_2(A_1) - M) = CNR_{th}$  και δίνεται από:

$$A_2(A_1) = \begin{cases} TNR + \hat{A}_2 + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right) - 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right), & \hat{A}_2 \leq M \\ TNR + M + 10 \log \left( 10^{\frac{-CNR_{th}}{10}} - 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right) - 10 \log \left( 1 + 10^{\frac{A_1 - CNR_{1,cs}}{10}} \right), & \hat{A}_2 > M \end{cases} \quad (3.41)$$

### 3.6. Λεπτομέρειες αριθμητικού υπολογισμού του γενικού τύπου (3.13)

Το ολοκλήρωμα του γενικού τύπου (3.13), που δίνει την πιθανότητα αποκοπής για κάθε είδος επαναλήπτη χαρακτηρίζεται από ένα ημίαιρο διάστημα ολοκλήρωσης (improper integral) [Apostol67, παράγραφος 10.23]. Η ολοκληρωτέα συνάρτηση αποτελείται από το γινόμενο δύο συνεχών και θετικών συναρτήσεων. Θεωρώντας τη μέγιστη τιμή της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος  $\operatorname{erfc}()$ , το γινόμενο αυτό δεν παρουσιάζει ασυνέχειες ή ταλαντώσεις και μπορεί να φραχθεί από τη συνάρτηση  $f_{u_1}(u_1)$ . Αφού το ολοκλήρωμα της  $f_{u_1}(u_1)$  συγκλίνει τουλάχιστον με το ρυθμό σύγκλισης μιας εκθετικής σειράς, χρησιμοποιώντας θεωρήματα υπολογισμού ολοκληρωμάτων [Apostol67, παράγραφος 10.23 και 10.13], μπορεί να αποδειχτεί ότι το ολοκλήρωμα του γενικού τύπου (3.13) επίσης συγκλίνει τουλάχιστον με τον ίδιο ρυθμό και επομένως μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί αριθμητικά.

Επιπλέον, το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να γραφτεί ως το άθροισμα ενός ορισμένου ολοκληρώματος από  $-K$  ως  $D_1$  συν έναν όρο σφάλματος  $E(-K)$  που ισούται με το

ολοκλήρωμα από  $-\infty$  μέχρι  $-K$  (όπου  $K > 0$ ). Ο όρος σφάλματος  $E(-K)$  μπορεί να φραχθεί από τον όρο σφάλματος ενός πλήρως συσχετισμένου συστήματος ( $\rho_n = 1$ ):

$$E(-K) \leq E(-K) \Big|_{\rho_n=1} \equiv 0.5 \cdot \operatorname{erfc}\left(K / \sqrt{2}\right) \quad (3.42)$$

Επομένως, ορίζοντας την τιμή του  $K$ , ο όρος σφάλματος μπορεί να περιοριστεί από μια τιμή που να δίνει την επιθυμητή αριθμητική ακρίβεια. Για παράδειγμα, ορίζοντας  $K = 10$  και αγνοώντας τον όρο σφάλματος, ο υπολογισμός της (3.13) θα έχει αριθμητική ακρίβεια τουλάχιστον  $10^{-23}$ , η οποία είναι παραπάνω από αρκετή για τον υπολογισμό της αποκοπής ή της αξιοπιστίας πρακτικών συστημάτων.

### **3.7. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός**

Σε αυτή την παράγραφο, οι προτεινόμενοι αναλυτικοί τύποι εφαρμόζονται για την πρόβλεψη της συνολικής (end-to-end) επίδοσης των διβηματικών συστημάτων, καθώς και για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης του επαναλήπτη. Η επίδοση ενός διβηματικού συστήματος συγκρίνεται με την επίδοση ενός συστήματος αναφοράς που αποτελείται από την αντίστοιχη απευθείας ζεύξη και μπορεί να έχει δύο διαφορετικές συνθέσεις. Το πρώτο σύστημα αναφοράς, που αναφέρεται ως ‘απευθείας ζεύξη’, αποτελείται από τη ζεύξη μεταξύ του κόμβου εκπομπής S και του κόμβου λήψης D με ισχύ εκπομπής ίση με την αντίστοιχη ισχύ εκπομπής του κόμβου εκπομπής του διβηματικού συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το σύστημα αναφοράς δεν είναι ενεργειακά ισοδύναμο με το διβηματικό σύστημα, του οποίου η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς είναι το άθροισμα των ισχυών εκπομπής του κόμβου S και του επαναλήπτη R.

Το δεύτερο σύστημα αναφοράς, που αναφέρεται ως ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’, αντιστοιχεί στη ζεύξη μεταξύ S και D με ισχύ εκπομπής ίση με τη συνολική ισχύ εκπομπής του διβηματικού συστήματος. Πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι για ένα σύστημα με επαναλήπτη σταθερού κέρδους, αυτά τα συστήματα είναι ενεργειακά ισοδύναμα μόνο σε συνθήκες καθαρού ουρανού, καθώς είναι δύσκολο να ενσωματωθούν σε αυτή την ισοδυναμία οι στοχαστικές ιδιότητες της απόσβεσης της βροχής του πρώτου βήματος, από την οποία εξαρτάται η ισχύς εκπομπής του επαναλήπτη. Αυτό οδηγεί βέβαια σε μια μικρή υπερεκτίμηση της καταναλισκόμενης ισχύς του συστήματος αναφοράς. Επιπλέον, η καμπύλη που αναπαριστά την επίδοση της ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή

ισοδυναμία' για τον επαναλήπτη σταθερού κέρδους διαφέρει από την αντίστοιχη καμπύλη των άλλων επαναληπτών, καθώς η ισχύς εκπομπής του επαναλήπτη σταθερού κέρδους εξαρτάται από το μήκος του πρώτου βήματος λόγω των μεταβλητών με το μήκος απωλειών ελευθέρου χώρου.

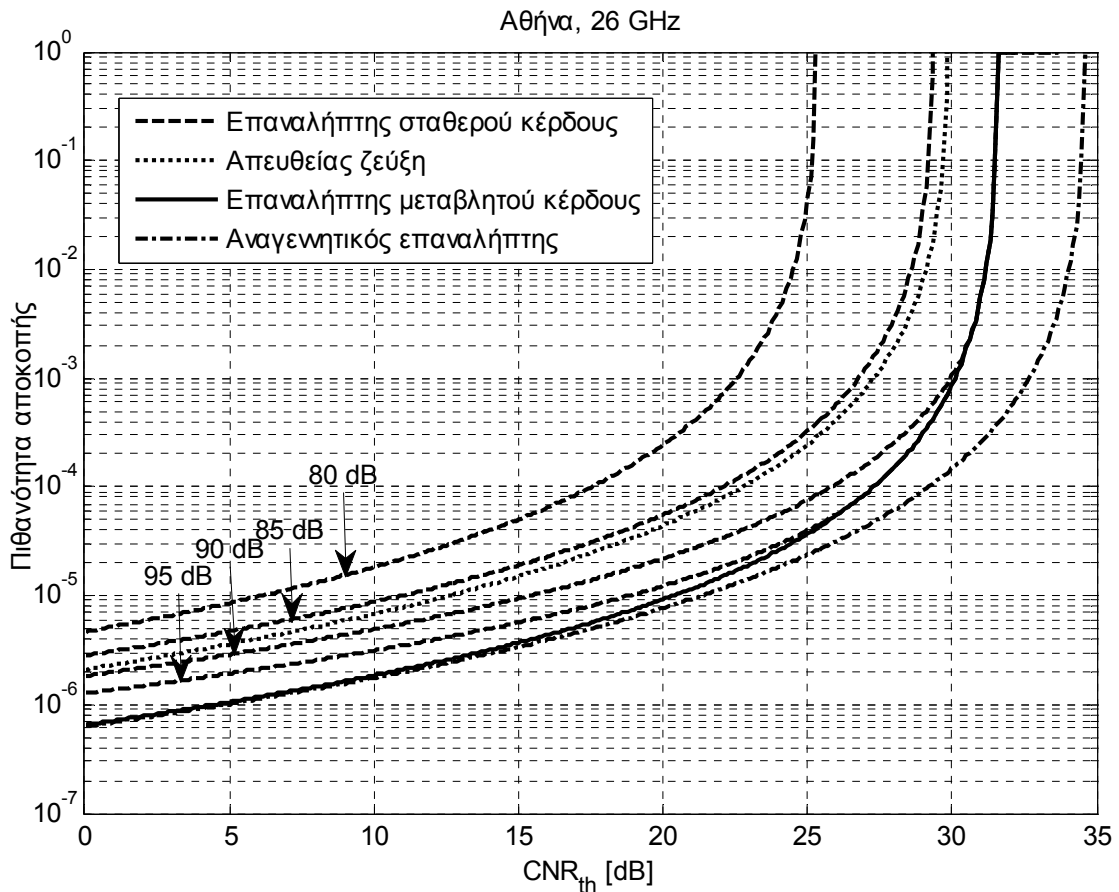
Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι για τις πρακτικές τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στα παρακάτω Σχήματα, τα αριθμητικά αποτελέσματα ενός απλού και ενός σύνθετου επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους ταυτίζονται.

### **3.7.1. Πιθανότητα αποκοπής**

Στα Σχήματα 3.6 ως 3.8, οι τιμές των παραμέτρων προδιαγράφονται από το πρότυπο [IEEE 802.16.2-2004] και εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά είναι: συχνότητα λειτουργίας  $f = 26GHz$ , κατακόρυφη πόλωση και τιμές παραμέτρων πομποδεκτών:  $P_1 = -6dBW$ ,  $G_{j,tr} = G_{j,rec} = 19dBi$ ,  $T_j = 300^\circ K$  ( $j=1,2$ ),  $B=28MHz$ . Επιπλέον, έχουμε για τον επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους  $P_T = -6dBW$ , για τον επαναλήπτη σταθερού κέρδους  $P_{sat} = -6dBW$ , για τον αναγεννητικό επαναλήπτη  $P_2 = -6dBW$  και  $M = 0dB$ , ενώ στο Σχήμα 3.7 γίνεται διερεύνηση και για άλλες τιμές των παραμέτρων  $P_2$  και  $M$ .

Στο Σχήμα 3.6, η πιθανότητα αποκοπής ενός διβηματικού συστήματος υπολογίζεται συναρτήσει της στάθμης  $CNR_{th}$  για διάφορα είδη επαναλήπτη. Για τη γεωμετρία της διάταξης ισχύουν  $L_1 = L_2 = 2km$  και  $\phi = 120^\circ$  για ένα σύστημα που βρίσκεται στην Αθήνα, ( $37.58^\circ N$ ,  $23.43^\circ E$ ). Οι τιμές των παραμέτρων του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης και των αποσβέσεων της βροχής που αναφέρονται στα δύο βήματα του συστήματος δίνονται στον Πίνακα 3.1. Επιπλέον, στο ίδιο Σχήμα δίνεται για σύγκριση η καμπύλη της πιθανότητας αποκοπής της 'απευθείας ζεύξης'. Όπως είναι εμφανές, ο αναγεννητικός επαναλήπτης παρουσιάζει καλύτερη επίδοση συγκρινόμενος με κάθε άλλο είδος επαναλήπτη, εκτός της περιοχής των χαμηλών τιμών της πιθανότητας αποκοπής όπου παρουσιάζει παρόμοια επίδοση με τον επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους. Σε αυτό το Σχήμα, απεικονίζεται επίσης η επίδραση της τιμής του κέρδους του ενισχυτή του επαναλήπτη σταθερού κέρδους. Όπως, γίνεται φανερό, μια ελάχιστη τιμή κέρδους της τάξεως των 90dB απαιτείται για να παρουσιάζει το σύστημα καλύτερη επίδοση από την 'απευθείας ζεύξη'. Για ακόμα καλύτερη επίδοση απαιτείται όμως μεγαλύτερη τιμή του

κέρδους. Επιπλέον, μεγάλες τιμές του σταθερού κέρδους οδηγούν τον ενισχυτή στον κόρο, όπως στην περίπτωση των 95dB και στάθμης  $CNR_{th}$  μεγαλύτερης των 25dB. Στην περίπτωση αυτή, ο επαναλήπτης συμπεριφέρεται όμοια με έναν επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους, όπως προβλέπεται και από τη θεωρητική ανάλυση. Τέλος, σημειώνεται ότι ο επαναλήπτης σταθερού κέρδους καταναλώνει λιγότερη ισχύ από τα άλλα είδη όταν ο ενισχυτής του λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Η μείωση αυτή της καταναλισκόμενης ισχύος εξαρτάται από την τιμή του κέρδους του ενισχυτή, όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (3.4) και (3.5).



Σχήμα 3.6: Πιθανότητα αποκοπής για διάφορα είδη επαναλήπτη και  $L_1=L_2=2\text{km}$ .

Στο Σχήμα 3.7, εξετάζεται ένας αναγεννητικός επαναλήπτης εξοπλισμένος με έναν εκτιμητή καναλιού για  $\phi=120^\circ$ , διάφορα μήκη  $L_1$  και  $L_2$  και διάφορες τιμές των παραμέτρων  $P_2$  και  $M$ . Οι τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων της απόσβεσης της βροχής

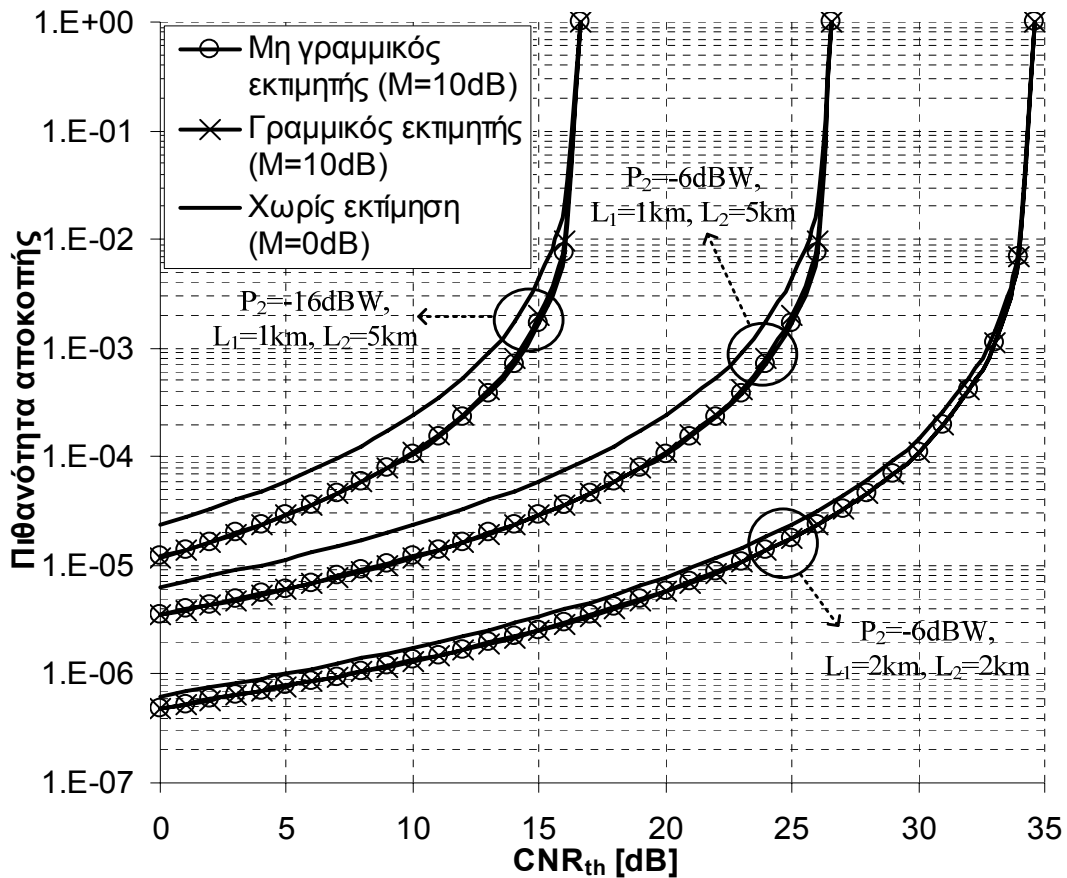


των διάφορων βημάτων δίνονται στον Πίνακα 3.1. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, ο γραμμικός και ο μη γραμμικός εκτιμητής έχουν την ίδια επίδοση για όλες τις τιμές των παραμέτρων. Περαιτέρω, όταν χρησιμοποιείται ένας εκτιμητής με μέγιστη τιμή στάθμης του συστήματος ελέγχου της ισχύος  $M = 10dB$ , υπάρχει κέρδος στη στάθμη του σηματοθορυβικού λόγου για μια δεδομένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής σε σχέση με την καμπύλη ενός επαναλήπτη χωρίς εκτιμητή ( $M = 0dB$ ). Από την άλλη πλευρά όμως, ο επαναλήπτης καταναλώνει περισσότερη ισχύ σε συνθήκες βροχής. Το κέρδος αυτό του σηματοθορυβικού λόγου είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση που το μήκος  $L_2$  είναι μεγαλύτερο από το μήκος  $L_1$ . Στην περίπτωση που το μήκος  $L_1$  είναι μεγαλύτερο από το μήκος  $L_2$  (περίπτωση που δεν φαίνεται σε αυτό το Σχήμα) δεν υπάρχει καθόλου κέρδος στο σηματοθορυβικό λόγο, καθώς ο εκτιμητής καναλιού δεν αυξάνει την ισχύ εκπομπής του επαναλήπτη λόγω των αρκετά μικρών εκτιμώμενων τιμών της απόσβεσης της βροχής της μικρότερης ζεύξης. Επιπλέον, το ζεύγος τιμών ( $P_2 = -16dBW, M = 10dB$ ) εμφανίζει χειρότερη επίδοση σε σχέση με το ζεύγος ( $P_2 = -6dBW, M = 0dB$ ), αλλά ο επαναλήπτης καταναλώνει 10dB λιγότερη ισχύ σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Αν δεν χρησιμοποιηθεί εκτιμητής ( $M = 0dB$ ), η επίδοση της περίπτωσης  $P_2 = -16dBW$  είναι ακόμα χειρότερη ιδιαίτερα για μικρές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Παρόμοια αποτελέσματα (δεν εμφανίζονται σε αυτό το Σχήμα) προκύπτουν και για την περίπτωση του επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

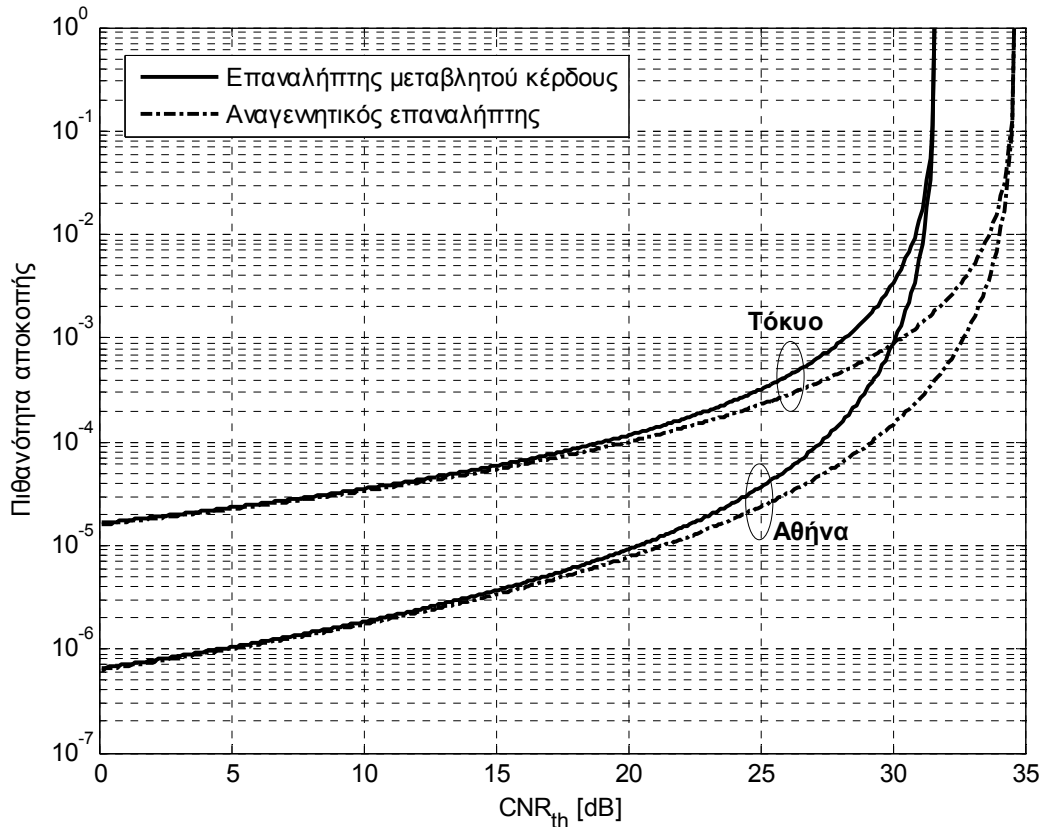
**Στατιστικές παράμετροι του θεωρούμενου διβηματικού συστήματος**

	<b>Αθήνα</b>		<b>Τόκυο</b>
$R_m$	0.03147		0.02669
$S_r$	1.6877		1.9893
	$L_1 = L_2 = 2km$	$L_1 = 1km, L_2 = 5km$	$L_1 = L_2 = 2km$
$(A_{m_1}, A_{m_2})$	(0.0089, 0.0089)	(0.0043, 0.0249)	(0.0076, 0.0076)
$(S_{a_1}, S_{a_2})$	(1.6671, 1.6671)	(1.6878, 1.5981)	(1.9739, 1.9739)
$\rho_n (\phi = 120^\circ)$	0.8974	0.8498	0.9230



Σχήμα 3.7: Διερεύνηση ενός επαναλήπτη εξοπλισμένου με εκτιμητή καναλιού.

Στο Σχήμα 3.8, απεικονίζεται η εξάρτηση της πιθανότητας αποκοπής από τις κλιματικές συνθήκες διάφορων περιοχών της γης που ανήκουν σε διαφορετικές ζώνες. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν συστήματα με αναγεννητικό ή μη-αναγεννητικό επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους για την ίδια γεωμετρική διάταξη με το Σχήμα 3.6, αλλά για δύο διαφορετικές πόλεις, την Αθήνα και το Τόκυο ( $35.40^\circ \text{ N}$ ,  $139.45^\circ \text{ E}$ ). Οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων του ρυθμού βροχόπτωσης και της απόσβεσης της βροχής για αυτές τις τοποθεσίες δίνονται στον Πίνακα 3.1. Όπως είναι προφανές από το Σχήμα, ένα διβηματικό σύστημα που βρίσκεται στο Τόκυο δίνει μεγαλύτερες τιμές της πιθανότητας αποκοπής για την ίδια στάθμη  $CNR_{th}$ , λόγω των δυσμενέστερων συνθηκών βροχόπτωσης αυτής της περιοχής. Ως εκ τούτου, η κλιματική εξάρτηση της πιθανότητας αποκοπής πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για τον αξιόπιστο σχεδιασμό της διάταξης ενός διβηματικού συστήματος που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz.



Σχήμα 3.8: Πιθανότητα αποκοπής ενός διβηματικού συστήματος για διαφορετικά μέρη της γης.

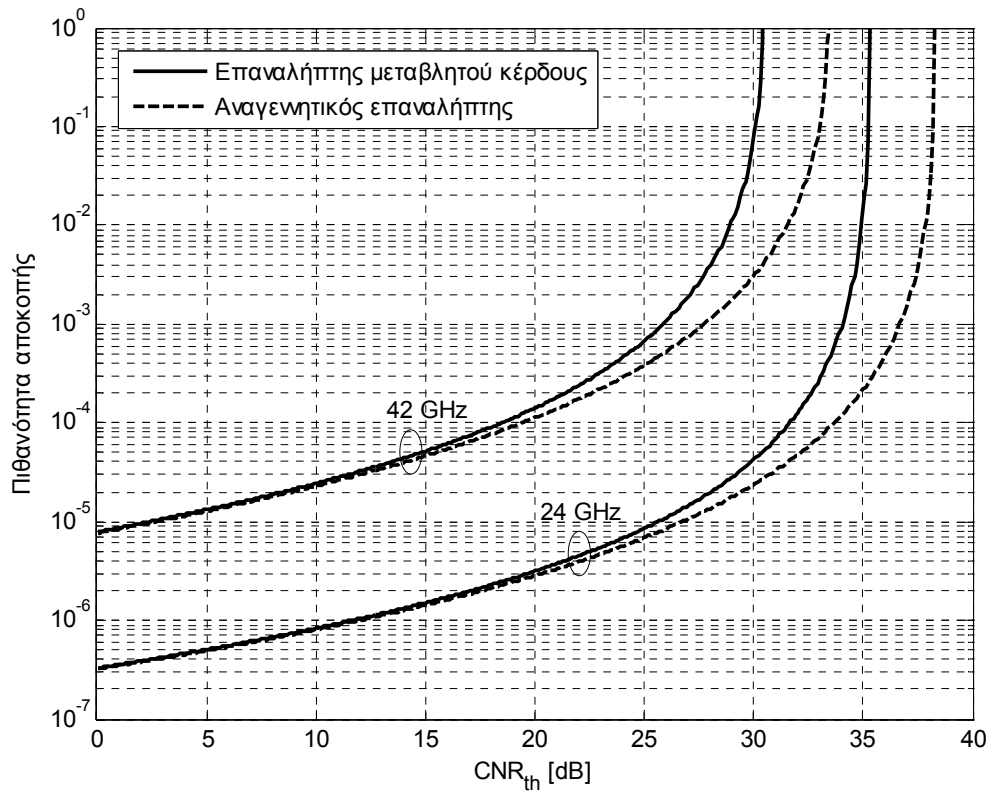
Στο Σχήμα 3.9, παρουσιάζεται η πιθανότητα αποκοπής για συστήματα αναγεννητικών επαναληπτών και μεταβλητού κέρδους που λειτουργούν στην Αθήνα, για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας, που είναι τυπικές στο πρότυπο [IEEE 802.16.2-2004], 24GHz και 42GHz. Οι παράμετροι της γεωμετρικής διάταξης είναι:  $L_1 = L_2 = 2km$  και  $\phi = 120^\circ$ , ενώ οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων, που επίσης προβλέπονται από το πρότυπο [IEEE 802.16.2-2004], είναι:  $M = 0dB$ ,  $G_{j,tr} = G_{j,rec} = 25dBi$ ,  $T_j = 300^\circ K$  και  $B = 28MHz$ , ( $j=1,2$ ). Για τον επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους έχουμε  $P_T = -15dBW$ , ενώ για τον αναγεννητικό επαναλήπτη  $P_2 = -15dBW$ . Οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων του ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και της απόσβεσης της βροχής των δύο ζεύξεων δίνονται στον Πίνακα 3.2. Από το Σχήμα αυτό επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας οδηγεί σε πολύ χαμηλότερες τιμές της στάθμης  $CNR_{th}$  για μία συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής. Επίσης, όπως έχει ήδη δειχθεί στα

προηγούμενα Σχήματα, ο αναγεννητικός επαναλήπτης έχει καλύτερη επίδοση από τον επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους για όλες τις τιμές της πιθανότητας αποκοπής εκτός από την περιοχή χαμηλών τιμών όπου οι δύο επαναλήπτες έχουν την ίδια επίδοση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2

Στατιστικές παράμετροι του διβηματικού συστήματος του Σχήματος 3.9

	$R_m$	$S_r$	$A_{m_j} (j=1,2)$	$S_{a_j} (j=1,2)$	$\rho_n (\phi = 120^\circ)$
$f = 24\text{GHz}$	0.03147	1.6877	0.0067	1.702	0.9007
$f = 42\text{GHz}$			0.051	1.4581	0.8752



Σχήμα 3.9: Πιθανότητα αποκοπής διβηματικού συστήματος για διάφορες συχνότητες λειτουργίας.

### 3.7.2. Βέλτιστη θέση του επαναλήπτη

Σε αυτήν την ενότητα, μελετάται η επίδραση της θέσης του επαναλήπτη ( $L_{1x}, L_{1y}$ ) στην επίδοση ενός διβηματικού συστήματος και αναζητείται η βέλτιστη θέση που οδηγεί

στο μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο για δεδομένη πιθανότητα αποκοπής. Η θέση του επαναλήπτη μεταβάλλεται πάνω στο επίπεδο αρχικού πομπού – τελικού δέκτη, που ορίζεται από τη θέση του κόμβου εκπομπής  $S (0,0)$  καθώς και τη θέση του κόμβου λήψης  $D (L,0)$ . Το μήκος  $SD$  θεωρείται σταθερό ίσο με  $L = 6km$ .

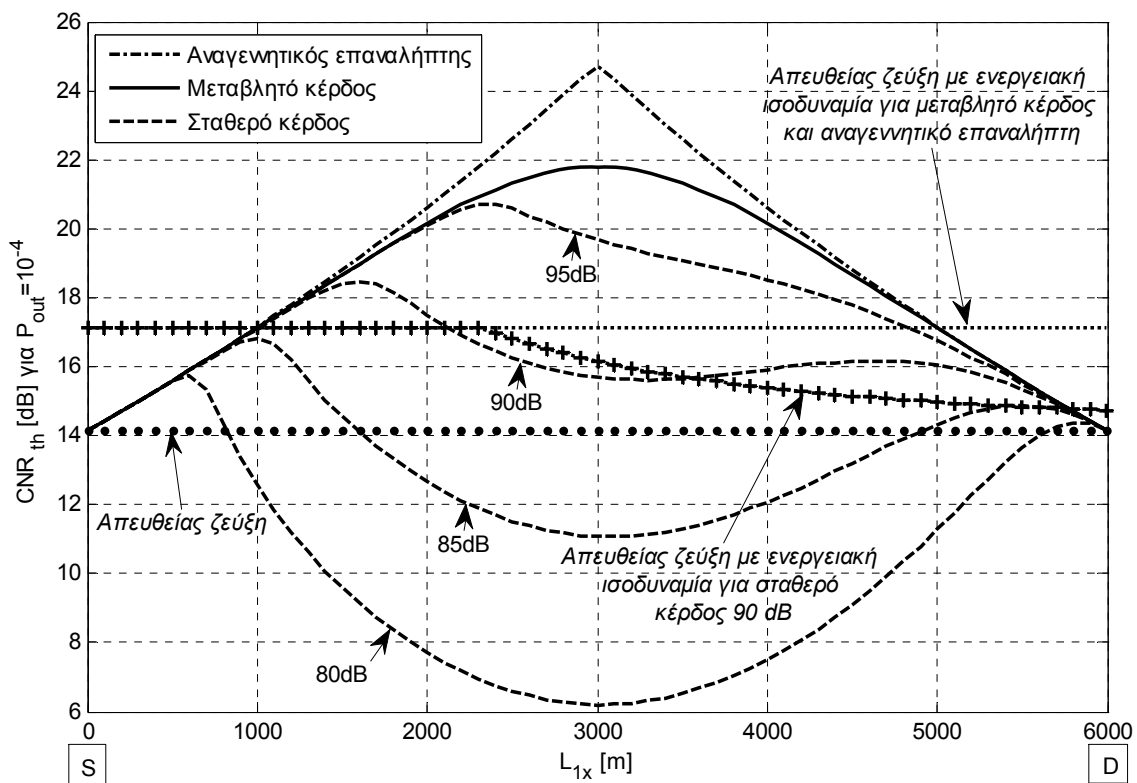
Στα παρακάτω Σχήματα 3.10 - 3.15, εξετάζεται η οριζόντια διβηματική τοπολογία, όπου ο επαναλήπτης τοποθετείται πάνω στην οριζόντια γραμμή  $SD$ , δηλαδή  $(L_{1x}, L_{1y}) = (L_1, 0)$  ή αλλιώς  $\phi = 180^\circ$ . Η βέλτιστη θέση που προκύπτει σε αυτά τα Σχήματα είναι η συνολική βέλτιστη θέση στο επίπεδο  $SD$ , καθώς κάθε κάθετη μετατόπιση του επαναλήπτη ( $L_{1y} \neq 0$ ) οδηγεί τόσο σε μεγαλύτερες απώλειες ελευθέρου χώρου όσο και σε μεγαλύτερες αποσβέσεις λόγω βροχής ανεξαρτήτως του είδους του επαναλήπτη. Στα Σχήματα 3.10 και 3.11, το σύστημα θεωρείται ότι λειτουργεί στην Αθήνα και οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι ίδιες με τις παραμέτρους του Σχήματος 3.6.

Το Σχήμα 3.10 απεικονίζει την απαιτούμενη στάθμη  $CNR_{th}$  (συνολική επίδοση) για μια δεδομένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής  $P_{out} = 10^{-4}$  συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης  $L_{1x}$  για διάφορα είδη επαναληπτών. Σημειώνεται ότι μια υψηλή τιμή της στάθμης  $CNR_{th}$  αντιστοιχεί σε χαλαρές απαιτήσεις του εξοπλισμού των πομποδεκτών, ενώ μια χαμηλή τιμή της στάθμης  $CNR_{th}$  αντιστοιχεί σε πιο σύνθετους πομποδέκτες. Η αντίστοιχη στάθμη  $CNR_{th}$  της ‘απευθείας ζεύξης’ και της ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’ δίνονται επίσης για λόγους σύγκρισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπύλη της ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’ για ένα σύστημα σταθερού κέρδους, που δίνεται μόνο για κέρδος 90dB, διαφέρει από την αντίστοιχη καμπύλη, που αναφέρεται στις περιπτώσεις του μεταβλητού κέρδους και του αναγεννητικού επαναλήπτη, για  $L_{1x}$  μεγαλύτερο από περίπου 2300m. Καθώς το σύστημα της ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’ είναι ενεργειακά ισοδύναμο με το διβηματικό σύστημα, η διαφορά σε αυτές τις καμπύλες οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα σταθερού κέρδους που λειτουργεί στη γραμμική περιοχή για  $L_{1x} > 2300m$  καταναλώνει λιγότερη ισχύ από τα συστήματα με άλλα είδη επαναλήπτη. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για άλλες τιμές του σταθερού κέρδους του επαναλήπτη.

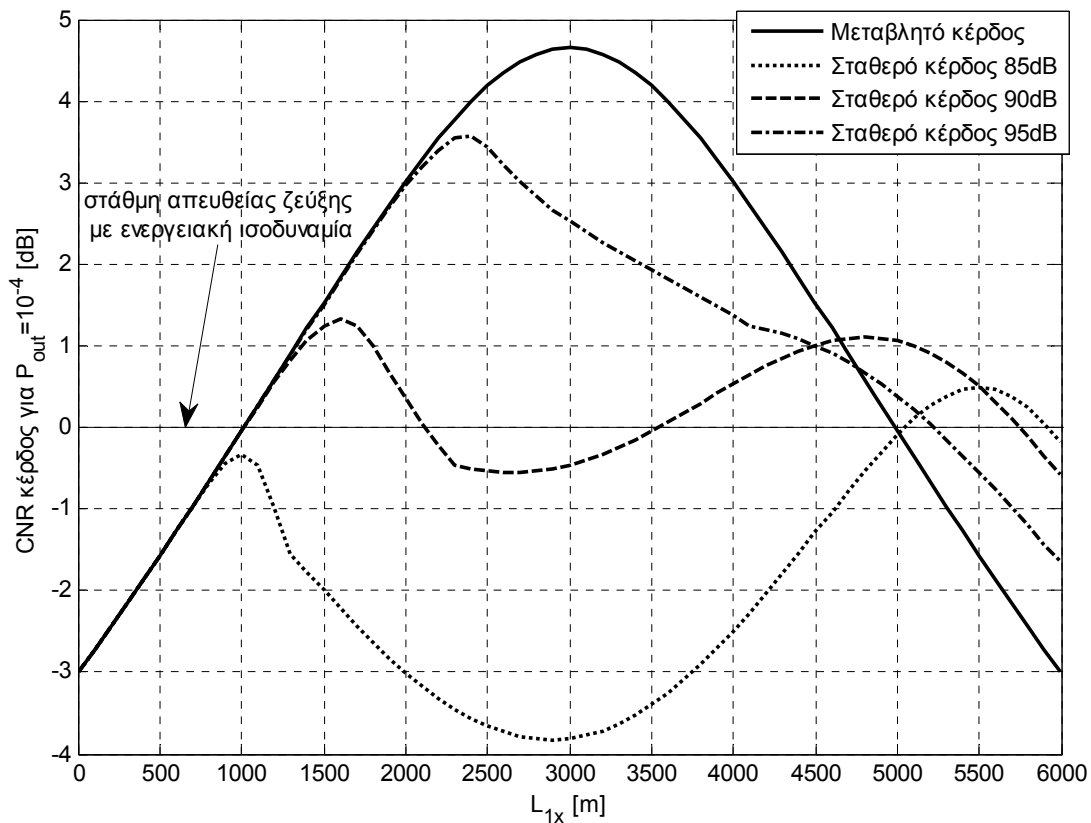
Όπως φαίνεται από το ίδιο Σχήμα, η επίδοση των επαναληπτών με σταθερό κέρδος μικρότερο από 90dB περίπου παρουσιάζει δύο μέγιστα και η βέλτιστη θέση του επαναλήπτη εμφανίζεται είτε κοντά στον κόμβο εκπομπής S είτε κοντά στον κόμβο λήψης D. Η παρουσία του πρώτου μεγίστου οφείλεται στο φαινόμενο του κόρου του ενισχυτή του επαναλήπτη και εμφανίζεται για μικρές αποστάσεις από τον κόμβο S. Η παρουσία του μεγίστου κοντά στον κόμβο D μπορεί να εξηγηθεί από τη συνδυαστική επίδραση των απωλειών ελευθέρου χώρου και της απόσβεσης της βροχής του δεύτερου βήματος, όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (3.19) και (3.20). Περαιτέρω, είναι προφανές ότι και τα δύο μέγιστα της περίπτωσης σταθερού κέρδους 90dB παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση από την καμπύλη της ‘απευθείας ζεύξης με ενεργειακή ισοδυναμία’, η οποία διαφέρει, όπως ήδη αναφέρθηκε, από την αντίστοιχη καμπύλη του μεταβλητού κέρδους και του αναγεννητικού επαναλήπτη. Μεγαλύτερα κέρδη από 90dB του ενισχυτή οδηγούν τον επαναλήπτη σταθερού κέρδους σε λειτουργία στον κόρο (και επομένως σε λειτουργία και επίδοση αντίστοιχη του επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους) για τις περισσότερες θέσεις του επαναλήπτη, ειδικά κοντά στον κόμβο S. Για ακόμη μεγαλύτερα σταθερά κέρδη (μεγαλύτερα από 100dB που δεν εμφανίζονται σε αυτό το Σχήμα) η λειτουργία του επαναλήπτη σταθερού κέρδους είναι ταυτόσημη με του επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους για όλο το εύρος των θέσεων του επαναλήπτη. Από την άλλη πλευρά, ο επαναλήπτης μεταβλητού κέρδους και ο αναγεννητικός επαναλήπτης εμφανίζουν καλύτερη επίδοση από την ‘απευθείας ζεύξη’, όπως είναι αναμενόμενο, καθώς τα μήκη των βημάτων του διβηματικού συστήματος είναι μικρότερα από την ‘απευθείας ζεύξη’ και επιπλέον ο επαναλήπτης εισάγει πρόσθετη ισχύ στο σύστημα. Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένοι επαναλήπτες παρουσιάζουν κέρδος σε σχέση με την ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’ σε ένα εύρος θέσεων περιορισμένων στο κέντρο του συστήματος, π.χ. στο εύρος 1-5km όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.10. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο αναγεννητικός επαναλήπτης υπερέχει του αντίστοιχου με μεταβλητό κέρδος.

Στο Σχήμα 3.11, διερευνάται ειδικά η επίδοση των επαναληπτών μεταβλητού και σταθερού κέρδους σε σχέση με την ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’. Συγκεκριμένα, το κέρδος της στάθμης CNR για μία συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής ορίζεται ως η διαφορά της στάθμης  $CNR_{th}$  του διβηματικού συστήματος από την αντίστοιχη στάθμη της ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’. Ένα θετικό CNR

κέρδος αντιστοιχεί προφανώς σε ένα σύστημα με επαναλήπτη που υπερτερεί της ‘απευθείας ζεύξης με ενεργειακή ισοδυναμία’. Το CNR κέρδος αποτελεί ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας των τεχνικών προώθησης για διάφορες θέσεις του επαναλήπτη κατά μήκος της ευθείας S-D. Από αυτό το Σχήμα, φαίνεται ότι το σύστημα σταθερού κέρδους είναι πιο αποτελεσματικό για κάθε τιμή του κέρδους από το σύστημα μεταβλητού κέρδους όταν ο επαναλήπτης τοποθετείται κοντά στον κόμβο λήψης D. Επιπλέον, καθώς η θέση του επαναλήπτη πλησιάζει τον κόμβο D, χαμηλότερες τιμές του σταθερού κέρδους του ενισχυτή δίνουν μεγαλύτερα CNR κέρδη. Για παράδειγμα, αυτό είναι εμφανές για αποστάσεις  $L_{1x} > 5.5km$ . Τέλος, για θέσεις του επαναλήπτη κοντά στον κόμβο εκπομπής S, το σύστημα σταθερού κέρδους λειτουργεί στον κόρο και επομένως τα CNR κέρδη όλων των διαφορετικών μη-αναγεννητικών συστημάτων ταυτίζονται.



Σχήμα 3.10: Επίδραση της θέσης του επαναλήπτη στη στάθμη  $CNR_{th}$  για δεδομένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής και για διάφορα είδη επαναλήπτη.

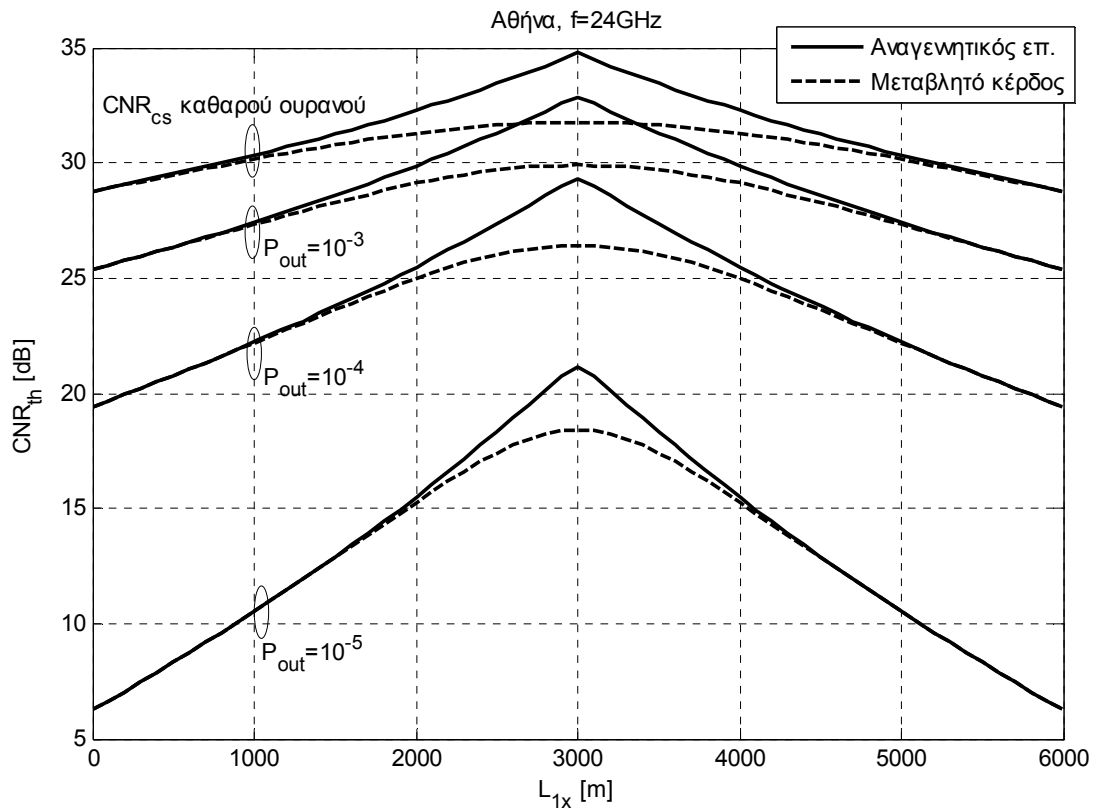


Σχήμα 3.11: CNR κέρδη για διάφορα μη-αναγεννητικά συστήματα σε σχέση με την ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’.

Στα επόμενα Σχήματα 3.12-3.15, οι τιμές των παραμέτρων είναι ίδιες με τις τιμές των παραμέτρων του Σχήματος 3.9, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Στο Σχήμα 3.12, απεικονίζεται η απαιτούμενη στάθμη  $CNR_{th}$  συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης  $L_{1x}$  για τρεις διαφορετικές τιμές της πιθανότητας αποκοπής (που αντιστοιχούν σε πιθανότητα διαθεσιμότητας 99.9%, 99.99% και 99.999%) για ένα σύστημα που βρίσκεται στην Αθήνα, Ελλάδα ( $f = 24GHz$ ) και χρησιμοποιεί επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους ή αναγεννητικό επαναλήπτη. Επίσης, απεικονίζονται οι τιμές του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου  $CNR_{cs}$  σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Γενικά, όπως είναι αναμενόμενο, το αναγεννητικό σύστημα υπερτερεί του μη-αναγεννητικού συστήματος, καθώς επιτυγχάνει την ίδια πιθανότητα αποκοπής για μεγαλύτερες στάθμες  $CNR_{th}$  για τις περισσότερες θέσεις  $L_{1x}$  του επαναλήπτη, ειδικά κοντά στο μέσο του συστήματος. Για τις θέσεις του επαναλήπτη κοντά στον κόμβο S και κοντά στον κόμβο D, τα δύο συστήματα παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια



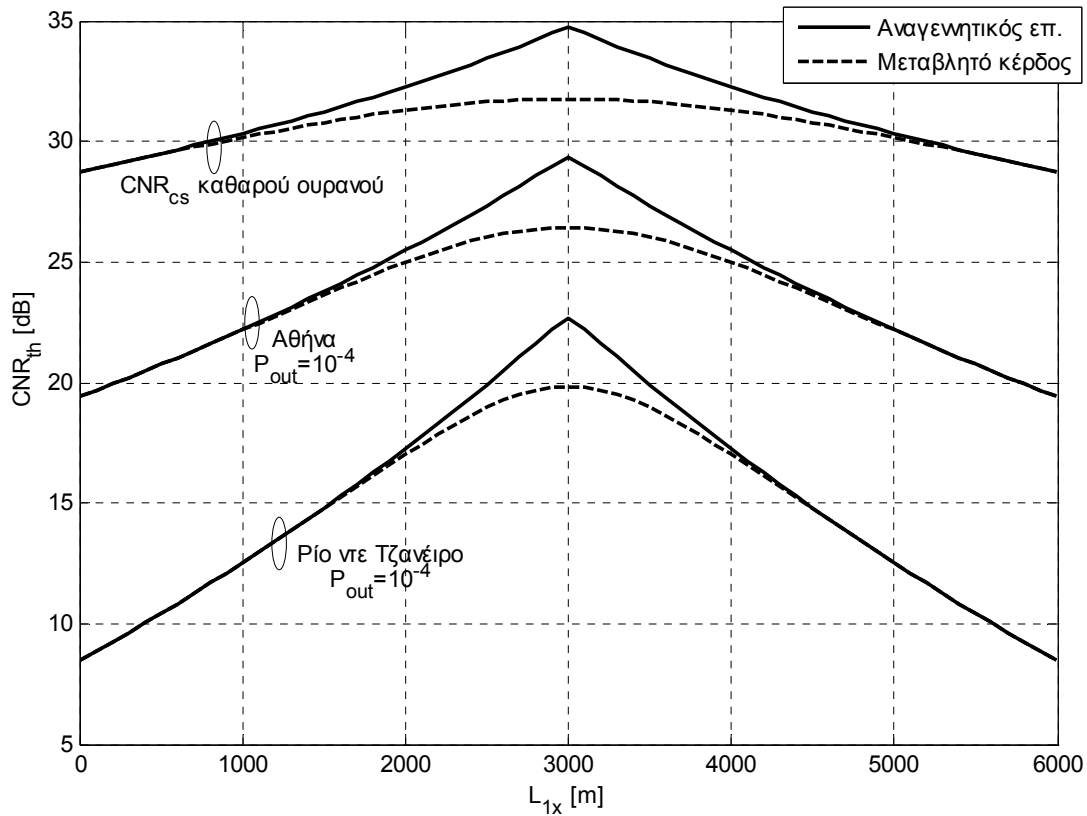
επίδοση (βλέπε επίσης Σχήμα 3.10). Σημειώνεται ότι το μέγεθος των τμημάτων που η επίδοση των δύο συστημάτων ταυτίζεται μεγαλώνει καθώς ο απαιτούμενος χρόνος διαθεσιμότητας του συστήματος αυξάνεται.



Σχήμα 3.12: Επίδραση της θέσης του επαναλήπτη στη στάθμη  $CNR_{th}$  για διάφορες τιμές της πιθανότητας αποκοπής.

Το Σχήμα 3.13 απεικονίζει την εξάρτηση του απαιτούμενου  $CNR_{th}$  από τις κλιματικές συνθήκες για δεδομένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής 0.01% ( $f = 24GHz$ ). Οι τιμές των παραμέτρων του ρυθμού βροχόπτωσης για την Αθήνα δίνονται στον Πίνακα 3.2, ενώ για το Ρίο ντε Τζανέιρο, Βραζιλία είναι  $(R_m, S_r) = (0.1568, 1.4719)$ . Όπως είναι αναμενόμενο, οι απαιτήσεις του εξοπλισμού των πομποδεκτών σε περιοχές με μέτριες συνθήκες βροχόπτωσης, όπως στην Αθήνα, είναι πολύ πιο χαλαρές συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε περιοχές που υποφέρουν από ισχυρές βροχοπτώσεις. Αξίζει να

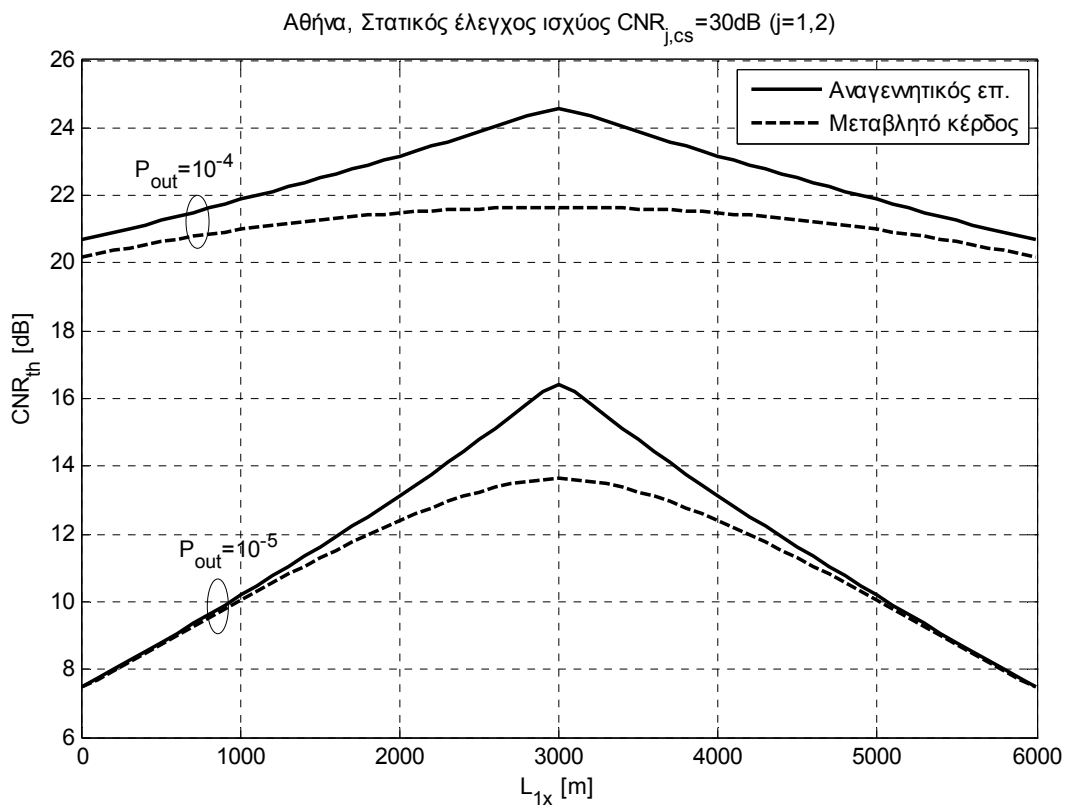
σημειωθεί ότι στα Σχήματα 3.12 και 3.13, οι καμπύλες καθαρού ουρανού απεικονίζουν μόνο την επίδραση των απωλειών ελευθέρου χώρου στην επίδοση του συστήματος.



Σχήμα 3.13: Επίδραση της θέσης του επαναλήπτη στη στάθμη  $CNR_{th}$  για περιοχές με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες.

Η επίδραση της απόσβεσης της βροχής στην επίδοση ενός διβηματικού συστήματος, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι απώλειες ελευθέρου χώρου, μπορεί να απεικονιστεί χρησιμοποιώντας στατικό έλεγχο ισχύος (static power control). Σε αυτήν την περίπτωση, ο σηματοθορυβικός λόγος ενός βήματος σε συνθήκες καθαρού ουρανού  $CNR_{j,cs}$  ( $j=1,2$ ) (ή ο λόγος της συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος του δεύτερου βήματος προς το θόρυβο  $TNR$  για το σύστημα μεταβλητού κέρδους) δεν υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) (ή τη σχέση (3.8) αντίστοιχα), αλλά θεωρείται σταθερός και ανεξάρτητος του μήκους του κάθε βήματος  $L_j$ . Σε αυτό το παράδειγμα, για το σύστημα μεταβλητού κέρδους χρησιμοποιείται ο απλοποιημένος τύπος (3.16) για λόγους ευκολίας, καθώς όπως έχει ήδη

αναφερθεί δίνει τα ίδια αριθμητικά αποτελέσματα με τον τύπο (3.6) για τις πρακτικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος που χρησιμοποιούνται. Το Σχήμα 3.14 απεικονίζει την επίδοση των αναγεννητικών και μη-αναγεννητικών συστημάτων μεταβλητού κέρδους που βρίσκονται στην Αθήνα ( $f = 24\text{GHz}$ ), θεωρώντας στατικό έλεγχο ισχύος με  $CNR_{j,cs} = 30\text{dB}$  ( $j=1,2$ ). Το αναγεννητικό σύστημα υπερτερεί και πάλι σε επίδοση του μη-αναγεννητικού για όλες τις αποστάσεις  $L_{1x}$  για πιθανότητα αποκοπής ίση με 0.01%, παρόμοια με τα προηγούμενα Σχήματα. Για μικρότερες τιμές της πιθανότητας αποκοπής (0.001%) υπάρχουν περιοχές του  $L_{1x}$  κοντά στους κόμβους S και D που τα δύο είδη επαναλήπτη έχουν την ίδια επίδοση.



Σχήμα 3.14: Επίδραση της θέσης του επαναλήπτη στη στάθμη  $CNR_{th}$  χρησιμοποιώντας στατικό έλεγχο ισχύος.

Από τα Σχήματα 3.12 - 3.14 φαίνεται ότι οι απώλειες ελευθέρου χώρου (καμπύλες για συνθήκες καθαρού ουρανού) και η απόσβεση λόγω βροχής (καμπύλες στατικού ελέγχου ισχύος) έχουν παρόμοια επίδραση στην τελική διβηματική επίδοση που

περιλαμβάνει απώλειες λόγω και των δύο αυτών φαινομένων (Σχήματα 3.12 και 3.13). Επιπλέον, η βέλτιστη θέση τόσο των αναγεννητικών επαναληπτών όσο και των επαναληπτών μεταβλητού κέρδους είναι στο μέσο του διβηματικού συστήματος για όλες τις θεωρούμενες περιπτώσεις. Αυτό φυσικά είναι αναμενόμενο για ένα συμμετρικό σύστημα ( $P_1 = P_2$ ), καθώς η επίδραση του μήκους του κάθε βήματος τόσο στις απώλειες ελευθέρου χώρου όσο και στην απόσβεση της βροχής είναι παρόμοια.

Για τη γενική ασύμμετρη περίπτωση ( $P_1 \neq P_2$ ), χρησιμοποιώντας τον απλοποιημένο τύπο (3.16) για το μη-αναγεννητικό επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους, η βέλτιστη θέση του στην ευθεία S-D, αγνοώντας την επίδραση της βροχής, μπορεί να υπολογιστεί παραγωγίζοντας ως προς  $L_1$  το συνολικό σηματοθορυβικό λόγο σε συνθήκες καθαρού ουρανού  $CNR_{t,cs}$ , ο οποίος δίνεται από την εξίσωση (3.16) για  $A_1 = A_2 = 0$ :

$$L_{1x}^{optimum} = \frac{10^{-P'_2/10}}{10^{-P'_1/10} + 10^{-P'_2/10}} L \quad (3.43)$$

όπου ο όρος  $P'_j$  ( $j = 1, 2$ ) ενσωματώνει όλες τις παραμέτρους λειτουργίας:

$$P'_j (dB) = P_j + G_{j,tr} + G_{j,rec} - N_j, \quad (j = 1, 2) \quad (3.44)$$

Η μέγιστη τιμή του λόγου  $CNR_{t,cs}$  που αντιστοιχεί στη βέλτιστη θέση  $L_{1x}^{optimum}$  δίνεται από:

$$CNR_{t,cs}^{maximum} = P'_1 + P'_2 - PL + 10 \log(10^{-P'_1/10} + 10^{-P'_2/10}) \quad (3.45)$$

όπου οι απώλειες ελευθέρου χώρου που αντιστοιχούν στο ολικό μήκος  $L$  εκφράζονται ως  $PL(dB) = 20 \log(4\pi L / \lambda)$ .

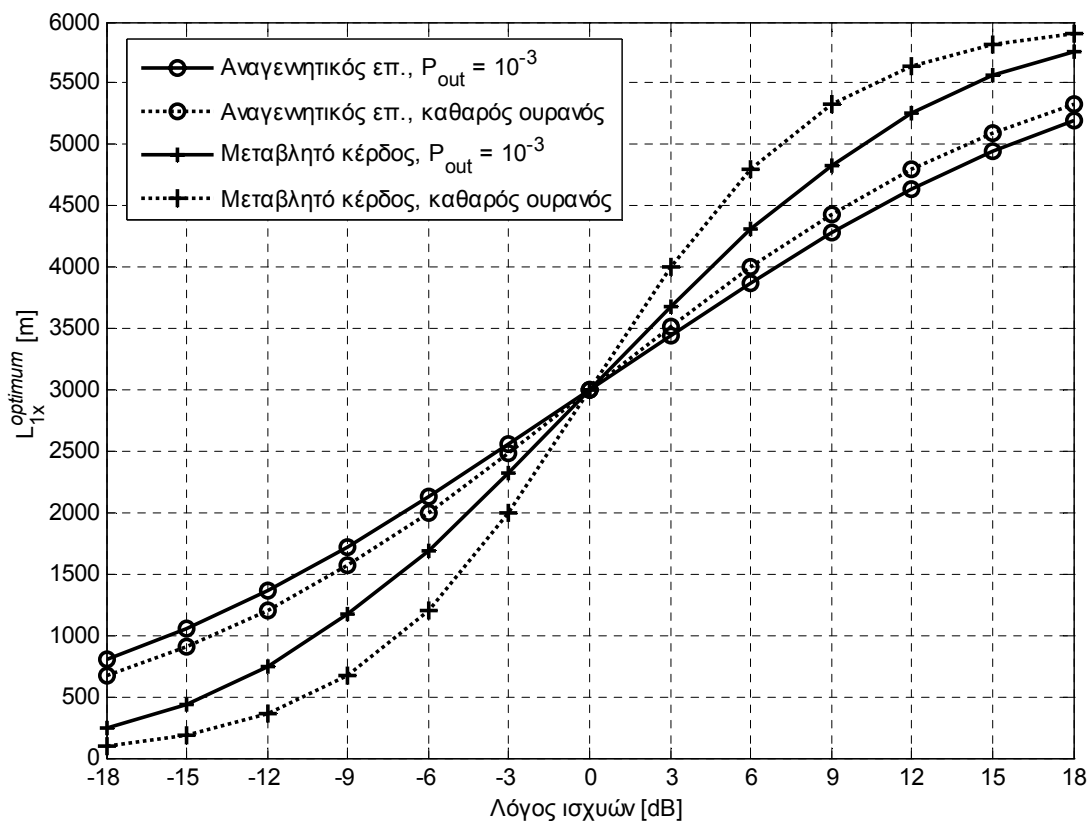
Η βέλτιστη θέση  $L_{1x}^{optimum}$  στην περίπτωση ενός αναγεννητικού επαναλήπτη μεγιστοποιεί το ελάχιστο των σηματοθορυβικών λόγων καθαρού ουρανού των δύο βημάτων, το οποίο χαρακτηρίζει την επίδοση του συστήματος, αγνοώντας και πάλι την επίδραση της βροχής. Αυτή η απαίτηση ικανοποιείται όταν οι σηματοθορυβικοί λόγοι των δύο βημάτων είναι ίσοι και η βέλτιστη θέση δίνεται από:

$$L_{1x}^{optimum} = \arg \max_{L_1} \left( \min(CNR_{1,cs}, CNR_{2,cs}) \right) = \frac{L}{1 + 10^{\frac{P'_2 - P'_1}{20}}} \quad (3.46)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη τιμή του σηματοθορυβικού λόγου καθαρού ουρανού του κάθε βήματος υπολογίζεται από:

$$CNR_{j,cs}^{\text{maximum}} = P'_1 - PL + 20 \log \left( 1 + 10^{\frac{P'_2 - P'_1}{20}} \right), (j = 1, 2) \quad (3.47)$$

Στην παραπάνω σχέση, τα  $P'_j (j = 1, 2)$  δίνονται από την έκφραση (3.44). Το Σχήμα 3.15 απεικονίζει τη βέλτιστη θέση του επαναλήπτη συναρτήσει του λόγου των ισχυών των δύο βημάτων  $P'_1/P'_2$  (γραμμική κλίμακα) ή  $P'_1 - P'_2 (dB)$  για ένα αναγεννητικό και ένα μη-αναγεννητικό σύστημα μεταβλητού κέρδους (Αθήνα,  $f = 24GHz$ ). Η βέλτιστη θέση του επαναλήπτη σε συνθήκες καθαρού ουρανού υπολογίζεται απευθείας από τις εξισώσεις (3.43) και (3.46), ενώ για συνθήκες βροχής και πιθανότητα αποκοπής  $P_{out} = 10^{-3}$  χρησιμοποιείται ο γενικός τύπος (3.13).



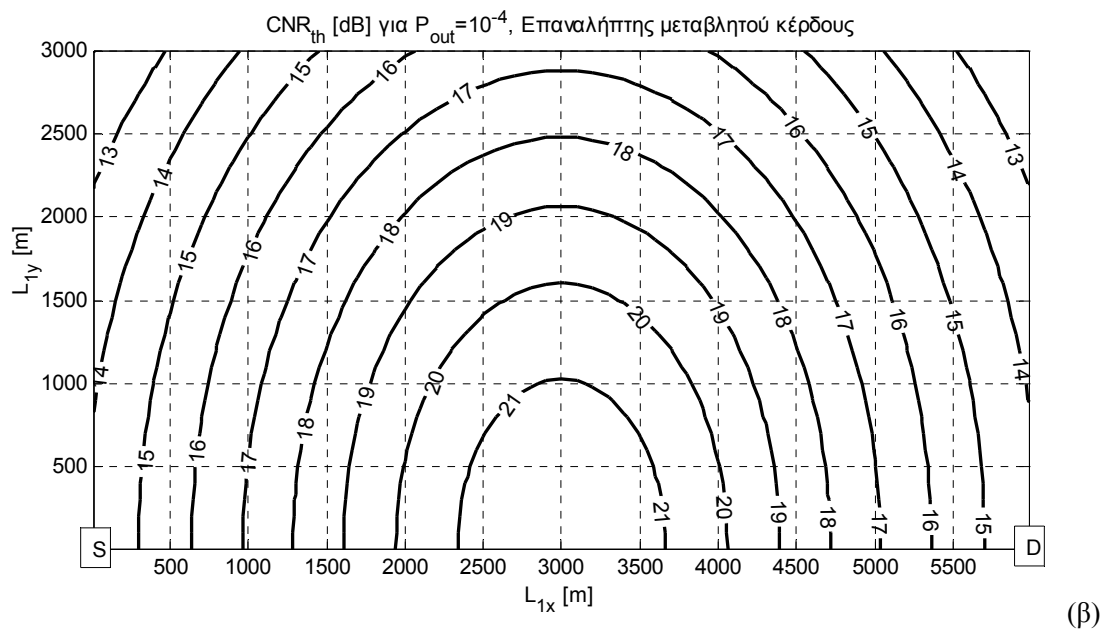
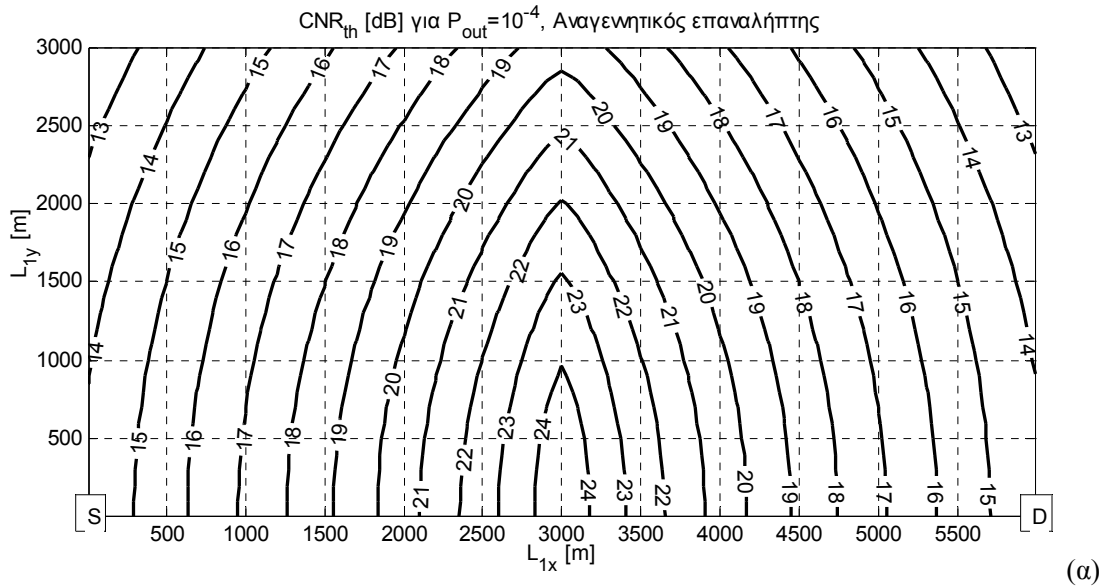
Σχήμα 3.15: Βέλτιστη θέση του επαναλήπτη συναρτήσει του λόγου ισχύος  $P'_1/P'_2$  για συνολική απόσταση κόμβου εκπομπής – κόμβου λήψης  $L = 6km$ .

Από το Σχήμα 3.15 φαίνεται ότι στη συμμετρική περίπτωση  $P'_1 = P'_2$  (λόγος ισχύος = 0dB) η βέλτιστη θέση του επαναλήπτη  $L_{1x}^{optimum}$  είναι πάντα στη μέση του συστήματος ανεξαρτήτως του είδους του επαναλήπτη και των κλιματικών συνθηκών, ενώ στην ασύμμετρη περίπτωση η βέλτιστη θέση των δύο ειδών επαναλήπτη δεν ταυτίζεται. Επιπροσθέτως, στην ασύμμετρη περίπτωση η βέλτιστη θέση του επαναλήπτη διαφέρει για τις συνθήκες καθαρού ουρανού και βροχής, ειδικά στην περίπτωση του επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους. Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν εύκολα να γενικευτούν και για την περίπτωση που η θέση του επαναλήπτη μεταβάλλεται και κάθετα ( $\phi \neq 180^\circ$ ).

Στα Σχήματα 3.16 - 3.18, εξετάζεται τόσο η οριζόντια όσο και η κάθετη ( $L_{1y} \neq 0$  και  $\phi \neq 180^\circ$ ) μετατόπιση του επαναλήπτη στο επίπεδο SD και απεικονίζονται οι ισοσταθμικές καμπύλες που προσδιορίζουν τις περιοχές με ίδια στάθμη  $CNR_{th}$  για δεδομένη πιθανότητα αποκοπής  $P_{out} = 10^{-4}$  για ένα σύστημα που λειτουργεί στην Αθήνα. Το Σχήμα 3.16 απεικονίζει τις ισοσταθμικές καμπύλες για ένα συμμετρικό σύστημα ( $P_1 = P_2$ ) με παραμέτρους λειτουργίας ίδιες με το Σχήμα 3.6 για: (α) ένα αναγεννητικό σύστημα και (β) ένα μη-αναγεννητικό σύστημα μεταβλητού κέρδους. Το Σχήμα 3.17 απεικονίζει τις ισοσταθμικές καμπύλες ενός ασύμμετρου συστήματος όπου ο επαναλήπτης εκπέμπει με το ένα τέταρτο της ισχύος εκπομπής του κόμβου S σε γραμμική κλίμακα (ή ισοδύναμα με 6.02dB λιγότερη ισχύ), επίσης για: (α) ένα αναγεννητικό σύστημα και (β) ένα μη-αναγεννητικό σύστημα μεταβλητού κέρδους. Η συχνότητα εκπομπής είναι  $f = 24GHz$  και οι τιμές των υπόλοιπων λειτουργικών παραμέτρων είναι ίδιες με το Σχήμα 3.9. Τέλος, το Σχήμα 3.18 απεικονίζει τις ισοσταθμικές καμπύλες για ένα μη-αναγεννητικό σύστημα σταθερού κέρδους 90dB και λειτουργικές παραμέτρους ίδιες με το Σχήμα 3.6.

Αυτά τα Σχήματα ορίζουν τις περιοχές που πρέπει να τοποθετηθεί ο επαναλήπτης ώστε το διβηματικό σύστημα να έχει καλύτερη επίδοση από μια συγκεκριμένη τιμή  $CNR_{th}$ , εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service). Για παράδειγμα, για το ασύμμετρο σύστημα του Σχήματος 3.17 και  $CNR_{th}$  μεγαλύτερο από 20dB (δεδομένης διαθεσιμότητας 99.99%), ο επαναλήπτης πρέπει να τοποθετηθεί μέσα στην επιφάνεια που ορίζεται από τις ισοσταθμικές καμπύλες με τιμές μεγαλύτερες από 20dB (γραμμοσκιασμένη περιοχή). Από το Σχήμα 3.16 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η

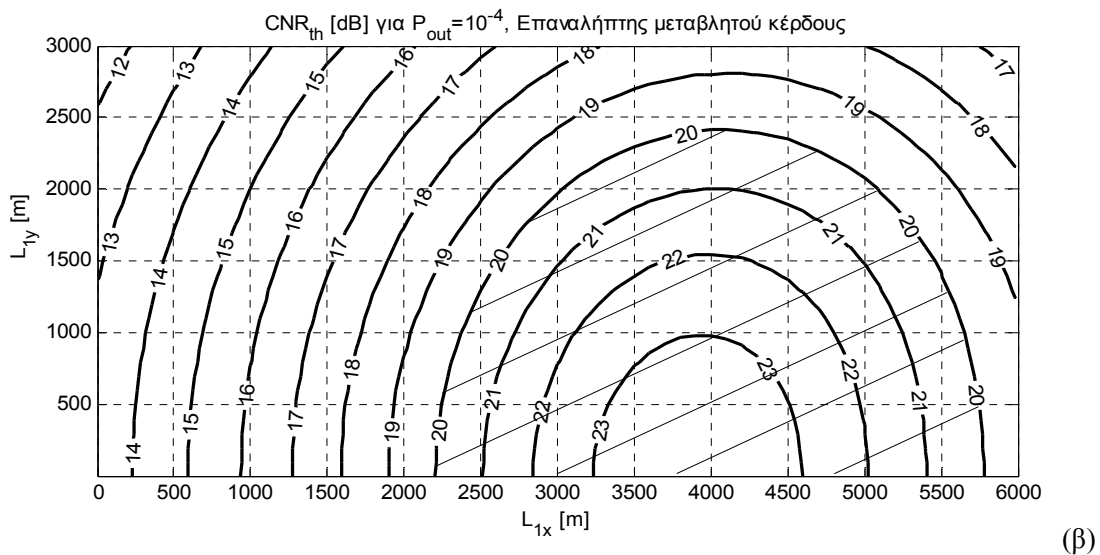
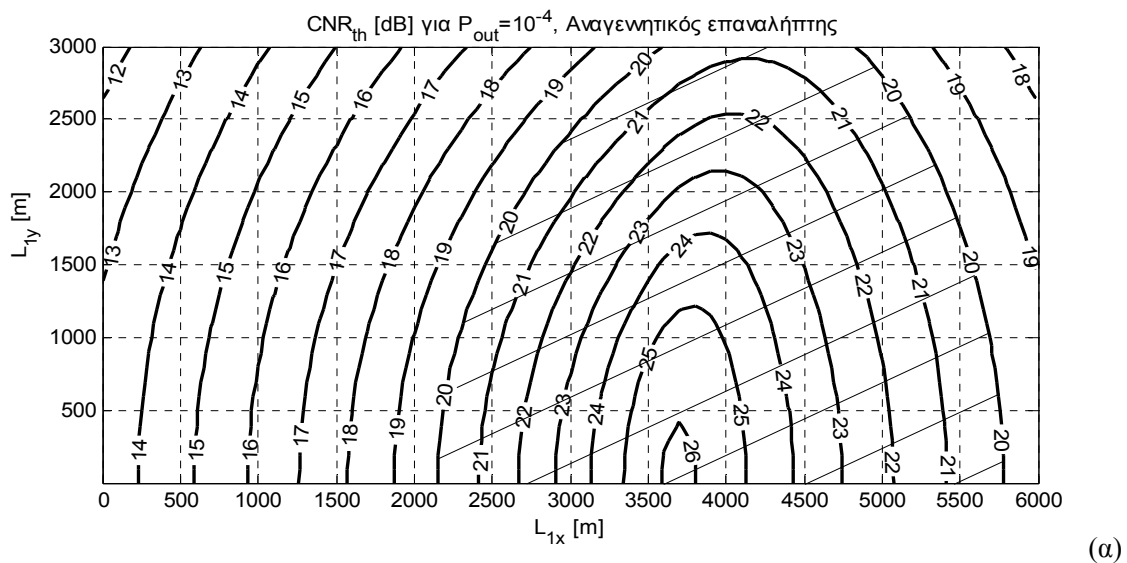
επίδοση τόσο του αναγεννητικού όσο του μη-αναγεννητικού επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους είναι συμμετρική ως προς το μέσο της επιφάνειας στην οποία τοποθετείται ο επαναλήπτης ( $L_{1x} = 3km$ ).



Σχήμα 3.16: Ισοσταθμικές καμπύλες του  $CNR_{th}$  για ένα συμμετρικό σύστημα με: (α) αναγεννητικό και (β) μη-αναγεννητικό επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους.

Από το Σχήμα 3.17 φαίνεται ότι οι θέσεις του επαναλήπτη που ικανοποιούν τις δεδομένες απαιτήσεις επίδοσης  $CNR_{th}$ , δεν βρίσκονται πλέον στο μέσο του συστήματος

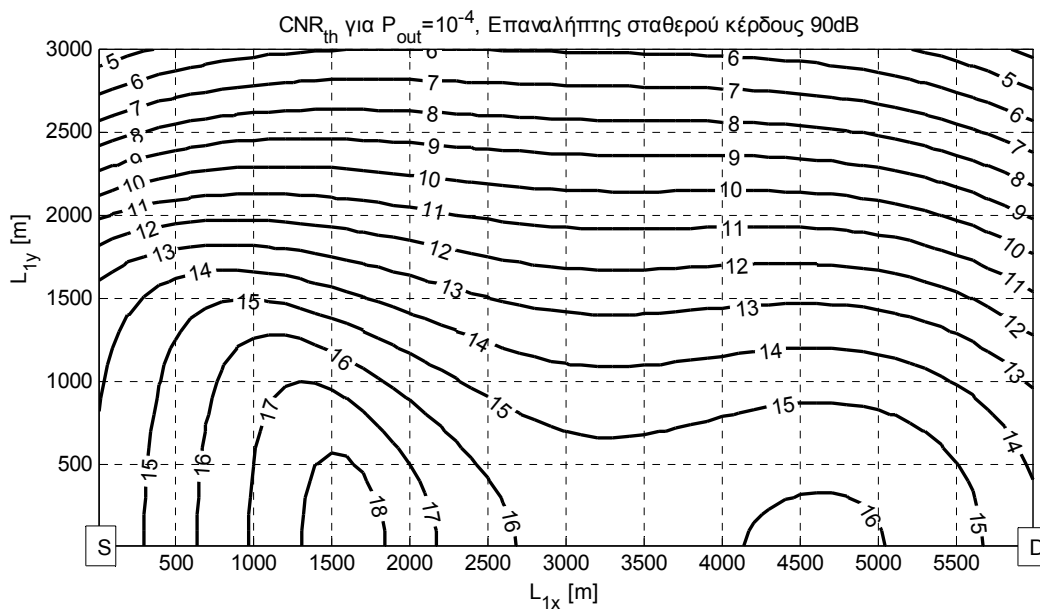
αλλά πιο κοντά στον κόμβο D καθώς ο επαναλήπτης εκπέμπει με λιγότερη ισχύ από τον κόμβο εκπομπής S. Επιπλέον, οι ισοσταθμικές καμπύλες ενός ασύμμετρου συστήματος είναι επίσης ασύμμετρες και επίσης εμφανίζονται κεκλιμένες. Με άλλα λόγια, η βέλτιστη οριζόντια θέση  $L_{1x}^{optimum}$  εξαρτάται από την κάθετη θέση  $L_{1y}$ , π.χ. για  $L_{1y} = 0$  η βέλτιστη οριζόντια θέση ενός αναγεννητικού επαναλήπτη είναι  $L_{1x}^{optimum} \approx 3.7km$ , ενώ για  $L_{1y} = 2.5km$  η βέλτιστη οριζόντια θέση είναι  $L_{1x}^{optimum} \approx 4km$ .



Σχήμα 3.17: Ισοσταθμικές καμπύλες του  $CNR_{th}$  για ένα ασύμμετρο σύστημα με: (α) αναγεννητικό και (β) μη-αναγεννητικό επαναλήπτη μεταβλητού κέρδους.



Τέλος, το Σχήμα 3.18 επιβεβαιώνει την παρουσία δύο μεγίστων στην επίδοση ενός επαναλήπτη σταθερού κέρδους, κοντά στους κόμβους S και D, για μικρές τιμές του  $L_{1y}$ , δηλαδή όταν ο επαναλήπτης τοποθετείται κοντά στη γραμμή SD, όπως φάνηκε και σε προηγούμενα Σχήματα. Όταν όμως ο επαναλήπτης απομακρύνεται κάθετα από τη γραμμή SD, οι ισοσταθμικές καμπύλες γίνονται πιο γραμμικές και οριζοντίως κατανεμημένες.



Σχήμα 3.18: Ισοσταθμικές καμπύλες του  $CNR_{th}$  για ένα σύστημα με μη-αναγεννητικό επαναλήπτη σταθερού κέρδους.

### 3.8. Συμπεράσματα

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα φυσικό μοντέλο για τον αξιόπιστο υπολογισμό της στατιστικής κατανομής της πιθανότητας αποκοπής ενός διβηματικού συστήματος με μη-αναγεννητικούς επαναλήπτες σταθερού και μεταβλητού κέρδους, καθώς και με αναγεννητικούς επαναλήπτες, που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz. Ένας τελικός γενικός τύπος, που μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί αριθμητικά, προτείνεται για κάθε είδος επαναλήπτη. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε μέρος της γης και σε κάθε πιθανή γεωμετρική διάταξη με όλες τις δυνατές τιμές των λειτουργικών παραμέτρων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζουν

τη σχετική επίδοση μεταξύ των διάφορων ειδών επαναλήπτη, καθώς και την επίδοση τους σε σχέση με μια ‘απευθείας ζεύξη’ ή μια ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’. Επίσης, στα αριθμητικά αποτελέσματα εξετάζεται η επίδραση ενός επαναλήπτη εξοπλισμένου με έναν εκτιμητή καναλιού, στην επίδοση ενός διβηματικού συστήματος. Επιπλέον, η βέλτιστη θέση ενός επαναλήπτη σε μια διβηματική γεωμετρική διάταξη διερευνάται εκτενώς, θεωρώντας διαφορετικές περιπτώσεις όπως συνθήκες καθαρού ουρανού, στατικός έλεγχος ισχύος, καθώς και τη γενική περίπτωση που λαμβάνονται από κοινού υπόψη οι απώλειες ελευθέρου χώρου και η απόσβεση λόγω βροχής. Επίσης, εξετάζεται η εξάρτηση της βέλτιστης θέσης του επαναλήπτη από το λόγο των ισχυών εκπομπής του κόμβου εκπομπής και του επαναλήπτη. Εκτενής ανάλυση, χρησιμοποιώντας ισοσταθμικές καμπύλες, απεικονίζει τις γεωμετρικές περιοχές που ένας επαναλήπτης πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε να εξασφαλίζει τις απαιτήσεις επίδοσης ενός συστήματος (Quality of Service - QoS) παρέχοντας ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση ασύρματων δικτύων.

## **4. Ανάλυση επίγειων συνεργατικών συστημάτων**

### **4.1. Εισαγωγή**

Το αντικείμενο του 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου είναι η παρουσίαση ενός αναλυτικού μοντέλου για την πρόβλεψη της επίδοσης ενός συστήματος συνεργατικής διαφορικότητας. Αρχικά μελετάται η επίδοση ενός συστήματος που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz και υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής, λαμβάνοντας υπόψη τις συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές αποσβέσεις των διάφορων καναλιών του συστήματος [Sakarellos09b, Sakarellos10e]. Στη συνέχεια μελετάται ένα συνεργατικό σύστημα που υποφέρει από διαλείψεις λόγω σκίασης [Sakarellos10c]. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως έχει περιγραφεί στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, οι σηματοθορυβικοί λόγοι στην είσοδο των κόμβων του συστήματος, εκφρασμένοι σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB όπως στην περίπτωση της βροχής, είναι συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές.

Ο κόμβος λήψης των θεωρούμενων συνεργατικών συστημάτων συνδυάζει συμμασικά το απευθείας σήμα από τον κόμβο εκπομπής με το σήμα που λαμβάνει μέσω ενός αναγεννητικού επαναλήπτη (αποκωδικοποίηση-και-προώθηση) χρησιμοποιώντας τις τεχνικές Συνδυασμού Μεγίστου Λόγου (Maximal Ratio Combining - MRC) και Συνδυασμού με Επιλογή (Selection Combining - SC) [Stuber01]. Επίσης, γίνεται διερεύνηση της επίδοσης διαφορετικών πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης, όπως η πολυπλεξία στο χρόνο (Time Division Multiple Access - TDMA), η πολυπλεξία στη συχνότητα (Frequency Division Multiple Access - FDMA) και η πολυπλεξία στο χώρο (Space Division Multiple Access - SDMA), λαμβάνοντας ταυτοχρόνως υπόψη την ενεργειακή και φασματική αποδοτικότητα του κάθε πρωτόκολλου. Επιπλέον, μελετάται η σχετική επίδοση διαφορετικών πρωτόκολλων συνεργατικής διαφορικότητας. Για την περίπτωση του συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής, παρουσιάζεται η

επίδοση των πρωτόκολλων Σταθερής Επανάληψης (Fixed Relaying - FR) και Επιλεγόμενης Επανάληψης (Selection Relaying - SR) [Laneman04]. Για την Επιλεγόμενη Επανάληψη παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής [Sakarellos09b, Sakarellos10e]. Για την περίπτωση ενός συνεργατικού συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω σκίασης, παρουσιάζεται η επίδοση του πρωτόκολλου Επιλεγόμενης Επανάληψης [Sakarellos10c], η οποία συγκρίνεται με την επίδοση του πρωτόκολλου Σταθερής Επανάληψης που έχει μελετηθεί στη δημοσίευση [Skraparlis09a].

Αναλυτικές εκφράσεις παρουσιάζονται για την πιθανότητα αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο σηματοθορυβικός λόγος της κάθε ζεύξης υπολογίζεται μέσω της θεωρίας διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Η επίδραση διάφορων λειτουργικών, γεωμετρικών και γεωγραφικών παραμέτρων, καθώς και η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στις απαιτήσεις επίδοσης ενός συνεργατικού συστήματος (Quality of Service - QoS), μελετάται πλήρως μέσω εκτενών αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τέλος, η επίδοση ενός συνεργατικού συστήματος συγκρίνεται με την επίδοση ενός μη συνεργατικού συστήματος απευθείας ζεύξης, εξασφαλίζοντας ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία.

## **4.2. Επίδοση χιλιοστομετρικών συνεργατικών συστημάτων**

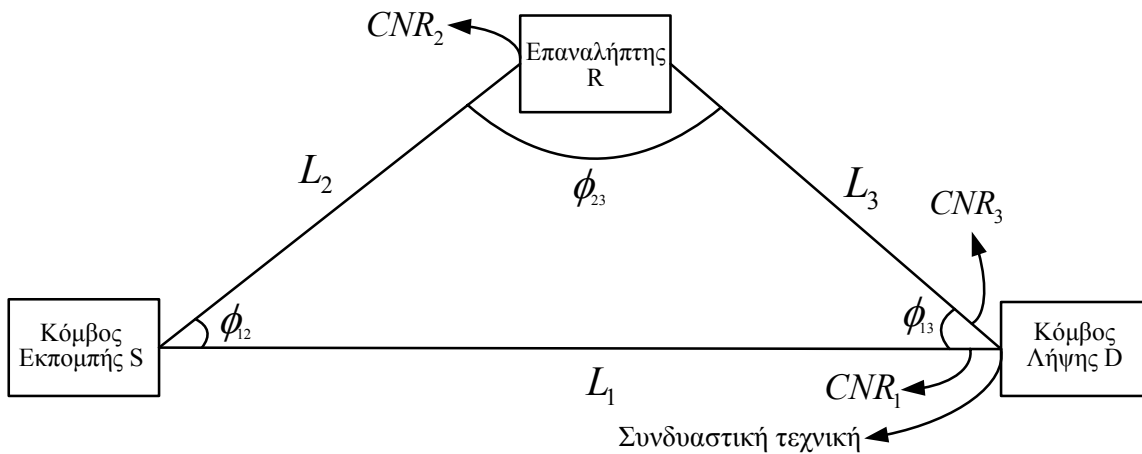
Ο σκοπός αυτής της παραγράφου είναι ο αναλυτικός υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής ενός βασικού συνεργατικού συστήματος που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz. Η πιθανότητα αυτή ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος  $CNR_{t,r}$  (dB) δεν υπερβαίνει μία συγκεκριμένη στάθμη  $CNR_{th}$  :

$$P_{out} = P(CNR_{t,r} < CNR_{th}) \quad (4.1)$$

### **4.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος**

Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συνεργατικού συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Ο κόμβος εκπομπής S εκπέμπει το ίδιο σήμα πληροφορίας τόσο προς τον αναγεννητικό επαναλήπτη R όσο και προς τον κόμβο λήψης D. Ο επαναλήπτης R, χρησιμοποιώντας την τεχνική αποκωδικοποίησης-και-προώθησης, αναγεννά το λαμβανόμενο σήμα και στη συνέχεια το επανεκπέμπει προς τον κόμβο λήψης D,

δημιουργώντας μία ζεύξη διαφορικότητας. Ο κόμβος λήψης D συνδυάζει συμφασικά, χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική SC είτε την τεχνική MRC, το σήμα της απευθείας ζεύξης και το λαμβανόμενο σήμα μέσω του επαναλήπτη, δημιουργώντας το τελικό σήμα. Στην περίπτωση της τεχνικής SC, το τελικό σήμα αντιστοιχεί στο καλύτερο από τα λαμβανόμενα σήματα από άποψη CNR, ενώ στην τεχνική MRC, ο λόγος CNR του τελικού σήματος ισούται με το άθροισμα των λαμβανόμενων CNR σε γραμμική κλίμακα.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρική διάταξη του συνεργατικού συστήματος.

Στο Σχήμα 4.1, τα μήκη της ζεύξης  $j$  ( $j=1,2,3$ ) υποδηλώνονται ως  $L_j$  (Km), ενώ οι ζεύξεις  $i, j$  ( $i, j=1,2,3, i \neq j$ ) σχηματίζουν γωνία  $\phi_{ij}$  (deg), όπου  $\phi_{ij} = \phi_{ji}$ . Ο σηματοθορυβικός λόγος CNR (dB) που λαμβάνει ο δέκτης της ζεύξης  $j$  ( $j=1,2,3$ ) σε συνθήκες καθαρού ουρανού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$CNR_{j,cs} = P_j + G_{j,tr} + G_{j,rec} - 20 \log(4\pi L_j / \lambda) - 10 \log(kT_j B) \quad (4.2)$$

Στην παραπάνω έκφραση,  $P_j$  (dBW) είναι η εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος πληροφορίας από τον πομπό της κάθε ζεύξης. Στη θεωρούμενη συνεργατική διάταξη ο κόμβος εκπομπής S εκπέμπει κάθε σήμα τόσο προς τον επαναλήπτη R όσο και προς τον κόμβο λήψης D με την ίδια ισχύ, δηλαδή  $P_1 = P_2$ . Τα κέρδη των κεραιών του πομπού και του δέκτη του  $j$  βήματος υποδηλώνονται ως  $G_{j,tr}$  (dBi) και  $G_{j,rec}$  (dBi), αντίστοιχα. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου και η ισχύς του θορύβου του  $j$  βήματος υπολογίζονται ως

$PL_j(dBW) = 20 \log(4\pi L_j / \lambda)$  και  $N_j(dBW) = 10 \log(kT_j B)$ , αντίστοιχα. Το μήκος κύματος υποδηλώνεται ως  $\lambda$ , ενώ  $k = 1.38 \times 10^{-23} (J/K)$  είναι η σταθερά του Boltzmann,  $B (Hz)$  είναι το εύρος φάσματος και  $T_j (K)$  είναι η θερμοκρασία θορύβου του δέκτη του  $j$  βήματος.

Επιπλέον, ο σηματοθορυβικός λόγος κάθε ζεύξης σε συνθήκες βροχής δίνεται από:

$$CNR_{j,r} (dB) = CNR_{j,cs} - A_j (j = 1, 2, 3) \quad (4.3)$$

Στην παραπάνω έκφραση, ο δείκτης  $r$  του σηματοθορυβικού λόγου υποδηλώνει συνθήκες βροχής και ο δείκτης  $cs$  υποδηλώνει συνθήκες καθαρού ουρανού. Τόσο ο ρυθμός βροχοπτώσης όσο και η απόσβεση λόγω βροχής θεωρούνται ότι ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή, όπως περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Επομένως, οι συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές  $A_j (dB)$  εκφράζουν την απόσβεση λόγω βροχής που εισάγεται σε κάθε ζεύξη αντίστοιχα. Οι παράμετροι  $A_{m_j}, S_{a_j} (j = 1, 2, 3)$  των αποσβέσεων  $A_j$  δίνονται από τους τύπους (2.9) και (2.10), ενώ ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_{n_{ij}} (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$  μεταξύ των αντίστοιχων κανονικών τυχαίων μεταβλητών  $\ln A_j$  δίνεται από τον τύπο (2.19), όπου  $\rho_{n_{ij}} = \rho_{n_{ji}}$ .

#### **4.2.2. Πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης**

Η πρόσβαση των θεωρούμενων κόμβων στο ασύρματο μέσο διάδοσης μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφορετικών πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης, όπως τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA και SDMA. Στα πρωτόκολλα TDMA και FDMA χρησιμοποιούνται δύο βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom - DOF): στο πρώτο χρονικό/συχνотικό παράθυρο ο κόμβος εκπομπής εκπέμπει ταυτόχρονα ένα σήμα προς τον επαναλήπτη R και τον κόμβο λήψης D, ενώ στο δεύτερο χρονικό/συχνотικό παράθυρο ο επαναλήπτης R επανεκπέμπει το λαμβανόμενο σήμα στον κόμβο λήψης D. Αυτή η διπλή χρήση φάσματος, καθώς και η ενεργειακή ισοδυναμία λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής και στη σύγκριση με μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη.

Αντίθετα, το πρωτόκολλο SDMA χρησιμοποιεί ένα βαθμό ελευθερίας: ο κόμβος S εκπέμπει και ο επαναλήπτης R λαμβάνει ένα σήμα, ενώ ταυτοχρόνως εκπέμπει στον κόμβο D την προηγούμενη λήψη από τον κόμβο S. Επομένως, ο κόμβος λήψης D λαμβάνει

ταυτοχρόνως τόσο την εκπομπή του επαναλήπτη R όσο και την εκπομπή του κόμβου S. Τα φαινόμενα παρεμβολής μπορούν εύκολα να αποφευχθούν με χρήση χωρικής πολυπλεξίας, η οποία είναι συνηθισμένη στα χιλιοστομετρικά δίκτυα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και επιτυγχάνεται με χρήση κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας και έξυπνων κεραιών (smart antennas). Επομένως, αυτό το πρωτόκολλο είναι το ίδιο αποδοτικό από άποψη χρήσης φάσματος με μια απευθείας ζεύξη, αλλά λιγότερο αποδοτικό από ενεργειακή άποψη καθώς καταναλώνει περισσότερη ενέργεια ανά βαθμό ελευθερίας.

### **4.2.3. Πιθανότητα αποκοπής συστήματος Σταθερής Επανάληψης**

Όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης (Fixed Relaying - FR), ο επαναλήπτης R πάντα προωθεί το λαμβανόμενο σήμα προς τον κόμβο λήψης D. Η μετάδοση ενός σήματος από τον κόμβο εκπομπής S στον κόμβο λήψης D είναι επιτυχημένη όταν τόσο ο επαναλήπτης R όσο και ο κόμβος λήψης D αποκωδικοποιούν επιτυχώς το λαμβανόμενο σήμα [Laneman04]. Επομένως, ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος του συστήματος  $CNR_{t,r}(dB)$  που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής της εξίσωσης (4.1), δίνεται από τον τύπο:

$$CNR_{t,r} = \begin{cases} \min(CNR_{2,r}, \max(CNR_{1,r}, CNR_{3,r})), \text{ για SC} \\ \min(CNR_{2,r}, 10 \log(10^{CNR_{1,r}/10} + 10^{CNR_{3,r}/10})), \text{ για MRC} \end{cases} \quad (4.4)$$

Ο πρώτος όρος του παραπάνω τύπου, τόσο για την τεχνική SC όσο και για την τεχνική MRC, εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής κατά το οποίο ο επαναλήπτης αποτυγχάνει να αποκωδικοποιήσει σωστά το σήμα του κόμβου S. Ο δεύτερος όρος ισούται με το αποτέλεσμα των συνδυαστικών τεχνικών SC και MRC στον κόμβο λήψης D αντίστοιχα, δηλαδή ο δεύτερος όρος ισούται με τον καλύτερο λόγο CNR για την τεχνική SC ή με το άθροισμα των λόγων CNR σε γραμμική κλίμακα για την τεχνική MRC. Με άλλα λόγια, αυτός ο όρος εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής κατά το οποίο ο κόμβος λήψης D αποτυγχάνει να αποκωδικοποιήσει σωστά το λαμβανόμενο σήμα.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.4) και λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.2) και (4.3), η πιθανότητα αποκοπής της (4.1) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \int_{A_{20}}^{\infty} dA_2 f_{A_2}(A_2) + \int_{A_{10}}^{\infty} dA_1 \int_{A_0}^{\infty} dA_3 \int_0^{A_{20}} dA_2 f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3) \quad (4.5)$$

Στον παραπάνω τύπο,  $f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3)$  είναι η τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή η οποία προκύπτει από την αντίστοιχη τρισδιάστατη κανονική κατανομή  $f_{u_1, u_2, u_3}(u_1, u_2, u_3)$ , όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Α, χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = (\ln A_j - \ln A_{m_j}) / S_{a_j}, (j = 1, 2, 3) \quad (4.6)$$

όπου  $A_{m_j}, S_{a_j} (j = 1, 2, 3)$  είναι οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής. Τα όρια  $A_{j0} (j = 1, 2, 3)$  των ολοκληρωμάτων της (4.5) είναι οι ρίζες των εξισώσεων  $CNR_{j,r} = CNR_{th}$ , λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (4.3):

$$A_{j0} = CNR_{j,cs} - CNR_{th} (j = 1, 2, 3) \quad (4.7)$$

Επιπλέον, το όριο  $A_0$  δίνεται από τον τύπο:

$$A_0 = \begin{cases} A_{30}, \text{ για SC} \\ CNR_{3,cs} - 10 \log \left( 10^{CNR_{th}/10} - 10^{(CNR_{1,cs} - A_1)/10} \right), \text{ για MRC} \end{cases} \quad (4.8)$$

Ο δεύτερος κλάδος της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται εξισώνοντας το αποτέλεσμα της συνδυαστικής τεχνικής MRC, που δίνεται από το δεύτερο όρο του MRC κλάδου της σχέσης (4.4), με τη στάθμη  $CNR_{th}$ . Η εξίσωση αυτή, καθώς και το αντίστοιχο ενδεχόμενο αποκοπής που αντιστοιχεί στο δεύτερο όρο του τύπου (4.5), απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4.2 για  $A_2 < A_{20}$ .

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό (4.6) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91], η πιθανότητα αποκοπής της εξίσωσης (4.5) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = (1/2) \operatorname{erfc} \left( u_{20} / \sqrt{2} \right) + \int_{u_{10}}^{\infty} du_1 \int_{u_0}^{\infty} du_3 f_{u_1, u_3}(u_1, u_3) \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{u_{20} - \mu_{2/1,3}}{\sqrt{2} \sigma_{2/1,3}} \right) \right) \quad (4.9)$$

όπου:

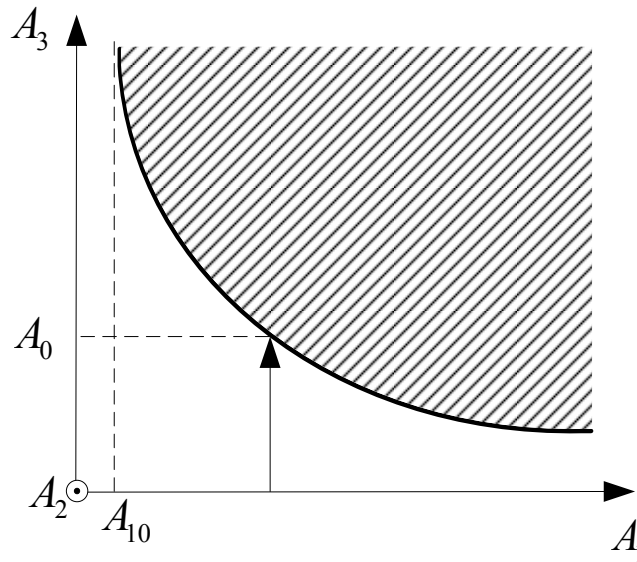
$$\begin{cases} u_{j0} = (\ln A_{j0} - \ln A_{m_j}) / S_{a_j}, (j = 1, 2) \\ u_0 = (\ln A_0 - \ln A_{m_3}) / S_{a_3} \end{cases} \quad (4.10)$$



Στην εξίσωση (4.9),  $f_{u_1, u_3}$  είναι η διδιάστατη κανονική κατανομή [Papoulis91], ενώ οι παράμετροι  $\mu_{2/1,3}, \sigma_{2/1,3}$ , που ορίζονται στο Παράρτημα Α, δίνονται από τους τύπους:

$$\begin{cases} \mu_{2/1,3} = \frac{\rho_{n_{12}} - \rho_{n_{13}}\rho_{n_{23}}}{1 - \rho_{n_{13}}^2} u_1 + \frac{\rho_{n_{23}} - \rho_{n_{12}}\rho_{n_{13}}}{1 - \rho_{n_{13}}^2} u_3 \\ \sigma_{2/1,3} = \sqrt{\frac{1 - \rho_{n_{12}}^2 - \rho_{n_{13}}^2 - \rho_{n_{23}}^2 + 2\rho_{n_{12}}\rho_{n_{13}}\rho_{n_{23}}}{1 - \rho_{n_{13}}^2}} \end{cases} \quad (4.11)$$

Στους παραπάνω τύπους οι συντελεστές συσχέτισης  $\rho_{n_{ij}}$  ( $i, j = 1, 2, 3, i \neq j$ ) ορίζονται στην παράγραφο 4.2.1. Όπως φαίνεται από τον πρώτο όρο των δύο κλάδων της σχέσης (4.4) και από τον πρώτο όρο των εξισώσεων (4.5) και (4.9), η επίδοση του πρωτόκολλου συνεργατικής διαφορικότητας FR περιορίζεται από την επίδοση της ζεύξης μεταξύ κόμβου εκπομπής S και επαναλήπτη R, καθώς απαιτείται από τον επαναλήπτη να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς το λαμβανόμενο σήμα.



Σχήμα 4.2: Ενδεχόμενο αποκοπής για την τεχνική MRC και για  $A_2 < A_{20}$ .

#### 4.2.4. Πιθανότητα αποκοπής συστήματος Επιλεγόμενης Επανάληψης

Για να ξεπεραστεί το μειονέκτημα ότι η επίδοση του πρωτοκόλλου FR περιορίζεται από την επίδοση της ζεύξης μεταξύ κόμβου εκπομπής S και επαναλήπτη R, προτείνεται το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης (Selection Relaying - SR). Σε αυτήν την περίπτωση, αν ο επαναλήπτης αποτύχει να αποκωδικοποιήσει σωστά το σήμα που εκπέμπεται από τον κόμβο S, δεν εκπέμπει προς τον κόμβο λήψης D ο οποίος λαμβάνει μόνο το σήμα του κόμβου S μέσω της απευθείας ζεύξης [Laneman04]. Επιπλέον, αν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TDMA/FDMA ταυτόχρονα με την τεχνική MRC και ο επαναλήπτης αποτύχει να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα, το δεύτερο χρονικό/συχνотικό παράθυρο, που αρχικά προοριζόταν για να επανεκπέμψει ο επαναλήπτης, μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί από τον κόμβο εκπομπής S για να επανεκπέμψει το ίδιο σήμα προς τον κόμβο λήψης D μέσω της απευθείας ζεύξης. Για να επιτευχθεί αυτό, το συνεργατικό σύστημα πρέπει να χρησιμοποιεί ανάδραση (feedback), έτσι ώστε ο κόμβος S να ενημερωθεί ότι ο επαναλήπτης απέτυχε να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος CNR που λαμβάνει ο κόμβος D από τον κόμβο S, μπορεί να διπλασιαστεί σε γραμμική κλίμακα, θεωρώντας ότι η απόσβεση της βροχής παραμένει σταθερή σε δύο συνεχόμενα χρονικά/συχνотικά παράθυρα.

Ο συνολικός σηματοθρομβικός λόγος  $CNR_{t,r}(dB)$ , που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής της σχέσης (4.1), δίνεται για τις τεχνικές SC και MRC αντίστοιχα από:

$$CNR_{t,r}^{SC} = \begin{cases} CNR_{1,r}, \text{για } CNR_{2,r} < CNR_{th} \\ \max(CNR_{1,r}, CNR_{3,r}), \text{για } CNR_{2,r} \geq CNR_{th} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$CNR_{t,r}^{MRC} = \begin{cases} CNR'_{1,r}, \text{για } CNR_{2,r} < CNR_{th} \\ 10 \log(10^{CNR_{1,r}/10} + 10^{CNR_{3,r}/10}), \text{για } CNR_{2,r} \geq CNR_{th} \end{cases} \quad (4.13)$$

όπου:

$$CNR'_{1,r} = \begin{cases} CNR_{1,r}, \text{για SDMA} \\ CNR_{1,r} + 10 \log(2), \text{για TDMA/FDMA} \end{cases} \quad (4.14)$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια ανάλυση με την περίπτωση του πρωτοκόλλου FR, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω σχέσεις και επιπλέον τις σχέσεις (4.2) και (4.3), η πιθανότητα αποκοπής της (4.1) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \int_{A'_{10}}^{\infty} dA_1 \int_{A_{20}}^{\infty} dA_2 f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) + \int_{A'_{10}}^{\infty} dA_1 \int_{A_0}^{\infty} dA_3 \int_0^{A_{20}} dA_2 f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3) \quad (4.15)$$

Στην παραπάνω έκφραση,  $f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3)$  και  $f_{A_1, A_2}(A_1, A_2)$  είναι η τρισδιάστατη και διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή (Παράρτημα Α), τα όρια  $A_{j0}$  ( $j=1,2,3$ ) και  $A_0$  δίνονται από τις (4.7) και (4.8) αντίστοιχα, ενώ το όριο  $A'_{10}$  υπολογίζεται ως:

$$A'_{10} = \begin{cases} A_{10}, & \text{για MRC SDMA ή για SC} \\ A_{10} + 10 \log(2), & \text{για MRC TDMA/FDMA} \end{cases} \quad (4.16)$$

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό της (4.6) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91], η πιθανότητα αποκοπής της (4.15) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \int_{u'_{10}}^{\infty} du_1 f_{u_1}(u_1) \operatorname{erfc} \left( \frac{u_{20} - \rho_{n12} u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_{n12}^2)}} \right) + \int_{u'_{10}}^{\infty} du_1 \int_{u_0}^{\infty} du_3 f_{u_1, u_3}(u_1, u_3) \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{u_{20} - \mu_{2/1,3}}{\sqrt{2}\sigma_{2/1,3}} \right) \right) \quad (4.17)$$

Στην παραπάνω έκφραση,  $f_{u_1, u_3}(u_1, u_3)$  και  $f_{u_1}(u_1)$  είναι η διδιάστατη και η μονοδιάστατη κανονική κατανομή αντίστοιχα (Παράρτημα Α), τα  $u_{j0}$  ( $j=1,2$ ),  $u_0$ ,  $\mu_{2/1,3}$ ,  $\sigma_{2/1,3}$  δίνονται από τις (4.10) και (4.11) αντίστοιχα, ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_{n12}$  ορίζεται στην παράγραφο 4.2.1, ενώ ισχύει:

$$u'_{10} = (\ln A'_{10} - \ln A_{m1}) / S_{a1} \quad (4.18)$$

Όπως είναι εμφανές από την παραπάνω ανάλυση για το SR συνεργατικό σύστημα, το ενδεχόμενο αποκοπής προκύπτει όταν οι λόγοι CNR που αναφέρονται σε τουλάχιστον δύο ζεύξεις του συστήματος έχουν ταυτοχρόνως μικρές τιμές.

Η πιθανότητα αποκοπής για το SR σύστημα μπορεί εναλλακτικά να υπολογιστεί θεωρώντας αρχικά τον ισοδύναμο CNR λόγο του διβηματικού συστήματος και στη συνέχεια συνδυάζοντάς τον με το CNR λόγο της απευθείας ζεύξης [Sakarellos09b]. Για έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, σύμφωνα με την ανάλυση του 3<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, ο ισοδύναμος λόγος CNR που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής ενός διβηματικού συστήματος είναι ο ελάχιστος CNR λόγος των δύο βημάτων [Sakarellos10a]:

$$CNR_{23,r} = \min(CNR_{2,r}, CNR_{3,r}) \quad (4.19)$$

Αν ο κόμβος λήψης D συνδυάζει το απευθείας σήμα με αυτό που λαμβάνει μέσω του επαναλήπτη χρησιμοποιώντας την τεχνική SC, τότε ο συνολικός λόγος CNR που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής του συνεργατικού συστήματος δίνεται από την έκφραση [Sakarellos09b]:

$$CNR_{t,r}^{SC} = \max(CNR_{1,r}, CNR_{23,r}) = \begin{cases} \max(CNR_{1,r}, CNR_{2,r}), CNR_{2,r} < CNR_{3,r} \\ \max(CNR_{1,r}, CNR_{3,r}), CNR_{3,r} < CNR_{2,r} \end{cases} \quad (4.20)$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια ανάλυση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως:

$$P_{out} = \int_{A_0}^{\infty} dA_1 \int_{A_2}^{\infty} dA_2 \int_0^{A_3(A_2)} dA_3 f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3) + \int_{A_0}^{\infty} dA_1 \int_{A_3}^{\infty} dA_3 \int_0^{A_2(A_3)} dA_2 f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3) \quad (4.21)$$

Στην παραπάνω έκφραση, τα όρια  $A_{j0}$  ( $j=1, 2, 3$ ) δίνονται από την (4.7), ενώ:

$$\begin{cases} A_3(A_2) = CNR_{3,cs} - CNR_{2,cs} + A_2 \\ A_2(A_3) = CNR_{2,cs} - CNR_{3,cs} + A_3 \end{cases} \quad (4.22)$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος της (4.21) αντιστοιχούν στον πρώτο και δεύτερο κλάδο της (4.20). Επίσης, η (4.21) υπολογίζεται ακριβώς όπως και οι αντίστοιχες σχέσεις των προηγούμενων περιπτώσεων, δηλαδή χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό της (4.6) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που η σχέση (4.21) είναι διαφορετική σε μορφή από την (4.15) εκφράζουν το ίδιο ενδεχόμενο αποκοπής καθώς αντιστοιχούν στον ίδιο όγκο ολοκλήρωσης. Επομένως, ο αριθμητικός υπολογισμός της (4.21) δίνει τα ίδια αποτελέσματα με τον αριθμητικό υπολογισμό της (4.15) (και κατά συνέπεια της (4.17)). Εφαρμόζοντας αυτήν τη μεθοδολογία μπορεί να προκύψει αντίστοιχος τύπος και για την τεχνική MRC, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση και για το πρωτόκολλο TDMA/FDMA, το συνεργατικό σύστημα δεν χρησιμοποιεί ανάδραση (feedback), δηλαδή ο κόμβος S δεν επανεκπέμπει το ίδιο σήμα στο κενό χρονικό/συχνотικό παράθυρο αν ο επαναλήπτης αποτύχει να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα.

#### 4.2.5. Ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία

Για να συγκριθεί η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης με ένα ισοδύναμο σύστημα απευθείας

ζεύξης που καταναλώνει την ίδια ενέργεια ανά σύμβολο και το ίδιο φάσμα με το συνεργατικό σύστημα, πρέπει να εφαρμοστούν ενεργειακοί και φασματικοί περιορισμοί. Η συνολική ενέργεια ανά εκπεμπόμενο σύμβολο τόσο στο πρωτόκολλο TDMA/FDMA όσο και στο πρωτόκολλο SDMA, είναι το άθροισμα της εκπεμπόμενης ενέργειας από τους κόμβους S και R που καταναλώνεται σε κάθε παράθυρο πολλαπλής πρόσβασης:

$$E_{total}(J) = 10^{P_1/10} t_s + 10^{P_3/10} t_s \quad (4.23)$$

όπου  $t_s$  (sec) είναι η διάρκεια του κάθε παράθυρου πολλαπλής πρόσβασης.

Όλα τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης καταναλώνουν την ίδια ενέργεια ανά εκπεμπόμενο σύμβολο. Η ισοδύναμη απευθείας ζεύξη καταναλώνει ενέργεια  $E_{DL} = 10^{P_{DL}/10} t_s$  ανά εκπεμπόμενο σύμβολο, η οποία πρέπει να είναι ίση με την (4.23) για λόγους ισοδυναμίας. Επομένως, η ισχύς εκπομπής  $P_{DL}$  (dBW) της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης προκύπτει:

$$P_{DL} = 10 \log(10^{P_1/10} + 10^{P_3/10}) \quad (4.24)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ορισμός της παραπάνω σχέσης προϋποθέτει ότι ο επαναλήπτης επανεκπέμπει το λαμβανόμενο σήμα. Κατά το πρωτόκολλο SR και αν ο επαναλήπτης δεν αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα, στην περίπτωση MRC TDMA/FDMA ενός συστήματος με ανάδραση στο δεύτερο χρονικό/συχνотικό παράθυρο αντί του επαναλήπτη επανεκπέμπει για δεύτερη φορά ο κόμβος S, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις του πρωτόκολλου SR κανένας κόμβος δεν εκπέμπει σε αυτό το παράθυρο. Παρόλα αυτά όμως, η προϋπόθεση της (4.24) αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου για πρακτικές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επομένως, η (4.24) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο ενεργειακής ισοδυναμίας για όλες τις περιπτώσεις του πρωτόκολλου SR, συμπεριλαμβανομένων και των δύο ενδεχόμενων επιτυχημένης και αποτυχημένης αποκωδικοποίησης στον επαναλήπτη.

Όπως έχει περιγραφεί προηγουμένως, τα πρωτόκολλα TDMA και FDMA δεσμεύουν δύο παράθυρα πολλαπλής πρόσβασης. Για να ενσωματωθεί αυτή η αναποτελεσματικότητα στον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής και να εξασφαλιστεί φασματική ισοδυναμία μεταξύ των διάφορων πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης και της απευθείας ζεύξης, ορίζεται η στάθμη  $CNR_{th, norm}$  που είναι κανονικοποιημένη ως προς το

ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Για το σκοπό αυτό, η έκφραση (4.1) μπορεί να ξαναγραφτεί με όρους χωρητικότητας αποκοπής, δηλαδή ως η πιθανότητα ότι η συνολική χωρητικότητα  $C$  (bits / (Hz · sec)) στον κόμβο D δεν υπερβαίνει μία συγκεκριμένη στάθμη  $C_{th}$ :

$$P_{out} = P(C < C_{th}) \quad (4.25)$$

Η κανονικοποιημένη ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων πιθανότητα αποκοπής για τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA υπολογίζεται κατά τα γνωστά, ως εξής:

$$P_{out} = P\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + 10^{CNR_{t,r}/10}) < \log_2(1 + 10^{CNR_{th,norm}/10})\right) \quad (4.26)$$

Απλοποιώντας την (4.26) και συγκρίνοντας με την (4.1), η στάθμη  $CNR_{th}$  μπορεί να αντικατασταθεί από την κανονικοποιημένη στάθμη  $CNR_{th,norm}$ , έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη φασματική ισοδυναμία μεταξύ των διαφορετικών πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης:

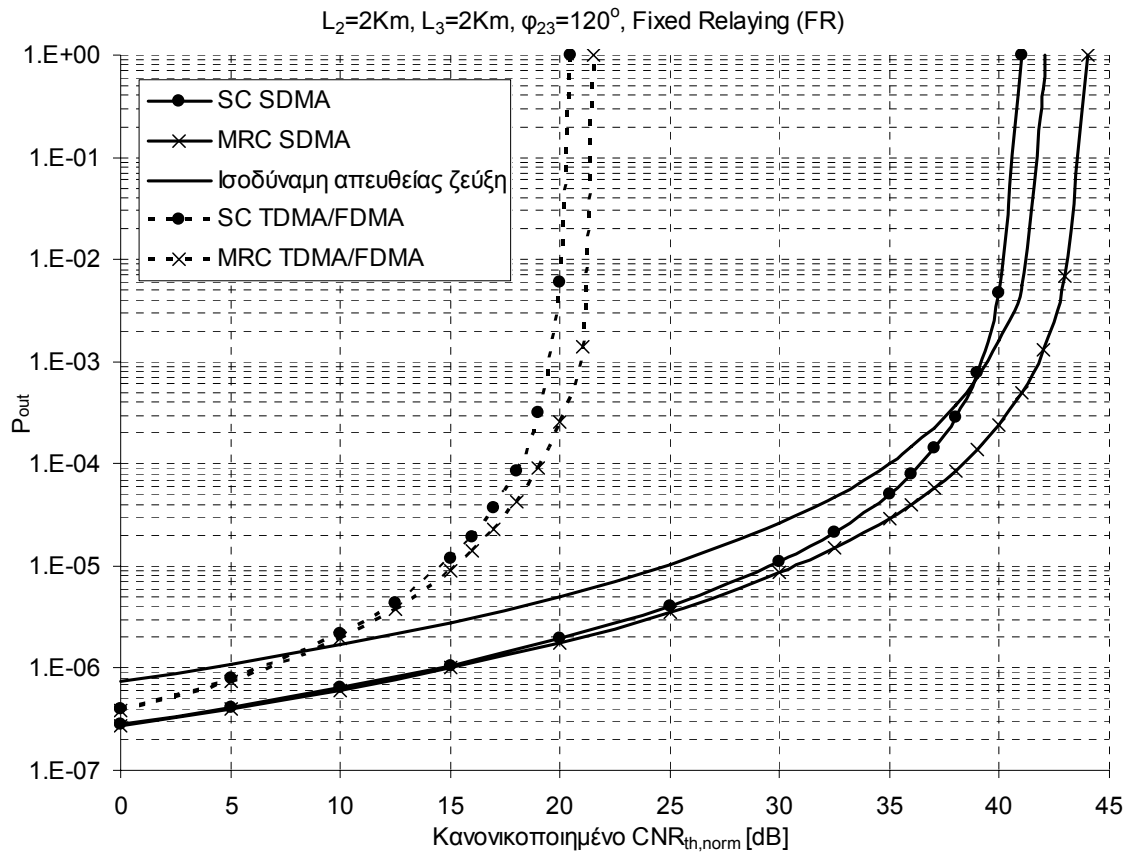
$$CNR_{th} = \begin{cases} 10 \log(10^{2 \cdot CNR_{th,norm}/10} + 2 \cdot 10^{CNR_{th,norm}/10}), & \text{για TDMA/FDMA} \\ CNR_{th,norm} & \text{,για SDMA} \end{cases} \quad (4.27)$$

#### 4.2.6. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Σε αυτήν την παράγραφο, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για την πιθανότητα αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις (4.9) και (4.17). Οι τελικές αυτές εκφράσεις υπολογίζονται εύκολα αριθμητικά και συγκλίνουν γρήγορα καθώς η έκφραση (4.9) και ο δεύτερος όρος της (4.17) χαρακτηρίζονται από ημίαιρα διαστήματα ολοκλήρωσης και η ολοκληρωτέα συνάρτηση αποτελείται από το γινόμενο της μονότονης, συνεχούς και θετικής συνάρτησης  $f_{u_1, u_3}(u_1, u_3)$  και μιας συνάρτησης που αυξάνει αυστηρά από το 0 μέχρι το 1, ενώ η ολοκληρωτέα συνάρτηση του πρώτου όρου της (4.17) είναι μια γνησίως φθίνουσα συνάρτηση. Πιο συγκεκριμένα, αντικαθιστώντας το άπειρο όριο με έναν κατάλληλο θετικό αριθμό επιτυγχάνεται η επιθυμητή αριθμητική ακρίβεια για την πιθανότητα αποκοπής. Η τιμή 10 για αυτόν τον αριθμό αποδείχτηκε ότι εξασφαλίζει την επιθυμητή ακρίβεια για όλα τα ακολουθούμενα αριθμητικά αποτελέσματα και επίσης έχει προταθεί σε μία παρόμοια έκφραση για την πολλαπλή διαφορική λήψη [Skraparlis09b].

Για δίκαιη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης και μιας ισοδύναμης απευθείας ζεύξης, χρησιμοποιούνται οι εκφράσεις (4.24) και (4.27) που εξασφαλίζουν ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία. Εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά, θεωρείται ένα συνεργατικό σύστημα που λειτουργεί στην Αθήνα ( $37.58^\circ$  N,  $23.43^\circ$  E). Οι τιμές των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης είναι  $(R_m, S_r) = (0.03147, 1.6877)$ . Για τις υπόλοιπες παραμέτρους χρησιμοποιούνται οι τυπικές τιμές [IEEE 802.16.2-2004]: συχνότητα λειτουργίας  $f = 26\text{GHz}$ , κάθετη πόλωση και τιμές των παραμέτρων των πομποδεκτών της κάθε ζεύξης:  $G_{j,tr} = 19\text{dBi}$ ,  $G_{j,rec} = 34\text{dBi}$ ,  $T_j = 300^\circ\text{K}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) και  $B = 28\text{MHz}$ .

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει την πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος, που χρησιμοποιεί είτε το πρωτόκολλο TDMA/FDMA είτε το πρωτόκολλο SDMA, συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης  $CNR_{th,norm}$  για τις συνδυαστικές τεχνικές SC και MRC. Η επίδοση μιας ισοδύναμης απευθείας ζεύξης απεικονίζεται επίσης για λόγους σύγκρισης. Οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων είναι:  $L_2 = L_3 = 2\text{Km}$  και  $\phi_{23} = 120^\circ$ , ενώ η ισχύς εκπομπής του σήματος πληροφορίας της κάθε ζεύξης είναι:  $P_1 = P_2 = -10\text{dBW}$  και  $P_3 = -15\text{dBW}$ . Οι τιμές αυτές, λαμβάνοντας υπόψη την (4.2), καταλήγουν σε:  $CNR_{1,cs} = 40.8\text{dB}$ ,  $CNR_{2,cs} = 45.6\text{dB}$  και  $CNR_{3,cs} = 40.6\text{dB}$ , που σημαίνει ότι ο λόγος CNR σε συνθήκες καθαρού ουρανού της ζεύξης κόμβου S – επαναλήπτη R, που κυρίως επηρεάζει την επίδοση του πρωτόκολλου FR όπως φαίνεται και από τη θεωρητική ανάλυση, είναι μεγαλύτερος από τους λόγους CNR σε συνθήκες καθαρού ουρανού των άλλων ζεύξεων.



Σχήμα 4.3: Πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος και σύγκριση με μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3, το πρωτόκολλο SDMA έχει καλύτερη επίδοση από τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA, αλλά για μικρές τιμές της πιθανότητας αποκοπής η επίδοση όλων των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης είναι παρόμοια. Η περίπτωση MRC SDMA έχει καλύτερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για όλες τις τιμές  $CNR_{th, norm}$ . Η περίπτωση SC SDMA παρουσιάζει επίσης καλύτερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για όλες σχεδόν τις τιμές  $CNR_{th, norm}$ , εκτός από μη πρακτικές τιμές της πιθανότητας αποκοπής (μεγαλύτερες από  $10^{-3}$ , χαμηλής διαθεσιμότητας ασύρματα δίκτυα). Επομένως, αυτό το Σχήμα παρουσιάζει το κέρδος των τεχνικών συνεργατικής διαφορικότητας, δηλαδή το CNR κέρδος σε σχέση με την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για μια συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής. Αυτό το CNR κέρδος είναι μεγαλύτερο για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής για όλα τα

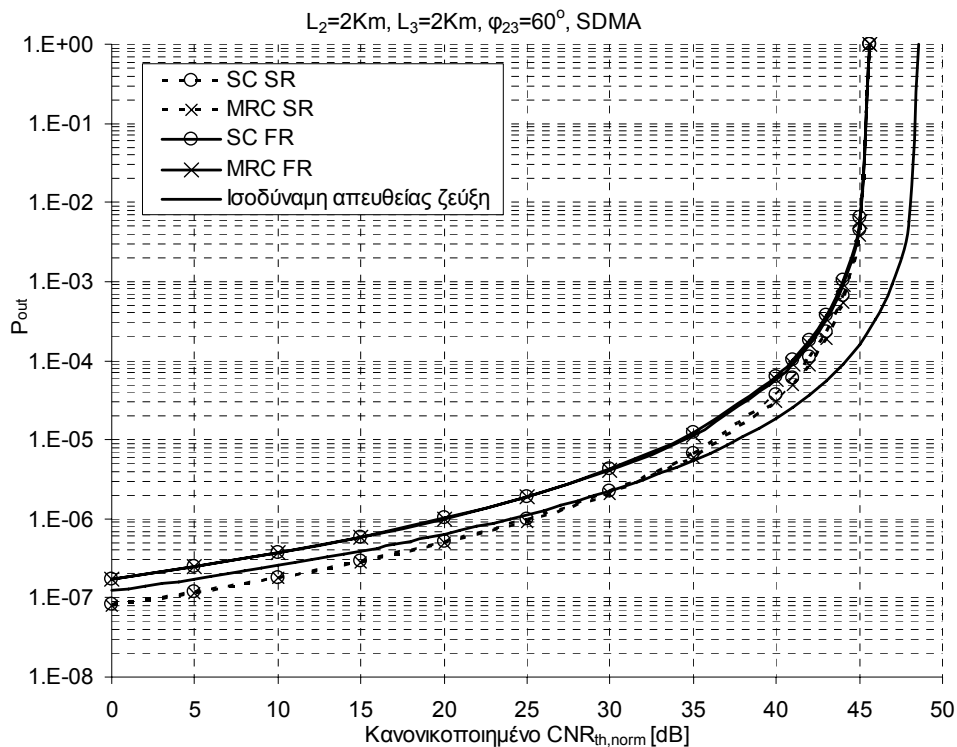


πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης και για όλες τις συνδυαστικές τεχνικές. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει μία ευρεία περιοχή τιμών  $CNR_{th,norm}$  που η απευθείας ζεύξη έχει καλύτερη επίδοση από τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA, αλλά όταν απαιτείται υψηλή διαθεσιμότητα, ένα συνεργατικό σύστημα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ακόμα και στην περίπτωση TDMA/FDMA. Αυτές οι CNR περιοχές όπου τα διαφορετικά πρωτόκολλα ή η απευθείας ζεύξη έχουν καλύτερη επίδοση, εξαρτώνται από τη γεωμετρική διάταξη του συστήματος, δηλαδή από τη θέση του επαναλήπτη, καθώς και από το λόγο των εκπεμπόμενων ισχυών του κόμβου εκπομπής S και του επαναλήπτη R. Επιπροσθέτως, είναι εμφανές ότι οι τεχνικές SC και MRC έχουν την ίδια επίδοση για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής για όλα τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης, αλλά για υψηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής η τεχνική MRC παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την τεχνική SC. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το συνεργατικό πρωτόκολλο SR (που δεν παρουσιάζεται σε αυτό το Σχήμα) έχει την ίδια επίδοση με το πρωτόκολλο FR για τη συγκεκριμένη γεωμετρική διάταξη, καθώς η μεγάλη τιμή του λόγου CNR της ζεύξης, κόμβος S – επαναλήπτης R, δεν περιορίζει την επίδοση του πρωτόκολλου FR.

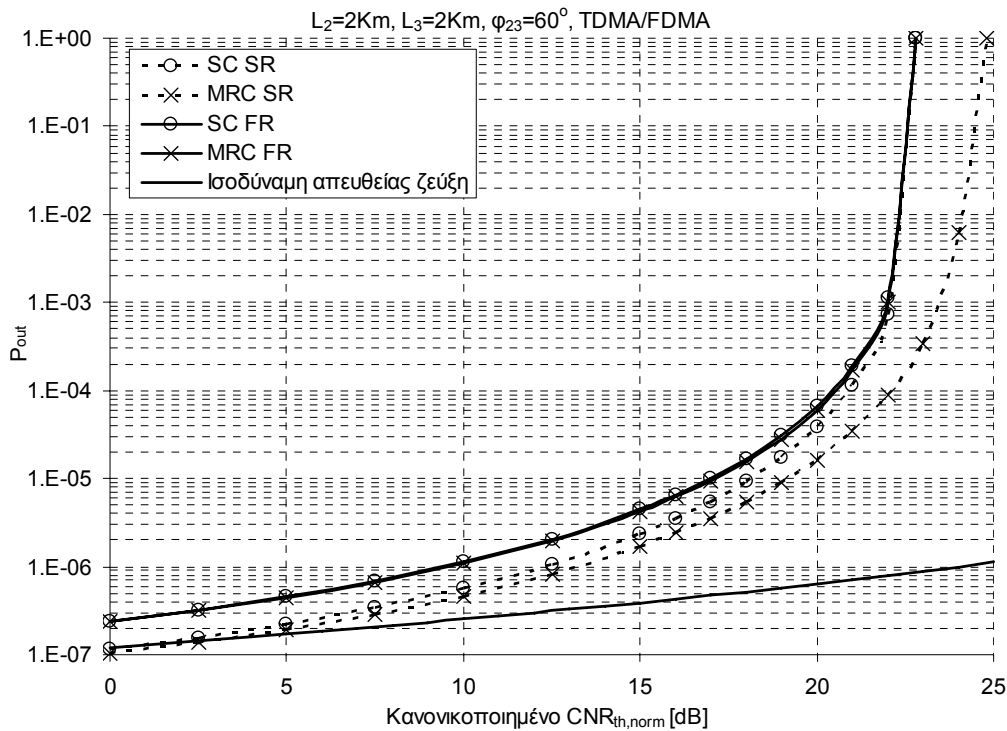
Στα Σχήματα 4.4 και 4.5, η επίδοση ενός FR συνεργατικού συστήματος συγκρίνεται με ένα αντίστοιχο SR σύστημα, καθώς και με μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη, για τις περιπτώσεις των πρωτόκολλων SDMA και TDMA/FDMA αντίστοιχα. Οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων είναι:  $L_2 = L_3 = 2Km$  και  $\phi_{23} = 60^\circ$ , ενώ η εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος πληροφορίας της κάθε ζεύξης είναι:  $P_j = -10dBW, (j=1,2,3)$ . Αυτές οι τιμές, λαμβάνοντας υπόψη την (4.2), καταλήγουν σε:  $CNR_{j,cs} = 45.6dB$ , δηλαδή ο λόγος CNR σε συνθήκες καθαρού ουρανού της ζεύξης μεταξύ του κόμβου S και του επαναλήπτη, στην περίπτωση αυτή έχει την ίδια τιμή με τους αντίστοιχους λόγους των άλλων ζεύξεων, σε αντίθεση με το Σχήμα 4.3.

Όπως φαίνεται από αυτά τα Σχήματα, οι τεχνικές SC και MRC έχουν την ίδια επίδοση, εκτός από την περίπτωση SR TDMA/FDMA, καθώς η επίδοση του συνεργατικού συστήματος περιορίζεται από την τιμή του λόγου CNR της ζεύξης μεταξύ του κόμβου S και του επαναλήπτη, με αποτέλεσμα να μειώνεται το αναμενόμενο MRC κέρδος. Στην περίπτωση SR TDMA/FDMA, η τεχνική MRC παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την τεχνική SC ιδιαίτερα για υψηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής, καθώς στην περίπτωση

MRC το δεύτερο χρονικό/συχνотικό παράθυρο χρησιμοποιείται από τον κόμβο εκπομπής S για να επανεκπέμψει το ίδιο σήμα απευθείας στον κόμβο λήψης D όταν ο επαναλήπτης αποτυγχάνει να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα (εκφράσεις (4.13)-(4.14)). Επιπλέον, το πρωτόκολλο SR παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από το πρωτόκολλο FR για κάθε πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης. Αυτό το CNR κέρδος είναι μεγαλύτερο για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επιπροσθέτως, το πρωτόκολλο FR εμφανίζει χειρότερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για όλα τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης, ενώ το πρωτόκολλο SR έχει καλύτερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Η διαφορά στην επίδοση μεταξύ των πρωτοκόλλων FR και SR προέρχεται από τις σχετικές τιμές των λόγων CNR της ζεύξης κόμβου S – επαναλήπτη και των άλλων επιμέρους ζεύξεων. Η σχετική επίδοση μεταξύ του συνεργατικού συστήματος και της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης έχει υποβαθμιστεί σε σύγκριση με το Σχήμα 4.3 και για τα δύο πρωτόκολλα FR και SR (ειδικά για την τεχνική MRC), αλλά το πρωτόκολλο FR επηρεάζεται περισσότερο από την τιμή του λόγου CNR της ζεύξης κόμβου S – επαναλήπτη, που περιορίζει την επίδοση του FR συστήματος, όπως αναμένεται από τη θεωρητική ανάλυση.

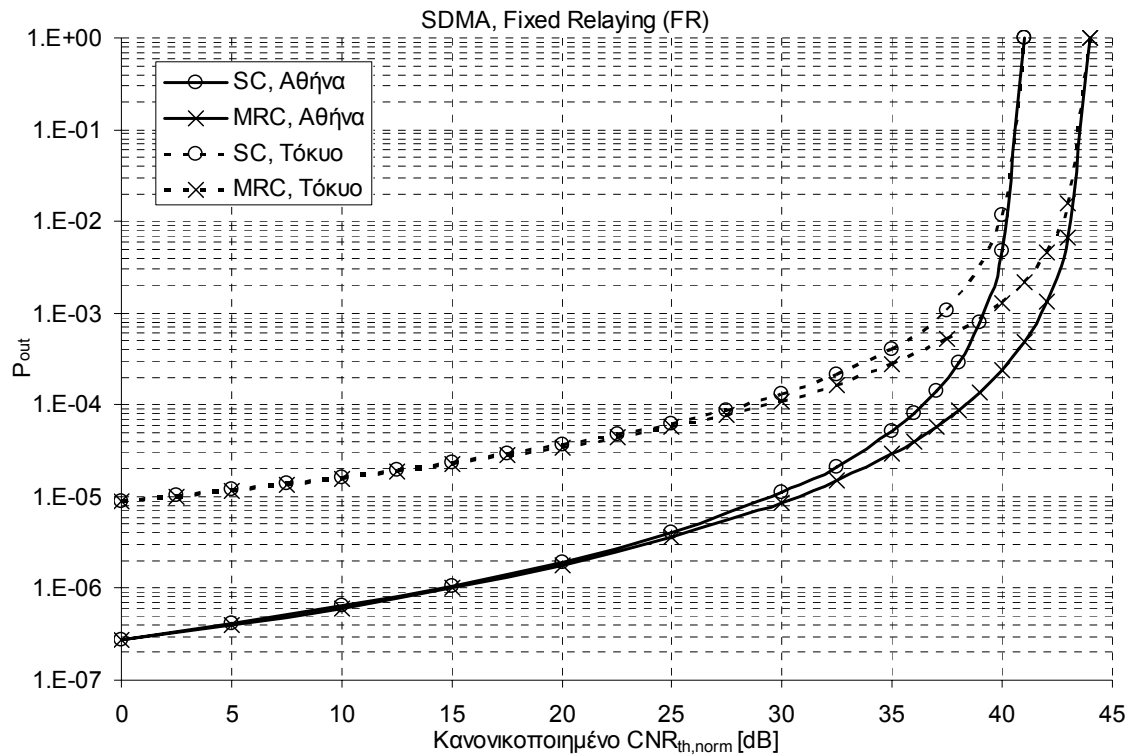


Σχήμα 4.4: Πιθανότητα αποκοπής των FR και SR συνεργατικών συστημάτων με SDMA.



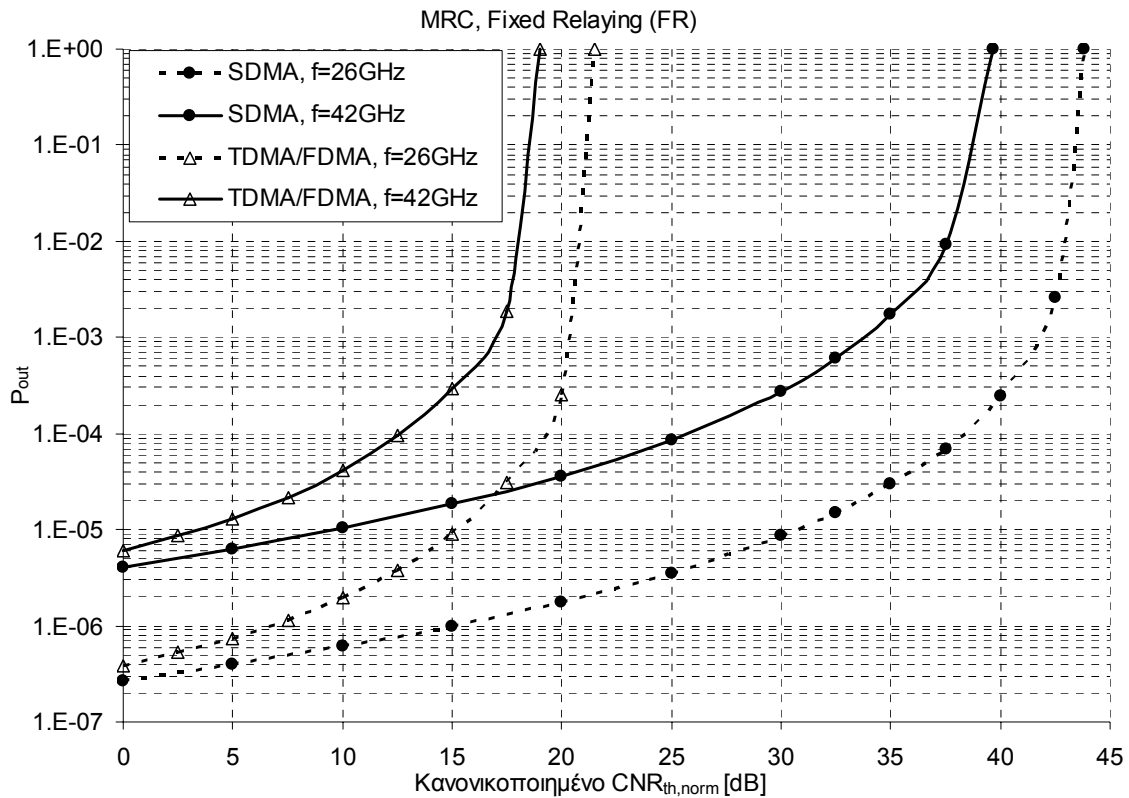
Σχήμα 4.5: Πιθανότητα αποκοπής των FR και SR συνεργατικών συστημάτων με TDMA/FDMA.

Σημειώνεται ότι το προτεινόμενο μοντέλο για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περιοχή της γης χρησιμοποιώντας τις τοπικές τιμές των λογαριθμοκανονικών παραμέτρων του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης. Το Σχήμα 4.6 απεικονίζει την πιθανότητα αποκοπής δύο συνεργατικών συστημάτων FR SDMA που χρησιμοποιούν είτε την τεχνική MRC είτε την τεχνική SC και λειτουργούν στην Αθήνα και στο Τόκυο ( $35.40^\circ \text{ N}, 139.45^\circ \text{ E}$ ) αντίστοιχα. Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων της λογαριθμοκανονικής κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης για το Τόκυο είναι  $(R_m, S_r) = (0.02669, 1.9893)$ , ενώ οι τιμές των άλλων παραμέτρων είναι ίδιες με αυτές του Σχήματος 4.3. Είναι εμφανές ότι η επίδοση του συνεργατικού συστήματος υποβαθμίζεται σημαντικά όταν αυτό θεωρείται ότι λειτουργεί στο Τόκυο συγκρινόμενο με το σύστημα που θεωρείται ότι λειτουργεί στην Αθήνα. Αυτή η υποβάθμιση είναι σημαντικότερη όταν απαιτείται μεγαλύτερη διαθεσιμότητα, δηλαδή για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής.



Σχήμα 4.6: Πιθανότητα αποκοπής δύο συνεργατικών συστημάτων FR SDMA που λειτουργούν σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Σημαντικό ρόλο όμως στην επίδοση ενός συνεργατικού συστήματος παίζει και η μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας. Στο Σχήμα 4.7, παρουσιάζεται η πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος που χρησιμοποιεί την τεχνική MRC και είτε τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA είτε το πρωτόκολλο SDMA και λειτουργεί στην Αθήνα με δύο διαφορετικές συχνότητες  $f = 26GHz$  και  $f = 42GHz$ . Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι ίδιες με αυτές του Σχήματος 4.3. Καθώς η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται, η επίδοση του συστήματος υποβαθμίζεται ανεξαρτήτως του πρωτόκολλου πολλαπλής πρόσβασης, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να προκύψουν και για ένα σύστημα SR ή για την τεχνική SC.



Σχήμα 4.7: Πιθανότητα αποκοπής ενός FR συνεργατικού συστήματος που λειτουργεί με δύο διαφορετικές συχνότητες.

### 4.3. Επίδοση συνεργατικών συστημάτων που υποφέρουν από διαλείψεις λόγω σκίασης

#### 4.3.1. Μοντελοποίηση του συστήματος

Σε αυτήν την παράγραφο, παρουσιάζεται η επίδοση ενός συνεργατικού συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω σκίασης και χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης [Sakarellos10c]. Σημειώνεται ότι η επίδοση του πρωτόκολλου Σταθερής Επανάληψης για το συγκεκριμένο σύστημα έχει μελετηθεί στη δημοσίευση [Skraparlis09a]. Όταν ο σηματοθορυβικός λόγος της ζεύξης κόμβου εκπομπής – επαναλήπτη είναι μικρότερος από μία συγκεκριμένη στάθμη, το θεωρούμενο σύστημα λειτουργεί ως μία απευθείας ζεύξη μεταξύ του κόμβου εκπομπής και του κόμβου λήψης. Το συνεργατικό σύστημα θεωρείται ότι δεν χρησιμοποιεί ανάδραση (feedback), δηλαδή ο

κόμβος εκπομπής δεν επανεκπέμπει το ίδιο σήμα στο κενό χρονικό/συχνοτικό παράθυρο αν ο επαναλήπτης αποτύχει να αποκωδικοποιήσει το λαμβανόμενο σήμα στην περίπτωση MRC TDMA/FDMA. Επίσης, το ενδεχόμενο αποκοπής αυτού του συστήματος εκφράζεται ακολουθώντας διαφορετική μεθοδολογία από τη δημοσίευση [Laneman04], όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο για την περίπτωση των διαλείψεων λόγω βροχής.

Η γεωμετρία του θεωρούμενου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Ο κόμβος λήψης D συνδυάζει το λαμβανόμενο σήμα από τον κόμβο εκπομπής S μέσω της απευθείας ζεύξης με το σήμα που λαμβάνει μέσω του αναγεννητικού επαναλήπτη R (διβηματική μετάδοση). Οι συνδυαστικές τεχνικές που χρησιμοποιεί ο κόμβος λήψης είναι και πάλι οι τεχνικές MRC και SC [Stuber01]. Επίσης, το συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης TDMA/FDMA ή SDMA, όπως αυτά έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του Κεφαλαίου αλλά και στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Στο Σχήμα 4.8, τα μήκη των ζεύξεων  $j$  ( $j=1,2,3$ ) συμβολίζονται με  $L_j(m)$ , ενώ οι ζεύξεις  $i, j$  ( $i, j=1,2,3, i \neq j$ ) σχηματίζουν γωνία  $\phi_{ij}$  (deg) με  $\phi_{ij} = \phi_{ji}$ . Ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος της ζεύξης  $j$  ( $j=1,2,3$ ) δίνεται σε γραμμική κλίμακα από:

$$\gamma_j = \frac{1}{N_0} P_{Txj} w_j \quad (4.28)$$

όπου  $N_0$  είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου σε γραμμική κλίμακα (στη συνέχεια θεωρείται ίση με 1 χωρίς να χάνεται η γενικότητα της ανάλυσης),  $P_{Txj}$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς της ζεύξης  $j$  και  $w_j$  είναι η λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την απόσβεση λόγω σκίασης με παραμέτρους (σε Neper):

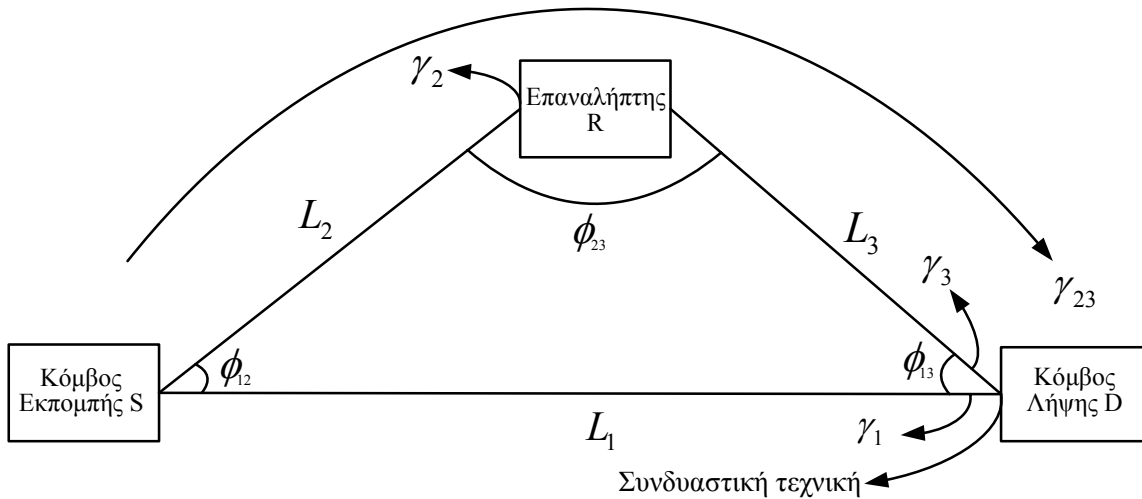
$$(\mu_{w_j}, \sigma_j) = (-\ln(PL_j), \sigma_j) \quad (4.29)$$

όπου  $PL_j$  είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου της ζεύξης  $j$  εκφρασμένες σε γραμμική κλίμακα και  $\sigma_j$  είναι η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής της απόσβεσης λόγω σκίασης (τυπικές τιμές για διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης δίνονται στο [IEEE 802.16j-2007]).

Ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος είναι επομένως μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή με παραμέτρους (σε Neper):

$$(\mu_j, \sigma_j) = \left( \left( \ln(P_{Txj}) + \mu_{w_j} \right), \sigma_j \right) \quad (4.30)$$

όπου η μέση τιμή  $\mu_{w_j}$  δίνεται από την (4.29). Οι παράμετροι της κατανομής, που εκφράζονται σε Neper, μπορούν επίσης να εκφραστούν σε dB χρησιμοποιώντας τη σχέση  $1Np = \xi dB = 10 / \ln(10) dB$ . Επιπλέον, οι λογαριθμοκανονικές τυχαίες μεταβλητές  $\gamma_j (j=1,2,3)$  θεωρούνται ότι είναι συσχετισμένες και ακολουθούν την τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ . Τέλος, ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος  $\gamma_{23}$  εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής του διβηματικού συστήματος από τον κόμβο S μέχρι τον κόμβο D μέσω του επαναλήπτη R.



Σχήμα 4.8: Γεωμετρική διάταξη του συνεργατικού συστήματος.

#### 4.3.2. Πιθανότητα αποκοπής συστήματος Επιλεγόμενης Επανάληψης

Το αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που ο συνολικός λόγος  $\gamma_c$  δεν υπερβαίνει μία συγκεκριμένη στάθμη  $\gamma_{th}$ :

$$P_{out} = P(\gamma_c < \gamma_{th}) \quad (4.31)$$

Ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής του διβηματικού συστήματος με αναγεννητικό επαναλήπτη, σύμφωνα με το 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο είναι:

$$\gamma_{23} = \min(\gamma_2, \gamma_3) \quad (4.32)$$

Αν χρησιμοποιείται η τεχνική SC, ο κόμβος λήψης D επιλέγει το λαμβανόμενο σήμα, από την απευθείας ζεύξη και το διβηματικό σύστημα, με το μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο. Χρησιμοποιώντας την (4.32), ο τελικός λόγος  $\gamma_C = \gamma_{SC}$  που εκφράζει το ενδεχόμενο της πιθανότητας (4.31), δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{SC} = \max(\gamma_1, \gamma_{23}) = \begin{cases} \max(\gamma_1, \gamma_2), \gamma_2 < \gamma_3 \\ \max(\gamma_1, \gamma_3), \gamma_3 < \gamma_2 \end{cases} \quad (4.33)$$

Αν χρησιμοποιείται η τεχνική MRC, ο κόμβος λήψης προσθέτει τους σηματοθορυβικούς λόγους των δύο λαμβανόμενων σημάτων σε γραμμική κλίμακα και ο τελικός λόγος  $\gamma_C = \gamma_{MRC}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma_{MRC} = \gamma_1 + \gamma_{23} = \begin{cases} \gamma_1 + \gamma_2, \gamma_2 < \gamma_3 \\ \gamma_1 + \gamma_3, \gamma_3 < \gamma_2 \end{cases} \quad (4.34)$$

Χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$  και τις σχέσεις (4.33) και (4.34), η πιθανότητα αποκοπής της (4.31) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_1 \int_0^{\gamma_0} d\gamma_2 \int_{\gamma_2}^{\infty} d\gamma_3 f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) + \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_1 \int_0^{\gamma_0} d\gamma_3 \int_{\gamma_3}^{\infty} d\gamma_2 f_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \quad (4.35)$$

όπου:

$$\gamma_0 = \begin{cases} \gamma_{th}, & \text{για SC} \\ \gamma_{th} - \gamma_1, & \text{για MRC} \end{cases} \quad (4.36)$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος όρος της (4.35) αντιστοιχούν στον πρώτο και το δεύτερο κλάδο της (4.33) για την τεχνική SC και της (4.34) για την τεχνική MRC, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = (\ln \gamma_j - \mu_j) / \sigma_j, (j=1,2,3) \quad (4.37)$$

όπου οι παράμετροι  $\mu_j, \sigma_j (j=1,2,3)$  δίνονται από την (4.30) και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91], η πιθανότητα αποκοπής της σχέσης (4.35) υπολογίζεται ως εξής:



$$P_{out} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{u_{1,0}} du_1 \int_{-\infty}^{u_{2,0}} du_2 f_{u_1 u_2}(u_1, u_2) \operatorname{erfc} \left( \frac{u_3(u_2) - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2}\sigma_{3/1,2}} \right) + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{u_{1,0}} du_1 \int_{-\infty}^{u_{3,0}} du_3 f_{u_1 u_3}(u_1, u_3) \operatorname{erfc} \left( \frac{u_2(u_3) - \mu_{2/1,3}}{\sqrt{2}\sigma_{2/1,3}} \right) \quad (4.38)$$

όπου:

$$\begin{cases} u_{1,0} = (\ln \gamma_{th} - \mu_1) / \sigma_1 \\ u_{j,0} = (\ln \gamma_0 - \mu_j) / \sigma_j, (j = 2, 3) \\ u_2(u_3) = (\ln \gamma_3 - \mu_2) / \sigma_2 \\ u_3(u_2) = (\ln \gamma_2 - \mu_3) / \sigma_3 \end{cases} \quad (4.39)$$

και το  $\gamma_0$  δίνεται από την (4.36) για τις περιπτώσεις των τεχνικών SC και MRC. Η διδιάστατη κανονική κατανομή των τυχαίων μεταβλητών  $u_i, u_j (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$  συμβολίζεται ως  $f_{u_i u_j}(u_i, u_j)$ . Οι παράμετροι  $\mu_{i/j,k}, \sigma_{i/j,k} (i, j, k = 1, 2, 3, i \neq j \neq k)$  ορίζονται στο Παράρτημα Α και δίνονται από:

$$\begin{cases} \mu_{i/j,k} = \frac{\rho_{ij} - \rho_{jk}\rho_{ik}}{1 - \rho_{jk}^2} u_j + \frac{\rho_{ik} - \rho_{jk}\rho_{ij}}{1 - \rho_{jk}^2} u_k \\ \sigma_{i/j,k} = \sqrt{\frac{1 - \rho_{jk}^2 - \rho_{ij}^2 - \rho_{ik}^2 + 2\rho_{jk}\rho_{ij}\rho_{ik}}{1 - \rho_{jk}^2}} \end{cases} \quad (4.40)$$

Στην έκφραση (4.40), οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών  $u_i, u_j (i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$  συμβολίζονται ως  $\rho_{ij}$ , όπου  $\rho_{ij} = \rho_{ji}$ .

### 4.3.3. Ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία

Για να συγκριθεί η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης με ένα ισοδύναμο σύστημα απευθείας ζεύξης που καταναλώνει την ίδια ισχύ και το ίδιο φάσμα με το συνεργατικό σύστημα, πρέπει να εφαρμοστούν ενεργειακοί και φασματικοί περιορισμοί, οι οποίοι περιγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.2.5. Σύμφωνα με αυτήν την ανάλυση, η ισχύς εκπομπής της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης είναι:

$$P_{Tx(eff)}(W) = P_{Tx1} + P_{Tx3} \quad (4.41)$$

όπου  $p_{Tsj}(W)$  είναι η ισχύς εκπομπής του βήματος  $j$  του συνεργατικού συστήματος. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση και τη σχέση (4.30), η ισχύς εκπομπής της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης μπορεί να ενσωματωθεί στις λογαριθμοκανονικές παραμέτρους της (σε Neper):

$$(\mu_{eff}, \sigma_{eff}) = (\mu_{w_{eff}} + \ln(\exp\{\mu_1 - \mu_{w_1}\} + \exp\{\mu_3 - \mu_{w_3}\}), \sigma_1) \quad (4.42)$$

όπου  $\mu_{w_{eff}} = \mu_{w_1}$  και  $\sigma_{eff} = \sigma_1$  (ίδιες συνθήκες διάδοσης).

Για να εξασφαλιστεί φασματική ισοδυναμία μεταξύ των διαφορετικών πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης και της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης χρησιμοποιείται η κανονικοποιημένη ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στάθμη  $\gamma_{th, norm}$ , όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.5. Η σχέση (4.26), εκφράζοντας τους σηματοθορυβικούς λόγους σε γραμμική κλίμακα γράφεται ως:

$$P_{out(A)} = P\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_C) < \log_2(1 + \gamma_{th, norm})\right) \quad (4.43)$$

Τελικά, αντίστοιχα της (4.27) προκύπτει:

$$\gamma_{th} = \begin{cases} \gamma_{th, norm}^2 + 2\gamma_{th, norm} & , \text{TDMA/FDMA} \\ \gamma_{th, norm} & , \text{SDMA} \end{cases} \quad (4.44)$$

Για μια δεδομένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής  $P_{out(ref)}$ , η κανονικοποιημένη στάθμη εκφράζεται ως:

$$\gamma_{th, norm} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}} = \begin{cases} \sqrt{1 + \gamma_{th} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}}} - 1 & , \text{TDMA/FDMA} \\ \gamma_{th} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}} & , \text{SDMA} \end{cases} \quad (4.45)$$

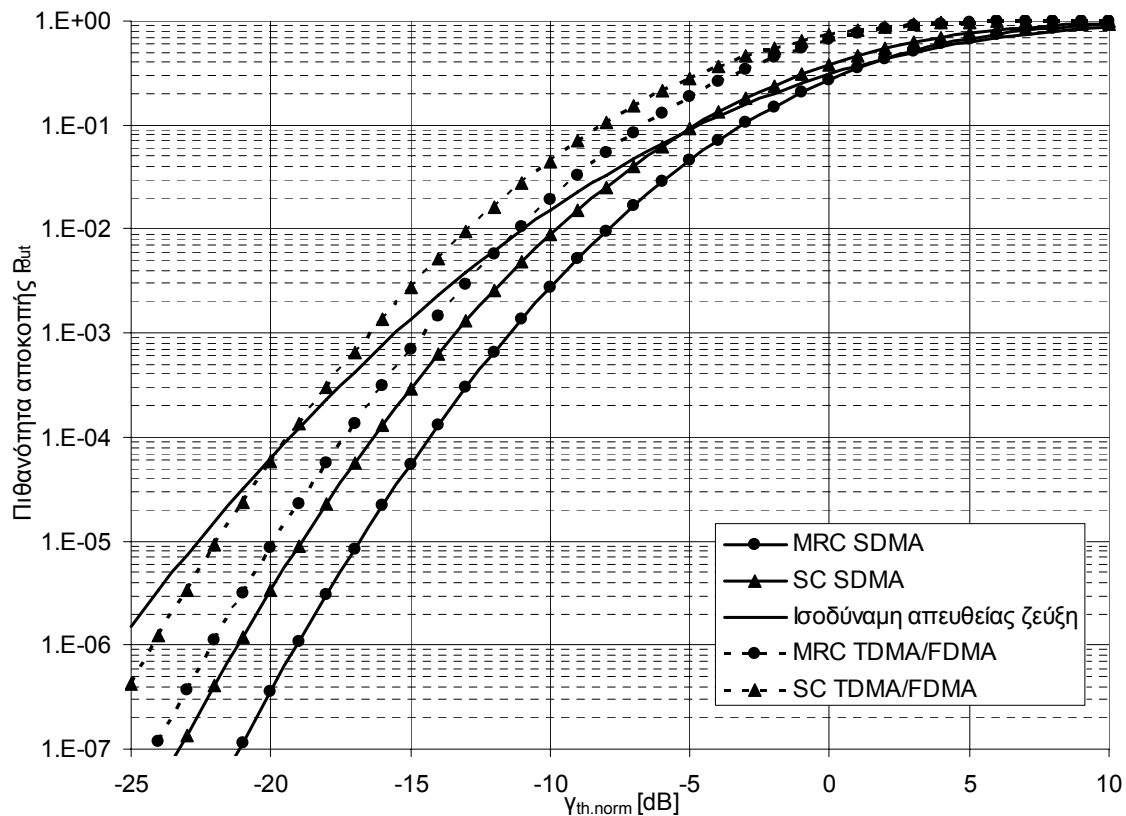
#### **4.3.4. Αριθμητικά αποτελέσματα**

Σε αυτήν την παράγραφο, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για την πιθανότητα αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω σκίασης. Αν δεν σημειώνεται διαφορετικά, οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος είναι  $\mu_j = 0dB$  και  $\mu_{w_j} = 0dB$  για κάθε επιμέρους ζεύξη του συστήματος. Επιπλέον, στα Σχήματα 4.9-4.11 για τον υπολογισμό των συσχετίσεων της σκίασης μεταξύ των διάφορων ζεύξεων χρησιμοποιείται το μοντέλο [Saunders99, IEEE 802.16j-2007]:

$$\rho_{ij} = (\phi_T / \phi_{ij})^\alpha \sqrt{L_i / L_j}, (i, j = 1, 2, 3, i \neq j) \quad (4.46)$$

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

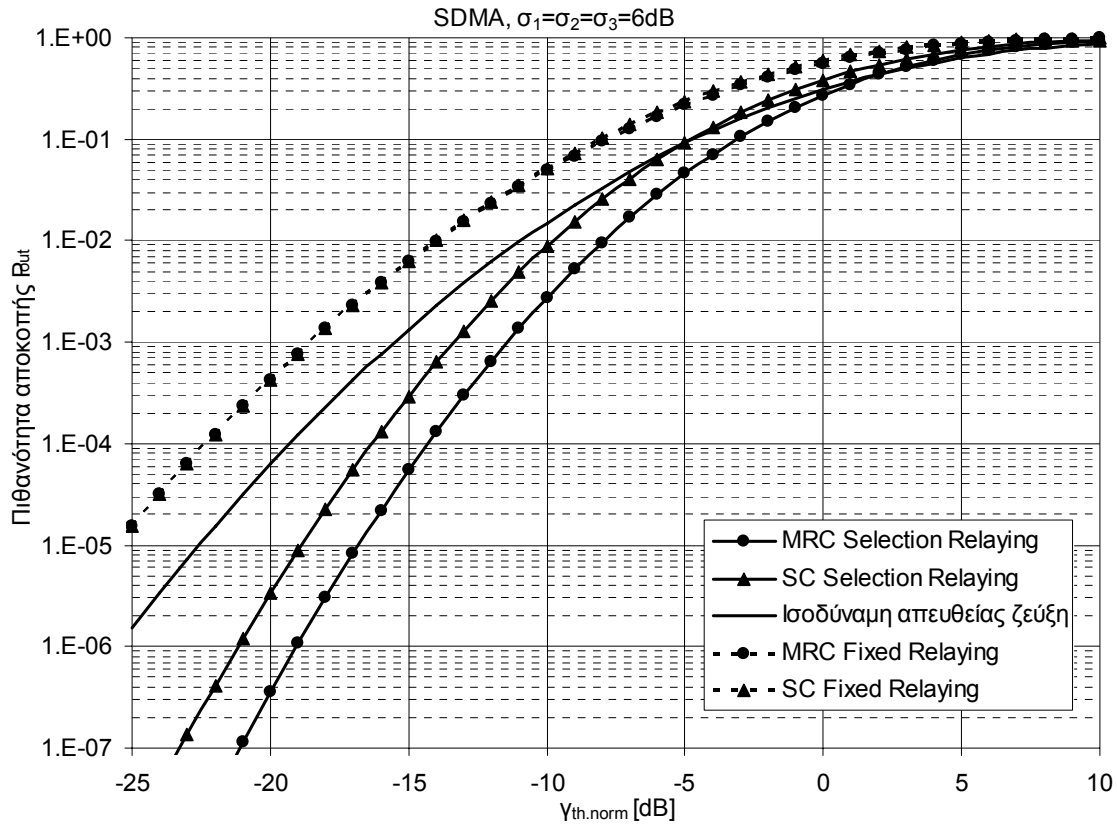
Στο Σχήμα 4.9, η πιθανότητα αποκοπής των τεχνικών SC και MRC ενός συνεργατικού συστήματος που χρησιμοποιεί είτε τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA ή το πρωτόκολλο SDMA απεικονίζεται συναρτήσει της κανονικοποιημένης στάθμης  $\gamma_{th, norm}$ . Οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος είναι  $\sigma_j = 6\text{dB} = 1.38N_p$  ( $j = 1, 2, 3$ ),  $L_1 = L_2 = 2000m$  και  $\phi_{23} = 30^\circ$ .



Σχήμα 4.9: Πιθανότητα αποκοπής ενός SR συνεργατικού συστήματος και σύγκριση με μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη.

Από το Σχήμα 4.9, είναι εμφανές ότι όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο SDMA, η τεχνική MRC παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για σχεδόν όλο το εύρος τιμών του κανονικοποιημένου λόγου  $\gamma_{th.norm}$ , ενώ η τεχνική SC υπερτερεί της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης για πρακτικές τιμές του  $\gamma_{th.norm}$  που αντιστοιχούν σε τιμές της πιθανότητας αποκοπής μικρότερες από 0.1. Αντιθέτως, όταν χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA, υπάρχει ένα σημαντικό εύρος τιμών του  $\gamma_{th.norm}$ , στο οποίο η ισοδύναμη απευθείας ζεύξη υπερτερεί τόσο της τεχνικής SC όσο και της τεχνικής MRC. Συγκεκριμένα, η τεχνική SC πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν για το θεωρούμενο σύστημα απαιτούνται χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής, δηλαδή για τιμές μικρότερες από περίπου  $10^{-4}$ . Αντίθετα, η τεχνική MRC δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τιμές της πιθανότητας αποκοπής μεγαλύτερες από 0.01, που όμως δεν παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον στη σχεδίαση ενός συστήματος. Τέλος, η τεχνική MRC παρουσιάζει ένα σημαντικό CNR κέρδος συγκρινόμενη με την τεχνική SC, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής, ανεξαρτήτως του πρωτόκολλου πολλαπλής πρόσβασης.

Στο Σχήμα 4.10, το πρωτόκολλο Επιλεγόμενης Επανάληψης (SR), που παρουσιάστηκε παραπάνω, συγκρίνεται με το πρωτόκολλο Σταθερής Επανάληψης (FR) [Sklarparlis09a] για τιμές των παραμέτρων ίδιες με τις τιμές του Σχήματος 4.9. Όπως φαίνεται από αυτό το Σχήμα, το πρωτόκολλο SR υπερτερεί του πρωτόκολλου FR, καθώς το πρωτόκολλο SR δεν δεσμεύεται από την ποιότητα του καναλιού μεταξύ κόμβου S και επαναλήπτη R. Επίσης, το πρωτόκολλο FR παρουσιάζει χειρότερη επίδοση από την ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για όλο το εύρος τιμών του λόγου  $\gamma_{th.norm}$ . Επιπλέον, για το πρωτόκολλο FR, η τεχνική MRC δεν παρουσιάζει κέρδος σε σχέση με την τεχνική SC για τις συγκεκριμένες τιμές των τυπικών αποκλίσεων. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί όμως ότι για χαμηλές τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma_2$  της ζεύξης μεταξύ κόμβου S και επαναλήπτη R, τα πρωτόκολλα SR και FR παρουσιάζουν παρόμοια επίδοση (αυτή η περίπτωση δεν εμφανίζεται σε αυτό το Σχήμα).



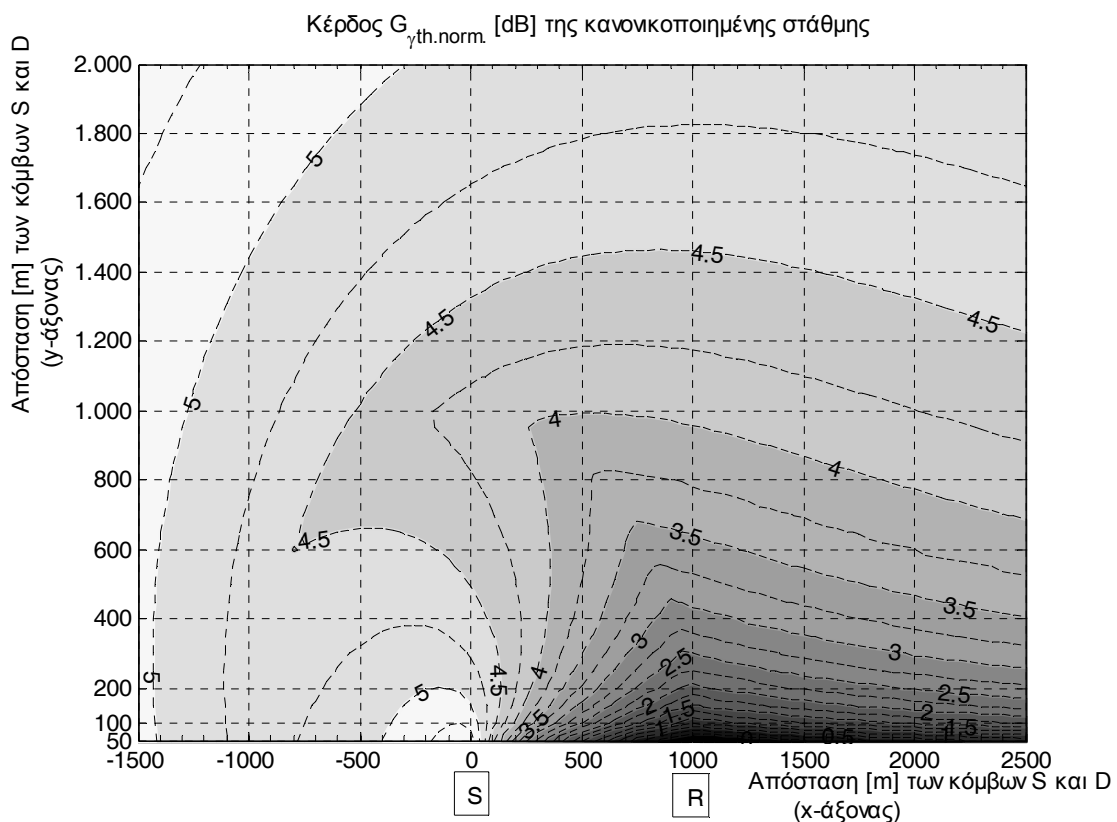
Σχήμα 4.10: Σύγκριση μεταξύ των SR και FR συνεργατικών συστημάτων.

Ένα πολύ χρήσιμο μέτρο για να αξιολογηθεί η επίδοση διάφορων συνεργατικών συστημάτων είναι το CNR κέρδος, που ορίζεται ως η διαφορά της κανονικοποιημένης στάθμης  $\gamma_{th, norm} [dB]$  και της αντίστοιχης στάθμης  $\gamma_{th, norm(eff)} [dB]$  μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη για μια συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής  $P_{out(ref)}$ :

$$G_{\gamma_{th, norm}} [dB] = \gamma_{th, norm} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}} [dB] - \gamma_{th, norm(eff)} \Big|_{P_{out}=P_{out(ref)}} [dB] \quad (4.47)$$

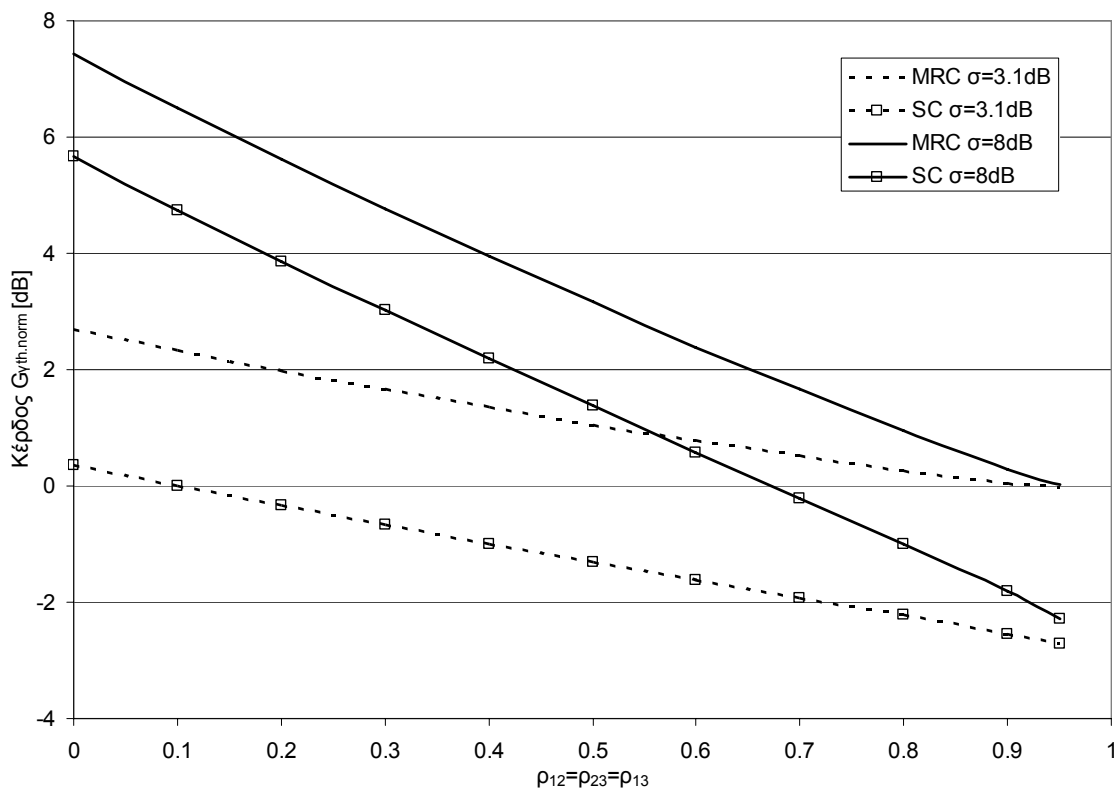
Το Σχήμα 4.11 απεικονίζει το κέρδος  $G_{\gamma_{th, norm}}$  για ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική MRC και το πρωτόκολλο TDMA/FDMA για διάφορες θέσεις του κόμβου λήψης D που μεταβάλλονται τόσο κάθετα όσο και οριζόντια, ενώ ο κόμβος S είναι τοποθετημένος στη θέση (0,0) και ο επαναλήπτης R είναι σταθερός σε απόσταση 1km από τον κόμβο S. Το Σχήμα αυτό αντιστοιχεί σε ένα χάρτη επίδοσης ενός συνεργατικού συστήματος που εκφράζει το κέρδος της συνεργασίας μεταξύ των κόμβων σε σχέση με την περίπτωση μη συνεργασίας για διάφορες θέσεις του κόμβου λήψης D, λαμβάνοντας υπόψη την

ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία των πρωτόκολλων συνεργατικής διαφορικότητας. Οι τιμές των παραμέτρων για αυτό το διάγραμμα είναι  $P_{out(ref)}=10^{-4}$  και  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)=(8,8,3.1)dB$  που αντιστοιχούν σε θέσεις του κόμβου S πάνω στη στέγη κτιρίων και των κόμβων R και D σε ύψος χαμηλότερο από τις στέγες των κτιρίων [IEEE 802.16j-2007]. Το Σχήμα αυτό απεικονίζει την επίδραση του μοντέλου συσχέτισης που θεωρήθηκε (έκφραση 4.46) στην επίδοση του συστήματος, χρησιμοποιώντας την αναλυτική έκφραση (4.38), η οποία μπορεί να επεκταθεί σε κάθε μοντέλο συσχέτισης μεταξύ των σηματοθορυβικών λόγων των επιμέρους ζεύξεων του συνεργατικού συστήματος. Για το συγκεκριμένο μοντέλο συσχέτισης, είναι εμφανές ότι η επίδοση του συνεργατικού συστήματος για θέσεις του κόμβου D κοντά στον επαναλήπτη και κατά μήκος της ευθείας, από τον κόμβο S στον επαναλήπτη R, δεν υπερτερεί σημαντικά της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις του D.



Σχήμα 4.11: Κέρδος CNR για διάφορες θέσεις του κόμβου D για ένα σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική MRC και το πρωτόκολλο TDMA/FDMA.

Το Σχήμα 4.12 απεικονίζει το κέρδος  $G_{\gamma_{th, norm}}$  συναρτήσει του συντελεστή συσχέτισης για την περίπτωση του πρωτόκολλου SDMA με ίδιες τιμές  $\rho_{12} = \rho_{23} = \rho_{13} = \rho$  μεταξύ των επιμέρους ζεύξεων και ίδιες τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ . Αυτή η θεώρηση αντιστοιχεί σε μία γεωμετρία ισόπλευρου τριγώνου ( $L_1 = L_2 = L_3 = L$ ), όπου το μήκος  $L$  μεταβάλλεται από  $L_c$  ως  $+\infty$  δίνοντας συντελεστές συσχέτισης  $\rho$  από 1 ως 0 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.12: Επίδραση της συσχέτισης στο CNR κέρδος για τις τεχνικές MRC και SC για διάφορες τυπικές αποκλίσεις.

Όπως είναι φανερό από αυτό στο Σχήμα, ο συντελεστής συσχέτισης έχει μια φθίνουσα γραμμική επίδραση στο κέρδος του συστήματος και για τις δύο τεχνικές MRC και SC. Η επίδραση αυτή είναι εντονότερη για μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ . Πιο συγκεκριμένα, για μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης, η τεχνική SC έχει χειρότερη επίδοση από μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη ανεξαρτήτως της τιμής της

συσχέτισης. Για μεγάλες τιμές της τυπικής απόκλισης, η τεχνική SC υπερτερεί ενός μη συνεργατικού συστήματος μόνο για χαμηλές και ενδιάμεσες τιμές της συσχέτισης. Από την άλλη μεριά, η τεχνική MRC υπερτερεί της μη συνεργατικής ισοδύναμης απευθείας ζεύξης για όλο το εύρος των τιμών της συσχέτισης, εκτός από την περίπτωση πολύ υψηλών τιμών της συσχέτισης (κοντά στη 1), όπου η επίδοση της τεχνικής MRC υποβαθμίζεται στην επίδοση ενός μη συνεργατικού συστήματος.

#### **4.4. Συμπεράσματα**

Σε αυτό το Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος, που υποφέρει από διαλείψεις είτε λόγω βροχής είτε λόγω σκίασης. Το θεωρούμενο συνεργατικό σύστημα χρησιμοποιεί έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, ενώ γίνεται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών πρωτόκολλων συνεργασίας, πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης και συνδυαστικών τεχνικών, η επιλογή των οποίων επηρεάζει σημαντικά την επίδοση του συστήματος. Το συνεργατικό σύστημα συγκρίνεται με ένα μη συνεργατικό σύστημα που αποτελείται από μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία των διάφορων συστημάτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα υποδεικνύουν το εύρος τιμών του σηματοθορυβικού λόγου και των διάφορων παραμέτρων του συστήματος που η συνεργασία μεταξύ των κόμβων υπερτερεί ή αποτυγχάνει να δώσει κέρδος σε σχέση με την περίπτωση μη συνεργασίας.

Όπως είναι φανερό από τα αριθμητικά αποτελέσματα, το πρωτόκολλο FR περιορίζεται από την ποιότητα της ζεύξης μεταξύ κόμβου S και επαναλήπτη R. Επομένως, όταν το συγκεκριμένο κανάλι είναι κακής ποιότητας το πρωτόκολλο SR υπερτερεί σαφώς του FR ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής, ενώ όταν το κανάλι αυτό είναι καλής ποιότητας τα δύο πρωτόκολλα έχουν την ίδια επίδοση. Το πρωτόκολλο SDMA υπερτερεί πάντα των πρωτόκολλων TDMA/FDMA καθώς και της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης για το μεγαλύτερο εύρος τιμών του σηματοθορυβικού λόγου. Αντίθετα, τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA υπερτερούν της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης μόνο για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επίσης, η τεχνική MRC έχει πάντα καλύτερη επίδοση ή στη χειρότερη περίπτωση την ίδια επίδοση με την τεχνική SC. Για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής και για την περίπτωση της απόσβεσης λόγω βροχής η επίδοση



των τεχνικών MRC και SC συγκλίνει, ενώ για τις ίδιες τιμές της πιθανότητας αποκοπής και για την περίπτωση των διαλείψεων λόγω σκίασης το κέρδος της τεχνικής MRC σε σχέση με την τεχνική SC μεγαλώνει. Παρόμοιο συμπέρασμα για τα δύο είδη διαλείψεων και για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής ισχύει και για τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης.

*Β. Κ. Σακαρέλλος – Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα.*

## **5. Ανάλυση δορυφορικών συνεργατικών συστημάτων**

### **5.1.Εισαγωγή**

Οι σύγχρονες δορυφορικές εφαρμογές απαιτούν μεγάλο εύρος φάσματος για να μπορούν να υποστηρίξουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται οι συχνότητες άνω των 10GHz, όπως οι Ku, Ka και V ζώνες συχνοτήτων. Ο κυρίαρχος μηχανισμός διαλείψεων σε αυτές τις συχνότητες είναι η απόσβεση λόγω βροχής που προκαλεί εξασθένηση των σημάτων και επιδεινώνει την επίδοση ενός δορυφορικού συστήματος [Panagoroulos04]. Οι τεχνικές διαφορικότητας χρησιμοποιούνται συχνά στα δορυφορικά συστήματα για να βελτιώσουν την επίδοσή τους μειώνοντας την απόσβεση του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης [Panagoroulos04].

Σε αυτό το Κεφάλαιο, αρχικά μελετάται η διπλή δορυφορική διαφορική λήψη [Sakarellos08a], η οποία είναι μια αποτελεσματική τεχνική για να μειωθούν οι μεγάλες αποσβέσεις στις δορυφορικές επικοινωνίες. Τα σήματα που εκπέμπονται από δύο δορυφόρους, που έχουν συγκεκριμένη γωνιακή απόκλιση στη γεωστατική τροχιά, συνδυάζονται στον τερματικό σταθμό με την τεχνική MRC (Maximal Ratio Combining) [Stuber01]. Η τεχνική MRC έχει πρόσφατα προταθεί επίσης και για ένα MIMO δορυφορικό σύστημα [Yamashita05]. Ο τερματικός σταθμός είναι εξοπλισμένος με δύο κεραίες ή με μία κεραία πολλαπλής εισόδου (multiple satellite feed – MSF). Παρόλο που οι συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης απαιτούν τη χρήση πολλών δορυφόρων, καθώς και επιπλέον πόρους στον εξοπλισμό του δέκτη, παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία και η χρήση τους δεν μπορεί να αποφευχθεί στα υψηλής διαθεσιμότητας δορυφορικά συστήματα (π.χ. τηλεϊατρική, εφαρμογές τηλεδιάσκεψης). Επιπλέον, σε περιοχές που η επίδοση υποβαθμίζεται σημαντικά λόγω ισχυρών φαινομένων βροχόπτωσης και οι άλλες τεχνικές

αντιστάθμισης των διαλείψεων δεν παρέχουν ικανοποιητικά περιθώρια διαλείψεων, η διαφορική λήψη είναι η μόνη αποδοτική τεχνική λύση.

Στην παράγραφο 5.2, παρουσιάζεται ένα αναλυτικό μοντέλο για τη στατιστική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου, καθώς και για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής ενός MRC συστήματος διπλής δορυφορικής λήψης που υποφέρει από συσχετισμένες διαλείψεις λόγω βροχής [Sakarellos08a]. Τόσο η λογαριθμοκανονική κατανομή, όσο και η γάμμα κατανομή χρησιμοποιούνται για ήπιες και ισχυρές συνθήκες βροχόπτωσης αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη τα φυσικά μοντέλα που περιγράφουν τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου διάδοσης. Στα αριθμητικά αποτελέσματα η τεχνική MRC συγκρίνεται με την τεχνική Selection Combining – SC ([Panagopoulos02c] και [Kanellopoulos90] για το λογαριθμοκανονικό και το γάμμα μοντέλο αντίστοιχα) και με την περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται διαφορική λήψη. Επίσης, η επίδραση παραμέτρων όπως η γωνιακή απόκλιση μεταξύ των δορυφόρων και η κλιματική εξάρτηση (εξέταση διαφορετικών κλιματικών περιοχών), στην επίδοση του συστήματος διερευνάται διεξοδικά.

Για να αντισταθμιστεί το βασικό μειονέκτημα της δορυφορικής διαφορικής λήψης, που είναι η χρήση δύο δορυφόρων, στη συνέχεια του Κεφαλαίου προτείνεται η συνεργασία μεταξύ δορυφορικών και επίγειων δικτύων, που μπορεί να αυξήσει την επίδοση ενός συστήματος [Matricciani03], [Khan08]. Τα σήματα που εκπέμπονται από ένα δορυφόρο, π.χ. ένα DVB-S2 σύστημα [Morello06], και από μια επίγεια ζεύξη, π.χ. [IEEE 802.16.2-2004], συνδυάζονται στον τερματικό δέκτη χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική SC, είτε την τεχνική MRC [Skrparlis09c]. Ένα πιθανό μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος έγκειται στη δυσκολία συγχρονισμού των δορυφορικών και επίγειων σημάτων, λόγω της μεγάλης χρονικής καθυστέρησης διάδοσης του δορυφορικού σήματος σε σχέση με την αντίστοιχη καθυστέρηση διάδοσης του επίγειου σήματος. Παρόλα αυτά, σωστός συγχρονισμός μεταξύ των δύο σημάτων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη αποθήκευση (buffering) των σημάτων, καθώς οι κόμβοι του συστήματος είναι σταθεροί και οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι γνωστές.

Στην παράγραφο 5.3, παρουσιάζονται αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής ενός συστήματος δορυφορικής – επίγειας διαφορικής λήψης που λειτουργεί σε τροπικές περιοχές [Skrparlis09c]. Ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος (CNR) υπολογίζεται και για τις δύο συνδυαστικές τεχνικές SC και MRC [Stuber01]. Η

επίδραση διάφορων λειτουργικών, γεωμετρικών και γεωγραφικών (κλιματικών συνθηκών) παραμέτρων στην αξιοπιστία (Quality of Service – QoS) της διαφορικής λήψης σε δορυφορικά – επίγεια δίκτυα, διερευνάται πλήρως μέσω εκτενών αριθμητικών αποτελεσμάτων. Οι τελικές μαθηματικές εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό ασύρματων δικτύων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ένα σημαντικό κίνητρο για την ανάλυση αυτού του συστήματος αποτέλεσε η διερεύνηση της καταλληλότητας και της πιθανής εγκατάστασης των Ασύρματων Ευρυζωνικών Δικτύων στην Λατινική Αμερική (Broadband Wireless Networks in Latin America), που πρόσφατα έχει αποτελέσει αντικείμενο μεγάλης ερευνητικής δραστηριότητας και εμπορικού ενδιαφέροντος [BRASIL].

Επιπλέον, σε αυτό το Κεφάλαιο μελετάται η επίδοση ενός συστήματος δορυφορικής – επίγειας συνεργατικής διαφορικότητας [Sakarellos10f]. Σε αυτό το σύστημα, ένας δορυφόρος εκπέμπει το ίδιο σήμα πληροφορίας τόσο προς τον τελικό επίγειο δέκτη, όσο και προς έναν επίγειο αναγεννητικό επαναλήπτη, ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από τον τελικό δέκτη. Στη συνέχεια, ο επαναλήπτης προωθεί το λαμβανόμενο σήμα επίσης προς τον τελικό δέκτη, ο οποίος τελικά συνδυάζει τα δύο λαμβανόμενα σήματα. Με αυτόν τον τρόπο, ο επίγειος επαναλήπτης προσφέρει χωρική διαφορικότητα στο συνεργατικό δορυφορικό – επίγειο σύστημα και η επίδοση του συστήματος βελτιώνεται.

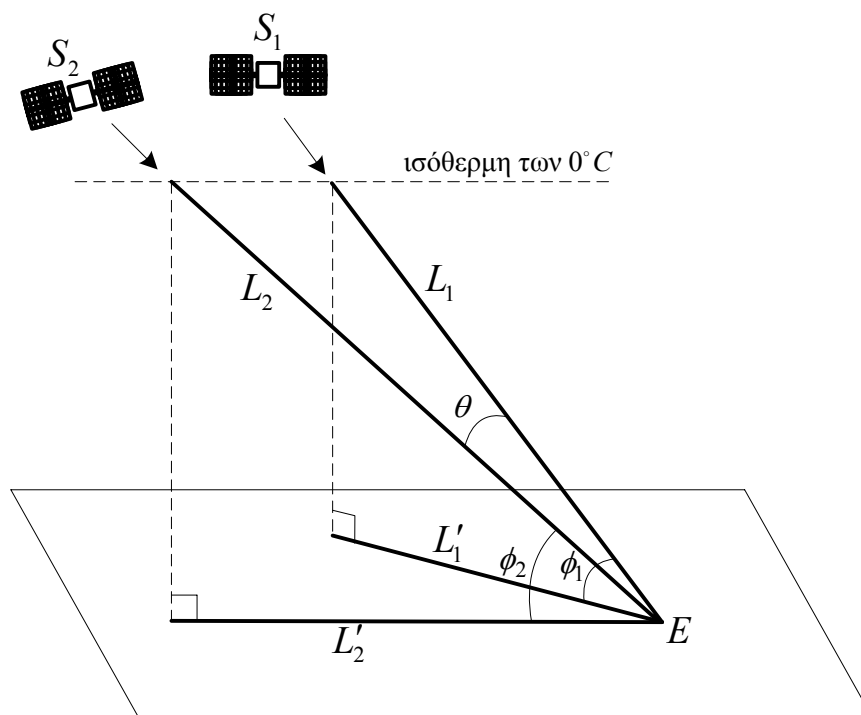
Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι για την αξιόπιστη σχεδίαση ενός δορυφορικού συστήματος πρέπει να ληφθούν επίσης υπόψη τα φαινόμενα παρεμβολών [Castanet03]. Υπάρχουν διάφορα είδη παρεμβολών, αλλά πολλές φορές θεωρείται κυρίαρχη η παρεμβολή από γειτονικό δορυφορικό σύστημα που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα [Kanellopoulos00, Matricciani96 και Matricciani97]. Αυτό το είδος ενδοκαναλικής παρεμβολής μπορεί να επιδεινωθεί από την πιθανή διαφορική απόσβεση λόγω βροχής μεταξύ της επιθυμητής και της παρεμβάλλουσας ζεύξης. Αν υπάρχει αρκετά μεγάλη διαφορά στην απόσβεση λόγω βροχής μεταξύ των δύο ζεύξεων, μπορεί να προκύψουν σημαντικά προβλήματα παρεμβολών. Επίσης, η απόσβεση λόγω βροχής αυξάνει τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας του δέκτη επηρεάζοντας τη στάθμη της ισχύος του θορύβου. Στις δημοσιεύσεις [Sakarellos06] και [Sakarellos08b], η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη ενσωματώνεται σε ένα φυσικό μοντέλο για την

πρόβλεψη της πιθανότητας αποκοπής της ζεύξης από το δορυφόρο στον επίγειο σταθμό, που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής και ενδοκαναλική παρεμβολή [Kanellopoulos98].

## **5.2. Επίδοση της MRC δορυφορικής διαφορικής λήψης σε κανάλια με συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές και γάμμα διαλείψεις**

### **5.2.1. Μοντελοποίηση του συστήματος**

Σε αυτή την παράγραφο, ένα δορυφορικό σύστημα διπλής διαφορικής λήψης θεωρείται, όπου ένας επίγειος σταθμός  $E$  συνδυάζει τα λαμβανόμενα σήματα από δύο δορυφόρους  $S_1$  και  $S_2$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία δορυφορικού συστήματος διπλής διαφορικής λήψης.

Οι δύο δορυφορικές ζεύξεις σχηματίζουν γωνία  $\theta$  (deg), ενώ οι γωνίες ανύψωσής τους είναι  $\phi_1$  (deg) και  $\phi_2$  (deg), αντίστοιχα. Τα ενεργά μήκη των δύο δορυφορικών ζεύξεων, που αντιστοιχούν στο τμήμα των ζεύξεων από τον επίγειο σταθμό ως την

ισόθερμη των  $0^\circ C$ , συμβολίζονται ως  $L_j (Km)$ ,  $j=1,2$  και οι προβολές τους στη γη ως  $L'_j = L_j \cos \phi_j$ , αντίστοιχα. Τα εκπεμπόμενα σήματα από τους δύο δορυφόρους υπόκεινται σε διαλείψεις λόγω βροχής, που εκφράζονται ως λογαριθμοκανονικές ή γάμμα τυχαίες μεταβλητές για κλιματικές περιοχές με ήπια ή ισχυρά φαινόμενα βροχόπτωσης αντίστοιχα, και συμβολίζονται ως  $A_j (dB)$ ,  $j=1,2$  για κάθε ζεύξη αντίστοιχα.

Ο λαμβανόμενος από τον επίγειο σταθμό σηματοθορυβικός λόγος, εκφρασμένος σε dB, κάθε δορυφορικής ζεύξης σε συνθήκες βροχής, υπολογίζεται ως εξής:

$$CNR_j = CNR_{cs,j} - A_j (dB), j=1,2 \quad (5.1)$$

όπου  $CNR_{cs,j} (dB)$ ,  $j=1,2$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος της ζεύξης  $j$  σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Ο επίγειος δέκτης συνδυάζει τα δύο σήματα χρησιμοποιώντας την τεχνική MRC και ο τελικός σηματοθορυβικός λόγος σε γραμμική κλίμακα υπολογίζεται ως:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{MRC} = \left(\frac{C}{N}\right)_1 + \left(\frac{C}{N}\right)_2 \quad (5.2)$$

Εκφράζοντας τον παραπάνω σηματοθορυβικό λόγο σε dB, έχουμε:

$$CNR_{MRC} = 10 \log \left( 10^{CNR_1/10} + 10^{CNR_2/10} \right) (dB) \quad (5.3)$$

Εφαρμόζοντας την απλοποιημένη θεώρηση του Crane για την κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης [Crane03] και χρησιμοποιώντας την σχέση (5.1), ο τελικός λόγος CNR εκφράζεται ως:

$$CNR_{MRC} = 10 \log \left( 10^{\frac{CNR_{cs,1} - A'_1 / \cos \phi_1}{10}} + 10^{\frac{CNR_{cs,2} - A'_2 / \cos \phi_2}{10}} \right) \quad (5.4)$$

όπου  $A'_j = A_j \cos \phi_j$ ,  $j=1,2$  είναι η απόσβεση λόγω βροχής που αναφέρεται στις προβολές των ενεργών μηκών των δορυφορικών ζεύξεων.

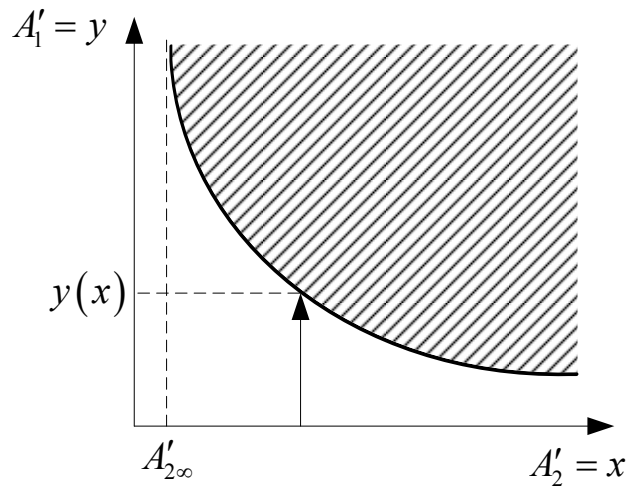
Η πιθανότητα αποκοπής ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που ο συνολικός λόγος CNR δεν υπερβαίνει μία συγκεκριμένη στάθμη  $CNR_{th} (dB)$ :

$$P_{outage} = P(CNR_{MRC} < CNR_{th}) \quad (5.5)$$

Στις επόμενες παραγράφους η παραπάνω πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται για τις περιπτώσεις που οι αποσβέσεις λόγω βροχής των δύο ζεύξεων είναι συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές και γάμμα τυχαίες μεταβλητές.

### 5.2.2. Πιθανότητα αποκοπής για λογαριθμοκανονικές αποσβέσεις

Σε αυτήν την περίπτωση, οι τυχαίες μεταβλητές  $A'_j, j=1,2$  θεωρούνται ότι ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{XY}(x,y)$  που περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Το ενδεχόμενο του οποίου η πιθανότητα δίνεται από την (5.5) απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 5.2 από τη γραμμοσκιασμένη περιοχή του επιπέδου  $(A'_1, A'_2)$ . Αυτή η περιοχή ορίζεται από την καμπύλη  $CNR_{MRC} = C(A'_1, A'_2) = C(y, x) = CNR_{th}$ . Στο Σχήμα 5.2,  $A'_{2\infty}$  και  $y(x)$  είναι οι ρίζες των εξισώσεων  $C(\infty, x) - CNR_{th} = 0$  και  $C(y(x), x) - CNR_{th} = 0$  αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2: Περιοχή ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής.

Ολοκληρώνοντας την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή στην επιφάνεια του Σχήματος 5.2, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως:

$$P_{outage} = \int_{x_{\infty}}^{\infty} \int_{y(x)}^{\infty} f_{XY}(x,y) dy dx \quad (5.6)$$

όπου το όριο  $x_{\infty}$  ορίζεται ως:



$$x_{\infty} = \begin{cases} 0, & A'_{2\infty} < 0 \\ A'_{2\infty}, & A'_{2\infty} > 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = \frac{\ln A'_j - \ln A_{m_j}}{S_{a_j}}, j = 1, 2 \quad (5.8)$$

και εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91], η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως:

$$P_{outage} = \frac{1}{2} \int_{u_{x_{\infty}}}^{\infty} f_{U_2}(u_2) \operatorname{erfc} \left( \frac{u_y - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) du_2 \quad (5.9)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, οι στατιστικές λογαριθμοκανονικές παράμετροι  $A_{m_j}, S_{a_j}$  ( $j=1,2$ ) που αναφέρονται στις κατανομές των  $A_j$  δίνονται από τους τύπους (2.9) και (2.10), ενώ ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  μεταξύ των κανονικών τυχαίων μεταβλητών  $u_j$  ( $j=1,2$ ) δίνεται από τον τύπο (2.19). Επίσης, στην (5.9) η κανονική κατανομή συμβολίζεται ως  $f_{U_2}(u_2)$ , ενώ:

$$\begin{cases} u_y = \frac{\ln y(x) - \ln A_{m_1}}{S_{a_1}} \\ u_{x_{\infty}} = \frac{\ln x_{\infty} - \ln A_{m_2}}{S_{a_2}} \end{cases} \quad (5.10)$$

### 5.2.3. Πιθανότητα αποκοπής για γάμμα αποσβέσεις

Στην περίπτωση που οι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές  $A'_j$ ,  $j=1,2$  ακολουθούν την από κοινού γάμμα κατανομή  $g_{XY}(x,y)$ , που περιγράφεται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, το ενδεχόμενο αποκοπής είναι ίδιο με αυτό της προηγούμενης παραγράφου και απεικονίζεται γραφικά επίσης στο Σχήμα 5.2. Η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται παρόμοια με την έκφραση (5.6):

$$P_{outage} = \int_{x_{\infty}}^{\infty} \int_{y(x)}^{\infty} g_{XY}(x,y) dy dx \quad (5.11)$$

Χρησιμοποιώντας κατάλληλους μετασχηματισμούς και απλή αλγεβρική ανάλυση, η έκφραση (5.11) απλοποιείται ως εξής:

$$P_{outage} = \frac{(1-\rho)^{\nu}}{\Gamma(\nu)} \int_{x_0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\rho^i}{i!} g_{X_i}(x) \Gamma\left(\nu+i, \frac{\beta_1}{1-\rho} y(x)\right) dx \quad (5.12)$$

Οι στατιστικές γάμμα παράμετροι  $\nu_j, \beta_j (j=1,2)$  δίνονται από τις σχέσεις (2.28) και (2.29), ενώ ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών  $A'_j, j=1,2$  δίνεται από την (2.40). Η παράμετρος  $\nu$  υπολογίζεται ως  $\nu = \sqrt{\nu_1 \nu_2}$ . Επίσης,  $\Gamma(\alpha)$  είναι η γνωστή συνάρτηση γάμμα και  $\Gamma(a, x)$  είναι η ατελής συνάρτηση γάμμα, που ορίζονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και  $g_{X_i}(x)$  είναι η γάμμα κατανομή με παραμέτρους  $\left(\nu+i, \frac{\beta_2}{1-\rho}\right)$ .

#### 5.2.4. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα των τελικών εκφράσεων (5.9) και (5.12). Ο Πίνακας 5.1 περιλαμβάνει τις τιμές των στατιστικών παραμέτρων του ρυθμού βροχόπτωσης για διάφορες τοποθεσίες της γης. Η επιλογή της κατανομής της απόσβεσης εξαρτάται από τη συγκεκριμένη τοποθεσία και τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες, ενώ οι στατιστικές παράμετροι της απόσβεσης της βροχής υπολογίζονται από τις παραμέτρους του ρυθμού βροχόπτωσης σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Οι τιμές των λόγων CNR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού θεωρούνται 20dB, ενώ οι γωνίες ανύψωσης και των δύο δορυφόρων θεωρούνται 40deg.

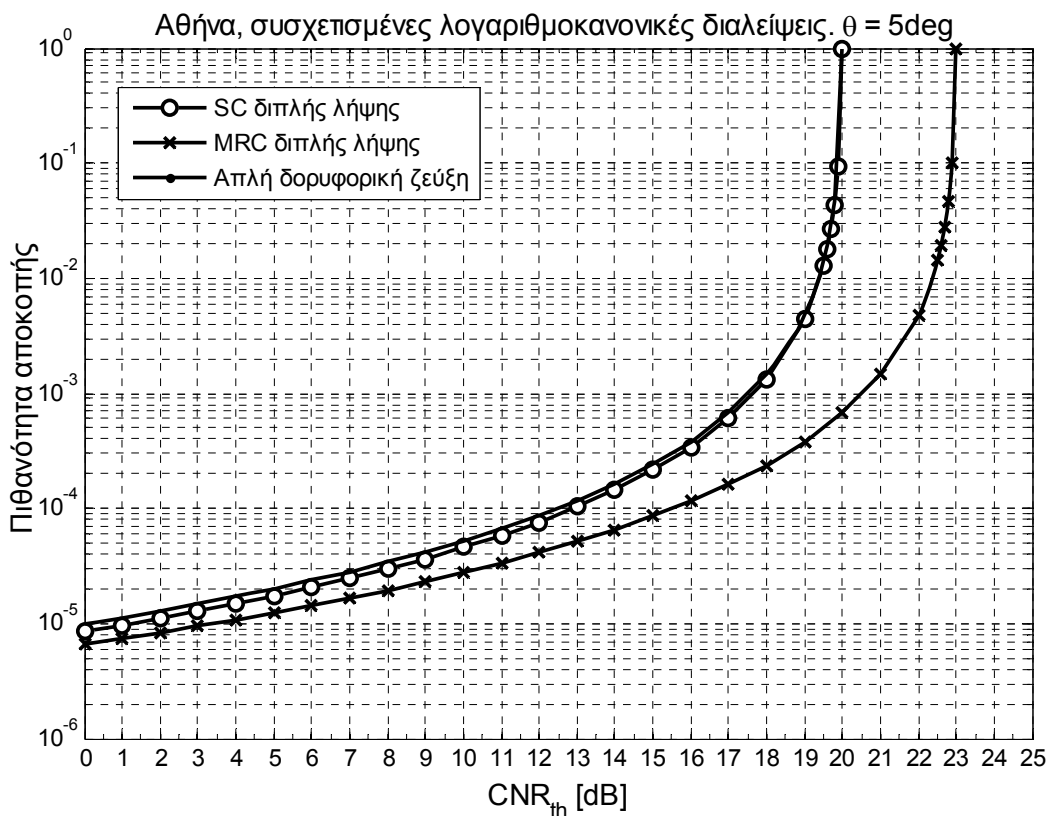
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

#### Στατιστικές παράμετροι του ρυθμού βροχόπτωσης

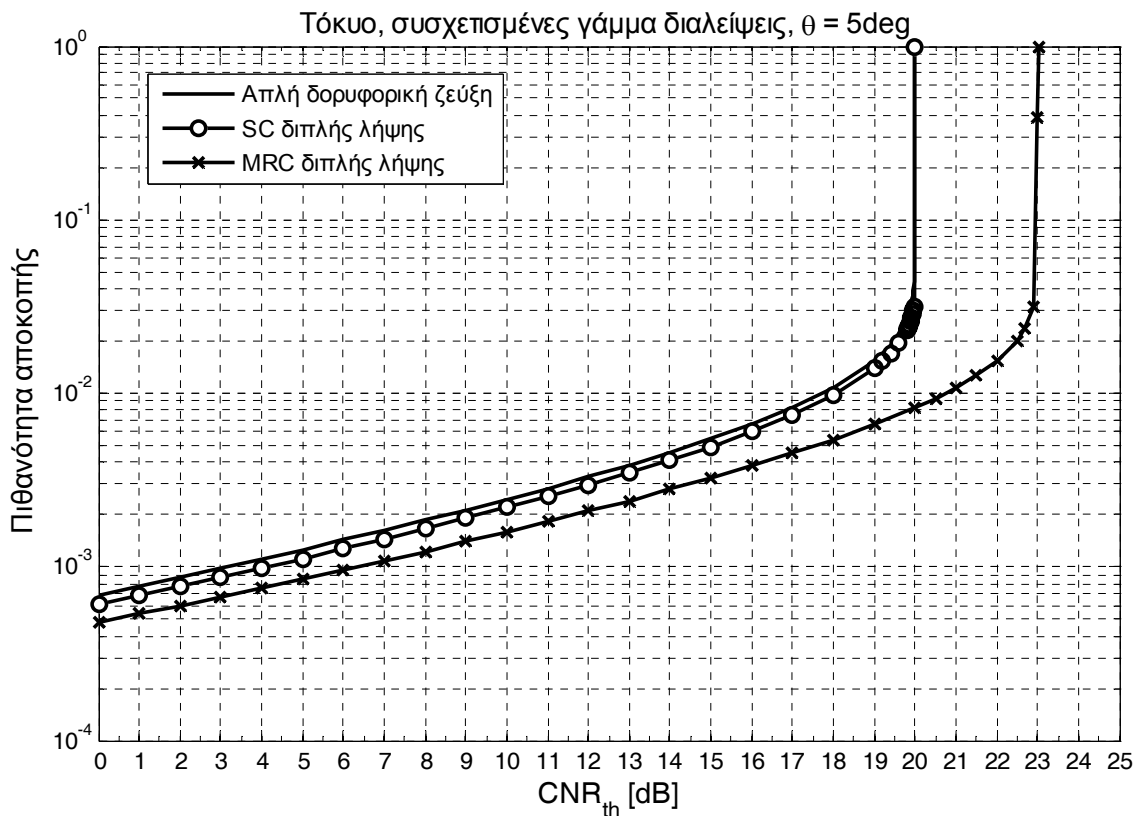
Τοποθεσία	Παράμετροι		
	Κατανομή της απόσβεσης	Κλιματικές παράμετροι	
Αθήνα	Λογαριθμοκανονική κατανομή	$R_m, S_r$	0.0315, 1.6877
Τόκυο	Γάμμα κατανομή	$\nu_R, \beta_R$	0.0066, 0.0399

Τα Σχήματα 5.3 και 5.4 απεικονίζουν την επίδοση της τεχνικής MRC, εκφρασμένη με την πιθανότητα αποκοπής συναρτήσει της στάθμης CNR για δορυφορικούς δέκτες που

λειτουργούν στην Αθήνα και το Τόκυο αντίστοιχα. Η γωνιακή απόκλιση των δύο δορυφόρων της διαφορικής λήψης είναι 5deg. Η καμπύλη της επίδοσης ενός απλού δορυφορικού συστήματος και ενός SC διπλού δορυφορικού συστήματος ([Panagoroulos02c] και [Kanelloroulos90] για το λογαριθμοκανονικό και το γάμμα μοντέλο αντίστοιχα) παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης. Είναι εμφανές ότι ο MRC δέκτης υπερτερεί του απλού δορυφορικού συστήματος κατά περίπου 3dB για όλες τις πιθανές τιμές της στάθμης CNR. Όταν συγκρίνεται με το SC δέκτη, η τεχνική MRC παρουσιάζει πλεονέκτημα 2-3dB εξαρτώμενο από την τιμή της στάθμης CNR. Ως συμπέρασμα, η τεχνική MRC πλεονεκτεί τόσο της τεχνικής SC όσο και του απλού δορυφορικού συστήματος, ανεξαρτήτως των κλιματικών φαινομένων της συγκεκριμένης τοποθεσίας, δηλαδή τόσο για τη λογαριθμοκανονική όσο και για τη γάμμα κατανομή.

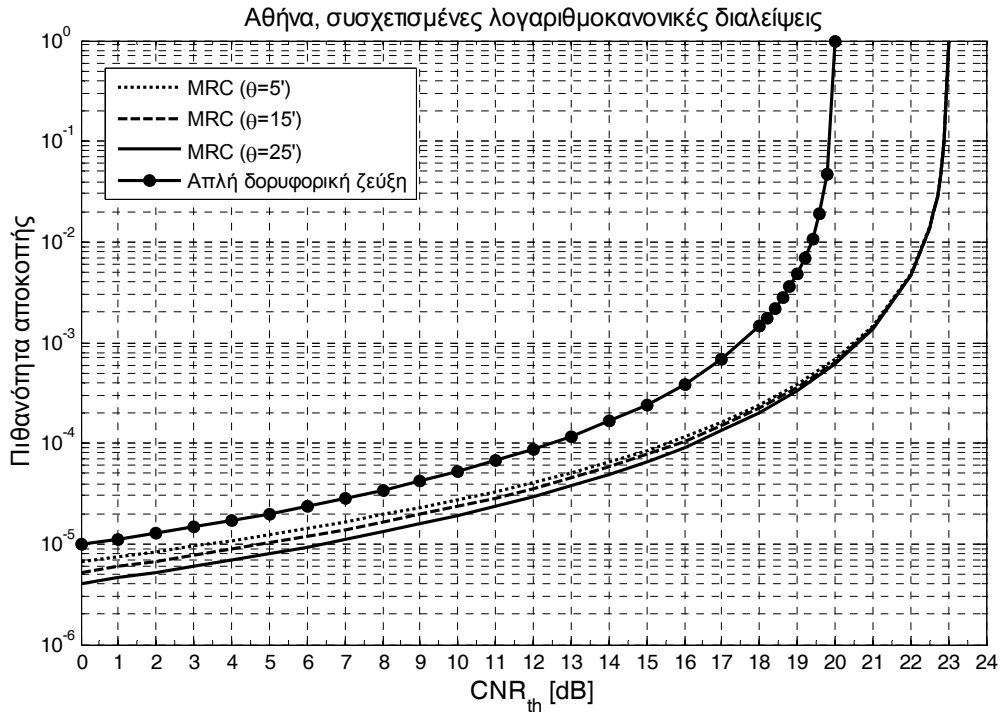


Σχήμα 5.3: Σύγκριση της επίδοσης των MRC και SC δορυφορικών δεκτών και μιας απλής δορυφορικής ζεύξης που λειτουργούν στην Αθήνα.

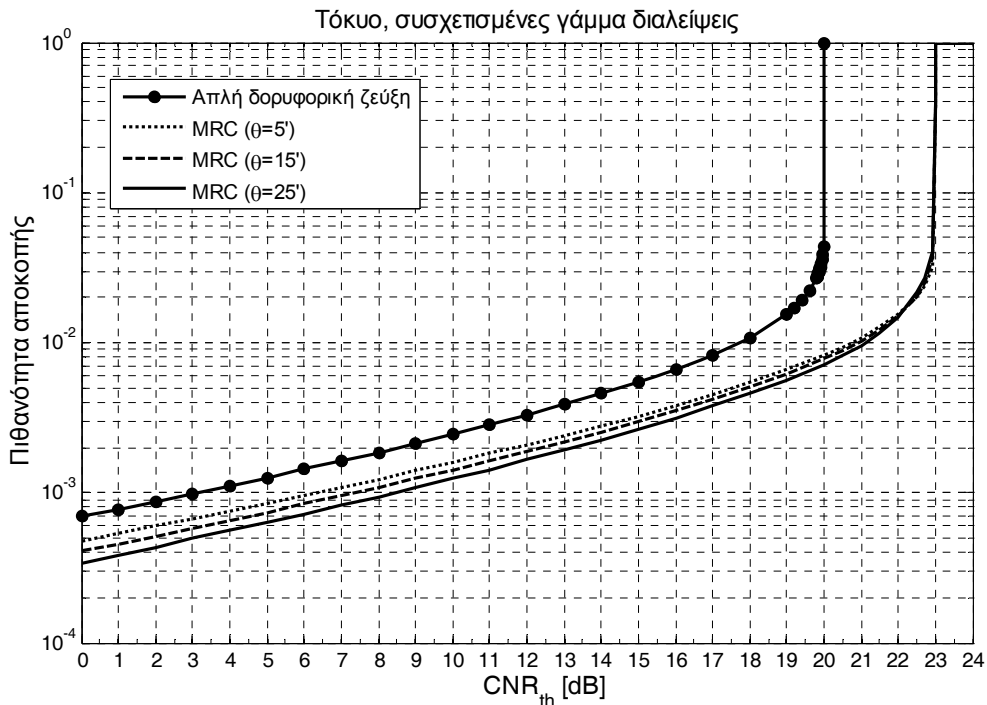


Σχήμα 5.4: Σύγκριση της επίδοσης των MRC και SC δορυφορικών δεκτών και μιας απλής δορυφορικής ζεύξης που λειτουργούν στο Τόκυο.

Τα Σχήματα 5.5 και 5.6 διερευνούν την επίδραση της γωνιακής απόκλισης των δύο δορυφόρων στην επίδοση του MRC δέκτη. Όπως είναι φανερό, η αύξηση της γωνιακής απόκλισης κατά  $10\text{deg}$  έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της CNR στάθμης μέχρι περίπου  $1.5\text{dB}$  για την ίδια τιμή της πιθανότητας αποκοπής. Επιπλέον, το κέρδος της επίδοσης (εκφρασμένο ως CNR κέρδος για συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής) της τεχνικής MRC σε σχέση με το απλό δορυφορικό σύστημα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής μεταβάλλεται από  $3$  μέχρι περίπου  $6\text{dB}$  για γωνιακές αποκλίσεις από  $5$  ως  $25\text{deg}$  αντίστοιχα. Για υψηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής η τεχνική MRC υπερτερεί της απλής δορυφορικής ζεύξης κατά  $3\text{dB}$ .



Σχήμα 5.5: Επίδοση του MRC δορυφορικού δέκτη που λειτουργεί στην Αθήνα για διάφορες γωνιακές αποστάσεις.

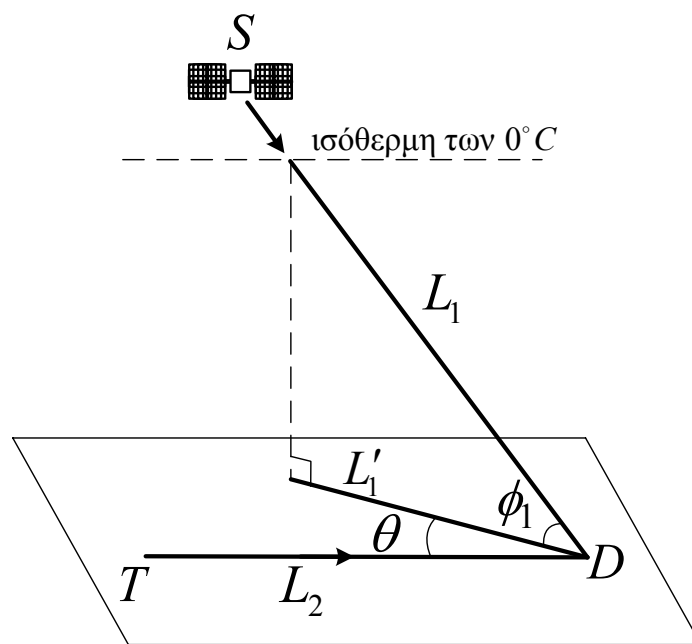


Σχήμα 5.6: Επίδοση του MRC δορυφορικού δέκτη που λειτουργεί στο Τόκιο για διάφορες γωνιακές αποστάσεις.

### **5.3. Συνεργασία δορυφορικών και επίγειων συστημάτων σε τροπικές περιοχές**

#### **5.3.1. Μοντελοποίηση του συστήματος**

Όπως αναφέρεται στην Εισαγωγή αυτού του Κεφαλαίου, για να αντισταθμιστεί το βασικό μειονέκτημα της δορυφορικής διαφορικής λήψης, που είναι η χρήση δύο δορυφόρων, προτείνεται η συνεργασία μεταξύ δορυφορικών και επίγειων δικτύων. Η γεωμετρική διάταξη του θεωρούμενου συστήματος διαφορικότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7. Ο τελικός επίγειος δέκτης  $D$  λαμβάνει δύο εκδοχές του ίδιου σήματος πληροφορίας: μία εκπεμπόμενη από το δορυφόρο  $S$  και μία δεύτερη εκπεμπόμενη από τον επίγειο κόμβο  $T$ . Ο κόμβος  $D$  συνδυάζει τα δύο λαμβανόμενα σήματα χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική SC είτε την τεχνική MRC.



Σχήμα 5.7: Γεωμετρία ενός δορυφορικού και επίγειου συστήματος διαφορικής λήψης.

Τόσο το δορυφορικό όσο και το επίγειο σύστημα λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz. Η γωνία ανύψωσης της δορυφορικής ζεύξης  $SD$  συμβολίζεται ως  $\phi_1$  (deg). Το ενεργό μήκος της δορυφορικής ζεύξης, που αντιστοιχεί στο τμήμα της ζεύξης  $SD$  από τον

επίγειο σταθμό D μέχρι την ισόθερμη των  $0^\circ C$ , συμβολίζεται ως  $L_1(Km)$  και η προβολή του στη γη ως  $L'_1(Km) = L_1 \cos \phi_1$ , ενώ το μήκος της επίγειας ζεύξης TD συμβολίζεται ως  $L_2(Km)$ . Η επίγεια ζεύξη TD και η προβολή της δορυφορικής ζεύξης SD στη γη σχηματίζουν γωνία  $\theta(deg)$ .

Οι αποσβέσεις λόγω βροχής που εισάγονται στη δορυφορική και στην επίγεια ζεύξη, που συμβολίζονται ως  $A_j(dB), j=1,2$  αντίστοιχα, θεωρούνται συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την από κοινού γάμμα κατανομή για ένα σύστημα που λειτουργεί σε τροπικές περιοχές [Kanellouros90]. Ο σηματοθορυβικός λόγος σε συνθήκες καθαρού ουρανού της ζεύξης  $j(j=1,2)$  συμβολίζεται ως  $CNR_{j,cs}(dB)$ . Οι λόγοι CNR κάθε ζεύξης σε συνθήκες βροχής υπολογίζονται ως:

$$CNR_{j,r}(dB) = CNR_{j,cs} - A_j \quad (j=1,2) \quad (5.13)$$

Ο επίγειος δέκτης D συνδυάζει το δορυφορικό και το επίγειο σήμα δημιουργώντας ένα καινούριο σήμα που είτε αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο λόγο CNR (για την τεχνική SC), είτε ο CNR λόγος του ισούται με το άθροισμα σε γραμμική κλίμακα των λόγων CNR των δύο ζεύξεων (για την τεχνική MRC). Ο συνολικός λόγος CNR εκφρασμένος σε dB για συνθήκες βροχόπτωσης, υπολογίζεται ως:

$$CNR_D(dB) = \begin{cases} 10 \log \left( 10^{CNR_{1,r}/10} + 10^{CNR_{2,r}/10} \right), & \text{για MRC} \\ \max(CNR_{1,r}, CNR_{2,r}), & \text{για SC} \end{cases} \quad (5.14)$$

Εφαρμόζοντας την απλοποιημένη θεώρηση του Crane για την κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης [Crane03] και χρησιμοποιώντας την σχέση (5.13), ο τελικός λόγος CNR εκφράζεται ως:

$$CNR_D = \begin{cases} 10 \log \left( 10^{\frac{CNR_{1,cs} - A'_1 / \cos \phi_1}{10}} + 10^{\frac{CNR_{2,cs} - A_2}{10}} \right), & \text{για MRC} \\ \max \left( \left( CNR_{1,cs} - \frac{A'_1}{\cos \phi_1} \right), (CNR_{2,cs} - A_2) \right), & \text{για SC} \end{cases} \quad (5.15)$$

Στην παραπάνω έκφραση,  $A'_1 = A_1 \cos \phi_1$  είναι η απόσβεση λόγω βροχής που αναφέρεται στην προβολή του ενεργού μήκους της δορυφορικής ζεύξης πάνω στη γη, που έχει μήκος  $L'_1$ .

Η πιθανότητα αποκοπής του δορυφορικού – επίγειου συστήματος διαφορεικής λήψης ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που ο συνολικός λόγος CNR δεν υπερβαίνει μια συγκεκριμένη στάθμη  $CNR_{th}$  (dB):

$$P_{out} = P(CNR_D < CNR_{th}) \quad (5.16)$$

Στις επόμενες παραγράφους, η παραπάνω πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται για τις περιπτώσεις των συνδυαστικών τεχνικών MRC και SC.

### 5.3.2. Πιθανότητα αποκοπής της τεχνικής MRC

Η πιθανότητα αποκοπής της (5.16) για την περίπτωση MRC υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.15) και ολοκληρώνοντας την από κοινού γάμμα κατανομή  $f_{A'_1, A_2}(A'_1, A_2)$  [Kanellopoulos90]:

$$P_{out} = \int_{A_{2,\infty}}^{\infty} \int_{A'_1(A_2)}^{\infty} f_{A'_1, A_2}(A'_1, A_2) dA'_1 dA_2 \quad (5.17)$$

Στην παραπάνω έκφραση, τα όρια  $A_{2,\infty}$  και  $A'_1(A_2)$  είναι οι ρίζες των εξισώσεων  $C(\infty, A_{2,\infty}) = CNR_{th}$ , εξασφαλίζοντας ότι  $A_{2,\infty} \geq 0$ , και  $C(A'_1(A_2), A_2) = CNR_{th}$  αντίστοιχα, όπου η καμπύλη  $C(A_1, A_2) = CNR_D$  δίνεται από τον MRC κλάδο της (5.15). Χρησιμοποιώντας κατάλληλους μετασχηματισμούς και απλή αλγεβρική ανάλυση, η έκφραση (5.17) απλοποιείται ως εξής:

$$P_{out} = \frac{(1-\rho)^{\nu}}{\Gamma(\nu)} \int_{A_{2,\infty}}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\rho^i}{i!} f_{A_{2,i}}(A_2) \Gamma\left(\nu+i, \frac{\beta_1}{1-\rho} A'_1(A_2)\right) dA_2 \quad (5.18)$$

Οι στατιστικές γάμμα παράμετροι  $\nu_j, \beta_j$  ( $j=1,2$ ) δίνονται από τις σχέσεις (2.28) και (2.29), ενώ ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  δίνεται από την (2.40). Η παράμετρος  $\nu$  υπολογίζεται ως  $\nu = \sqrt{\nu_1 \nu_2}$ . Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η από κοινού γάμμα κατανομή ορίζεται για τυχαίες μεταβλητές με παρόμοιες στατιστικές παραμέτρους  $\nu_1 \approx \nu_2$ . Επιπλέον,  $\Gamma(\alpha)$  είναι η γνωστή συνάρτηση γάμμα και  $\Gamma(a, x)$  είναι η ατελής συνάρτηση γάμμα, που ορίζονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο και  $f_{A_{2,i}}(A_2)$  είναι η γάμμα κατανομή με παραμέτρους  $(\nu+i, \beta_2/(1-\rho))$ .



### 5.3.3. Πιθανότητα αποκοπής της τεχνικής SC

Η πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος διαφορικής λήψης δύο δορυφόρων που χρησιμοποιεί την τεχνική SC παρουσιάζεται στη δημοσίευση [Kanellorou90]. Σε αυτήν την παράγραφο υπολογίζεται η πιθανότητα αποκοπής της τεχνικής SC για ένα δορυφορικό – επίγειο σύστημα διαφορικής λήψης. Η πιθανότητα αποκοπής της (5.16) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την (5.15) και ολοκληρώνοντας την από κοινού γάμμα κατανομή:

$$P_{out} = \int_{A_{2,0}}^{\infty} \int_{A'_{1,0}}^{\infty} f_{A'_1, A_2} (A'_1, A_2) dA'_1 dA_2 \quad (5.19)$$

Στην παραπάνω έκφραση, τα όρια των ολοκληρωμάτων είναι  $A_{2,0} = CNR_{2,r} - CNR_{th}$  και  $A'_{1,0} = (CNR_{1,r} - CNR_{th}) \cos \phi$ , εξασφαλίζοντας ότι  $A'_{1,0}, A_{2,0} \geq 0$ . Χρησιμοποιώντας κατάλληλους μετασχηματισμούς και απλή αλγεβρική ανάλυση, η έκφραση (5.19) απλοποιείται ως εξής:

$$P_{out} = \frac{(1-\rho)^v}{\Gamma(v)} \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \frac{\rho^i}{i!} \Gamma(v+i) \left[ 1 - \Gamma\left(v+i, \frac{\beta_1}{1-\rho} A'_{1,0}\right) \right] \left[ 1 - \Gamma\left(v+i, \frac{\beta_2}{1-\rho} A_{2,0}\right) \right] \right\} \quad (5.20)$$

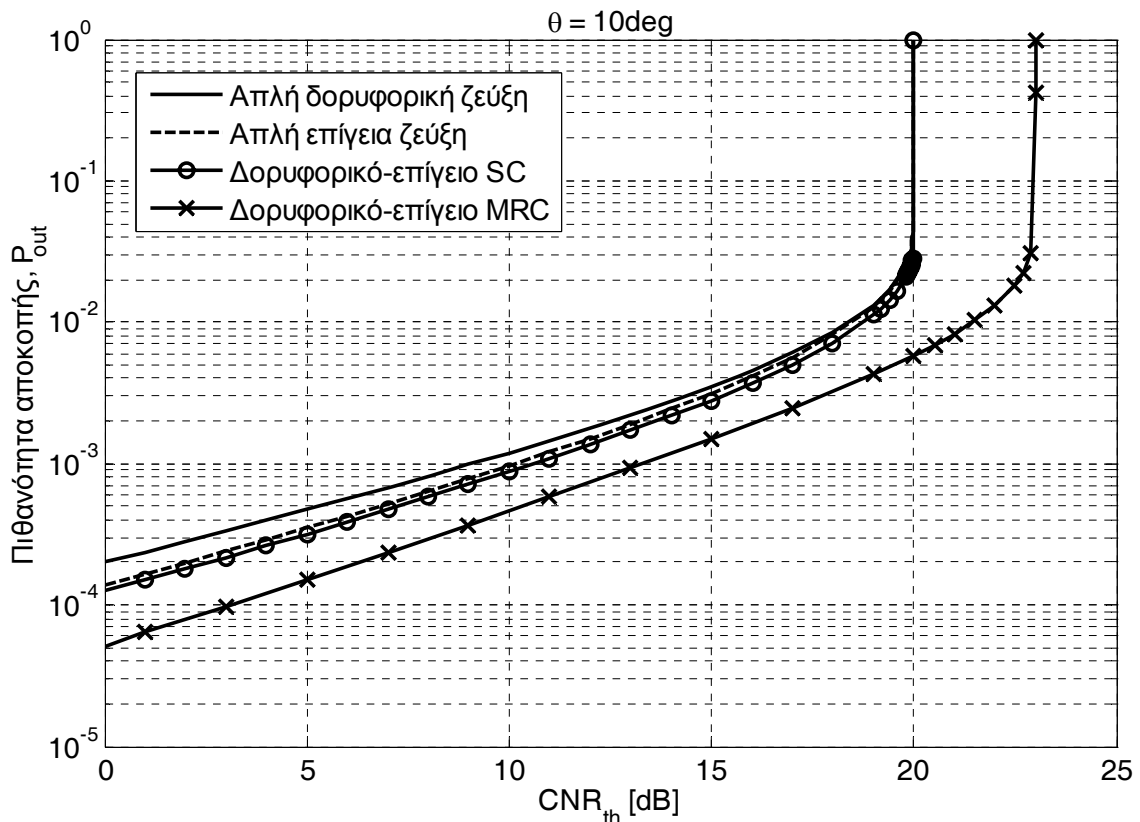
Οι παράμετροι της παραπάνω σχέσης είναι ίδιες με τις παραμέτρους της σχέσης (5.18) για την περίπτωση της τεχνικής MRC.

### 5.3.4. Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Σε αυτήν την παράγραφο, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το αναλυτικό προτεινόμενο μοντέλο για την πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος δορυφορικής – επίγειας διαφορικής λήψης που λειτουργεί στην περιοχή Manaus της Βραζιλίας (3.06°S, 60.01°W). Οι τιμές των σηματοθορυβικών λόγων σε συνθήκες καθαρού ουρανού θεωρούνται 20dB και για τις δύο ζεύξεις, η συχνότητα λειτουργίας είναι 12GHz, ενώ η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου θεωρείται 45deg. Οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων του ρυθμού βροχόπτωσης είναι  $(\nu_R, \beta_R) = (0.0095, 0.0323)$ .

Στο Σχήμα 5.8, η πιθανότητα αποκοπής απεικονίζεται συναρτήσει της στάθμης CNR για ένα σύστημα διαφορικής λήψης που χρησιμοποιεί τις τεχνικές MRC και SC. Οι καμπύλες της πιθανότητας αποκοπής του απλού δορυφορικού και του απλού επίγειου συστήματος δίνονται για λόγους σύγκρισης. Η γωνιακή απόκλιση της προβολής της

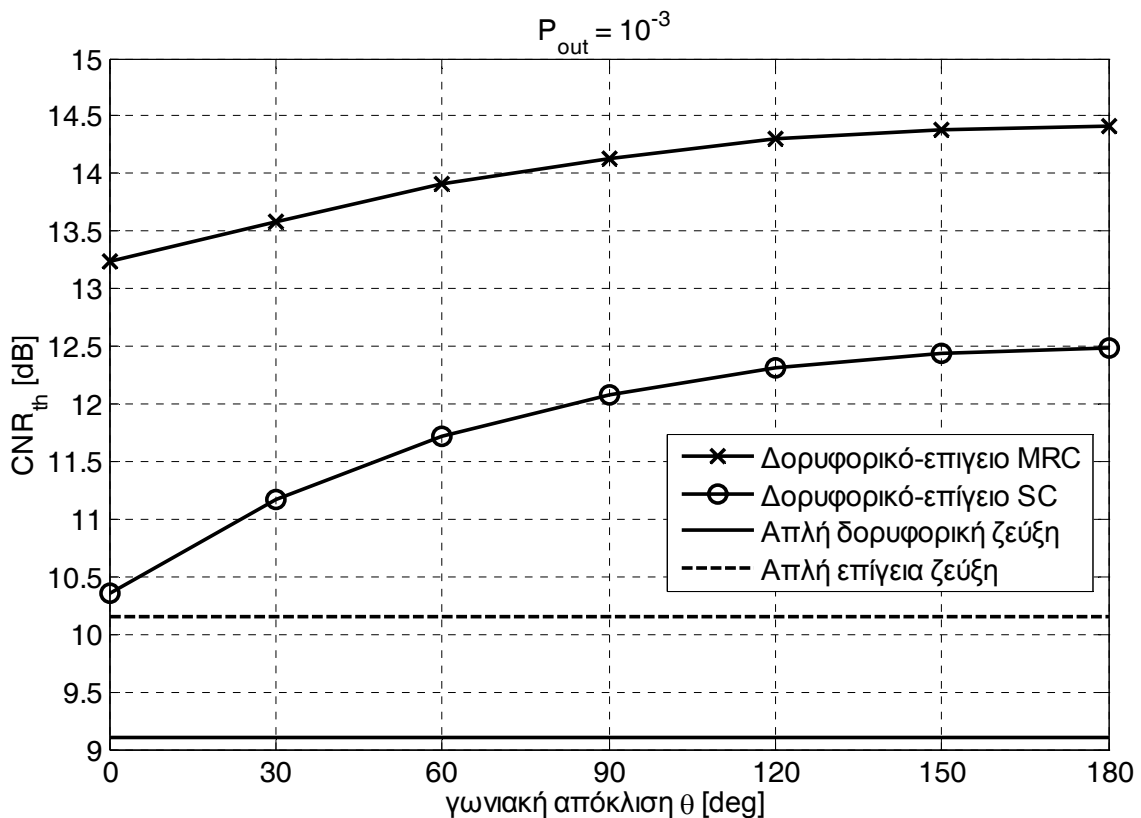
δορυφορικής ζεύξης στη γη και της επίγειας ζεύξης είναι  $\theta = 10^\circ$ , ενώ το μήκος της επίγειας ζεύξης είναι  $L_2 = 6Km$ . Όπως είναι εμφανές από αυτό το Σχήμα, και οι δύο τεχνικές MRC και SC υπερτερούν των επιδόσεων των απλών ζεύξεων. Επιπλέον, το CNR κέρδος της τεχνικής MRC είναι σημαντικά μεγαλύτερο συγκριτικά με το αντίστοιχο κέρδος της τεχνικής SC.



Σχήμα 5.8: Πιθανότητα αποκοπής του δορυφορικού – επίγειου συστήματος MRC και SC και σύγκριση με την αντίστοιχη δορυφορική και επίγεια απλή ζεύξη.

Στο Σχήμα 5.9, η στάθμη CNR των τεχνικών MRC και SC απεικονίζεται για δεδομένη τιμή της πιθανότητας αποκοπής  $P_{out} = 10^{-3}$  συναρτήσει της γωνιακής απόκλισης  $\theta$  για  $L_2 = 6Km$ . Οι καμπύλες της επίδοσης της απλής δορυφορικής και της απλής επίγειας ζεύξης απεικονίζονται επίσης για λόγους σύγκρισης. Για μικρές τιμές της γωνίας  $\theta$ , η επίδοση και των δύο τεχνικών MRC και SC μειώνεται, καθώς μικρές τιμές της γωνίας  $\theta$  συνεπάγονται υψηλή τιμή της συσχέτισης μεταξύ των αποσβέσεων της δορυφορικής και

επίγειας ζεύξης. Αντίθετα, καθώς η τιμή της γωνίας  $\theta$  μεγαλώνει, οι αποσβέσεις των ζεύξεων αυτών γίνονται πιο ασυσχέτιστες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το CNR κέρδος σε σχέση με την απλή δορυφορική ή επίγεια ζεύξη να αυξάνεται και για τις δύο συνδυαστικές τεχνικές. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το CNR κέρδος, σε σχέση με μια απλή ζεύξη, που αφορά την τεχνική MRC είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κέρδος της τεχνικής SC ιδιαίτερα για μικρές τιμές της γωνίας  $\theta$ .

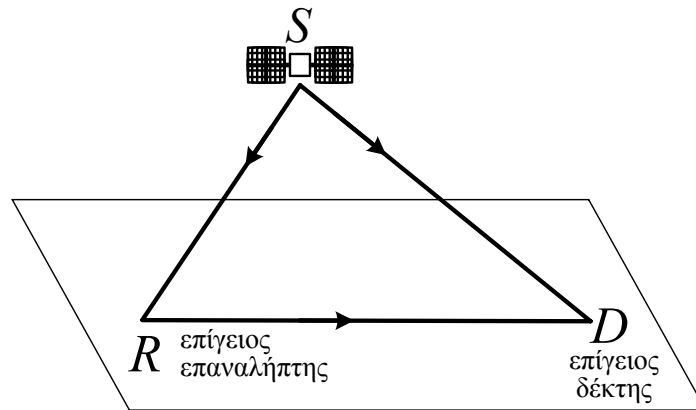


Σχήμα 5.9: Στάθμη CNR για  $P_{out} = 10^{-3}$  συναρτήσει της δορυφορικής – επίγειας γωνιακής απόκλισης για τις τεχνικές MRC και SC και σύγκριση με τις αντίστοιχες απλές ζεύξεις.

#### 5.4. Επίδοση των συνεργατικών δορυφορικών – επίγειων δικτύων

Το αντικείμενο αυτής της παραγράφου είναι η παρουσίαση ενός αναλυτικού μοντέλου διάδοσης για την πρόβλεψη της συνολικής επίδοσης ενός δορυφορικού

συνεργατικού συστήματος που χρησιμοποιεί έναν επίγειο επαναλήπτη. Το θεωρούμενο συνεργατικό σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 5.10.

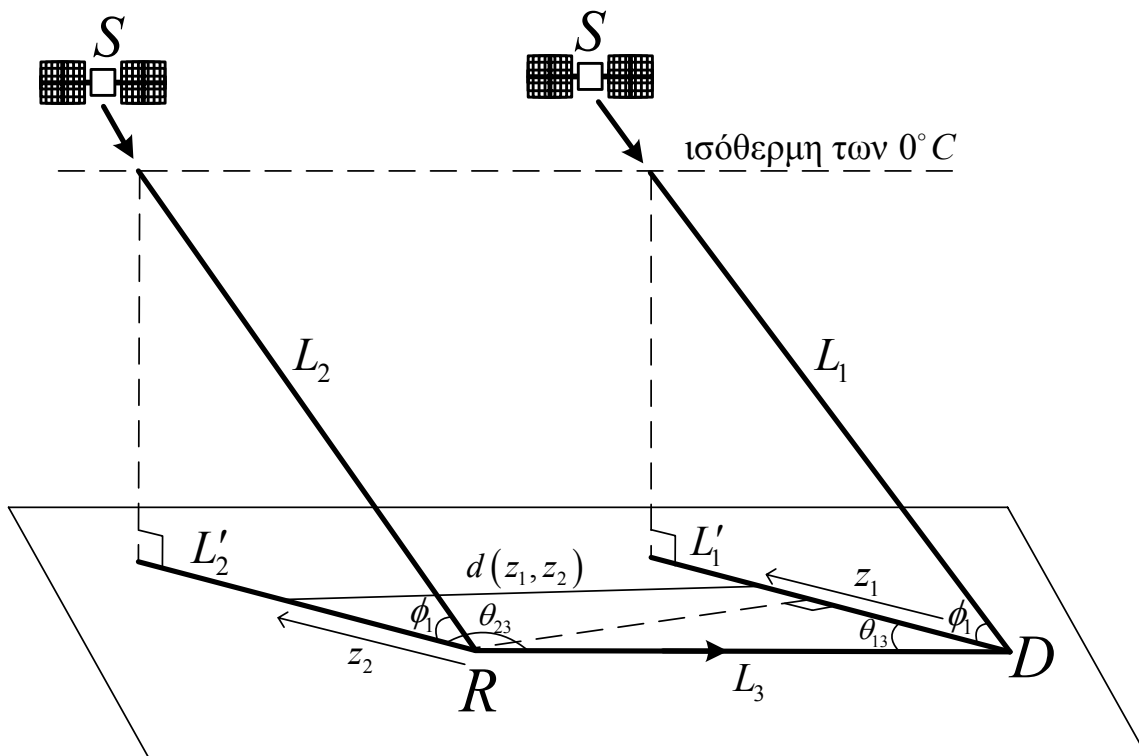


Σχήμα 5.10: Δορυφορικό – επίγειο συνεργατικό σύστημα.

Ο δορυφόρος  $S$  εκπέμπει το ίδιο σήμα πληροφορίας τόσο προς τον τελικό επίγειο δέκτη  $D$ , όσο και προς έναν επίγειο αναγεννητικό επαναλήπτη  $R$ , ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από τον τελικό δέκτη. Στη συνέχεια, ο επαναλήπτης  $R$  προωθεί το λαμβανόμενο σήμα, χρησιμοποιώντας την τεχνική αποκωδικοποίησης-και-προώθησης, προς τον δέκτη  $D$ , ο οποίος τελικά συνδυάζει τα δύο λαμβανόμενα σήματα. Με αυτόν τον τρόπο, ο επίγειος επαναλήπτης προσφέρει χωρική διαφορικότητα στο συνεργατικό δορυφορικό – επίγειο σύστημα. Ο δέκτης  $D$  μπορεί να συνδυάσει τα λαμβανόμενα σήματα είτε με την τεχνική MRC, είτε με την τεχνική SC, ενώ τα πρωτόκολλα συνεργασίας SR και FR μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως στην περίπτωση ενός επίγειου συνεργατικού συστήματος που περιγράφηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Το μήκος των δύο δορυφορικών ζεύξεων, από το δορυφόρο  $S$  μέχρι τον επίγειο επαναλήπτη  $R$  και από το δορυφόρο  $S$  μέχρι τον επίγειο δέκτη  $D$ , είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το μήκος της επίγειας ζεύξης από τον επαναλήπτη  $R$  μέχρι το δέκτη  $D$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι δύο δορυφορικές ζεύξεις να θεωρούνται παράλληλες. Η ισοδύναμη γεωμετρική διάταξη του δορυφορικού συνεργατικού συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 5.11. Η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου συμβολίζεται ως  $\phi$  (deg). Τα ενεργά μήκη των δύο δορυφορικών ζεύξεων, από τον επίγειο δέκτη  $D$  και τον επίγειο επαναλήπτη  $R$  αντίστοιχα μέχρι την ισόθερμη των  $0^\circ C$ , συμβολίζονται ως  $L_j(Km), j=1,2$  ( $L_1 = L_2$ ) και η προβολή

τους στη γη ως  $L'_j(Km) = L_j \cos \phi_j, j = 1, 2$  ( $L'_1 = L'_2$ ), ενώ το μήκος της επίγειας ζεύξης συμβολίζεται ως  $L_3(Km)$ . Η επίγεια ζεύξη R-D σχηματίζει με τις προβολές στη γη των δύο δορυφορικών ζεύξεων S-D και S-R, γωνίες  $\theta_{13}(\text{deg})$  και  $\theta_{23}(\text{deg})$  αντίστοιχα. Τόσο το δορυφορικό, όσο και το επίγειο σύστημα λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και υποφέρουν από διαλείψεις λόγω βροχής που συμβολίζονται ως  $A_j(dB), j = 1, 2, 3$  για κάθε ζεύξη αντίστοιχα. Οι αποσβέσεις αυτές θεωρούνται συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή.



Σχήμα 5.11: Ισοδύναμη γεωμετρική διάταξη του δορυφορικού συνεργατικού συστήματος.

Χρησιμοποιώντας και πάλι την απλοποιημένη θεώρηση του Crane για ομοιόμορφη κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης [Crane03], που περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.5, οι αποσβέσεις που εισάγονται στις υποθετικές επίγειες ζεύξεις με μήκος  $L'_j(j = 1, 2)$  υπολογίζονται ως:

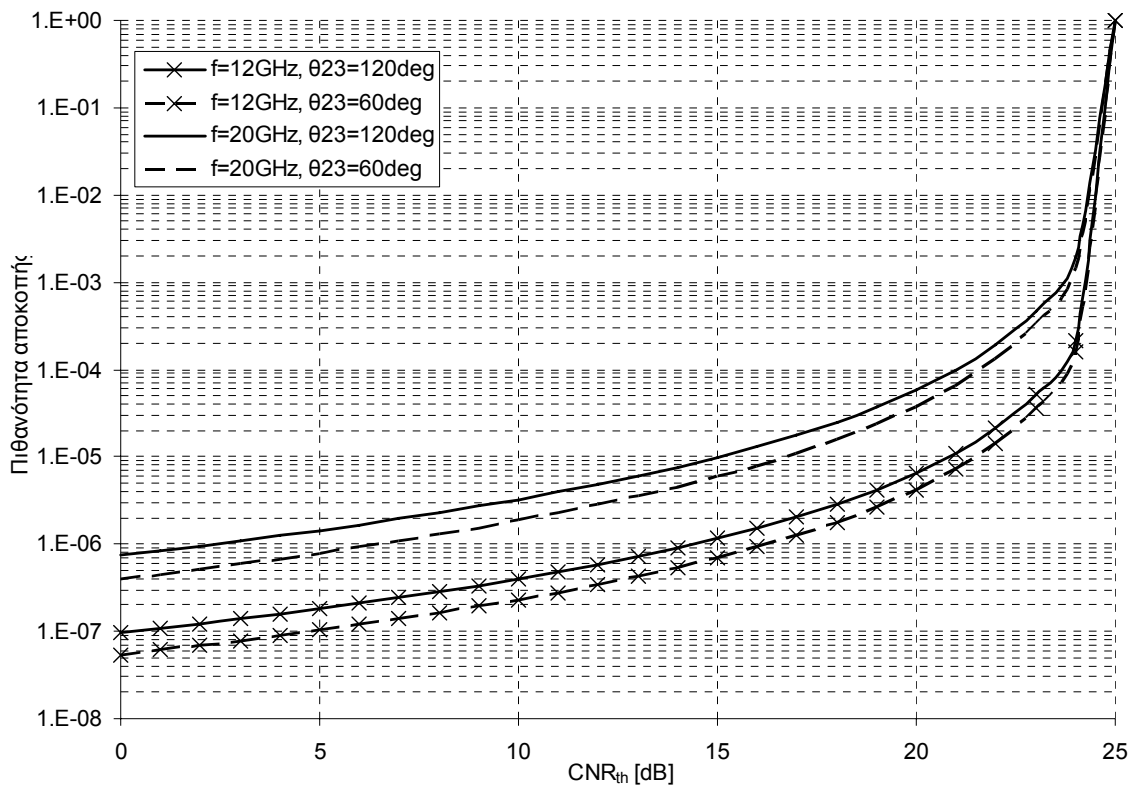
$$A'_j(dB) = A_j \cos \phi_j (j = 1, 2) \quad (5.21)$$

Οι τυχαίες μεταβλητές  $A'_1, A'_2, A'_3$  είναι επίσης συσχετισμένες και υποθέτουμε ότι ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή  $f_{A'_1, A'_2, A'_3}(A'_1, A'_2, A'_3)$ . Χρησιμοποιώντας την ίδια ανάλυση με αυτήν που περιγράφηκε στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο για ένα επίγειο συνεργατικό σύστημα και λαμβάνοντας υπόψη την έκφραση (5.21), οι σηματοθορυβικοί λόγοι της κάθε ζεύξης υπό συνθήκες βροχής δίνονται από την (4.3), ενώ ο λόγος CNR που εκφράζει το ενδεχόμενο αποκοπής του συνεργατικού συστήματος δίνεται από την (4.4) για ένα σύστημα FR και από τις (4.12) και (4.13) για ένα σύστημα SR. Επίσης, ολοκληρώνοντας την κατανομή  $f_{A'_1, A'_2, A'_3}(A'_1, A'_2, A'_3)$  αντί της  $f_{A_1, A_2, A_3}(A_1, A_2, A_3)$  ως προς  $A'_1, A'_2, A'_3$  και λαμβάνοντας υπόψη την (5.21) για τον υπολογισμό των ορίων των ολοκληρωμάτων, η πιθανότητα του συνεργατικού συστήματος δίνεται από την (4.9) για ένα σύστημα FR και από την (4.17) για ένα σύστημα SR.

Στις εκφράσεις (4.9) και (4.17), ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των αντίστοιχων κανονικών τυχαίων μεταβλητών δίνεται από την (2.19) και ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των λογαριθμοκανονικών τυχαίων μεταβλητών δίνεται από την (2.20), αλλά για την περίπτωση των μεταβλητών  $A'_1, A'_2$  πρέπει να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία των παράλληλων ζεύξεων του Σχήματος 5.11. Επομένως, για τον υπολογισμό του σημειακού συντελεστή συσχέτισης  $\rho_0$  (Κεφάλαιο 2) μεταξύ των ειδικών αποσβέσεων δύο σημείων των παράλληλων ζεύξεων, η μεταξύ τους απόσταση υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} d(z_1, z_2) &= \sqrt{(L_3 \sin \theta_{13})^2 + (z_1 - z_2 - L_3 \cos \theta_{13})^2} \\ &= \sqrt{(L_3 \sin \theta_{23})^2 + (z_2 - z_1 - L_3 \cos \theta_{23})^2} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους μπορούν να προκύψουν αριθμητικά αποτελέσματα παρόμοια με αυτά του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Το Σχήμα 5.12 απεικονίζει την πιθανότητα αποκοπής ενός δορυφορικού συνεργατικού συστήματος συναρτήσει της στάθμης  $CNR_{th}$  (dB) για δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας  $f = 12GHz$  και  $f = 20GHz$  και δύο διαφορετικές γωνιακές αποκλίσεις  $\theta_{23} = 60deg$  και  $\theta_{23} = 120deg$  για ένα SR SDMA SC σύστημα που λειτουργεί στην Αθήνα. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:  $\phi_1 = 45deg$ , σηματοθορυβικοί λόγοι σε συνθήκες καθαρού ουρανού  $CNR_{j,cs} = 25dB$  ( $j = 1, 2, 3$ ) και  $L_3 = 5km$ .



Σχήμα 5.12: Πιθανότητα αποκοπής ενός δορυφορικού συνεργατικού συστήματος με επίγειο επαναλήπτη που λειτουργεί στην Αθήνα.

Όπως είναι φανερό από αυτό το Σχήμα, τόσο η συχνότητα λειτουργίας όσο και η γεωμετρία του συστήματος επηρεάζουν σημαντικά την επίδοση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα έχει πολύ σημαντικό κόστος στην επίδοση του συστήματος, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επίσης, η διαφορετική γεωμετρία του συστήματος συνεπάγεται διαφορετική επίδοση κατά αρκετά dB (ως 4dB) ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επομένως, για την αξιόπιστη σχεδίαση ενός συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη η θέση του επαναλήπτη και να αναζητηθεί η βέλτιστη θέση του. Εναλλακτικά, για μια δεδομένη θέση του επαναλήπτη, η περιοχή κάλυψης (μέσα στην οποία εξασφαλίζεται συγκεκριμένη τιμή πιθανότητας αποκοπής) του συστήματος δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη γύρω από αυτόν, καθώς προς συγκεκριμένες διευθύνσεις η περιοχή κάλυψης είναι μεγαλύτερη ή ισοδύναμα η επίδοση του συστήματος σε αυτές τις διευθύνσεις είναι καλύτερη. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι ο περιορισμός της επίδοσης του FR συνεργατικού συστήματος από το

σηματοθορυβικό λόγο της ζεύξης από το δορυφόρο στον επαναλήπτη, μπορεί να αντισταθμιστεί σε ένα δορυφορικό σύστημα αν ο επαναλήπτης είναι εξοπλισμένος με μία κεραία μεγαλύτερου κέρδους από το κέρδος της κεραίας του δέκτη D. Αυτό είναι εφικτό καθώς είναι αρκετά πιθανό ένας επαναλήπτης (π.χ. hub) να εξυπηρετεί περισσότερους από έναν τελικούς χρήστες και επομένως να διαθέτει καλύτερο εξοπλισμό από ένα μεμονωμένο χρήστη.

### **5.5. Συμπεράσματα**

Σε αυτό το Κεφάλαιο αρχικά προτείνονται αναλυτικές εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος διπλής δορυφορικής διαφορικής λήψης που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής που μοντελοποιούνται είτε ως συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές είτε ως συσχετισμένες γάμμα τυχαίες μεταβλητές. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι χρησιμοποιεί δύο δορυφόρους καθώς και επιπλέον πόρους στον εξοπλισμό του δέκτη. Παρόλα αυτά, ένα σύστημα δορυφορικής διαφορικής λήψης είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές υψηλής διαθεσιμότητας (π.χ. τηλεϊατρική, εφαρμογές τηλεδιάσκεψης) ή σε περιοχές ισχυρών φαινομένων βροχόπτωσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα διερευνούν το κέρδος της επίδοσης της τεχνικής MRC σε σχέση με την τεχνική SC. Επιπλέον, τα αριθμητικά αποτελέσματα απεικονίζουν την επίδραση της γωνιακής απόκλισης στο κέρδος της επίδοσης της τεχνικής MRC σε σχέση με μια απλή δορυφορική ζεύξη. Οι προτεινόμενες αναλυτικές εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αξιόπιστο σχεδιασμό ενός δορυφορικού δικτύου και για την αξιολόγηση και σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών συνδυαστικών τεχνικών. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε κάθε μέρος της γης επιλέγοντας την κατάλληλη κατανομή των διαλείψεων (λογαριθμοκανονική ή γάμμα) που προσεγγίζει καλύτερα είτε τα πειραματικά δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης είτε τα δεδομένα των χαρτών βροχής της ITU-R.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου, προτείνεται η συνεργασία μεταξύ δορυφορικών και επίγειων δικτύων με σκοπό να αποφευχθεί η χρήση πολλαπλών δορυφόρων και ταυτόχρονα να βελτιωθεί η επίδοση ενός συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής. Ένα πιθανό μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος έγκειται στη δυσκολία συγχρονισμού των δορυφορικών και επίγειων σημάτων, λόγω της μεγάλης χρονικής καθυστέρησης διάδοσης του δορυφορικού σήματος σε σχέση με την αντίστοιχη



καθυστερήση διάδοσης του επίγειου σήματος. Παρόλα αυτά, σωστός συγχρονισμός μεταξύ των δύο σημάτων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη αποθήκευση (buffering) των σημάτων, καθώς οι κόμβοι του συστήματος είναι σταθεροί και οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι γνωστές. Αναλυτικές εκφράσεις παρουσιάζονται τόσο για την επίδοση ενός συστήματος δορυφορικής και επίγειας διαφορικής λήψης, που λειτουργεί σε τροπικές περιοχές, όσο για την ολική επίδοση ενός συνεργατικού δορυφορικού συστήματος με έναν επίγειο επαναλήπτη, που λειτουργεί σε περιοχές με ήπια φαινόμενα βροχόπτωσης. Οι διαφορετικές συνδυαστικές τεχνικές συγκρίνονται μεταξύ τους καθώς και με μια απλή δορυφορική ή επίγεια ζεύξη. Επίσης, από τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η γεωμετρία του συστήματος παίζει καταλυτικό ρόλο στην επίδοσή του. Επομένως, για την αξιόπιστη σχεδίαση ενός δορυφορικού συνεργατικού συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη η θέση του επίγειου επαναλήπτη και να αναζητηθεί η βέλτιστη θέση του ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή γεωγραφική κάλυψη.

*Β. Κ. Σακαρέλλος – Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα.*

## **6. Συμπεράσματα και προοπτικές για μελλοντική έρευνα**

### ***6.1. Συμπεράσματα***

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάλυση της επίδοσης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που χρησιμοποιούν τεχνικές συνεργατικής διαφορικότητας, καθώς και των μικροαρχιτεκτονικών που αποτελούν τα βασικά εργαλεία σύνθεσης των συστημάτων αυτών. Τα συνεργατικά συστήματα αποτελούνται από πολλαπλούς κόμβους, οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους δημιουργώντας πολλαπλά κανάλια διαφορικότητας που γενικά υποφέρουν από συσχετισμένες διαλείψεις. Επομένως, ο τελικός χρήστης λαμβάνει πολλαπλές εκδοχές του ίδιου σήματος πληροφορίας μέσω των συνεργατικών κόμβων και τις συνδυάζει κατάλληλα δημιουργώντας το τελικό σήμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της επίδοσης και της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των συνεργατικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα διάφορα είδη επαναλήπτη που χρησιμοποιούνται στα συνεργατικά δίκτυα, οι συνδυαστικές τεχνικές διαφορικής λήψης με τις οποίες ο τελικός δέκτης συνδυάζει τα διαφορετικά σήματα που λαμβάνει, τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης που επιτρέπουν στους χρήστες ενός δικτύου να μοιράζονται το μέσο διάδοσης καθώς και τα πρωτόκολλα συνεργατικής διαφορικότητας που ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται οι κόμβοι ενός δικτύου. Τέλος, παρουσιάζεται μια γενική αναδρομή στην πρόσφατη βιβλιογραφία των συνεργατικών δικτύων.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση του φυσικού στρώματος των καναλιών που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια. Όταν ένα σύστημα λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz (τόσο από 10GHz ως 50GHz, όσο και άνω των 50GHz)

υποφέρει κυρίως από διαλείψεις λόγω βροχής. Η απόσβεση λόγω βροχής μοντελοποιείται ως μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή όταν αυτή είναι εκφρασμένη σε dB, ενώ για την από κοινού στατιστική της απόσβεσης της βροχής προτείνεται η από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Η συσχέτιση μεταξύ των τυχαίων αυτών μεταβλητών εκφράζει τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου διάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, για τη διάδοση σε συχνότητες 10-50GHz προτείνεται το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων, ενώ για τη διάδοση σε συχνότητες άνω των 50GHz, πρέπει να ληφθεί υπόψη το συνδυαστικό στρωσιγενές-συνεκτικό μοντέλο. Επιπροσθέτως, εξετάζεται και η περίπτωση της απόσβεσης λόγω βροχής σε τροπικά κλίματα, όπου η απόσβεση αυτή μοντελοποιείται ως μία γάμμα τυχαία μεταβλητή, ενώ η χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχόπτωσης περιγράφεται από το μοντέλο Morita-Higutti. Για τα δορυφορικά συστήματα, χρησιμοποιείται η απλοποιημένη θεώρηση του Crane για ομοιόμορφη κατακόρυφη δομή του μέσου βροχόπτωσης. Τέλος, μελετώνται τα κανάλια που υποφέρουν από διαλείψεις που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης, όπου ο σηματοθορυβικός λόγος εκφρασμένος σε γραμμική κλίμακα είναι μία λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο για την ανάλυση της ολικής (end-to-end) επίδοσης ενός συστήματος δύο βημάτων (dual-hop) με έναν επαναλήπτη που λειτουργεί στις χιλιοστομετρικές συχνότητες πάνω από 10 GHz, λαμβάνοντας υπόψη τις συσχετισμένες διαλείψεις λόγω βροχής των δύο καναλιών του συστήματος. Χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή, ένας γενικός τύπος απλού ολοκληρώματος, που μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί αριθμητικά, προτείνεται για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής ενός διβηματικού συστήματος με ένα μη-αναγεννητικό επαναλήπτη σταθερού ή μεταβλητού κέρδους, καθώς και ενός συστήματος με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη. Ο τελικός εξαγόμενος τύπος ενσωματώνει ένα ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο που περιγράφει την χωρική ανομοιογένεια της βροχής και περιλαμβάνει απώλειες ελευθέρου χώρου και διάφορες παραμέτρους του επαναλήπτη όπως η θέση του, η ισχύς εκπομπής αλλά και τα φαινόμενα κόρου και αναδίπλωσης ισχύος του ενισχυτή. Επίσης, παρουσιάζεται η ανάλυση ενός συστήματος με έναν επαναλήπτη που περιλαμβάνει έναν εκτιμητή καναλιού που προβλέπει την απόσβεση του δεύτερου βήματος της ζεύξης βασισμένος στην πληροφορία που λαμβάνει από το πρώτο βήμα της ζεύξης.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε μέρος της γης και σε κάθε πιθανή γεωμετρική διάταξη με όλες τις δυνατές τιμές των λειτουργικών παραμέτρων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζουν τη σχετική επίδοση μεταξύ των διάφορων ειδών επαναλήπτη, καθώς και την επίδοση τους σε σχέση με μια ‘απευθείας ζεύξη’ χωρίς επαναλήπτη ή μια ισοδύναμη ‘απευθείας ζεύξη με ενεργειακή ισοδυναμία’ λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορετική κατανάλωση ισχύος κάθε συστήματος. Επίσης, στα αριθμητικά αποτελέσματα εξετάζεται η επίδραση ενός επαναλήπτη εξοπλισμένου με έναν εκτιμητή καναλιού, που βελτιώνει την επίδοση ενός διβηματικού συστήματος με κόστος όμως τη μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος σε συνθήκες βροχής.

Επιπλέον, η βέλτιστη θέση ενός επαναλήπτη σε μια διβηματική γεωμετρική διάταξη διερευνάται εκτενώς, θεωρώντας διαφορετικές περιπτώσεις, όπως συνθήκες καθαρού ουρανού, στατικός έλεγχος ισχύος, καθώς και τη γενική περίπτωση που λαμβάνονται από κοινού υπόψη οι απώλειες ελευθέρου χώρου και η απόσβεση λόγω βροχής. Η βέλτιστη θέση ενός επαναλήπτη ορίζεται ως εκείνη η γεωμετρική διάταξη ενός ασύρματου δικτύου, όπου επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος ολικός σηματοθορυβικός λόγος, ή ισοδύναμα η μικρότερη πιθανότητα αποκοπής, για τα ίδια χαρακτηριστικά εκπομπής των κόμβων. Επίσης, εξετάζεται η εξάρτηση της βέλτιστης θέσης του επαναλήπτη από το λόγο των ισχυών εκπομπής του κόμβου εκπομπής και του επαναλήπτη. Εκτενής ανάλυση, χρησιμοποιώντας ισοσταθμικές καμπύλες, απεικονίζει τις γεωμετρικές περιοχές που ένας επαναλήπτης πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε να εξασφαλίζει τις απαιτήσεις επίδοσης ενός συστήματος (Quality of Service – QoS) παρέχοντας ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση ασύρματων δικτύων.

Το αντικείμενο του 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου είναι η παρουσίαση ενός αναλυτικού μοντέλου για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος, που υποφέρει από συσχετισμένες διαλείψεις είτε λόγω βροχής είτε λόγω σκίασης. Στην περίπτωση της βροχής οι αποσβέσεις των ζεύξεων του συστήματος εκφρασμένες σε dB ακολουθούν την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή, ενώ στην περίπτωση της σκίασης οι σηματοθορυβικοί λόγοι στην είσοδο των κόμβων του συστήματος, εκφρασμένοι σε γραμμική κλίμακα και όχι σε dB ακολουθούν επίσης την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή. Ο κόμβος λήψης των θεωρούμενων συνεργατικών συστημάτων συνδυάζει συμφασικά το απευθείας σήμα από τον κόμβο εκπομπής με το

σήμα που λαμβάνει μέσω ενός αναγεννητικού επαναλήπτη (αποκωδικοποίηση-και-προώθηση) χρησιμοποιώντας τις συνδυαστικές τεχνικές MRC και SC. Επίσης, γίνεται διερεύνηση της επίδοσης των πρωτόκολλων πολλαπλής πρόσβασης TDMA, FDMA και SDMA και των πρωτόκολλων συνεργασίας FR και SR. Οι αναλυτικές εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής ενός συνεργατικού συστήματος παράγονται χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή, ενώ ο σηματοθορυβικός λόγος της κάθε ζεύξης υπολογίζεται μέσω της θεωρίας διάδοσης των ραδιοκυμάτων.

Η επίδοση ενός συνεργατικού συστήματος συγκρίνεται με την επίδοση ενός μη συνεργατικού συστήματος που αποτελείται από μια ισοδύναμη απευθείας ζεύξη λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή και φασματική ισοδυναμία των διάφορων συστημάτων και των διάφορων πρωτόκολλων. Επίσης, η επίδραση διάφορων λειτουργικών, γεωμετρικών και γεωγραφικών παραμέτρων, καθώς και η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στις απαιτήσεις επίδοσης (Quality of Service – QoS) ενός συνεργατικού συστήματος, μελετάται πλήρως μέσω εκτενών αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα υποδεικνύουν το εύρος τιμών του σηματοθορυβικού λόγου και των διάφορων παραμέτρων του συστήματος που η συνεργασία μεταξύ των κόμβων υπερτερεί ή αποτυγχάνει να δώσει κέρδος σε σχέση με την περίπτωση μη συνεργασίας. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τελικοί αναλυτικοί τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αξιόπιστο σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου.

Επιπροσθέτως, όπως είναι φανερό από τα αριθμητικά αποτελέσματα, το πρωτόκολλο FR περιορίζεται από την ποιότητα της ζεύξης μεταξύ κόμβου S και επαναλήπτη R. Επομένως, όταν το συγκεκριμένο κανάλι είναι κακής ποιότητας το πρωτόκολλο SR υπερτερεί του FR ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής, ενώ όταν το κανάλι αυτό είναι καλής ποιότητας τα δύο πρωτόκολλα έχουν την ίδια επίδοση. Το πρωτόκολλο SDMA υπερτερεί πάντα των πρωτόκολλων TDMA/FDMA και υπερτερεί της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης για το μεγαλύτερο εύρος τιμών του σηματοθορυβικού λόγου. Αντίθετα, τα πρωτόκολλα TDMA/FDMA υπερτερούν της ισοδύναμης απευθείας ζεύξης μόνο για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής. Επίσης, η τεχνική MRC έχει πάντα καλύτερη επίδοση ή στη χειρότερη περίπτωση την ίδια επίδοση με την τεχνική SC. Για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής και για την περίπτωση της απόσβεσης λόγω βροχής η επίδοση των τεχνικών MRC και SC συγκλίνει, ενώ για τις

ίδιες τιμές της πιθανότητας αποκοπής και για την περίπτωση των διαλείψεων λόγω σκίασης το κέρδος της τεχνικής MRC σε σχέση με την τεχνική SC μεγαλώνει. Παρόμοιο συμπέρασμα για τα δύο είδη διαλείψεων και για χαμηλές τιμές της πιθανότητας αποκοπής ισχύει και για τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αρχικά προτείνονται αναλυτικές εκφράσεις για την πιθανότητα αποκοπής ενός συστήματος διπλής δορυφορικής διαφορικής λήψης που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής που μοντελοποιούνται είτε ως συσχετισμένες λογαριθμοκανονικές είτε ως συσχετισμένες γάμμα τυχαίες μεταβλητές για ήπιες και ισχυρές συνθήκες βροχόπτωσης αντίστοιχα. Το σύστημα αυτό παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι χρησιμοποιεί δύο δορυφόρους καθώς και επιπλέον πόρους στον εξοπλισμό του δέκτη. Παρόλα αυτά, ένα σύστημα δορυφορικής διαφορικής λήψης είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές υψηλής διαθεσιμότητας (π.χ. τηλεϊατρική, εφαρμογές τηλεδιάσκεψης) ή σε περιοχές ισχυρών φαινομένων βροχόπτωσης. Τα αριθμητικά αποτελέσματα διερευνούν το κέρδος της επίδοσης της τεχνικής MRC σε σχέση με την τεχνική SC. Επιπλέον, τα αριθμητικά αποτελέσματα απεικονίζουν την επίδραση της γωνιακής απόκλισης στο κέρδος της επίδοσης της τεχνικής MRC σε σχέση με μια απλή δορυφορική ζεύξη. Οι προτεινόμενες αναλυτικές εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αξιόπιστο σχεδιασμό ενός δορυφορικού δικτύου και για την αξιολόγηση και σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών συνδυαστικών τεχνικών. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε κάθε μέρος της γης επιλέγοντας την κατάλληλη κατανομή των διαλείψεων (λογαριθμοκανονική ή γάμμα) που προσεγγίζει καλύτερα είτε τα πειραματικά δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης είτε τα δεδομένα των χαρτών βροχής της ITU-R.

Στη συνέχεια του 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, προτείνεται η συνεργασία μεταξύ δορυφορικών και επίγειων δικτύων με σκοπό να αποφευχθεί η χρήση πολλαπλών δορυφόρων και ταυτόχρονα να βελτιωθεί η επίδοση ενός συστήματος που υποφέρει από διαλείψεις λόγω βροχής. Ένα πιθανό μειονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος έγκειται στη δυσκολία συγχρονισμού των δορυφορικών και επίγειων σημάτων, λόγω της μεγάλης χρονικής καθυστέρησης διάδοσης του δορυφορικού σήματος σε σχέση με την αντίστοιχη καθυστέρηση διάδοσης του επίγειου σήματος. Παρόλα αυτά, σωστός συγχρονισμός μεταξύ των δύο σημάτων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη αποθήκευση (buffering) των σημάτων, καθώς οι κόμβοι του συστήματος είναι σταθεροί και οι

καθυστερήσεις διάδοσης είναι γνωστές. Αναλυτικές εκφράσεις παρουσιάζονται τόσο για την επίδοση ενός συστήματος δορυφορικής και επίγειας διαφορικής λήψης, που λειτουργεί σε τροπικές περιοχές, όσο για την ολική επίδοση ενός συνεργατικού δορυφορικού συστήματος με έναν επίγειο επαναλήπτη, που λειτουργεί σε περιοχές με ήπια φαινόμενα βροχόπτωσης. Οι διαφορετικές συνδυαστικές τεχνικές συγκρίνονται μεταξύ τους καθώς και με μια απλή δορυφορική ή επίγεια ζεύξη. Επίσης, από τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτει ότι η γεωμετρία του συστήματος παίζει καταλυτικό ρόλο στην επίδοσή του. Επομένως, για την αξιόπιστη σχεδίαση ενός δορυφορικού συνεργατικού συστήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη η θέση του επίγειου επαναλήπτη και να αναζητηθεί η βέλτιστη θέση του ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή γεωγραφική κάλυψη.

## **6.2. Προοπτικές για μελλοντική έρευνα**

Το αντικείμενο των συνεργατικών δικτύων, που μελετάται σε αυτήν τη διατριβή, παρουσιάζει όλο και μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Επομένως, τα προτεινόμενα αποτελέσματα μπορούν να αναπτυχθούν και να επεκταθούν καλύπτοντας παρεμφερή αντικείμενα με σκοπό την επίλυση νέων ερευνητικών προβλημάτων.

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται η χρήση της λογαριθμοκανονικής κατανομής για τη μοντελοποίηση της απόσβεσης της βροχής σε συχνότητες διάδοσης άνω των 50GHz, ένα αντικείμενο που δεν έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Περισσότερα πειραματικά δεδομένα απαιτούνται για τη δημιουργία ενός νέου φυσικού μοντέλου που θα επιτρέπει τον ακριβή αναλυτικό υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων της απόσβεσης της βροχής σε αυτές τις συχνότητες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της ειδικής απόσβεσης της βροχής συναρτήσει της απόστασης μεταξύ δύο σημείων μιας ζεύξης με σκοπό την ακριβέστερη μοντελοποίηση της ανομοιογένειας του μέσου βροχόπτωσης. Επιπλέον, η μικροσκοπική δομή του μέσου βροχόπτωσης μπορεί να μελετηθεί σε αυτές τις συχνότητες χρησιμοποιώντας τη θεωρία πολλαπλής σκέδασης με σκοπό τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης της βροχής με χρήση ηλεκτρομαγνητικών υπολογιστικών μεθόδων.

Μελλοντική επέκταση της ανάλυσης της επίδοσης των συνεργατικών συστημάτων που παρουσιάζεται σε αυτήν τη διατριβή αποτελεί η μελέτη συνεργατικών συστημάτων που υποφέρουν από διαλείψεις που οφείλονται σε διαφορετικά φυσικά φαινόμενα και



επομένως περιγράφονται από άλλες στατιστικές κατανομές (π.χ. Weibull, Rician, σύνθετα κανάλια – composite channels που υποφέρουν ταυτοχρόνως από διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας). Αξίζει να σημειωθεί ότι η συναφής βιβλιογραφία αφορά κυρίως συνεργατικά συστήματα που υποφέρουν από διαλείψεις Rayleigh και Nakagami, αλλά περιορίζεται σε ανεξάρτητα κανάλια. Επομένως, ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να μελετηθεί και να ενσωματωθεί στη μαθηματική ανάλυση είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των διαλείψεων των διαφορετικών καναλιών του συνεργατικού συστήματος και η επίδρασή του στην επίδοση ενός συστήματος για τα συγκεκριμένα είδη διαλείψεων. Επίσης, οι συνεργατικές τεχνικές μπορούν να επεκταθούν και σε άλλα είδη ασύρματων δικτύων που τελευταία απασχολούν έντονα την ερευνητική κοινότητα, όπως είναι τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου (Free Space Optics – FSO).

Στη διατριβή αυτή, μελετήθηκαν συστήματα με έναν επαναλήπτη, όπως το απλό διβηματικό σύστημα, το συνεργατικό σύστημα με έναν επαναλήπτη και το δορυφορικό συνεργατικό σύστημα με έναν επίγειο επαναλήπτη. Η προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της επίδοσης των συνεργατικών δικτύων μπορεί μελλοντικά να επεκταθεί και σε πιο πολύπλοκες διατάξεις, όπως π.χ. σε συστήματα με  $N$  επαναλήπτες που συνεργάζονται τοποθετημένοι παράλληλα ή σε σειρά σε ένα πολυβηματικό σύστημα ή ακόμα και σε ένα σύστημα που συνδυάζει τα δύο προηγούμενα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα που αναμένεται να προκύψουν από τη μελέτη ενός τέτοιου συστήματος θα περιλαμβάνουν πολλαπλά ολοκληρώματα. Η αξιόπιστη αριθμητική επίλυση ή η προσέγγιση με κλειστούς μαθηματικούς τύπους αυτών των εκφράσεων παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και πρέπει να μελετηθεί εκτενώς.

Στα προηγούμενα Κεφάλαια, αναλύθηκε η επίδοση των συνεργατικών πρωτοκόλλων Fixed Relaying και Selection Relaying, ενώ μελετήθηκαν οι συνδυαστικές τεχνικές MRC και SC. Στην περίπτωση του διβηματικού συστήματος μελετήθηκαν όλα τα είδη επαναλήπτη, αλλά στην περίπτωση των συνεργατικών συστημάτων χρησιμοποιήθηκε μόνο ο αναγεννητικός επαναλήπτης. Επομένως, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη των συνεργατικών συστημάτων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Αυξανόμενης Επανάληψης (Incremental Relaying - IR), που περιγράφεται στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Επίσης, τα προτεινόμενα αποτελέσματα μπορούν εύκολα να επεκταθούν και σε άλλες συνδυαστικές τεχνικές, όπως π.χ. η τεχνική EGC. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της επίδοσης ενός

συνεργατικού συστήματος με αναγεννητικό επαναλήπτη με την αντίστοιχη επίδοση ενός συστήματος με μη-αναγεννητικό επαναλήπτη σταθερού ή μεταβλητού κέρδους. Συγκεκριμένα, όπως τονίζεται στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο η επίδοση ενός FR αναγεννητικού συστήματος περιορίζεται από την ποιότητα της ζεύξης μεταξύ του κόμβου εκπομπής και του επαναλήπτη. Αν χρησιμοποιηθεί όμως ένας μη-αναγεννητικός επαναλήπτης το σύστημα αναμένεται να μην επηρεάζεται τόσο πολύ από αυτή τη ζεύξη, καθώς ακόμα κι αν η ποιότητά της δεν είναι καλή ο μη-αναγεννητικός επαναλήπτης συνεχίζει να προωθεί το λαμβανόμενο σήμα και το σύστημα δεν οδηγείται σε αποκοπή.

Ένας παράγοντας εκτός των διαλείψεων που επιδεινώνει την επίδοση ενός σύγχρονου ασύρματου δικτύου είναι οι πιθανές παρεμβολές από άλλα συστήματα που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα ή από άλλους κόμβους του ίδιου συστήματος. Επομένως, ως επέκταση της ανάλυσης που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, προτείνεται η μελέτη των συνεργατικών συστημάτων που υποφέρουν τόσο από διαλείψεις όσο και από παρεμβολές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αναμένεται να παρουσιάσει η διερεύνηση της χρήσης των συνεργατικών τεχνικών ως μιας αποτελεσματικής μεθόδου για να αντισταθμιστεί η επιδείνωση της επίδοσης του συστήματος λόγω της επίδραση των παρεμβολών.

Οι κόμβοι ενός συνεργατικού συστήματος μοιράζονται τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους του συστήματος, όπως την ισχύ και το φάσμα. Μια πολύ ενδιαφέρουσα επέκταση της παρούσας ανάλυσης είναι η μελέτη του βέλτιστου συμψηφισμού των τηλεπικοινωνιακών πόρων, ικανοποιώντας δεδομένους τεχνικούς περιορισμούς, με σκοπό τόσο την εξοικονόμηση των πόρων αυτών όσο και τη βελτίωση της επίδοσης του συνολικού συστήματος αλλά και του κάθε κόμβου χωριστά. Επιπλέον, απαιτείται ο προσδιορισμός του εύρους των παραμέτρων που η συνεργασία μεταξύ των κόμβων του συστήματος επιφέρει κέρδος σε σύγκριση με τη μη συνεργασία, η ποσοτικοποίηση του κέρδους αυτού και τα όρια του καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συνεργαζόμενων κόμβων. Οι τελικές προτεινόμενες μαθηματικές εκφράσεις και η αναζήτηση της βέλτιστης θέσης του επαναλήπτη που παρουσιάστηκε στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία για την ολοκλήρωση της μελλοντικής αυτής επέκτασης.

Τέλος, στα προηγούμενα Κεφάλαια μελετήθηκε η επίδοση των συνεργατικών συστημάτων υπολογίζοντας την πιθανότητα αποκοπής και τη στατιστική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου. Σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει όμως και ο

αναλυτικός υπολογισμός και άλλων τηλεπικοινωνιακών μεγεθών που εκφράζουν την επίδοση ενός συστήματος. Τέτοια μεγέθη είναι η μέση πιθανότητα σφάλματος ψηφίου (Bit Error Probability – BER), η εργοδική χωρητικότητα και η πιθανότητα μη υπέρβασης ενός δεδομένου ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας (outage capacity). Η γνώση αυτών των μεγεθών θα βοηθήσει στη βαθύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων των τεχνικών συνεργατικής διαφορικότητας.

*Β. Κ. Σακαρέλλος – Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα.*

## **Παράρτημα Α: Λογαριθμοκανονική κατανομή**

### ***Μονοδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή***

Όπως αναφέρεται και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - pdf) μιας λογαριθμοκανονικής τυχαίας μεταβλητής  $A$  δίνεται από τον τύπο [ITU-R P.1057-1]:

$$f_A(A) = \frac{1}{S_a A \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln A - \ln A_m)^2}{2S_a^2}\right) \quad (\text{A.1})$$

όπου οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι  $A_m, S_a$  ορίζονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Η παραπάνω λογαριθμοκανονική κατανομή προκύπτει από την κανονική κατανομή  $N(\mu, \sigma)$  χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό  $u = \ln A$  [Papoulis91]:

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

Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$\begin{cases} \mu = \ln A_m \\ \sigma = S_a \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Εναλλακτικά, η λογαριθμοκανονική κατανομή προκύπτει από την κανονικοποιημένη κανονική κατανομή  $N(0,1)$  με τη βοήθεια του μετασχηματισμού:

$$u = (\ln A - \ln A_m) / S_a \quad (\text{A.4})$$

Οι ροπές μιας λογαριθμοκανονικής τυχαίας μεταβλητής υπολογίζονται από τη ροπογεννήτρια συνάρτηση μιας κανονικής τυχαίας μεταβλητής [Papoulis91]:

$$m_k = E[A^k] = E[e^{kU}] = A_m^k \exp\left(\frac{k^2 S_a^2}{2}\right) \quad (\text{A.5})$$

Από την παραπάνω σχέση, υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μιας λογαριθμοκανονικής τυχαίας μεταβλητής:

$$\mu_A = A_m \exp(S_a^2 / 2) \quad (\text{A.6})$$

$$\sigma_A = \sqrt{A_m^2 \exp(S_a^2) (\exp(S_a^2) - 1)} \quad (\text{A.7})$$

Η πιθανότητα του ενδεχομένου  $a \leq A \leq b$  αντιστοιχεί σε ολοκλήρωση της κατανομής της εξίσωσης (A.1) στο χωρίο που εκφράζει αυτό το ενδεχόμενο, δηλαδή στο χωρίο  $a \leq A \leq b$ . Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό (A.4), η πιθανότητα αυτή μετατρέπεται σε ολοκλήρωμα της κανονικοποιημένης κανονικής κατανομής  $N(0,1)$ :

$$P(a \leq A \leq b) = \int_a^b f_A(A) dA = \int_c^d f_u(u) du \quad (\text{A.8})$$

Τα όρια του παραπάνω ολοκληρώματος δίνονται από τους τύπους:

$$\begin{cases} c = (\ln a - \ln A_m) / S_a \\ d = (\ln b - \ln A_m) / S_a \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

Η πιθανότητα της εξίσωσης (A.8) υπολογίζεται με τη βοήθεια της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος  $\text{erfc}()$  (complementary error function):

$$\begin{aligned} P(a \leq A \leq b) &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{c}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{d}{\sqrt{2}}\right) \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\ln a - \ln A_m}{S_a \sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{\ln b - \ln A_m}{S_a \sqrt{2}}\right) \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

Ο ορισμός της συνάρτησης σφάλματος  $\text{erf}()$  (error function), της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος  $\text{erfc}()$ , οι ιδιότητές τους, καθώς και αλγόριθμοι με τους οποίους υπολογίζονται αριθμητικά δίνονται στο βιβλίο [Abramovitz65]:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-z^2} dz \quad (\text{A.11})$$

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2} dz \quad (\text{A.12})$$

$$\text{erf}(-x) = -\text{erf}(x) \quad (\text{A.13})$$

$$\text{erf}(x \rightarrow +\infty) = 1 \quad (\text{A.14})$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (\text{A.15})$$

$$\operatorname{erfc}(-x) = 2 - \operatorname{erfc}(x) \quad (\text{A.16})$$

$$\operatorname{erfc}(x_1) > \operatorname{erfc}(x_2), \text{ όταν } x_1 < x_2 \quad (\text{A.17})$$

Πολλές φορές, αντί της συνάρτησης  $\operatorname{erfc}()$ , χρησιμοποιείται η συνάρτηση  $Q()$  που ορίζεται ως:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (\text{A.18})$$

### Διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή

Η διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή των τυχαίων μεταβλητών  $A_j$  ( $j=1,2$ ) δίνεται από τον τύπο (2.17):

$$f_{A_1, A_2}(A_1, A_2) = \frac{1}{2\pi A_1 A_2 S_{a_1} S_{a_2} \sqrt{1 - \rho_n^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1 - \rho_n^2)} \left[ \left( \frac{\ln A_1 - \ln A_{m_1}}{S_{a_1}} \right)^2 + \left( \frac{\ln A_2 - \ln A_{m_2}}{S_{a_2}} \right)^2 - 2\rho_n \left( \frac{\ln A_1 - \ln A_{m_1}}{S_{a_1}} \right) \left( \frac{\ln A_2 - \ln A_{m_2}}{S_{a_2}} \right) \right] \right\} \quad (\text{A.19})$$

Η παραπάνω διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή προκύπτει από τη διδιάστατη κανονική κατανομή [Papoulis91]:

$$f_{u_1, u_2} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2 D}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [u_1 \quad u_2] C^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{A.20})$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \rho_n \\ \rho_n & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.21})$$

$$D = \det[C] \quad (\text{A.22})$$

χρησιμοποιώντας πάλι το μετασχηματισμό:

$$u_j = (\ln A_j - \ln A_{m_j}) / S_{a_j} \quad (j=1,2) \quad (\text{A.23})$$

Οι παράμετροι  $A_{m_j}, S_{a_j}$  ( $j=1,2$ ) των τυχαίων μεταβλητών  $A_j$  ( $j=1,2$ ), ο συντελεστής συσχέτισής τους  $\rho$  καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  μεταξύ των κανονικών τυχαίων μεταβλητών  $u_j$  ( $j=1,2$ ) περιγράφονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Η πιθανότητα του ενδεχομένου ( $a_1 \leq A_1 \leq b_1, a_2 \leq A_2 \leq b_2$ ), που εκφράζεται από ένα διπλό ολοκλήρωμα της διδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής (A.19) στο αντίστοιχο χωρίο, αντιστοιχεί με την πιθανότητα του ενδεχομένου ( $c_1 \leq u_1 \leq d_1, c_2 \leq u_2 \leq d_2$ ) μέσω του μετασχηματισμού (A.23):

$$\begin{aligned} P(a_1 \leq A_1 \leq b_1, a_2 \leq A_2 \leq b_2) &= P(c_1 \leq u_1 \leq d_1, c_2 \leq u_2 \leq d_2) \\ &= \int_{c_2}^{d_2} \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1 u_2}(u_1, u_2) du_1 du_2 \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Bayes [Papoulis91]:

$$f_{u_1 u_2}(u_1, u_2) = f_{u_2}(u_2) f_{u_1}(u_1 | u_2) = f_{u_1}(u_1) f_{u_2}(u_2 | u_1) \quad (\text{A.25})$$

όπου η δεσμευμένη κατανομή  $f_{u_1}(u_1 | u_2)$  και η μονοδιάστατη κανονική κατανομή  $f_{u_2}(u_2)$  δίνονται από τους τύπους:

$$f_{u_1}(u_1 | u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_n^2)}} \exp\left[-\frac{(u_1 - \rho_n u_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right] \equiv N(\rho_n u_2, \sqrt{1-\rho_n^2}) \quad (\text{A.26})$$

$$f_{u_2}(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right) \equiv N(0,1) \quad (\text{A.27})$$

με αντίστοιχες εκφράσεις και για τις  $f_{u_2}(u_2 | u_1)$  και  $f_{u_1}(u_1)$ , η πιθανότητα της εξίσωσης (A.24) υπολογίζεται από:

$$\begin{aligned} P(c_1 \leq u_1 \leq d_1, c_2 \leq u_2 \leq d_2) &= \int_{c_2}^{d_2} f_{u_2}(u_2) \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1}(u_1 | u_2) du_1 du_2 = \\ &= \int_{c_2}^{d_2} f_{u_2}(u_2) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{c_1 - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{d_1 - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) \right] du_2 = \\ &= \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1}(u_1) \int_{c_2}^{d_2} f_{u_2}(u_2 | u_1) du_2 du_1 = \\ &= \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1}(u_1) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{c_2 - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{d_2 - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) \right] du_1 \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$



Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (A.28) υπολογίζεται αριθμητικά με κατάλληλους αλγόριθμους, όπως για παράδειγμα με τις ενσωματωμένες συναρτήσεις ολοκλήρωσης του προγράμματος Matlab ή με Gauss-Legendre ολοκλήρωση σε γλώσσα C [Press07].

### ***N*-διάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή**

Η *N*-διάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή των τυχαίων μεταβλητών  $A_j (j=1,2,\dots,N)$  με παραμέτρους  $A_{m_j}, S_{a_j} (j=1,2,\dots,N)$  και συντελεστές συσχέτισης  $\rho_{ij} (i, j=1,2,\dots,N, i \neq j)$ , ( $\rho_{ij} = \rho_{ji}$ ), προκύπτει με χρήση του μετασχηματισμού (A.23) για  $j=1,2,\dots,N$  στη *N*-διάστατη κανονικοποιημένη κανονική κατανομή των τυχαίων μεταβλητών  $u_j (j=1,2,\dots,N)$  με συντελεστές συσχέτισης  $\rho_{n_{ij}} (i, j=1,2,\dots,N, i \neq j)$ , ( $\rho_{n_{ij}} = \rho_{n_{ji}}$ ). Η *N*-διάστατη κανονική κατανομή δίνεται από τον τύπο [Papoulis91]:

$$f_{u_1 u_2 \dots u_N} (u_1, u_2, \dots, u_N) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N D_{1,2,\dots,N}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N] C_{1,2,\dots,N}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{A.29})$$

$$C_{1,2,\dots,N} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{n_{12}} & \dots & \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{21}} & 1 & \dots & \rho_{n_{2N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{n_{N1}} & \rho_{n_{N2}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.30})$$

$$D_{1,2,\dots,N} = \det [C_{1,2,\dots,N}] \quad (\text{A.31})$$

Η πιθανότητα ενός ενδεχομένου των *N* λογαριθμοκανονικών τυχαίων μεταβλητών αντιστοιχεί στην πιθανότητα ενός ενδεχομένου των αντίστοιχων *N* κανονικών τυχαίων μεταβλητών, όπως και στις περιπτώσεις της μονοδιάστατης και της διδιάστατης κατανομής. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται και πάλι με τη βοήθεια του θεωρήματος Bayes:

$$f_{u_1 u_2 \dots u_N} (u_1, u_2, \dots, u_N) = f_{u_1 u_2 \dots u_{N-1}} (u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) f_{u_N} (u_N | u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) \quad (\text{A.32})$$

Στην παραπάνω σχέση  $f_{u_1, u_2, \dots, u_{N-1}}(u_1, u_2, \dots, u_{N-1})$  είναι η κανονική κατανομή διαστάσεων N-1, ενώ η δεσμευμένη κατανομή της μεταβλητής  $u_N$  δίνεται από την κανονική κατανομή:

$$f_{u_N}(u_N | u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}} \exp\left[-\frac{(u_N - \mu_{N|1,2,\dots,N-1})^2}{2\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}^2}\right] \quad (\text{A.33})$$

με μέση τιμή  $\mu_{N|1,2,\dots,N-1}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}$ :

$$\mu_{N|1,2,\dots,N-1} = \left\{ C_{1,2,\dots,N-1}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix} \right\}^T \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

$$\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}^2 = 1 - \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix}^T C_{1,2,\dots,N-1}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.35})$$

Με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων η πιθανότητα του ενδεχομένου  $(a_1 \leq A_1 \leq b_1, a_2 \leq A_2 \leq b_2, \dots, a_N \leq A_N \leq b_N)$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & P(a_1 \leq A_1 \leq b_1, a_2 \leq A_2 \leq b_2, \dots, a_N \leq A_N \leq b_N) = \\ & = P(c_1 \leq u_1 \leq d_1, c_2 \leq u_2 \leq d_2, \dots, c_N \leq u_N \leq d_N) = \\ & = \int_{c_1}^{d_1} \int_{c_2}^{d_2} \dots \int_{c_{N-1}}^{d_{N-1}} f_{u_1, u_2, \dots, u_{N-1}}(u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) \int_{c_N}^{d_N} f_{u_N}(u_N | u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) du_N du_{N-1} \dots du_1 = \\ & = \int_{c_1}^{d_1} \int_{c_2}^{d_2} \dots \int_{c_{N-1}}^{d_{N-1}} f_{u_1, u_2, \dots, u_{N-1}}(u_1, u_2, \dots, u_{N-1}) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{c_N - \mu_{N|1,2,\dots,N-1}}{\sqrt{2}\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{d_N - \mu_{N|1,2,\dots,N-1}}{\sqrt{2}\sigma_{N|1,2,\dots,N-1}}\right) \right] \\ & \quad \cdot du_{N-1} du_{N-2} \dots du_1 \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

Τα παραπάνω ολοκληρώματα, για μικρό αριθμό N μπορούν να υπολογιστούν αριθμητικά με τις ενσωματωμένες συναρτήσεις ολοκλήρωσης του προγράμματος Matlab ή με Gauss-Legendre ολοκλήρωση σε γλώσσα C, ενώ για N μεγαλύτερο του 3 προτείνεται η μέθοδος ολοκλήρωσης Monte Carlo [Press07].

## **Βιβλιογραφία**

- [**Abramovitz65**] M. Abramovitz and I. Stegun, “*Handbook of Mathematical Functions*”, Dover Publications, New York, 1965.
- [**AbuDayya94**] A. A. Abu-Dayya and N. C. Beaulieu, “Outage probabilities in the presence of correlated lognormal interferers”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 1, pp.164-173, Feb 1994
- [**Alouini02**] M. Alouini, and M. Simon, “Dual diversity over correlated lognormal fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, 50, pp. 1946-1959, 2002.
- [**Andrews08**] J. G. Andrews et al, “Rethinking Information Theory for Mobile Ad Hoc Networks”, *IEEE Communication Magazine*, Vol. 46, No. 12, pp. 94-101, Dec. 2008.
- [**Apostol67**] T. M. Apostol, “*Calculus, Volume I.*”, John Wiley & Sons Inc., Second edition, 1967
- [**Beaulieu06**] N. C. Beaulieu & J. Hu, “A closed-form expression for the outage probability of decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels”, *IEEE Communications Letters*, 10(12), 813-815, 2006
- [**Bolcskei06**] H. Bolcskei, R.U. Nabar, O. Oyman and A.J. Paulraj, “Capacity scaling laws in MIMO relay networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.5, no.6, pp.1433-1444, June 2006
- [**Boyer04**] J. Boyer, D. D. Falconer, and H. Yanikomeroglu, “Multihop diversity in wireless relaying channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, pp. 1820-1830, 2004.
- [**BRASIL**] EC FP6 IST Project BRASIL, [www.dvb-brasil.org](http://www.dvb-brasil.org).

**[Capsoni09]** C. Capsoni, L. Luini, R. Nebuloni, A. Paraboni, C. Riva, “Electromagnetic Propagation at Frequencies above 50 GHz: the Challenge of the Atmosphere”, *EUCAP 2009*, Berlin, Germany, March 2009.

**[Castanet03]** L. Castanet L., A. Bolea-Alamañac, M. Bousquet “Interference and Fade Mitigation Techniques for Ka and Q/V band satellite communication systems”, *COST 272-280 International workshop on Satellite Communications from Fade Mitigation to Service Provision*, Noordwijk, The Netherlands, pp.241-248, May 2003.

**[Chia09]** S. Chia, M. Gasparroni, P. Brick, “The next challenge for cellular networks: backhaul”, *IEEE Microwave Magazine*, pp. 54-66, Aug. 2009.

**[Crane03]** R. K. Crane, “*Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*”, CRC Press LLC, 2003.

**[Ding07]** Z. Ding, T. Ratnarajah and C. Cowan, “On the Diversity-Multiplexing Tradeoff for Wireless Cooperative Multiple Access Systems”, *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 55, no. 9, pp. 4627-4638, September 2007.

**[Dohler06]** M. Dohler, A. Gkelias, A.H. Aghvami, “Capacity of distributed PHY-layer sensor networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.55, no.2, pp. 622-639, March 2006.

**[ECC Recommendation (05)07]** ECC Recommendation (05)07, “Radio Frequency Channel Arrangements for Fixed Service Systems in the Bands 71- 76GHz and 81-86GHz”, Dublin, February 2009.

**[Foerster01]** J. Foerster, “The effects of multipath interference on the performance of UWB systems in an indoor wireless channel,” *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2001 Spring*, pp. 1176-1180 vol.2, 2001.

**[Ghassemzadeh04]** S. Ghassemzadeh et al., “Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, pp. 1786-1796, 2004.

**[Goldsmith05]** A. Goldsmith, “*Wireless Communications*”, Cambridge University Press, 2005.

**[Hashemi93]** H. Hashemi, “The indoor radio propagation channel,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, pp. 943-968, 1993.

**[Hasna03a]** M. Hasna, & M. Alouini, “End-to-end performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2(6), p. 1126-1131, 2003.

**[Hasna03b]** M. O. Hasna and M.-S. Alouini, “Outage Probability of Multihop Transmission Over Nakagami Fading Channels”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 7, No. 5, May 2003.

**[Hasna03c]** M. O. Hasna and M.-S. Alouini, “End-to-End Outage Probability of Multihop Transmission Over Lognormal Shadowed Channels”, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 28, No. 2C, December 2003.

**[Hasna04a]** M. Hasna & M. Alouini, “A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(6), 1963-1968, 2004.

**[Hasna04b]** M. Hasna & M. Alouini, “Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays”, *IEEE Transactions on Communications*, 52(1), 130-135, 2004.

**[Hendrantoro02]** G. Hendrantoro, R. J. C. Bultitude, and D. D. Falconer, “Use of Cell-Site Diversity in Millimeter - Wave Fixed Cellular Systems to Combat the Effects of Rain Attenuation”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 602-614, April 2002.

**[Ho95]** C. L. Ho, “Calculating the mean and variance of power sums with two log-normal components”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, pp. 756-762, 1995

**[IEEE 802.16.2-2004]** IEEE 802.16.2-2004 LAN/MAN Committee, “IEEE recommended practice for local and metropolitan area networks. Coexistence of fixed broadband wireless access systems”, IEEE Computer Society, USA, ISBN: 0-7381-3986-6, 2004.

**[IEEE 802.16j-2007]** IEEE 802.16j-06/013r3, “Multi-hop Relay System Evaluation Methodology”, Feb. 19, 2007.

**[ITU-R P.837-5]** ITU-R Recommendation P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling”, 2007.

**[ITU-R P.838-3]** ITU-R Recommendation P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”, 2005.

**[ITU-R P.839-3]** ITU-R Recommendation P.839-3, “Rain height model for prediction methods”, 2001.

**[ITU-R P.1057-1]** ITU-R Recommendation P. 1057-1, “Probability distributions relevant to radiowave propagation modeling”, 2001.

**[Janani04]** M. Janani et al, “Coded cooperation in wireless communications: space-time transmission and iterative decoding”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.52, Issue 2, pp. 362-371, Feb.2004.

**[Jing06]** Y. Jing and B. Hassibi, “Distributed space-time coding in wireless relay networks”, *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 5, pp. 3524-3536, Dec. 2006.

**[Kanellopoulos90]** J. D. Kanellopoulos, S. G. Koukoulas, “A model for the prediction of the site diversity performance based on the two-dimensional gamma distribution”, *Transactions of the Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan*, Section E, vol. 73, no2, pp. 229-236, 1990.

**[Kanellopoulos91]** J. D. Kanellopoulos, S. Ventouras, “ A modification of the predictive analysis for the multiple site diversity performance taking into account the stratified rain”, *European Transactions on Telecommunications*, pp. 49-57, Volume 1, Issue 1, 1991.

**[Kanellopoulos98]** J. D. Kanellopoulos and S. N. Livieratos, “Analysis of the total carrier-to-noise plus interference ratio statistics applied to adjacent satellite interference under the presence of rain”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, No. 4, pp. 527—552, 1998.

**[Kanellopoulos00]** J. D. Kanellopoulos, A. D. Panagopoulos and S. N. Livieratos, “A comparison of co-polar and co-channel satellite interference prediction models with experimental results at 11.6 GHz and 20GHz”, *Int. Jour. of Sat. Commun*, 18, pp.107-120, 2000.

**[Karagiannidis06a]** G. Karagiannidis, “Performance bounds of multihop wireless communications with blind relays over generalized fading channels”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(3), 498-503, 2006.

**[Karagiannidis06b]** G. Karagiannidis, T. Tsiftsis & R. Mallik, “Bounds for multi-hop relayed communications in nakagami-m fading”, *IEEE Transactions on Communications*, 54(1), 18-22, 2006.

- [Khan08]** A. A. Khan et al, “Multi Radio Diversity for Satellite-Terrestrial Mobile Communications”, *4th International Conference on Circuits and Systems for Communications*, 2008, ICCSC 2008
- [Kramer05]** G. Kramer, M. Gastpar and P. Gupta, “Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.51, no. 9, pp. 3037-3063, Sept. 2005.
- [Kvicera07]** V. Kvicera and M. Gabner, “Rain Attenuation at 58GHz: Prediction versus Long Term Results”, *Eurasip Journal of Wireless Communications and Networking*, vol.2007.
- [Laneman01]** J. N. Laneman, G. W. Wornell and D. N. C. Tse, “An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks”, *Proc. IEEE ISIT*, Washington, DC, p. 294, June 2001.
- [Laneman03]** J. N. Laneman and G. W. Wornell, “Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks”, *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.
- [Laneman04]** J.N. Laneman, D.N.C. Tse, G.W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.50, no.12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [Lin75]** S. H. Lin, “A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths”, *Bell Syst. Tech. Jour.* 54(6), p. 1051-1083, 1975.
- [Little09]** S. Little, “Is microwave backhaul up to the 4G task?”, *IEEE Microwave Magazine*, pp. 67-74, Aug. 2009.
- [Lo09]** C. K. Lo, S. Vishwanath and R. W. Heath, “Relay Subset Selection in Wireless Networks Using Partial Decode-and-Forward Transmission”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.58, no.2, pp.692-704, Feb. 2009
- [Lockie09]** D. Lockie, D. Peck, “High-data-rate Millimeter-wave radios”, *IEEE Microwave Magazine*, pp. 75- 83, Aug. 2009.
- [Maral98]** G. Maral, M. Bousquet, “*Satellite Communications Systems, Techniques and Technology*”, 3rd Edition, John Wiley & Sons, ISBN 0471970379, 1998.

**[Matricciani96]** E. Matricciani, E. and M. Mauri, “Cochannel interference in satellite communication systems derived from rain attenuation measurements at 20GHz”, *Int. Jour. of Sat. Commun.*, 14, (71-76), 1996.

**[Matricciani97]** E. Matricciani, “Copolar and cochannel interference during rain at 11.6 GHz estimated from radar measurements”, *Inter. Jour. of Sat. Commun.*, 15, 65-71, 1997.

**[Matricciani03]** E. Matricciani, “Micro scale site diversity in satellite and tropospheric communication systems affected by rain attenuation,” *Space Communications*, vol. 19, pp. 83-90, 2003.

**[Mehta07]** N.B. Mehta, J. Wu, A. F. Molisch and J. Zhang, “Approximating a Sum of Random Variables with a Lognormal”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, ISSN: 1536-1276, Vol. 6, Issue 7, pp. 2690-2699, July 2007.

**[Mheidat06]** H. Mheidat and M. Uysal, “Impact of receive diversity on the performance of amplify-and-forward relaying under APS and IPS power constraints”, *IEEE Communications Letters*, vol.10, no.6, pp.468-470, June 2006.

**[Michalopoulos08]** D.S. Michalopoulos and G.K. Karagiannidis, “PHY-layer Fairness in Amplify-and-Forward Cooperative Diversity Systems”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.7, no.3, pp.1073-1082, March 2008.

**[Morello06]** A. Morello, V. Mignone, “DVB-S2: The second generation standard for satellite broad-band services,” *Proceed. IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 210-227, 2006

**[Morita76]** Morita K. and Higutti I., “Prediction methods of rain attenuation distributions of micro and millimeter waves”, *Rev. of ECL*, 24 (7-8), p. 651-668, 1976

**[Nabar04]** R. U. Nabar, H. Bolcskei and F. W. Kneubuhler, “Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1099 – 1109, Aug 2004.

**[Nosratinia04]** A. Nosratinia, T. E. Hunter and A. Hedayat, “Cooperative Communication in Wireless Networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, October 2004.

**[Oyman07]** O. Oyman and A.J. Paulraj, “Power-Bandwidth Tradeoff in Dense Multi-Antenna Relay Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.6, no.6, pp.2282-2293, June 2007.

**[Panagopoulos02a]** A. D. Panagopoulos J. D. Kanellopoulos, “Cell-Site Diversity Performance of Millimeter-Wave Fixed Cellular Systems Operating at Frequencies above



20 GHz”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 1, issue 10, pp.183-185, 2002.

**[Panagopoulos02b]** A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos “Adjacent Satellite Interference Effects as applied to the Outage Performance of an Earth-Space System located in a Heavy Rain Climatic Region”, *Annals of Telecommunications*, No 9-10, pp.925-942, 2002.

**[Panagopoulos02c]** A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Prediction of triple-orbital diversity performance in Earth-space communication,” *International Journal of Satellite Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 187-200, 2002

**[Panagopoulos03a]** A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, “Statistics of differential rain attenuation on converging terrestrial paths”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 9, pp. 2514-2517, 2003.

**[Panagopoulos03b]** A. D. Panagopoulos and J.D. Kanellopoulos “Differential Rain Attenuation Statistics on two Converging Point-to-Point Terrestrial Links Located in a Tropical Climatic Region”, *Annals of Telecommunications*, Vol. 58, No. 3-4, Mar.-April, pp. 673-677, 2003.

**[Panagopoulos04]** A. D. Panagopoulos, P.- D. M. Arapoglou, P. G. Cottis, “Satellite Communications at Ku, Ka and V bands, Propagation Impairments and Mitigation Techniques”, *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 3rd Quarter, October 2004.

**[Panagopoulos05]** A. D. Panagopoulos, P.M. Arapoglou, G. E. Chatzarakis, J. D. Kanellopoulos and P. G. Cottis, “LMDS Diversity Systems: A new Performance Model Incorporating Stratified Rain”, *IEEE Communication Letters*, Vol. 9, No. 2, pp. 145-147, February 2005.

**[Panagopoulos07]** A. D. Panagopoulos, P. - D. M. Arapoglou, J. D. Kanellopoulos, P. G. Cottis, “Intercell Radio Interference Studies in Broadband Wireless Access Networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 56, Issue 1, Jan. 2007 Page(s):3 – 12.

**[Papoulis91]** A. Papoulis, “*Probability Random Variables and Stochastic Processes*”, McGraw-Hill, New York, 1991.

**[Piboongun04]** T. Piboongunon, V.A. Aalo, “Outage probability of L-branch selection combining in correlated lognormal fading channels” *Electronics Letters*, vol.40, no.14, pp. 886-888, July 2004.

**[Press07]** W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, and B. Flannery, “*Numerical Recipes, 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*”, Cambridge University Press, 2007.

**[Rappaport96]** T. S. Rappaport, “*Wireless Communications: Principles and Practice*”, Prentice Hall, 1996.

**[Riihonen08]** T. Riihonen, R. Wichman, and J. Hamalainen, “Co-phasing full-duplex relay link with non-ideal feedback information,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS '08)*, pp. 263–267, October 2008.

**[Safari08]** M. Safari and M. Uysal, “Cooperative Diversity over Lognormal Fading Channels: Performance Analysis and Optimization”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 5, part 2, p. 1963-1972, May 2008.

**[Sakarellos06]** V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos, G. E. Chatzarakis and J. D. Kanellopoulos, “Interference Performance Analysis of a Broadband Satellite Downlink Including the Noise Temperature Increase Due to Rain”, *12th Ka and Broadband Communications Conference, Naples, Italy*, Sep. 27-29, 2006.

**[Sakarellos07]** V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Performance Study of Dual-Hop Transmissions in Millimeter Wireless Mesh Networks”, *2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), Edinburgh, U.K., 11-16 Nov. 2007*, pp. 1-5, 2007.

**[Sakarellos08a]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Performance of MRC Satellite Diversity Receivers over Correlated Lognormal and Gamma Fading Channels”, *10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications, SPSC 2008, European Space Agency (ESA), 6-8 Oct. 2008, Rhodes, Greece*, pp. 1-5, 2008.

**[Sakarellos08b]** V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, “Noise Temperature Increase Effect on Total Outage Analysis of an Interfered Satellite Link”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 29, No. 1, pp. 99-111, January 2008.

**[Sakarellos09a]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Optimum Placement of Radio Relays in Millimeter Wave Wireless Dual-Hop Networks”, *IEEE Antennas & Propagation Magazine, Wireless Corner*, Vol. 51, No 2, pp. 190 - 199, April 2009.

**[Sakarellos09b]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative diversity performance in millimeter wave wireless mesh networks: Outage analysis”, *3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), Berlin, Germany, 23-27 March 2009*, pp. 1410 - 1414, 2009.

**[Sakarellos10a]** 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 10 GHz”, *IEEE Transactions on Communications*, Accepted, May 2010.

**[Sakarellos10b]** V. K. Sakarellos, M. Chortatou, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, “Outage Analysis of a Millimeter Wave Triple-Hop Configuration with Arbitrary Position of the Relay Nodes”, *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010), 12-16 April 2010, Barcelona, Spain, 2010*.

**[Sakarellos10c]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative Diversity Performance in Correlated Lognormal Channels”, *COST 2100 TD(10)10083 contribution, Athens, Greece, 2010/Febr/3-5, 2010*.

**[Sakarellos10d]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance of Terrestrial Radio Communication Networks Operating Above 50 GHz: Impact of Rain Attenuation”, *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010), 12-16 April 2010, Barcelona, Spain, 2010*.

**[Sakarellos10e]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance analysis of Millimeter Wave Cooperative Diversity Systems”, *to be submitted to IEEE Transactions on Communications*, 2010.

**[Sakarellos10f]** V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative Diversity Performance of Satellite and Terrestrial Millimeter Wave Networks”, *to be submitted to IEEE Communications Letters*, 2010.

**[Saunders99]** S. R. Saunders, “*Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*”, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-98609-7, 1999

- [Sendonaris03]** A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang, “User Cooperation Diversity (two parts)”, *IEEE Trans. Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-48, Nov. 2003.
- [Skraparlis09a]** D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance Analysis of Cooperative Diversity with MRC and SC in Correlated Lognormal Channels”, *EURASIP Wireless Communications & Networking*, Vol. 2009, Article ID 707839, 2009.
- [Skraparlis09b]** D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Performance of N-Branch Receive Diversity Combining in Correlated Lognormal Channels”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 13, No 7, pp. 489 - 491, July 2009.
- [Skraparlis09c]** D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Satellite and Terrestrial Diversity Reception Performance in Tropical Regions”, *International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC 2009, 9-11 Sept. 2009, Siena, Italy*, pp. 403-406, 2009.
- [Skraparlis10a]** D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “On the effect of correlation on the performance of dual diversity receivers in lognormal fading”, *submitted to IEEE Communications Letters*, 2010.
- [Skraparlis10b]** D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “New Results on the Statistics and the Capacity of Dual-branch MRC and EGC Diversity in Correlated Lognormal Channels”, *submitted to IEEE Communications Letters*, 2010.
- [Slimane01]** B. S. Slimane, “Bounds on the distribution of a sum of independent lognormal random variables”, *IEEE Transactions on Communications*, vol.49, no.6, pp.975-978, Jun 2001.
- [Soldani08]** D. Soldani and S. Dixit, “Wireless relays for broadband access [radio communications series],” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, 2008, pp. 58-66.
- [Stefanov04]** A. Stefanov and E. Erkip, “Cooperative Coding for Wireless Networks”, *IEEE Trans. on Communications*, vol. 52, no. 9, September 2004.
- [Stuber01]** G. L. Stuber, “*Principles of Mobile Communications*”, Second ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.

- [Stutzman82]** W. L. Stutzman and W. K. Dishman, “A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths”, *Radio Science*, pp. 1465-1476, vol.17, no. 6, 1982.
- [Tellambura08]** C. Tellambura, “Bounds on the distribution of a sum of correlated lognormal random variables and their application”, *IEEE Transactions on Communications*, 56 (8), pp. 1241-1248, August 2008.
- [Timms05]** G. Timms, V. Kvicera, M. Gabner, “60GHz Band Propagation experiments on Terrestrial Paths in Sydney and Praha”, *Radioengineering*, vol. 14, Dec. 2005.
- [Tjelta09]** T. Tjelta, T. Breivik, “Measured attenuation data and predictions for a gigabit radio link in the 80GHz band”, *EUCAP 2009*, Berlin, Germany, March 2009.
- [Van Der Meulen71]** E. C. Van Der Meulen, Three-Terminal Communication Channels, *Advances in Applied Probability*, Vol. 3, No. 1 (Spring, 1971), pp. 120-154.
- [Wang08]** Z. Wang, E. Tameh and A. Nix, “Joint Shadowing Process in Urban Peer-to-Peer Radio Channels,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, pp. 52-64, 2008.
- [Wei02]** S. Wei and D. Goeckel, “Error statistics for average power measurements in wireless communication systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, pp. 1535-1546, 2002.
- [Wei07]** Shuangqing Wei, “Diversity–Multiplexing Tradeoff of Asynchronous Cooperative Diversity in Wireless Networks”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.53, no.11, pp.4150-4172, Nov. 2007
- [Wells09]** J. Wells, “Faster than fiber: The future of multi- G/s wireless”, *IEEE Microwave Magazine*, pp. 104- 112, May 2009.
- [Weng07]** L. Weng and R. D. Murch, “Multi-user MIMO relay system with self-interference cancellation,” in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '07)*, pp. 959–963, March 2007.
- [Yamashita05]** F. Yamashita, K. Kobayashi, M. Ueba, and M. Umehira, “Broadband multiple satellite MIMO system,” in *Proceedings of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '05)*, pp. 2632–2636, Dallas, Tex, USA, September 2005.

**[Yang05]** Lin Yang, M. O. Hasna and M.-S. Alouini, “Average Outage Duration of Multihop Communication Systems with Regenerative Relays”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 4, No. 4, July 2005.

**[Yu08]** T. Yu, et al., “Proposal for Full Duplex Relay,” IEEE C802.16j-08/106r4, May 2008, [http://wirelessman.org/relay/contrib/C80216j-08\\_106r4.doc](http://wirelessman.org/relay/contrib/C80216j-08_106r4.doc).

**[Zhang01]** J. Zhang and V. Aalo, “Effect of macrodiversity on average-error probabilities in a Rician fading channel with correlated lognormal shadowing”, *IEEE Transactions on Communications*, vol.49, no.1, pp.14-18, Jan 2001.

**[Zhao05]** Y. Zhao, R. Adve, & T. J. Lim, “Outage probability at arbitrary SNR with cooperative diversity”, *IEEE Communications Letters*, 9(8), 700-702, 2005.

## Δημοσιεύσεις

### Διεθνή Περιοδικά με κριτές:

- [Π1] **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 10 GHz”, *IEEE Transactions on Communications*, Accepted May 2010.
- [Π2] D. Skraparlis, **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Performance of N-Branch Receive Diversity Combining in Correlated Lognormal Channels”, *IEEE Communications Letters*, Vol. 13, No 7, pp. 489 - 491, July 2009.
- [Π3] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Optimum Placement of Radio Relays in Millimeter Wave Wireless Dual-Hop Networks”, *IEEE Antennas & Propagation Magazine, Wireless Corner*, Vol. 51, No 2, pp. 190 - 199, April 2009.
- [Π4] D. Skraparlis, **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance Analysis of Cooperative Diversity with MRC and SC in Correlated Lognormal Channels”, *EURASIP Wireless Communications & Networking*, Vol. 2009, Article ID 707839, 2009.
- [Π5] **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, “Noise Temperature Increase Effect on Total Outage Analysis of an Interfered Satellite Link”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 29, No. 1, pp. 99-111, January 2008.

### Υπό κρίση:

- [Π6] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance analysis of Millimeter Wave Cooperative Diversity Systems”, *submitted to IEEE Transactions on Communications*, 2010.
- [Π7] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative Diversity Performance of Satellite and Terrestrial Millimeter Wave Networks”, *submitted to IEEE Communications Letters*, 2010.

- [Π18] D. Skraparlis, **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “On the effect of correlation on the performance of dual diversity receivers in lognormal fading”, *submitted to IEEE Communications Letters*, 2010.
- [Π19] D. Skraparlis, **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “New Results on the Statistics and the Capacity of Dual-branch MRC and EGC Diversity in Correlated Lognormal Channels”, *submitted to IEEE Communications Letters*, 2010.

#### **Διεθνή Συνέδρια:**

- [Σ1] **V. K. Sakarellos**, M. Chortatou, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, “Outage Analysis of a Millimeter Wave Triple-Hop Configuration with Arbitrary Position of the Relay Nodes”, *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010), 12-16 April 2010, Barcelona, Spain*, 2010.
- [Σ2] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance of Terrestrial Radio Communication Networks Operating Above 50 GHz: Impact of Rain Attenuation”, *4th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2010), 12-16 April 2010, Barcelona, Spain*, 2010.
- [Σ3] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative Diversity Performance in Correlated Lognormal Channels”, *COST 2100 TD(10)10083 contribution, Athens, Greece, 2010/Febr/3-5*, 2010.
- [Σ4] D. Skraparlis, **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Satellite and Terrestrial Diversity Reception Performance in Tropical Regions”, *International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC 2009, 9-11 Sept. 2009, Siena, Italy*, pp. 403-406, 2009.
- [Σ5] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative diversity performance in millimeter wave wireless mesh networks: Outage analysis”, *3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), Berlin, Germany, 23-27 March 2009*, pp. 1410 - 1414, 2009.
- [Σ6] **V. K. Sakarellos**, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Performance of MRC Satellite Diversity Receivers over Correlated Lognormal and Gamma Fading Channels”, *10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications, SPSC 2008, European Space Agency (ESA), 6-8 Oct. 2008, Rhodes, Greece*, pp. 1-5, 2008.
- [Σ7] **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Performance Study of Dual-Hop Transmissions in Millimeter Wireless Mesh Networks”, *2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), Edinburgh, U.K., 11-16 Nov. 2007*, pp. 1-5, 2007.
- [Σ8] **V. K. Sakarellos**, A. D. Panagopoulos, G. E. Chatzarakis and J. D. Kanellopoulos, “Interference Performance Analysis of a Broadband Satellite Downlink Including the Noise Temperature Increase Due to Rain”, *12th Ka and Broadband Communications Conference, Naples, Italy, Sep. 27-29, 2006*.



## **Βιογραφικό σημείωμα**

Ο Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος γεννήθηκε στη Γαλλία στις 27 Νοεμβρίου 1980. Αποφοίτησε από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης το 2004. Από τον Οκτώβριο του 2004 ήταν Υποψήφιος Διδάκτορας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και υποστήριξε τη Διδακτορική Διατριβή του τον Ιούλιο του 2010.

Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα αφορούν τα πεδία της μοντελοποίησης καναλιού, της σχεδίασης ασύρματων ζεύξεων, των τεχνικών συνεργατικής διαφορικότητας σε κανάλια με διαλείψεις και της ανάλυσης ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η ερευνητική του δραστηριότητα επιβραβεύτηκε με το Πρόγραμμα Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας Κ. Καραθεοδωρής και το Πρόγραμμα Ενίσχυσης Βασικής Έρευνας 2009, χρηματοδοτούμενα από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Έχει δημοσιεύσει 13 επιστημονικά άρθρα σε Διεθνή Περιοδικά με κριτές και Πρακτικά Διεθνών Συνεδρίων. Είναι φοιτητικό μέλος της IEEE και μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.