



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

**Ανάπτυξη Μοντέλων Συνδεσιμότητας και Αξιολόγηση  
Επίδοσης σε Ασύρματα Δίκτυα Νέας Γενιάς**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Τ. ΠΙΤΣΙΛΑΔΗΣ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &  
Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

Αθήνα, Δεκέμβριος 2012





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

## Ανάπτυξη Μοντέλων Συνδεσιμότητας και Αξιολόγηση Επίδοσης σε Ασύρματα Δίκτυα Νέας Γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Τ. ΠΙΤΣΙΛΑΔΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &  
Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

Συμβουλευτική Επιτροπή : Φ. Κωνσταντίνου

Μ. Θεολόγου

Α. Δ. Παναγόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 19<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2012.

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

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

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

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

.....  
Σ. Παπαβασιλείου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Κανάτας  
Καθηγητής  
Πανεπιστημίου Πειραιώς

.....  
Γ. Ευθύμογλου  
Επ. Καθηγητής  
Πανεπιστημίου Πειραιώς

Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

.....  
Γεώργιος Τ. Πιτσιλαδής

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

Copyright © Γεώργιος Τ. Πιτσιλαδής, 2012.

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.

Στους γονείς μου και στην αδελφή μου



## Πρόλογος

Ολοκληρώνοντας την πολυετή και απαιτητική προσπάθεια της εκπόνησης της διδακτορικής έρευνας, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους εξαιρετικούς επιστήμονες και αξιόλογους συνεργάτες με τους οποίους είχα την χαρά να συνεργαστώ αυτά τα χρόνια. Είναι οι άνθρωποι οι οποίοι με βοήθησαν στην διδακτορική έρευνα αλλά και στα πρώτα βήματα της επαγγελματικής μου πορείας. Τώρα που ολοκληρώνεται αυτό το κεφάλαιο της ζωής μου αισθάνομαι ότι είναι η κατάλληλη στιγμή να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους ανθρώπους που μου συμπαραστάθηκαν αυτά τα χρόνια.

Πρώτον από όλους, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής μου Καθηγητή κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου και διευθυντή του εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διατριβή και να ασχοληθώ ερευνητικά με τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες. Θα ήθελα επιπλέον να τον ευχαριστήσω και να του δείξω την ευγνωμοσύνη μου για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις χρήσιμες συμβουλές του και την συμπαράστασή του. 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 που υπήρξε αρωγός αυτής της προσπάθειας και που συμμετείχε ενέργα προσφέροντας σημαντική βοήθεια κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση, το ήθος του, ο δυναμισμός του χαρακτήρα του και το πάθος του για τα ερευνητικά ζητήματα αποτέλεσαν πρότυπα για την εξέλιξη μου ως υποψήφιος διδάκτορας. Πάνω από όλα όμως, υπήρξε καλός φίλος και ο άνθρωπος που ενθάρρυνε τις επιλογές και τις προσπάθειές μου.

Επιπλέον, εξαιρετικοί συνάδελφοι και φίλοι ήταν για μένα όλοι οι ερευνητές της ομάδας του Εργαστηρίου των Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών. Τους ευχαριστώ όλους για την συμπαράστασή τους αλλά και για την ανοχή που επέδειξαν τα τελευταία πέντε χρόνια στην συμπεριφορά μου. Ιδιαίτερα τους συναδέλφους Δημήτρη Παπανικολάου, Νίκο Παπανικολάου, Βούλα Βασσάκη, Μάριο Πουλάκη, Χρήστο Ξάνθη, Σταύρο Σαγκριώτη και Χάρη Κουρόγιωργα που υπήρξαν φίλοι στον ελεύθερο χρόνο και μοιραστήκαμε μαζί τις ίδιες προσπάθειες και ανησυχίες. Τους Θανάση Μαρούση και

Νίκο Σκέντο για τις σημαντικότερες συμβουλές τους καθώς και το Βασίλη Σακαρέλλο για την βοήθεια και τις πληροφορίες που προσέφερε κατά την συγγραφή της διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Τζάννο και Νίνα, για την πλήρη συμπαράσταση και υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια αυτής της δύσκολης πορείας αλλά και για τα κίνητρα που μου δίνουν να προσπαθώ πάντα για το καλύτερο. Την αδερφή μου Μαρία για την συνολική βοήθειά της όλα αυτά τα χρόνια και το συνεχές ενδιαφέρον της. Όλους τους στενούς μου φίλους για την ευχάριστη παρέα τους και ιδιαίτερα τη Μαρία Γρίβα.



## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μοντέλων συνδεσιμότητας και η αξιολόγηση της επίδοσης τους σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς. Τα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς θα ενσωματώνουν πρωτοποριακά χαρακτηριστικά όπως η χρήση πολλαπλών βημάτων για την μετάδοση της πληροφορίας, η δυνατότητα αυτοοργάνωσης των κόμβων τους και η αποκεντρωμένη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων τους. Πρωταρχικός παράγοντας για την λειτουργία αυτών των δικτύων είναι η επίτευξη συνδεσιμότητας. Η έλλειψη όμως κεντρικού διαχειριστή και η αποκεντρωμένη δομή αυτών των δικτύων δυσχεραίνουν την επίτευξη της αναγκαίας συνδεσιμότητας για την λειτουργία τους. Επομένως, απαιτείται η ανάπτυξη μοντέλων υπολογισμού και μέτρων αξιολόγησης της συνδεσιμότητας που θα ενσωματώνονται στα πρωτόκολλα επικοινωνίας ώστε κάθε ανεξάρτητος κόμβος του δικτύου να οργανώνει την λειτουργία του με στόχο την εμφάνιση πλήρους συνδεσιμότητας στο δίκτυο που το περιλαμβάνει.

Στα πλαίσια αυτά προτάθηκαν βελτιώσεις και τροποποιήσεις στην βασική μεθοδολογία υπολογισμού της συνδεσιμότητας, αναπτύχθηκε από την αρχή ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της και διερευνήθηκαν τα όρια της συνδεσιμότητας για κανάλια διαλείψεων εξαιτίας σκίασης και για κανάλια διαλείψεων εξαιτίας βροχής.

Πιο συγκεκριμένα, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο προτείνονται αρκετές βελτιώσεις και τροποποιήσεις στην βασική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας και αξιολογείται το προτεινόμενο μοντέλο για κανάλια διαλείψεων εξαιτίας σκίασης. Πέρα από τον αναλυτικό υπολογισμό της συνδεσιμότητας, παρουσιάζεται αναλυτική λύση και για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τιμής της πυκνότητας των κόμβων που απαιτείται για να μείνει το δίκτυο συνδεδεμένο. Η ανάλυση βασίστηκε στη γενικότερη περίπτωση που αντιστοιχεί σε τυχαία δίκτυα με τυχαία τοπολογία μία θεώρηση που αποτέλεσε την βάση για όλες τις μεθοδολογίες και αναλύσεις της διατριβής.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται η δυνατότητα χρήσης μεθόδων διαφορισμού στις συνδέσεις του δικτύου με απώτερο στόχο την αύξηση της συνδεσιμότητας για περιβάλλοντα διάδοσης με διαλείψεις σκίασης. Η μεθοδολογία που προέκυψε είναι γενική και ενσωματώνει στον υπολογισμό της συνδεσιμότητας δύο από τις

βασικότερες τεχνικές διαφορικής λήψης, του συνδυασμού με επιλογή και του συνδυασμού μεγίστου λοβού, ενώ είναι δυνατή η παραμετροποίηση για οποιαδήποτε άλλη τεχνική διαφορικής λήψης.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύχθηκε από μηδενική βάση ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας που βασίζεται στην θεωρία γράφων και τα συνδεδεμένα δένδρα. Η νέα μεθοδολογία προτείνει ένα καινούργιο μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας ενός τυχαίου δικτύου το οποίο αποδεικνύεται ότι αποτελεί άνω όριο για τον πραγματικό υπολογισμό της πιθανότητας να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο. Τα βασικά πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ότι λαμβάνονται ταυτόχρονα υπόψη για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας τόσο η χωρική κατανομή του δικτύου όσο και η στοχαστική συμπεριφορά του καναλιού διάδοσης αλλά και οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων. Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για συσχετισμένα κανάλια διαλείψεων σκίασης ενώ είναι δυνατή η παραμετροποίησή του για οποιοδήποτε κανάλι διάλειψης. Τέλος, το νέο μοντέλο παραμετροποιήθηκε ώστε να ενσωματώνει και την δυνατότητα χρήσης τεχνικών διαφορισμού και αξιολογείται για κανάλια διαλείψεων σκίασης.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύχθηκε μεθοδολογία υπολογισμού της συνδεσιμότητας για τα σύγχρονα δίκτυα κορμού κυψελωτών συστημάτων. Τα δίκτυα αυτά εγκαθίστανται σε περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου και λειτουργούν στις ζώνες των μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (10-50GHz). Όπως αναμένεται, το προτεινόμενο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας λαμβάνει υπόψη των κυριότερο στοχαστικό παράγοντα εξασθενήσεων για αυτές τις συχνότητες που είναι οι διαλείψεις εξαιτίας βροχής. Για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας ελήφθησαν υπόψη τρία διαφορετικά μοντέλα κατανομών (λογαριθμοκανονική κατανομή, γάμμα κατανομή και Weibull κατανομή) για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων εξασθενήσεων εξαιτίας διαλείψεων βροχής. Εξετάστηκε επίσης η επίδραση στην συνδεσιμότητα του δικτύου της χρήσης διπλά πολωμένων συνδέσεων για την αύξηση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου. Τέλος, προτάθηκε η τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης (Adaptive Modulation) για την διατήρηση, όποτε κρίνεται αναγκαίο, της συνδεσιμότητας στα απαιτούμενα επίπεδα μεταβάλλοντας την ρυθμαπόδοση του δικτύου.

## Abstract

The objective of this thesis is to develop new connectivity models and to evaluate their performance in next generation wireless networks. The future wireless networks will incorporate innovative features such as the use of multi-hop transmissions of data information, the ability of self-organization and the decentralized management of available resources. The primary factor for the reliable operation of these wireless networks is to achieve connectivity. The lack of centralized administration and the decentralized structure of these networks are the major reasons for limited connectivity performance. Therefore, the development of evaluation models and metrics for the calculation of connectivity that will be taken into account from each independent node and that will be integrated into the communication protocols is necessary in order to enhance connectivity and network's performance.

For the abovementioned reasons, improvements and modifications to the basic methodology for connectivity calculation have been proposed, a new connectivity model has been developed and connectivity limits for shadowing fading channels and rain fading channels have been explored.

More specifically, in 2<sup>nd</sup> chapter several improvements and modifications to the basic methodology for the calculation of connectivity are proposed and evaluated for shadowing fading channels. Apart from the analytical calculation of connectivity, an analytical solution for the determination of a critical value of nodes density that it is required to keep the network connected is presented. In all thesis chapters, the analysis is based on the general case of random networks represented by a homogeneous Poisson point field process.

In 3<sup>rd</sup> chapter, the usage of diversity techniques in network connections in order to enhance connectivity is investigated under the assumption of shadowing fading channels. The proposed methodology is general and incorporates in the connectivity calculation two of the main diversity reception techniques, which are the selection combining scheme (SC) and the maximal-ratio combining scheme (MRC). The usage of any other diversity scheme is also possible.

In 4<sup>th</sup> chapter, a new connectivity model based on graph theory and spanning trees is proposed for connectivity evaluation in finite wireless multi-hop networks. The new

spanning-tree-based connectivity model proposes a new connectivity metric for random networks, which it is proved to be an upper limit for the real probability of network's connectivity. The main advantages of the proposed methodology are that the network spatial distribution, the stochastic behavior of the propagation channel and the availabilities of network connections are taken into account for connectivity calculation. The proposed spanning-tree-based model is evaluated under the assumption of correlated fading channels due to shading phenomena, whereas it is possible the parameterization for any fading channel. Finally, the new model is parameterized to incorporate the usage of diversity techniques under the assumption of shadowing fading channels.

In 5<sup>th</sup> chapter, a methodology for calculating connectivity in future backhaul and core networks of cellular systems is presented. These networks are installed in outdoor environments and operate at microwave and millimeter-wave frequency bands (10-50GHz). As expected, the proposed connectivity model takes into account the induced attenuations from rain fading which is the main stochastic cause for signal impairments at these frequencies. Three different models of distributions (lognormal distribution, gamma distribution and Weibull distribution) are considered for the calculation of the additional attenuations due to rain fading and are taken into account for the connectivity assessment. Also, the impact of using double polarized connections on network connectivity in order to increase the throughput is examined. Finally, an adaptive modulation technique in order to maintain, when it is necessary, network's connectivity by reducing network's capacity and throughput is investigated.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	7
Περίληψη .....	9
Abstract .....	11
Κεφάλαιο 1 .....	17
Εισαγωγή.....	17
1.1 Σκοπός.....	17
1.2 Σύνοψη Διατριβής.....	20
1.3 Αναδρομή στην βιβλιογραφία.....	23
1.4 Συνεισφορά διατριβής.....	26
Κεφάλαιο 2 .....	29
Μοντελοποίηση δικτύου και αξιολόγηση συνδεσιμότητας.....	29
2.1 Εισαγωγή.....	29
2.2 Χωρική κατανομή δικτύου.....	30
2.3 Μοντελοποίηση συνδεσιμότητας .....	33
2.3.1 Poisson Boolean μοντέλο.....	33
2.3.2 Αξιολόγηση συνδεσιμότητας .....	35
2.3.3 Μέθοδος υπολογισμού συνδεσιμότητας .....	37
2.4 Γενικό μοντέλο συνδεσιμότητας.....	40
2.5 Νέο γενικευμένο μοντέλο συνδεσιμότητας .....	46

2.6	Συνδεσιμότητα σε περιβάλλον διαλείψεων .....	49
2.6.1	Φαινόμενα διαλείψεων.....	49
2.6.2	Διαλείψεις λόγω σκίασης.....	53
2.6.3	Γενικό μοντέλο συνδεσιμότητας για διαλείψεις λόγω σκίασης.....	56
2.6.4	Νέο γενικευμένο μοντέλο συνδεσιμότητας για διαλείψεις λόγω σκίασης .....	58
2.7	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός.....	61
2.8	Κρίσιμη πυκνότητα κόμβων για την συνδεσιμότητα.....	67
2.9	Συμπεράσματα .....	69
Κεφάλαιο 3 .....		71
Βελτίωση συνδεσιμότητας με χρήση μεθόδων διαφορισμού.....		71
3.1	Εισαγωγή.....	71
3.2	Διαθεσιμότητα καναλιού μετάδοσης .....	73
3.3	Αξιολόγηση συνδεσιμότητας για διαφορική λήψη .....	77
3.4	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός.....	78
3.5	Συμπεράσματα .....	83
Κεφάλαιο 4 .....		85
Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας.....		85
4.1	Εισαγωγή.....	85
4.2	Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας .....	88
4.2.1	Συνδεσιμότητα γράφων .....	88
4.2.2	Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας βασισμένο σε συνδεδετικά δένδρα .....	91
4.3	Αξιολόγηση νέου μοντέλου για διαλείψεις σκίασης.....	100
4.3.1	Χωρική κατανομή κόμβων .....	100
4.3.2	Δεσμευμένη πιθανότητα σύνδεσης.....	102
4.3.3	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	105

4.4 Βελτίωση συνδεσιμότητας με χρήση τεχνικών διαφορισμού .....	114
4.4.1 Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας με χρήση μεθόδων διαφορισμού .....	114
4.4.2 Διαθεσιμότητα διαφορικών συνδέσεων .....	117
4.4.3 Χωρική κατανομή κόμβων .....	119
4.4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	120
4.5 Συμπεράσματα .....	126
Κεφάλαιο 5 .....	129
Αξιολόγηση συνδεσιμότητας σε ασύρματα δίκτυα κορμού κυψελωτών δικτύων νέας γενιάς .....	129
5.1 Εισαγωγή.....	129
5.2 Ασύρματα δίκτυα κορμού (Backhaul networks).....	132
5.3 Απόσβεση λόγω βροχής.....	135
5.4 Υπολογισμός συνδεσιμότητας: Λογαριθμοκανονικό μοντέλο .....	137
5.4.1 Απόσβεση διαλείψεων βροχής: Λογαριθμοκανονικό μοντέλο.....	137
5.4.2 Υπολογισμός συνδεσιμότητας .....	139
5.5 Υπολογισμός Συνδεσιμότητας: Γάμμα μοντέλο .....	141
5.5.1 Απόσβεση διαλείψεων βροχής: Γάμμα μοντέλο.....	141
5.5.2 Υπολογισμός συνδεσιμότητας .....	144
5.6 Υπολογισμός συνδεσιμότητας: Weibull μοντέλο .....	145
5.6.1 Απόσβεση διαλείψεων βροχής: Weibull μοντέλο .....	145
5.6.2 Υπολογισμός συνδεσιμότητας .....	147
5.7 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός.....	148
5.7.1 Γενικά.....	148
5.7.2 Πιθανότητα απομόνωσης.....	151
5.7.3 Κρίσιμη πυκνότητα κόμβων .....	157
5.8 Αξιολόγηση συνδεσιμότητας με χρήση διπλής πόλωσης .....	160
5.8.1 Γενικά.....	160

5.8.2	Μεθοδολογία υπολογισμού συνδεσιμότητας.....	161
5.8.3	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	164
5.9	Ανάλυση απόδοσης δικτύου .....	166
5.9.1	Πιθανότητα ανίχνευσης σφάλματος .....	166
5.9.2	Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός .....	170
5.10	Συμπεράσματα .....	174
	Κεφάλαιο 6 .....	177
	Συμπεράσματα και προοπτικές για μελλοντική έρευνα .....	177
6.1	Συμπεράσματα .....	177
6.2	Προοπτικές για μελλοντική έρευνα .....	181
	Παράρτημα Α.....	183
	Υπολογισμός ολοκληρώματος της υπό συνθήκης κατανομής .....	183
	Παράρτημα Β.....	187
	Διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή .....	187
	Παράρτημα Γ .....	191
	Υπολογισμός παραμέτρων απωλειών βροχής .....	191
	Δημοσιεύσεις .....	193
	Βιβλιογραφία .....	195
	Βιογραφικό σημείωμα .....	205



## Κεφάλαιο 1

# Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η μελέτη της συνδεσιμότητας σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η συνδεσιμότητα των πολυβηματικών αδόμητων (ad hoc) δικτύων ενώ αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της. Τα ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα αποτελούν μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία για τις περιπτώσεις που τα κυβελωτά δίκτυα και γενικά τα ασύρματα δίκτυα με σταθερή υποδομή (σταθμοί βάσης) δεν αποτελούν την ενδεδειγμένη λύση. Τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα, όπως της κινητής τηλεφωνίας και των ασύρματων δικτύων παροχής πρόσβασης στο διαδίκτυο, βασίζονται κατά πρώτον στην ύπαρξη σταθμών βάσης ή σημείων πρόσβασης και κατά δεύτερον στην ύπαρξη κεντρικής διαχείρισης για να καθίσταται δυνατή η λειτουργία τους καθώς και η εξυπηρέτηση των χρηστών. Αυτό συνεπάγεται σημαντική υλική υποδομή και κόστος λειτουργίας που μεταφέρεται από τον πάροχο του δικτύου στους χρήστες. Η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών γίνεται μέσω της υποδομής του δικτύου του παρόχου ο οποίος αναλαμβάνει και την διαχείριση της σύνδεσης.

Η ιδέα των πολυβηματικών δικτύων βασίζεται στην δυνατότητα ασύρματων συσκευών (που από εδώ και πέρα θα καλούνται κόμβοι) να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς την μεσολάβηση κάποιου σταθμού βάσης ή κεντρικού διαχειριστή. Η απευθείας επικοινωνία είναι εφικτή μόνο εφόσον οι δύο κόμβοι πληρούν κάποιες συνθήκες (π.χ. βρίσκονται αρκετά κοντά). Η επικοινωνία σε μεγαλύτερες αποστάσεις γίνεται δυνατή εφόσον κάποιοι από τους κόμβους του δικτύου λειτουργούν σαν αναμεταδότες. Οι κόμβοι αυτοί αναλαμβάνουν να προωθούν την πληροφορία δημιουργώντας μια αλυσίδα επικοινωνίας μεταξύ των απομακρυσμένων κόμβων. Στην δυνατότητα αυτή να χρησιμοποιούνται αρκετοί διαδοχικοί κόμβοι ως αναμεταδότες για την δημιουργία ενός μονοπατιού επικοινωνίας μεταξύ δύο απομακρυσμένων κόμβων αποδίδεται και η ονομασία «πολυβηματικά δίκτυα».

Η εγκαθίδρυση επικοινωνίας μέσω «πολλαπλών διαδοχικών βημάτων» αντικαθιστά θεωρητικά την ανάγκη ύπαρξης κεντρικής διαχείρισης καθώς το δίκτυο απαρτίζεται από παρόμοιες συσκευές που λειτουργούν ταυτόχρονα ως πομποί, όταν θέλουν να στείλουν πληροφορία, και ως αναμεταδότες, για την προώθηση της πληροφορίας άλλων κόμβων, ενώ ταυτόχρονα συνεργάζονται για να διατηρήσουν την συνδεσιμότητα και λειτουργικότητα του δικτύου. Η δυνατότητα επικοινωνίας μέσω πολλαπλών βημάτων είναι μια βιώσιμη τεχνολογική λύση για πολλά προβλήματα σε συστήματα επικοινωνιών και επιτυγχάνει υψηλές ροές δεδομένων και υψηλή διαθεσιμότητα για μεταδόσεις πληροφοριών. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική των πολυβηματικών δικτύων έχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων αρχιτεκτονικών που την καθιστούν ως την επικρατέστερη αρχιτεκτονική για τα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνιών. Το πιο σημαντικό είναι η απουσία κάποιας επιπλέον υποδομής πέρα από τους κόμβους του δικτύου, γεγονός που επιτρέπει την δημιουργία δικτύων κατά περίπτωση/εκ περιτροπής (π.χ. όταν αρκετοί κόμβοι συγκεντρωθούν σε μία περιοχή) και με μηδενικό κόστος (χωρίς δηλαδή την συνδρομή σε κάποιο πάροχο κινητής τηλεφωνίας ή διαχειριστή δικτύου για χρήση συχνοτήτων σε ελεύθερες ζώνες). Η αποκεντρωμένη οργάνωση αυτών των δικτύων συνεπάγεται αυξημένη αξιοπιστία καθώς αν κάποιοι κόμβοι σταματήσουν να λειτουργούν τότε οι υπόλοιποι αναλαμβάνουν την διαχείριση του δικτύου και την επίτευξη συνδεσιμότητας μεταξύ των υπολοίπων κόμβων. Σε ένα ασύρματο δίκτυο με υποδομή ή σε ένα κυψελωτό σύστημα μία δυσλειτουργία του διαχειριστή συνεπάγεται αυτομάτως αδράνεια όλου του συστήματος. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η αυξημένες ροές δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας διαδοχικές κοντινές μεταδόσεις αυξάνοντας την συνολική χωρητικότητα του δικτύου και βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση των κόμβων.

Από την άλλη πλευρά, βασικό μειονέκτημα της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής των πολυβηματικών δικτύων είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας των λειτουργιών των κόμβων που οφείλεται στην απουσία κεντρικής διαχείρισης. Η συνεργασία και η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κόμβων του πολυβηματικού δικτύου αποτελεί επιβεβλημένη αναγκαιότητα με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας των πρωτοκόλλων επικοινωνίας σε όλα τα επίπεδα του δικτύου και την αύξηση του συνολικού τηλεπικοινωνιακού φορτίου. Επιπλέον, παρόλο που η υλοποίηση μικρής κλίμακας πολυβηματικών δικτύων είναι εύκολα εφικτή, το ίδιο δεν ισχύει για δίκτυα μεγαλύτερης κλίμακας καθώς ο μεγάλος αριθμός κόμβων αυξάνει την συνολική πολυπλοκότητα του δικτύου και δυσχεραίνει σημαντικά την συνδεσιμότητα του.

Η μελέτη και ανάλυση των πολυβηματικών ασυρμάτων δικτύων νέας γενιάς έχει μεγάλη σημασία κυρίως για τα ασύρματα δίκτυα καθώς τα ενσύρματα παρουσιάζουν

σταθερή τοπολογία και είναι λιγότερο ευάλωτα στους διάφορους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή τους. Ένα σημαντικό μέρος από διαφορετικές κατηγορίες ασυρμάτων δικτύων που θα απαρτίσουν τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα βασίζονται στην αρχιτεκτονική των πολυβηματικών δικτύων. Διακρίνονται από αυτό το σύνολο τα αδόμητα δίκτυα (Ad hoc networks), τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks), τα ασύρματα γνωστικά δίκτυα (cognitive radio networks), τα ασύρματα δίκτυα κορμού ή υποδομής (backhaul networks) και τα δίκτυα με τοπολογία πλέγματος (mesh networks).

Το πιο βασικό ζήτημα που προκύπτει σε όλα αυτά τα δίκτυα είναι η συνδεσιμότητα των κόμβων τους. Να υπάρχει δηλαδή πάντα η δυνατότητα εύρεσης των απαραίτητων αναμεταδοτών για να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους ο κόμβος αποστολέας με τον κόμβο παραλήπτη. Η εύρεση και επιλογή των απαραίτητων αναμεταδοτών κόμβων μπορεί να είναι ένα ζήτημα που πρέπει να διαχειριστεί το πρωτόκολλο δρομολόγησης, η ύπαρξη όμως των φυσικών συνδέσεων και της δυνατότητας επικοινωνίας μεταξύ γειτονικών κόμβων είναι ένα ζήτημα που αναφέρεται στο φυσικό επίπεδο και χαρακτηρίζει την συνδεσιμότητα του δικτύου.

Η ύπαρξη καθυστερήσεων κατά μήκος της αλυσίδας επικοινωνίας μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη, επειδή κάποια ενδιάμεσα κανάλια εμφανίζουν έντονη τηλεπικοινωνιακή κίνηση ή μειωμένη διαθεσιμότητα, είναι ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που περιορίζει την απόδοση και την ποιότητα υπηρεσίας του δικτύου (QoS). Παράλληλα, η ύπαρξη καθυστερήσεων στις από άκρη-σε-άκρη μεταδόσεις αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση των κόμβων του δικτύου και μειώνει δραματικά τη συνολική χωρητικότητα μετάδοσής του δηλαδή τη ρυθμοάποδοση (throughput). Όλα αυτά τα ζητήματα έχουν διαφορετική βαρύτητα ανάλογα με την κατηγορία του δικτύου και το είδος της εφαρμογής του. Όμως είναι ζητήματα αλληλένδετα και άμεσα εξαρτώμενα με την συνδεσιμότητα του δικτύου. Η ύπαρξη υψηλής συνδεσιμότητας στο δίκτυο επιτρέπει την επικοινωνία όλων των κόμβων μεταξύ τους, την επιλογή από το πρωτόκολλο δρομολόγησης την βέλτιστης διαδρομής βάσει της εκτιμώμενης συνολικής καθυστέρησης και της αποφυγής επιβαρυνμένων με κίνηση συνδέσεων, καθώς και την καλύτερη διάθεση και διαχείριση των τηλεπικοινωνιακών και ενεργειακών πόρων του δικτύου.

Βασικό σκοπός αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη γενικού μοντέλου υπολογισμού της συνδεσιμότητας για ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα στο οποίο θα μπορούν να ενσωματωθούν διάφορα μοντέλα καναλιού του φυσικού επιπέδου του δικτύου. Επιπρόσθετα, ένας επιπλέον σημαντικός σκοπός της διατριβής είναι η αξιολόγηση και μελέτη της εξάρτησης της συνδεσιμότητας από τις βασικές παραμέτρους του φυσικού επιπέδου ενός ασύρματου δικτύου όπως είναι η τοπολογία

των κόμβων και το περιβάλλον διάδοσης της πληροφορίας σε κάθε σύνδεση του δικτύου.

## 1.2 Σύνοψη Διατριβής

Στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής αναπτύχθηκε ένα γενικευμένο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας που μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές κατηγορίες ασύρματων δικτύων νέας γενιάς και να προσαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα λειτουργίας του δικτύου. Παράλληλα, βελτιώθηκαν συγκεκριμένα μοντέλα συνδεσιμότητας που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην βιβλιογραφία και τέλος πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της συνδεσιμότητας για συγκεκριμένες κατηγορίες δικτύων και περιβαλλόντων διάδοσης.

Αρχικά, για τη μοντελοποίηση απαιτείται η θεωρητική περιγραφή και η χωρική αναπαράσταση ενός πραγματικού ασύρματου πολυβηματικού δικτύου. Για τον σκοπό αυτό καταφεύγουμε σε μία μαθηματική μέθοδο τυχαίας κατανομής σημείων στον ευκλείδειο χώρο που στην διεθνή ορολογία ονομάζεται διαδικασία τυχαίων σημείων πεδίου Poisson ή Poisson point field process. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην Poisson κατανομή και έχει σαν αποτέλεσμα να κατανέμει με τυχαίο και ανεξάρτητο τρόπο συγκεκριμένο αριθμό σημείων στον ευκλείδειο χώρο και να μοντελοποιεί την τυχαία τοπολογία που εμφανίζεται στα περισσότερα πολυβηματικά δίκτυα. Κατόπιν, αναλύεται το Poisson Boolean μοντέλο πάνω στο οποίο βασίζονται τα περισσότερα μοντέλα συνδεσιμότητας. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στη διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson για την τοπολογία του δικτύου και θεωρεί ότι ο κάθε κόμβος έχει μία περιοχή κάλυψης που για τις δύο διαστάσεις ισοδυναμεί με ένα δίσκο με συγκεκριμένη ακτίνα κάλυψης. Αν ένας κόμβος βρίσκεται στην περιοχή κάλυψης ενός άλλου και το αντίστροφο τότε οι δύο κόμβοι θεωρούνται συνδεδεμένοι και μπορούν να ανταλλάσσουν πακέτα πληροφορίας. Παρότι το μοντέλο είναι σχετικά διαδεδομένο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή κάποιων βασικών συμπερασμάτων, έχει το βασικό μειονέκτημα να μην λαμβάνει υπόψη του την στοχαστική φύση του μέσου διάδοσης που είναι ο ασύρματος δίαυλος και κατ' επέκταση την στοχαστική συμπεριφορά της περιοχής κάλυψης. Το μειονέκτημα αυτό παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον τελικό υπολογισμό της συνδεσιμότητας καθώς πρώτον, η ντετερμινιστική παραδοχή για την περιοχή κάλυψης του κάθε κόμβου δεν ανταποκρίνεται σε κανένα πραγματικό περιβάλλον διάδοσης και δεύτερον, γιατί η περιοχή κάλυψης του κάθε κόμβου είναι πρωταρχικής σημασίας μέγεθος, βάσει του συγκεκριμένου μοντέλου, για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας.

Για την αντιμετώπιση αυτού του βασικού μειονεκτήματος αναπτύσσεται μια μεθοδολογία όπου η περιοχή κάλυψης υπολογίζεται όχι από κάποιο ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης αλλά στοχαστικά λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού μετάδοσης της πληροφορίας. Με αυτό τον τρόπο το μοντέλο υπολογισμού προσεγγίζει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των πραγματικών ασύρματων δικτύων. Στο πλαίσιο της διατριβής το μοντέλο αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά την διάδοση της πληροφορίας εμφανίζονται φαινόμενα αργών διαλείψεων λόγω φαινομένων σκίασης. Η μοντελοποίηση αυτή ανταποκρίνεται κυρίως στις περιπτώσεις που το δίκτυο βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον, σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων ή σε περιοχές με αρκετά εμπόδια και σκεδαστές, ενώ οι κόμβοι του δικτύου παρουσιάζουν από μικρή έως μηδενική κινητικότητα. Η σκίαση μπορεί να οφείλεται επίσης και στη μεταβολή του περιβάλλοντος χώρου διάδοσης. Για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης του νέου μοντέλου παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα με υπάρχοντες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας χρησιμοποιώντας και στις δύο περιπτώσεις τα ίδια χαρακτηριστικά για το κανάλι διάδοσης.

Κατόπιν, αναπτύσσεται ένα νέο γενικευμένο μοντέλο για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας που δανείζεται πολλά στοιχεία από την θεωρία γράφων ενώ λαμβάνει υπόψη και την στοχαστικότητα του ασύρματου μέσου επικοινωνίας. Η βασική αρχή αυτού του μοντέλου είναι η εύρεση των συνθηκών υπό τις οποίες εμφανίζεται το πρώτο συνδεδετικό δέντρο στο γράφο αναπαράστασης του δικτύου. Οι συνθήκες αυτές είναι κρίσιμες και αποδεικνύεται ότι είναι και οι ελάχιστες αναγκαίες ως προς τις απαιτήσεις για την εμφάνιση συνδεσιμότητας στο δίκτυο. Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιείται και σε αυτή την περίπτωση θεωρώντας ότι ο τηλεπικοινωνιακός διάυλος υφίσταται αργές διαλείψεις μεγάλης κλίμακας λόγω σκίασης. Επιπρόσθετα, γίνεται η θεώρηση συσχετισμένων καναλιών διάλειψης μεταξύ γειτονικών συνδέσεων του δικτύου ώστε να γίνει καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών διάδοσης. Το νέο μοντέλο συνδεσιμότητας είναι γενικό και ευέλικτο ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε κανάλι διάλειψης λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη και την επίδραση παρεμβολών από άλλα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Πέρα από την ανάπτυξη ενός μοντέλου για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, σημαντικό κομμάτι της Διδακτορικής Διατριβής λαμβάνει και η πρόταση τεχνικών για την βελτίωση της συνδεσιμότητας των πολυβηματικών δικτύων που έχουν και σαν άμεσο αποτέλεσμα την συνολική βελτίωση τόσο της απόδοσης όσο και της αξιοπιστίας του δικτύου. Για τον άνωθεν λόγο εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης τεχνικών διαφορικής λήψης στα σύγχρονα ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα. Οι

τεχνικές διαφορικής λήψης χωρίς να αυξάνουν σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος παρέχουν σημαντική βελτίωση στην διαθεσιμότητα και χωρητικότητα των συνδέσεων του συστήματος. Στην περίπτωση μας θα εξεταστεί το κατά πόσο βελτιώνουν την συνδεσιμότητα του δικτύου οι πιο ευρέως διαδεδομένες τεχνικές διαφορικής λήψης.

Η αξιολόγηση γίνεται με χρήση και των δύο προτεινόμενων μοντέλων, ενώ τα χαρακτηριστικά του τηλεπικοινωνιακού δίαυλου θεωρούνται ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις για να μπορεί να αποτιμηθεί και στα αριθμητικά αποτελέσματα το κέρδος από την χρήση των τεχνικών διαφορικής λήψης. Τέλος, στο πλαίσιο αξιολόγησης των τεχνικών διαφορικής λήψης ως προς την συνδεσιμότητα ασύρματων πολυβηματικών δικτύων, πραγματοποιείται μελέτη συνδεσιμότητας σε ασύρματα δίκτυα εσωτερικού χώρου λειτουργίας στην χλιοστομετρική ζώνη συχνοτήτων στα πρότυπα άλλων συστημάτων επικοινωνίας μικρής εμβέλειας που έχουν προταθεί και σχεδιαστεί να λειτουργούν στην συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων όπως τα UWB.

Μία αρκετά υποσχόμενη κατηγορία ασύρματων πολυβηματικών δικτύων, που θα αποτελέσει ιδανική λύση κυρίως για μητροπολιτικά ασύρματα δίκτυα (WMN) και για την τελική σύνδεση των χρηστών στο διαδίκτυο για περιοχές όπου η ενσύρματη κάλυψη είναι οικονομικά ασύμφορη, αποτελούν τα δίκτυα κορμού ή υποδομής (Backhaul networks). Αυτά τα δίκτυα αποτελούν τον κορμό (ραχοκοκκαλιά) για την διασύνδεση άλλων δικτύων και ετερογενών χρηστών στον παγκόσμιο ιστό και σε πληθώρα τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Η εγκατάσταση των δικτύων αυτών γίνεται σε εξωτερικούς χώρους και έχουν προταθεί, εξαιτίας των υψηλών απαιτήσεων για ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ζώνες χλιοστομετρικών συχνοτήτων, δηλαδή συχνότητες μετάδοσης μεγαλύτερες των 10GHz. Σε αυτές τις συχνότητες και δεδομένου ότι το δίκτυο είναι εγκατεστημένο σε εξωτερικό χώρο, οι μεταδόσεις στις συνδέσεις του δικτύου εξαρτώνται έντονα από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε έντονες εξασθενίσεις και απώλειες συνδέσεων. Κρίνεται αναγκαία και για αυτή την περίπτωση η αξιολόγηση της συνδεσιμότητας των σύγχρονων ασύρματων δικτύων υποδομής.

Στα πλαίσια αυτά, αναπτύσσεται μεθοδολογία αξιολόγησης της συνδεσιμότητας βασισμένη σε τρία διαφορετικά στοχαστικά μοντέλα διάδοσης που μοντελοποιούν τα φυσικά φαινόμενα της τροποσφαιρικής διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις υψηλές συχνότητες. Τα μοντέλα αυτά εξαρτώνται ιδιαίτερα από τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το υπό θεώρηση δίκτυο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η ανάπτυξη ενός γενικευμένου μοντέλου για την εύρεση των αναγκαίων λειτουργικών παραμέτρων του δικτύου για

την επίτευξη συνδεσιμότητας που βασίζεται στην γεωγραφική θέση του δικτύου. Παράλληλα, παρουσιάζεται μεθοδολογία για τον υπολογισμό της κρίσιμης πυκνότητας που πρέπει να έχουν οι κόμβοι του δικτύου για να παραμένει αυτό συνδεδεμένο, ενώ εξετάζεται η δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης σημάτων με διαφορετική πόλωση για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των συνδέσεων. Τέλος, παρουσιάζεται ένα μοντέλο προσαρμογής της απόδοσης των ρυθμών μετάδοσης των συνδέσεων με στόχο την διατήρηση της διαθεσιμότητας και κατ' επέκταση της συνδεσιμότητας στα επιθυμητά επίπεδα.

### 1.3 Αναδρομή στην βιβλιογραφία

Η μελέτη της συνδεσιμότητας έχει προσελκύσει ιδιαίτερα το επιστημονικό ενδιαφέρον, κυρίως τις προηγούμενες δεκαετίες, καθώς εμφανίστηκαν αρκετά νέα ζητήματα και μοντέλα τόσο στα δίκτυα μετάδοσης πληροφορίας όσο και στα κυψελωτά συστήματα. Η συνδεσιμότητα σαν πρόβλημα είναι ιδιαίτερα γνωστό καθώς πρωτοεμφανίστηκε στην θεωρία γράφων και σε θεωρητικά θέματα άλλων επιστημονικών κλάδων. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον άρχισε πάλι να αυξάνεται εξαιτίας της εμφάνισης των αδόμητων (ad hoc) δικτύων και των δικτύων αισθητήρων (sensor networks). Λόγω της δομής τους και της αποκεντρωμένης διαχείρισής τους, η επίτευξη συνδεσιμότητας αποτελεί το βασικότερο ζήτημα και την βάση για την λειτουργία αυτών των δικτύων.

Στην υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πάρα πολλές δημοσιεύσεις που ερευνούν το αντικείμενο της συνδεσιμότητας και της απόδοσης πολυβηματικών δικτύων. Από τη πρωτοποριακή για τα χρονικά δεδομένα εργασία του Robertazzi [CR89], που στόχο είχε τον προσδιορισμό της συνδεσιμότητας κατά μήκος μίας αλυσίδα κόμβων που επικοινωνούν μεταξύ τους, μέχρι σήμερα έχει προκύψει πλούσια βιβλιογραφία και δημοσιεύσεις με διαφορετικές προσεγγίσεις για το ζήτημα της συνδεσιμότητας. Οι δημοσιεύσεις αυτές είτε ασχολούνται με τα χαμηλότερα επίπεδα του δικτύου και εξετάζουν την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην συνδεσιμότητα του δικτύου προτείνοντας νέα μοντέλα και μεθοδολογίες κυρίως για την ορθή αξιολόγηση της συνδεσιμότητας [DTH02], [MAH07], [MA06] [OB03], [PPT89], [XK04], είτε αναφέρονται στην ανάπτυξη αλγορίθμων που έχουν σαν σκοπιμότητα τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας και την βελτίωση της μέσω άλλων προσαρμοστικών τεχνικών που μπορούν να λαμβάνουν τόπο κατά την λειτουργία του συστήματος [BW04], [GZD<sup>+</sup>06], [HHB<sup>+</sup>03], [LHB<sup>+</sup>05], [Verd97]. Στο πλαίσιο αυτής της Διατριβής μας απασχολούν κυρίως θέματα και προβλήματα που εμπίπτουν στην κατηγορία της ανάπτυξης μοντέλων συνδεσιμότητας και μελέτης της επίδρασης των

παραμέτρων του φυσικού επιπέδου σε αυτήν, οπότε θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε την βιβλιογραφία που συγκλίνει προς αυτά τα ζητήματα.

Αν θέλαμε να κατατάξουμε τις ερευνητικές εργασίες που ασχολούνται με τέτοια ζητήματα τότε θα έπρεπε αρχικά να τις χωρίσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες και κατόπιν σε αρκετές υποκατηγορίες ανάλογα με τις υποθέσεις και τις μεθοδολογίες που ακολουθούν. Η τελική κατηγοριοποίηση θα μπορούσε να παρουσιαστεί με ένα δένδρο όπου στην πρώτη βαθμίδα υπάρχει ο βασικός διαχωρισμός ανάμεσα σε δίκτυα με πεπερασμένο αριθμό κόμβων και σε άπειρα δίκτυα, δηλαδή σε δίκτυα που ο αριθμός των κόμβων τους δεν είναι γνωστός. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε εκείνα τα δίκτυα που γνωρίζουμε ή μπορούμε να προβλέψουμε το μέγεθός τους και το πλήθος των κόμβων. Ενώ, η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται ουσιαστικά στις περιπτώσεις που τα δίκτυα απαρτίζονται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων και οι κόμβοι δεν έχουν την δυνατότητα να γνωρίζουν όλους τους χρήστες του δικτύου ενώ τα δίκτυα αυτά μπορούν παράλληλα να επεκτείνονται συνεχώς.

Στην περίπτωση των δικτύων με τους πεπερασμένους κόμβους υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία όπου μελετάται το θέμα της συνδεσιμότητας και της απόδοσης των δικτύων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι κόμβοι των δικτύων θεωρούνται ομοιόμορφα κατανομημένοι είτε βάσει μία ομογενής τυχαίας διαδικασίας Poisson είτε βάσει της ομοιόμορφης κατανομής. Για τις περισσότερες κατηγορίες ασύρματων πολυβηματικών δικτύων έχει φανεί ότι τον καθοριστικότερο παράγοντα παίζουν οι διαφορετικές τιμές διαθεσιμότητας των συνδέσεων μεταξύ γειτονικών κόμβων με εξαίρεση τα δίκτυα αισθητήρων όπου η συνδεσιμότητα εξαρτάται εξίσου σημαντικά και από τα ενεργειακά αποθέματα των κόμβων [ASC<sup>+</sup>02], [ZHK<sup>+</sup>04]. Στα πλαίσια αυτά έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της τυχειότητας του καναλιού διάδοσης [MA05], [Dar07], [KZ03]. Πιο συγκεκριμένα ο Bettstetter στο [Bet03] υπολόγισε για πρώτη φορά την επίδραση των διαλείψεων σκίασης στην συνδεσιμότητα ασύρματων δικτύων και πως οι διαλείψεις αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε βελτίωση της συνδεσιμότητας. Αντίστοιχες εργασίες εμφανίστηκαν και από άλλες ερευνητικές ομάδες [HM06], [SB03], [SCA05] δικαιολογώντας την σημασία που έχει η επίδραση του μέσου διάδοσης στα τελικά αποτελέσματα αξιολόγησης της συνδεσιμότητας. Ομοίως, οι Miorandi και Altman στο [MA05] παρουσίασαν ένα μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας λαμβάνοντας υπόψη λογαριθμικανονικά κανάλια για την μοντελοποίηση των αργών διαλείψεων ενώ αντίστοιχα έγινε μελέτη και για περιπτώσεις εμφάνισης διαλείψεων μικρής κλίμακας θεωρώντας Rayleigh και Rician κατανομές. Πέρα από τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας προέκυψε και ένα βασικό συμπέρασμα ότι οι αργές διαλείψεις επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την



συνδεσιμότητα του δικτύου από τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Αντίστοιχα σε επόμενη ερευνητική εργασία τους [MAG08] παρουσιάστηκαν επιπλέον στοιχεία και αποτελέσματα για Nakagami κανάλια διάλειψης ενώ προτάθηκε και η χρήση μεθόδων διαφορικής λήψης και πολλαπλών κεραιών για την βελτίωση της διαθεσιμότητας των συνδέσεων και κατά συνέπεια της συνδεσιμότητας. Αναλυτικότερα αποτελέσματα και συμπεράσματα για την χρήση συστημάτων πολλαπλών κεραιών και μεθόδων διαφορισμού με στόχο την βελτίωση της συνδεσιμότητας ασύρματων πολυβηματικών δικτύων παρουσιάζονται επιπλέον στο [SPZ07]. Μία από τις πρώτες εργασίες αναφορικά με δίκτυα οχημάτων και τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας σε αυτά δημοσιεύτηκε από τον Verdone [Ver97] χρησιμοποιώντας μοντέλο διάδοσης δύο συνιστωσών (απευθείας και από μία ανάκλαση) λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη και διαλείψεις μικρής κλίμακας.

Πέρα από την καθοριστική σημασία του καναλιού διάδοσης στην διαθεσιμότητα των συνδέσεων μεταξύ των γειτονικών κόμβων του δικτύου και κατ' επέκταση της συνδεσιμότητας, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει και η χωρική κατανομή των κόμβων του δικτύου. Παρότι τα μοντέλα χωρικών κατανομών που χρησιμοποιούνται είναι συγκεκριμένα και προέρχονται από μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην χωρική ανάλυση, υπάρχουν κάποια κρίσιμα μεγέθη τα οποία βοηθούν ιδιαίτερα στην επίτευξη συνδεσιμότητας εντός ενός δικτύου. Αυτά τα μεγέθη εξαρτώνται στις περισσότερες των περιπτώσεων και από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και από τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης. Στην βιβλιογραφία μπορεί κανείς να συναντήσει αρκετές δημοσιευμένες εργασίες [Bet02], [PPT89] σχετικά με τον ελάχιστο αριθμό γειτόνων που πρέπει βάσει της χωρικής κατανομής και των χαρακτηριστικών διάδοσης να έχει ένας κόμβος για να είναι δυνατή η επίτευξη συνδεσιμότητας ή ποιες είναι οι συνθήκες για να επιτευχθεί κ-συνδεσιμότητα σε ένα πολυβηματικό δίκτυο [LT07]. Η κ-συνδεσιμότητα αποτελεί ένα μέτρο αξιοπιστίας και αντοχής της συνδεσιμότητας του δικτύου σε περιπτώσεις απώλειας κάποιων συνδέσεων ή ακόμα και κόμβων του δικτύου. Μελέτη σχετικά με κρίσιμες τιμές της ισχύος για την διατήρηση της κ-συνδεσιμότητας αναφέρεται στο [ZH08] ενώ ανάλυση για την εύρεση του κρίσιμου σημείου κατά το οποίο μεταβάλλεται η συμπεριφορά της συνδεσιμότητας περιγράφεται στο [KTK09].

Στην περίπτωση των δικτύων που ο αριθμός των κόμβων τους δεν είναι πεπερασμένος ή δεν είναι γνωστός ο τελικός προσδιορισμός της συνδεσιμότητας είναι αδύνατος. Σε αυτές τις περιπτώσεις ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση και εύρεση της ασυμπτωτικής συμπεριφοράς της συνδεσιμότητας καθώς ο αριθμός των κόμβων συνεχώς αυξάνει και το δίκτυο επεκτείνεται. Στις περισσότερες ερευνητικές μελέτες που θα αναφέρουμε ο υπολογισμός την ασυμπτωτικής συμπεριφοράς της

συνδεσιμότητας ανάγεται στην εύρεση μίας μεγάλης συνεκτικής συνιστώσας εντός του δικτύου. Το βασικό μαθηματικό εργαλείο για την εύρεση ενός μεγάλου συνόλου από συνδεδεμένους κόμβους το οποίο επεκτείνεται, καθώς ο αριθμός των κόμβων του δικτύου αυξάνεται και τείνει προς το άπειρο, είναι η θεωρία διήθησης (Percolation theory) [Gr99]. Αποτελέσματα υπό την χρήση αυτής της θεωρίας έχουν εξαχθεί για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ασύρματων πολυβηματικών δικτύων [GK98] και για την αξιολόγηση της επίδρασης των παρεμβολών στην συνδεσιμότητα [DFM<sup>+</sup>06], [DBT05]. Επιπρόσθετα, η χρήση αυτής της θεωρίας οδήγησε στον υπολογισμό και της μέγιστης ροής δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτή την κατηγορία δικτύων [DFT06].

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που προέκυψαν κατά την μελέτη της συνδεσιμότητας ασύρματων πολυβηματικών δικτύων είναι αυτό της σχέσης μεταξύ την συνδεσιμότητας και της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου [GT01]. Αρχικά οι Gupta και Kumar στις ερευνητικές εργασίες τους [GK00], [KX04] κατάφεραν να χαρακτηρίσουν την ασυμπτωτική συμπεριφορά της χωρητικότητας του δικτύου ακολουθώντας μεθοδολογίες από την θεωρία διήθησης που χρησιμοποιήθηκαν και για τον χαρακτηρισμό της συνδεσιμότητας. Αργότερα, ο Franceschetti στις πιο πρόσφατες εργασίες του [FDT<sup>+</sup>06] και [FDT<sup>+</sup>07] κατάφερε να πετύχει καλύτερες προσεγγίσεις και να χαρακτηρίσει καλύτερα την ασυμπτωτική συμπεριφορά της χωρητικότητας ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου.

Κλείνοντας την σύντομη σύνοψη της συναφούς βιβλιογραφίας αξίζει να αναφερθούμε σε ένα σύνολο από σημαντικές ερευνητικές μελέτες [FBC<sup>+</sup>05], [FM06], [HAB<sup>+</sup>09] και [FCB04] που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της συνδεσιμότητας από μια πιο γενική και θεωρητική ματιά παρουσιάζοντας μαθηματικές μεθοδολογίες και συμπεράσματα που μπορούν να ενσωματωθούν στις ερευνητικές μελέτες και για τα ασύρματα δίκτυα.

## 1.4 Συνεισφορά διατριβής

Η βασική συνεισφορά αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών και μοντέλων για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα με απώτερο σκοπό την χρήση αυτών των μοντέλων ως εργαλεία για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας στα ανώτερα στρώματα του δικτύου. Επιπλέον, πραγματοποιείται αξιολόγηση της επίδοσης της συνδεσιμότητας σύμφωνα με τα προτεινόμενα μοντέλα υπολογισμού της σε συγκεκριμένες κατηγορίες δικτύων και για συγκεκριμένα περιβάλλοντα διάδοσης που παρουσιάζουν ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον.

Αναλυτικά, μια πιο λεπτομερή παρουσίαση των αποτελεσμάτων και της συνεισφοράς της παρούσας διατριβής είναι:

- Ανάλυση γενικού μοντέλου συνδεσιμότητας για δίκτυα με έντονες διαλείψεις μεγάλης κλίμακας εξαιτίας φαινομένων σκίασης και αξιολόγηση της επίδοσης της συνδεσιμότητας.
- Ανάπτυξη νέας μεθοδολογίας για την βελτίωση του γενικού μοντέλου συνδεσιμότητας με στόχο τον ακριβέστερο υπολογισμό της συνδεσιμότητας σε πολυβηματικά δίκτυα.
- Συγκριτική αξιολόγηση και των δύο μοντέλων συνδεσιμότητας για περιβάλλοντα διάδοσης όπου ο βασικός μηχανισμός διάδοσης περιλαμβάνει αργές διαλείψεις εξαιτίας σκίασης.
- Παρουσίαση μεθοδολογίας υπολογισμού της κρίσιμης πυκνότητας των κόμβων του δικτύου που απαιτούνται για να επιτευχθεί δεδομένο ποσοστό συνδεσιμότητας.
- Αξιολόγηση συνδεσιμότητας για ευρυζωνικά δίκτυα εσωτερικού χώρου για μεταδόσεις στα 60GHz με χρήση βασικών μεθόδων διαφορικής λήψης.
- Ανάπτυξη νέας μεθοδολογίας υπολογισμού της συνδεσιμότητας πολυβηματικών δικτύων που βασίζεται αποκλειστικά στην θεωρία γράφων και τα συνδεδετικά δένδρα.
- Παρουσίαση νέου μέτρου αξιολόγησης της συνδεσιμότητας βάσει του νέου μοντέλου υπολογισμού της συνδεσιμότητας το οποίο αποδεικνύεται ότι αποτελεί άνω όριο για την πιθανότητα να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο.
- Αξιολόγηση της παραπάνω μεθοδολογίας για γειτονικά συσχετισμένα λογαριθμικά κανάλια σκίασης. Τα συσχετισμένα κανάλια χρησιμοποιούνται για την καλύτερη μοντελοποίηση των πραγματικών διαύλων επικοινωνίας.
- Γενίκευση του νέου μοντέλου συνδεσιμότητας με την εφαρμογή τεχνικών διαφορισμού για την βελτίωση της συνδεσιμότητας και παρουσίαση μεγεθών για την αξιολόγηση της βελτίωσης της συνδεσιμότητας. Και σε αυτή την περίπτωση οι κλάδοι των συνδέσεων των διαφορετικών τεχνικών λήψης ελήφθησαν ως συσχετισμένοι για να λόγους καλύτερης προσέγγισης των πραγματικών δικτύων.
- Ανάπτυξη μοντέλου συνδεσιμότητας για δίκτυα υποδομής (Backhaul networks) που λειτουργούν στις χιλιοστομετρικές συχνότητες. Το μοντέλο υπολογισμού περιλαμβάνει στοχαστικά μοντέλα διάδοσης για την πλήρη περιγραφή των εξασθενήσεων λόγω φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια των μεταδόσεων.

- Για να έχει παγκόσμια εμβέλεια το μοντέλο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας συμπεριλαμβάνει τρία διαφορετικά στοχαστικά μοντέλα υπολογισμού των εξασθενίσεων που είναι ευρύτερα διαδεδομένα στην διεθνή βιβλιογραφία.
- Πραγματοποιείται μελέτη για την απόδοση των συνδέσεων του δικτύου και προτείνεται η χρήση τεχνικών προσαρμοστικής διαμόρφωσης για την διατήρηση, όποτε κρίνεται αναγκαίο, της συνδεσιμότητας και της διαθεσιμότητας των συνδέσεων.
- Τέλος, ελέγχεται η δυνατότητα μετάδοσης διπλά πολωμένων σημάτων για τον διπλασιασμό της συνολικής χωρητικότητας των συνδέσεων του δικτύου και μελετάται η επίδραση αυτής της τεχνικής στην συνδεσιμότητα του δικτύου.

## Κεφάλαιο 2

# Μοντελοποίηση δικτύου και αξιολόγηση συνδεσιμότητας

### 2.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη της συνδεσιμότητας και την ανάπτυξη ενός γενικευμένου μοντέλου που θα πραγματοποιεί την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας σε ένα τυχαίο δίκτυο κρίνεται αναγκαίο πρώτα να οριστεί η έννοια της συνδεσιμότητας. Ως συνδεσιμότητα στη θεωρία δικτύων ορίζεται η δυνατότητα ύπαρξης τουλάχιστον μίας συνδεδεμένης διαδρομής ανάμεσα σε οποιοδήποτε τυχαίο ζευγάρι κόμβων του δικτύου. Για ένα υπαρκτό δίκτυο στο οποίο υπάρχει κάποιος κεντρικός διαχειριστής η αξιολόγηση της συνδεσιμότητας και η διατήρηση της με συνεχή παραμετροποίηση των λειτουργικών παραμέτρων του δικτύου είναι μια σχετικά απλή διαδικασία. Για δίκτυα όμως όπου δεν υπάρχει κεντρικός διαχειριστής και οι δυνατότητες των κόμβων είναι προκαθορισμένες και περιορισμένες, όπως στα ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα, η διατήρηση της συνδεσιμότητας αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία και πρέπει να υπάρχει εξ αρχής σωστή αξιολόγηση των λειτουργικών παραμέτρων του δικτύου ώστε να μπορεί να παραμένει το δίκτυο συνδεδεμένο.

Από τον ορισμό γίνεται κατανοητό ότι η συνδεσιμότητα ως έννοια είναι αρκετά γενική και αφηρημένη με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αξιολογηθεί ποσοτικά παρά μόνο με την εισαγωγή ενός μετρικού μεγέθους που να ανταποκρίνεται και να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τον ορισμό της έννοιας. Στο παρόν κεφάλαιο αυτό θα αναπτυχθεί ένα μοντέλο για την υπολογισμό της συνδεσιμότητας σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα που έχει σαν μέτρο αξιολόγησης την πιθανότητα απομόνωσης ενός τυχαίου κόμβου του δικτύου [Π1]. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η πιθανότητα ένας οποιοσδήποτε κόμβος του δικτύου να είναι απομονωμένος και κατά συνέπεια να μην μπορεί να επικοινωνήσει με κανένα άλλο κόμβο μέσα στο δίκτυο. Το ενδεχόμενο αυτό φαίνεται αρχικά να αναιρεί την έννοια της συνδεσιμότητας όπως έχει ήδη διατυπωθεί. Όμως ο μηδενισμός της πιθανότητας του ενδεχομένου να είναι κάποιος κόμβος απομονωμένος οδηγεί αυτόματα στην

ύπαρξη κόμβων που μπορούν να επικοινωνούν με άλλους γειτονικούς και υπό κάποιες συνθήκες, στις οποίες θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου, στην εμφάνιση συνδεσιμότητας εντός του δικτύου. Η εύρεση της πιθανότητας απομόνωσης ενός κόμβου του δικτύου είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να εκτιμηθεί αναλυτικά στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη και την επίδραση του περιβάλλοντος διάδοσης.

Παρότι το μοντέλο είναι γενικό, και μπορεί να εφαρμοστεί λαμβάνοντας υπόψη οποιαδήποτε παραδοχή για το φυσικό επίπεδο του δικτύου και του περιβάλλοντος διάδοσης των συνδέσεων του δικτύου, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αξιολόγηση μόνο για περιπτώσεις σκίασης κυρίως για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, γιατί αργές διαλείψεις λόγω σκίασης εμφανίζονται σε μια πληθώρα περιπτώσεων πολυβηματικών δικτύων και δεύτερον γιατί έχει αποδειχθεί ότι για τα δίκτυα με χαμηλή κινητικότητα είναι ο σημαντικότερος παράγοντας επίδρασης στην συνδεσιμότητα του δικτύου [MA05].

Για τη θεωρητική μελέτη ενός πολυβηματικού δικτύου χρειάζεται με κάποιο τρόπο να κατασκευάσουμε ένα τυχαίο πολυβηματικό δίκτυο. Για να είναι το μοντέλο συνδεσιμότητας γενικό θα πρέπει να αναφέρεται σε ένα τυχαίο δίκτυο, επομένως οι κόμβοι του δικτύου πρέπει να είναι τυχαία κατανομημένοι στον χώρο. Για την αναπαράσταση της χωρικής τοπολογίας ενός πολυβηματικού δικτύου καταφεύγουμε σε μια διαδικασία τυχαίας κατανομής σημείων στον χώρο που βασίζεται στην Poisson κατανομή και είναι γνώστη στην βιβλιογραφία ως τυχαία σημεία Poisson. Η μεθοδολογία αυτή και οι ιδιότητες τις περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο και αποτελεί τη βάση για όλα τα μοντέλα συνδεσιμότητας που παρουσιάζονται στην διατριβή.

## 2.2 Χωρική κατανομή δικτύου

Είναι πολύ σημαντικό η ανάπτυξη μεθοδολογιών για τα πολυβηματικά δίκτυα να βασίζεται σε αξιόπιστες υποθέσεις αναφορικά με την μορφή και την τοπολογία αυτών των δικτύων. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά είναι η έλλειψη εκ των προτέρων γνώσης για την τοπολογία τους καθώς πρόκειται για δίκτυα που εμφανίζονται κατά περίπτωση και εκ περιτροπής όταν συναθροιστούν αρκετοί κόμβοι-χρήστες. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ότι οι θέσεις των χρηστών είναι τυχαίες και όχι προκαθορισμένες ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλη ανεξαρτησία μεταξύ τους, δηλαδή η ύπαρξη του ενός κόμβου δεν επηρεάζει την ύπαρξη κάποιου άλλου κόμβου στην περιοχή. Επομένως, μια γενική χωρική κατανομή πρέπει να λαμβάνει υπόψη την

τυχαιότητα της θέσης και του αριθμού των κόμβων του δικτύου καθώς και την έλλειψη οποιασδήποτε μεταξύ τους εξάρτησης. Με γνώμονα αυτές τις βασικές αρχές θα προσπαθήσουμε παρακάτω να ορίσουμε με όσο το δυνατόν γενικότερο τρόπο την χωρική κατανομή που ακολουθούν αυτά τα δίκτυα.

Αυτό που προσπαθούμε να κάνουμε ουσιαστικά είναι να κατανείμουμε σε ένα συγκεκριμένο χώρο όπως ο  $\mathbb{R}$  ή ο  $\mathbb{R}^2$  με τυχαίο τρόπο ένα τυχαίο αριθμό σημείων που αναπαριστούν γενικά τους κόμβους ενός πολυβηματικού δικτύου. Αυτό, από την θεωρία πιθανοτήτων, ισοδυναμεί με ένα πείραμα τύχης όπου χωρίζουμε την περιοχή σε πολύ μικρές στοιχειώδεις περιοχές που έχουν το ίδιο πλήθος διαστάσεων με τον αρχικό χώρο και εκτελούμε ένα πείραμα Bernulli σε κάθε μία από τις στοιχειώδεις περιοχές για το αν θα εμφανιστεί εκεί ένα σημείο ή όχι [PP02]. Αν έχουμε ένα πείραμα τύχης, όπως το παραπάνω, στο οποίο εκτελούμε  $m$  ανεξάρτητες δοκιμές για να καλύψουμε όλη την περιοχή του δικτύου με σταθερή πυκνότητα  $p$  τότε η τυχαία μεταβλητή  $N$  που μετράει το συνολικό πλήθος των επιτυχιών (εμφανίσεων των σημείων) ακολουθεί διωνυμική κατανομή. Επομένως, η πιθανότητα να εμφανιστούν  $n$  σημεία στην συγκεκριμένη περιοχή θα δίνεται βάσει της διωνυμικής κατανομής από την σχέση:

$$P(N = n) = \binom{m}{n} p^n (1-p)^{m-n} \quad (2.1)$$

Το βασικό μειονέκτημα που προκύπτει είναι η δυσκολία που υπάρχει στον υπολογισμό του διωνύμου κυρίως καθώς μεγαλώνουν οι τιμές των παραμέτρων  $m, n$ . Βάσει του θεωρήματος DeMoivre-Laplace όταν το  $m \rightarrow \infty$  και το  $p$  είναι σταθερό η διωνυμική κατανομή, και κατ' επέκταση η παραπάνω σχέση, προσεγγίζεται από την κανονική κατανομή. Ενώ επιπρόσθετα αν ισχύουν οι παραδοχές: ο αριθμός των στοιχειωδών περιοχών να είναι πολύ μεγάλος  $m \rightarrow \infty$ , η πιθανότητα εμφάνισης ενός σημείου πάρα πολύ μικρή  $p \rightarrow 0$  και ταυτόχρονα το γινόμενο τους να είναι σταθερός αριθμός  $mp = \lambda$ , τότε η διωνυμική κατανομή προσεγγίζεται με μεγάλη ακρίβεια και από την Poisson κατανομή. [PP02] Οι προαναφερθέντες παραδοχές υφίστανται και στα πραγματικά δίκτυα και επομένως η σχέση (2.1) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$P(N = n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad (2.2)$$

Η ανάλυση που μόλις παρουσιάστηκε αποτελεί την βάση για την γενικότερη μεθοδολογία των τυχαίων σημείων Poisson [PP02], [Kin93] που θα χρησιμοποιηθεί στην διατριβή για την θεωρητική ανακατασκευή της δομής και τοπολογίας ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου.

Η βασική υπόθεση για την μεθοδολογία των τυχαίων σημείων Poisson (Poisson point field process) είναι ότι υπάρχει ένας συγκεκριμένος χώρος  $A$  στον οποίο εκτείνεται όλο το δίκτυο και έχει συγκεκριμένη πυκνότητα σημείων  $\rho$ . Από δω και πέρα θα θεωρούμε τις έννοιες σημεία και κόμβοι του δικτύου ταυτόσημες καθώς σε κόμβους αναφέρονται και τα σημεία της διαδικασίας. Σύμφωνα με την μεθοδολογία, η χωρική κατανομή των σημείων στον χώρο  $A$  θα είναι τυχαία και οι θέσεις των σημείων ανεξάρτητες μεταξύ τους, ενώ ο αριθμός των σημείων που βρίσκεται στον χώρο  $A$  ή σε κάποιο πεπερασμένο υποσύνολο του (υποπεριοχή)  $A_o \subseteq A$  θα ακολουθεί Poisson κατανομή με παράμετρο  $\lambda = \rho A$  και θα δίνεται από την τελική σχέση:

$$P(n \text{ nodes in } A_o) = P(N = n) = \frac{(\rho A_o)^n}{n!} e^{-\rho A_o} \quad (2.3)$$

Βασικές ιδιότητες της Poisson κατανομής που είναι πολύ χρήσιμες και για την μετέπειτα ανάλυση είναι [MR96]:

- Η αναμενόμενη τιμή του αριθμού των κόμβων για μία περιοχή  $A_o$  είναι ίση με την παράμετρο της Poisson κατανομής.

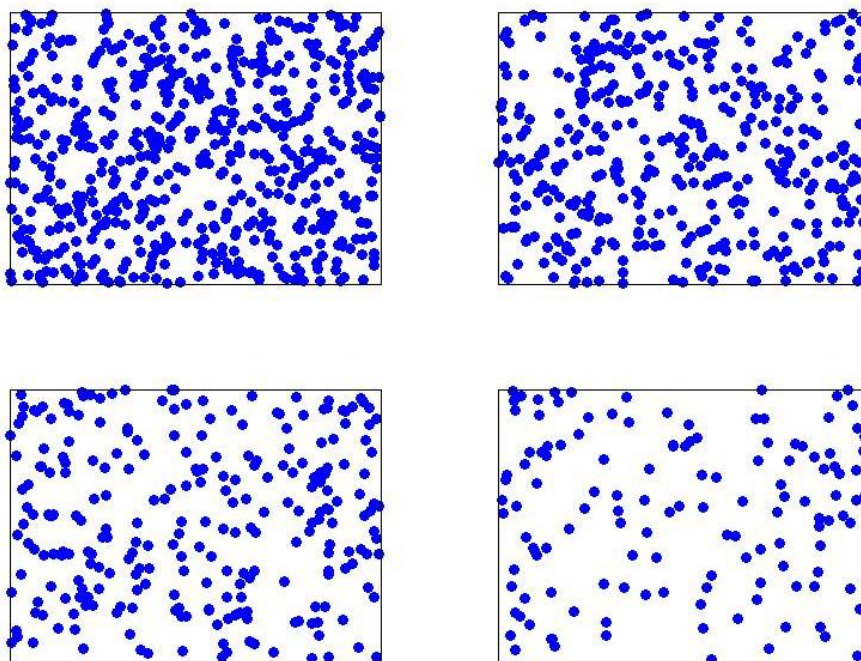
$$E(N) = \rho A_o$$

- Ο αριθμός των κόμβων  $N_i$  με  $i \in \mathbb{N}$  στις περιοχές  $A_i \subseteq A$  είναι ανεξάρτητες και τυχαίες μεταβλητές με αποτέλεσμα:

$$P(N_1 = n_1 \cap N_2 = n_2 \cap \dots \cap N_v = n_v) = \prod_{i=1}^v P(N_i = n_i)$$

- Το αποτέλεσμα της τυχαίας μεταβλητής  $N_i$  εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της υποπεριοχής  $A_i$ , αλλά όχι από την τοποθεσία ή το σχήμα της.





Σχήμα 2.1: Τοπολογία ομοιογενών τυχαίων σημείων Poisson για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $\lambda$  (0.06, 0.04, 0.02 και 0.015) με  $A = 100 \times 100 m^2$ .

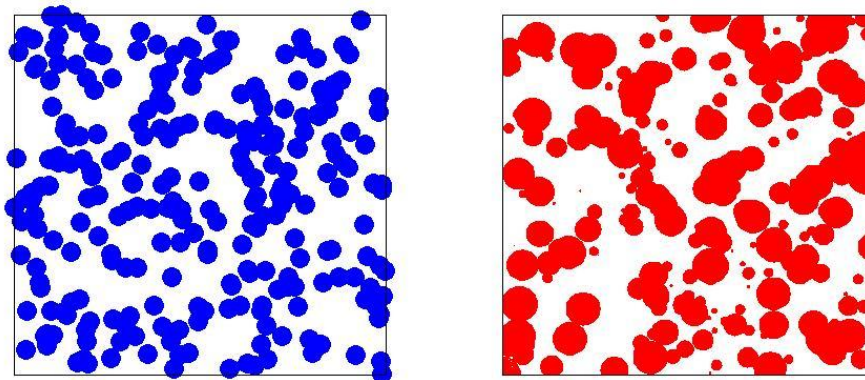
Η διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson είναι ομογενής για την περίπτωση που η παράμετρος  $\lambda$  έχει σταθερή τιμή ενώ αν αποτελεί συνάρτηση άλλων παραμέτρων τότε η διαδικασία θεωρείται μη ομογενής [PP02]. Πολλές φορές στην διεθνή βιβλιογραφία αλλά και σε κάποια σημεία αυτής της διατριβής, η πυκνότητα των κόμβων συμβολίζεται με  $\lambda$  αντί για  $\rho$  όταν δεν υπάρχει ανάγκη αναφοράς στην παράμετρο την Poisson κατανομής παρά μόνο στην πυκνότητα των κόμβων. Η μορφή που παρουσιάζει ένα δίκτυο που έχει προκύψει από την μέθοδο τυχαίων σημείων Poisson φαίνεται στο σχήμα 2.1 για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $\lambda$  της Poisson κατανομής.

## 2.3 Μοντελοποίηση συνδεσιμότητας

### 2.3.1 Poisson Boolean μοντέλο

Η πρώτη υλοποίηση για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου βασίζεται στο Poisson Boolean μοντέλο [SKM95], [Gil61]. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στα τυχαία σημεία Poisson αναφορικά με την χωρική κατανομή των κόμβων σε ένα χώρο  $\mathbb{R}^d$ . Πρακτικά, κατανέμονται στον επιλεγμένο χώρο τα σημεία  $\{Z_i\}$  ακολουθώντας μία χωρική Poisson διαδικασία με παράμετρο  $\lambda$

[DVJ88]. Ταυτόχρονα, θεωρείται ότι κάθε κόμβος έχει συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης που έχει την μορφή δίσκου για  $d = 1, 2$  με κέντρο τις συντεταγμένες  $\{Z_i\}$  του κόμβου και μπορεί και επικοινωνεί με οποιονδήποτε κόμβο υπάρχει μέσα στην περιοχή κάλυψης του.



Σχήμα 2.2: Τοπολογία Boolean Poisson μοντέλων με ίδιες δυνατότητες ραδιοκάλυψης (αριστερό σχήμα) και διαφορετικές ανά κόμβο (δεξιό σχήμα).

Βασικοί παράμετροι αυτού του μοντέλου είναι η πυκνότητα των κόμβων του δικτύου και η ακτίνα κάλυψης του κάθε κόμβου για αυτό θα συμβολίζεται από  $\lambda$  και  $R$  αντίστοιχα. Αν οι κόμβοι έχουν τις ίδιες δυνατότητες εκπομπής το  $R$  είναι ίδιο για όλους και κατά συνέπεια το μέγεθος της περιοχής ραδιοκάλυψης. Διαφορετικά υπάρχει και η δυνατότητα ο κάθε κόμβος να έχει διαφορετική εμβέλεια και το  $R$  να αποτελεί μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τις ιδιότητες του κάθε κόμβου (σχήμα 2.2). Δύο κόμβοι θεωρούνται συνδεδεμένοι μεταξύ τους αν ο καθένας βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του άλλου. Το οποίο, για την ειδικότερη περίπτωση που όλοι κόμβοι έχουν την ίδια σε μέγεθος περιοχή κάλυψης, ισοδυναμεί απλά με το να βρεθεί ένας κόμβος στην εμβέλεια κάποιου άλλου. Η περιοχή κάλυψης του δικτύου είναι γενικά η περιοχή που καταλαμβάνουν οι περιοχές κάλυψης όλων των κόμβων και μπορεί να περιγραφεί ως:

$$B(\lambda, R) = \bigcup_i B(Z_i, R_i)$$

όπου το  $B(Z_i, R_i)$  είναι ένας δίσκος με κέντρο τις συντεταγμένες του σημείου  $Z_i$  και ακτίνα ίση με  $R_i$ . Η επιλογή της ακτίνας κάλυψης μπορεί να γίνει είτε βάσει κάποιας εμπειρικής παραδοχής είτε ακόμα ορθότερα με γνώμονα κάποιο ντετερμινιστικό

μοντέλο διάδοσης. Το  $R_i$  π.χ. μπορεί να εξαχθεί από την εξίσωση του Friis [Kra88] ή το μοντέλο Okumura-Hata [Rap96] αν γίνουν κάποιες υποθέσεις για την συχνότητα, την ισχύ εκπομπής, την ευαισθησία του δέκτη και τα κέρδη των κεραιών του συστήματος.

Η περιοχή κάλυψης του δικτύου αποτελείται από ένα σύνολο μη συνδεδεμένων συνεκτικών ομάδων. Ως συνεκτικές ομάδες αναφερόμαστε στις ομάδες κόμβων που οι περιοχές τους κάλυψης αλληλεπικαλύπτονται με αποτέλεσμα να θεωρούνται συνδεδεμένοι. Το δίκτυο θα θεωρείται συνδεδεμένο όταν όλες αυτές οι συνεκτικές ομάδες θα αλληλεπικαλύπτουνε και θα δημιουργηθεί μία μονάχα συνεκτική ομάδα που θα περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση θα υπάρχει πλήρη συνδεσιμότητα στο δίκτυο. Ειδικά για το Poisson Boolean μοντέλο η επίτευξη συνδεσιμότητας είναι εφικτή με σωστή παραμετροποίηση της παραμέτρου  $\lambda$  του δικτύου και την ακτίνας εμβέλειας  $R_i$  των κόμβων του.

### 2.3.2 Αξιολόγηση συνδεσιμότητας

Στο πλαίσιο αυτής της παραγράφου μας ενδιαφέρει ο χαρακτηρισμός της πιθανότητας οι κόμβοι μιας οριοθετημένης κυρτής περιοχής του επιπέδου να σχηματίζουν μία συνδεδεμένη τοπολογία. Γενικά, η εύρεση της πλήρους συνδεσιμότητας είναι μια δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία που έχει αποδειχθεί ότι δεν μπορεί, για γενικές και τυχαίες περιπτώσεις, να προσδιοριστεί ακριβώς [Hal88]. Ιδιαίτερα όταν τα δίκτυα περιέχουν μεγάλο αριθμό κόμβων, καταφεύγουμε συνήθως για τον προσδιορισμό της συνδεσιμότητας είτε στην εύρεση μίας μεγάλης συνεκτικής (συνδεδεμένης) ομάδας, όπου με τον όρο μεγάλη εννοούμε ότι περιέχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό των κόμβων του δικτύου, είτε θεωρούμε ότι αν δείξουμε ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου δεν είναι απομονωμένοι τότε μπορούν και επικοινωνούν μεταξύ τους και επομένως το δίκτυο είναι συνδεδεμένο.

Η εύρεση μίας μεγάλης συνεκτικής συνιστώσας χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις μη πεπερασμένων δικτύων, δηλαδή για την ανάλυση δικτύων που δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση το ενδιαφέρον εστιάζεται περισσότερο στον χαρακτηρισμό της ασυμπτωτικής συμπεριφοράς της συνδεσιμότητας. Στις περισσότερες μεθοδολογίες για τον εντοπισμό μία μεγάλης ομάδας συνδεδεμένων κόμβων χρησιμοποιείται για την ανάλυση η θεωρία διήθησης (Percolation theory) [Gri99], [BBF<sup>+</sup>03]. Αποτελέσματα υπό την χρήση αυτής της θεωρίας έχουν εξαχθεί για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ασύρματων πολυβηματικών δικτύων [GK98] και υβριδικών

δικτύων [DTH02], για την αξιολόγηση της επίδρασης των παρεμβολών στην συνδεσιμότητα [DBT05], καθώς και για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της συνδεσιμότητας και της χωρητικότητας του δικτύου [DT04]. Ο απώτερος σκοπός της ανάλυσης και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω ερευνητικές εργασίες είναι να βρεθεί η συμπεριφορά των μεγεθών του δικτύου και κυρίως της συνδεσιμότητας ως συνάρτηση του αριθμού των κόμβων του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο παράγονται αποτελέσματα που δείχνουν τις διαφοροποιήσεις μεταξύ δικτύων πάρα πολλών κόμβων και δικτύων μέτριου μεγέθους καθώς και μεταξύ πολύ πυκνών δικτύων και αραιών δικτύων. Τα συμπεράσματά τους μπορούν να αποτελέσουν ένα μέτρο εμπιστοσύνης των άλλων θεωριών και μεθόδων υπολογισμού που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

Παρόλο που η εύρεση της πραγματικής συνδεσιμότητας ενός τυχαίου δικτύου είναι αδύνατη, αναπτύσσονται μέθοδοι που προσεγγίζουν την πραγματική τιμή της. Για την περίπτωση δικτύων πολλών κόμβων ή αρκετά πυκνών δικτύων μια καλή προσέγγιση για την εκτίμηση της συνδεσιμότητας προέρχεται από τον υπολογισμό της πιθανότητας του ενδεχομένου κανένας κόμβος του δικτύου να μην είναι απομονωμένος. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, αν δεν υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος εντός του δικτύου τότε σίγουρα κάθε κόμβος θα έχει τουλάχιστον ένα γείτονα για να επικοινωνεί και να προωθεί την πληροφορία. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα το δίκτυο να είναι συνδεδεμένο θα προσεγγίζεται από την πιθανότητα να μην υπάρχει απομονωμένος κόμβος εντός του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση έχει αποδειχθεί στην θεωρία γράφων ότι παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα τόσο για τυχαίους γεωμετρικούς γράφους, σύμφωνα με την εργασία του Penrose [Pen03], όσο και για τυχαίους γράφους στην μελέτη του Bollobás [Bol01], καθώς και των Erdős και Rényi [ER60].

Ως τυχαίος γεωμετρικός γράφος ορίζεται ο επίπεδος γράφος στον οποίο ο αριθμός και οι θέσεις των κόμβων έχουν προκύψει από μια τυχαία διαδικασία, όπως τα τυχαία σημεία Poisson, και οι ακμές από κάποιο ντετερμινιστικό γεωμετρικό μοντέλο. Όπως γίνεται κατανοητό, ένα ασύρματο πολυβηματικό δίκτυο που μπορεί να περιγραφεί από το Poisson Boolean μοντέλο έχει την μορφή ενός τυχαίου γεωμετρικού γράφου. Κατά συνέπεια, από εδώ και στο εξής το δίκτυο θα θεωρείται ταυτόσημο με ένα γράφο του οποίου οι κόμβοι αναπαριστούν τους χρήστες του δικτύου και οι ακμές τις συνδέσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων, ενώ συμπεράσματα και θεωρήματα από την θεωρία γράφων θα θεωρούμε ότι ισχύουν και στο μοντέλο του δικτύου. Ως τυχαίος γράφος ορίζεται ο επίπεδος γράφος του οποίου οι κόμβοι έχουν προκύψει από μία τυχαία διαδικασία όπως γίνεται και στον τυχαίο γεωμετρικό γράφο αλλά και οι ακμές του εμφανίζονται με τυχαίο τρόπο και δεν ακολουθούν κάποιο γεωμετρικό κανόνα.

Αποτελεί δηλαδή μια γενικότερη περίπτωση από αυτή του τυχαίου γεωμετρικού γράφου.

Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι πέρα από μια πολύ καλή προσέγγιση, όπως εξηγήσαμε για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, η πιθανότητα του ενδεχομένου να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος μέσα στο δίκτυο αποτελεί ένα άνω όριο για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας. Κατά συνέπεια, και αυτό κρίνεται ως το σημαντικότερο, οι λειτουργικές παράμετροι του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας είναι οι ελάχιστες δυνατές για να παραμείνει το δίκτυο συνδεδεμένο και οποιαδήποτε άλλη υποβάθμισή τους θα οδηγήσει σε απώλεια της συνδεσιμότητας του δικτύου. Το ότι η παραπάνω πιθανότητα αποτελεί ένα άνω όριο της πιθανότητας να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό συλλογίζόμενοι το μηχανισμό εμφάνισης της συνδεσιμότητας σε ένα δίκτυο. Αρχικά το δίκτυο αποτελείται από κόμβους απομονωμένους ενώ σιγά σιγά αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτες συνδέσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων. Κατόπιν, καθώς αυξάνεται η συνδεσιμότητα του δικτύου, οι κόμβοι αρχίζουν να σχηματίζουν συνεκτικές ομάδες από συνδεδεμένους μεταξύ τους κόμβους μέχρι την στιγμή που ενώ δεν υπάρχουν καθόλου απομονωμένοι κόμβοι θα εμφανιστεί η τελευταία αναγκαία σύνδεση έτσι ώστε όλες οι συνεκτικές ομάδες να συνδεθούν μεταξύ τους και να δημιουργηθεί μία ενιαία συνδεδεμένη τοπολογία. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει οριακά πλήρης συνδεσιμότητα στο δίκτυο. Για ομογενή δίκτυα η απόσταση μεταξύ των ενδεχομένων να είναι όλοι οι κόμβοι συνδεδεμένοι και του αν μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος είναι πάρα πολύ μικρή [PPT89] για αυτό και θεωρείται ότι η πιθανότητα του ενός γεγονότος προσεγγίζει την άλλη. Η υπόθεση αυτή δεν έχει αποδειχθεί και για μη ομογενή δίκτυα οπότε δεν πρέπει να χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί παρακάτω όταν δεν υπάρχει χωρική ομοιογένεια στην τοπολογία του δικτύου.

### 2.3.3 Μέθοδος υπολογισμού συνδεσιμότητας

Θεωρούμε ένα Poisson Boolean μοντέλο  $B(\lambda, R)$  για χώρο  $\mathbb{R}^2$  με συνολικό εμβαδόν  $A$  και με πυκνότητα  $\rho$  κόμβους ανά μονάδα επιφανείας. Θεωρούμε ότι ένας τυχαίος κόμβος έχει ακτίνα κάλυψης  $R$  και αντιστοιχεί σε περιοχή κάλυψης με εμβαδόν  $S$ . Επειδή οι κόμβοι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι βάσει της διαδικασίας τυχαίων σημείων Poisson (homogeneous Poisson point filed process), δημιουργώντας ένα ομογενές πεδίο, τότε η πιθανότητα να έχει ένας τυχαίος κόμβος  $k$  γειτονικούς

κόμβους προκύπτει από την Poisson κατανομή (2.3) για την περιοχή κάλυψης  $S$  του κόμβου:

$$P(N = k) = \frac{(\rho S)^k}{k!} e^{-\rho S} \quad (2.3)$$

Ενώ για την περίπτωση που ο κόμβος είναι απομονωμένος και κατά συνέπεια δεν έχει γείτονες ( $k = 0$ ) προκύπτει η πιθανότητα απομόνωσης του κόμβου που δίνεται από την σχέση:

$$P_{iso} = P(N = 0) = e^{-\rho S} \quad (2.4)$$

Η πιθανότητα απομόνωσης είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα μεγέθη στην βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, ενώ από τον υπολογισμό της μπορεί να προκύψει και η πιθανότητα κάλυψης του κόμβου. Το ενδεχόμενο κάλυψης του κόμβου, δηλαδή να είναι στην εμβέλεια επικοινωνίας κάποιου άλλου και να μην είναι απομονωμένος, αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο να έχει τουλάχιστον έναν γειτονικό κόμβο. Επομένως η πιθανότητα κάλυψης  $P_{cov}$  θα δίνεται από το συμπλήρωμα της πιθανότητας απομόνωσης:

$$P_{cov} = 1 - P_{iso} \quad (2.5)$$

Όταν η πιθανότητα απομόνωσης τείνει στο μηδέν ( $P_{iso} \rightarrow 0$ ) ή η πιθανότητα κάλυψης τείνει στο ένα ( $P_{cov} \rightarrow 1$ ) τότε ο κόμβος έχει τουλάχιστον ένα γείτονα.

Εν συνεχεία, εισάγουμε τις παρακάτω παραδοχές οι οποίες θεωρούμε ότι ισχύουν για το χωρικό μοντέλο:

- Η περιοχή  $A$  που καταλαμβάνει το δίκτυο είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να αγνοείται η επίδραση των συνοριακών κόμβων.
- Η πιθανότητα να είναι ένας οποιοσδήποτε κόμβος απομονωμένος εντός της περιοχής  $A$  δεδομένου ότι υπάρχουν  $n$  κόμβοι δίνεται από την πιθανότητα απομόνωσης που υπολογίζεται από την σχέση (2.4).
- Δεδομένου ότι υπάρχουν  $n$  κόμβοι στην περιοχή  $A$ , τα ενδεχόμενα  $I_k = \{\text{ο κόμβος } k \text{ είναι απομονωμένος}\}$ ,  $k=1,2,\dots,n$  είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Ως συνέπεια των παραπάνω αν ορίσουμε ως  $B$  το ενδεχόμενο να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος μέσα στο δίκτυο, τότε η πιθανότητα του ενδεχομένου  $B$  δεδομένου ότι θα υπάρχουν ακριβώς  $n$  κόμβοι στην περιοχή  $A$  θα δίνεται από την σχέση:

$$P(B | N = n) = (1 - P_{iso})^n \quad (2.6)$$

Γενικά, για τον υπολογισμό της πιθανότητας του ενδεχομένου  $B$  ανεξαρτήτως του αριθμού των κόμβων του δικτύου καταφεύγουμε στο θεώρημα συνολικής πιθανότητας σύμφωνα με το οποίο αν  $U = [N_1, N_2, \dots, N_n]$  είναι ένας διαμερισμός του  $A$ , δηλαδή λαμβάνει υπόψη όλες τις δυνατές περιπτώσεις για τον αριθμό των κόμβων που δύναται να εμφανιστούν εντός της καθορισμένης περιοχής  $A$ , και  $B$  είναι ένα τυχαίο γεγονός τότε [PP02]:

$$P(B) = P(B | A_1)P(A_1) + \dots + P(B | A_n)P(A_n), \quad n=0, \dots, \infty \quad (2.7)$$

Και επειδή τα  $P(A_i)$  είναι ανεξάρτητα ενδεχόμενα που ακολουθούν Poisson κατανομή και λαμβάνοντας υπόψη ότι τα  $P(B | A_i)$  δίνονται από την σχέση (2.6) καταλήγουμε στην μη δεσμευμένη πιθανότητα για το ενδεχόμενο να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος στο δίκτυο:

$$P(B) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\lambda} \frac{[\lambda(1 - P_{iso})]^n}{n!} = e^{-\lambda P_{iso}} \quad (2.8)$$

Όπου και εδώ  $\lambda = \rho A$ . Οι παραδοχές πάνω στις οποίες βασίζεται η παραπάνω σχέση αποτελούν μία γενική αλλά απλοποιημένη εικόνα της συμπεριφοράς ενός δικτύου. Παρόλα αυτά, έχειδειχθεί στο [BB05] ότι αποτελούν μια αρκετή καλή προσέγγιση που οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η αγνόηση της επίδρασης των συνοριακών κόμβων έχει μηδαμινή σημασία για δίκτυα αρκετών κόμβων όπως έχει αποδειχθεί στο [Bet01], ενώ ακόμα και αν θεωρήσουμε ότι η παραδοχή της ανεξαρτησίας των απομονωμένων κόμβων δεν είναι τόσο αυστηρή και απόλυτη τότε βάσει της μεθόδου προσέγγισης Poisson διαδικασιών [Bar01] καταλήγουμε σε αντίστοιχα αποτελέσματα.

Από την σχέση (2.8) διαπιστώνουμε ότι η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος εξαρτάται από δύο παράγοντες: πρώτον την παράμετρο  $\lambda$  της

Poisson κατανομής που στην πραγματικότητα εξαρτάται από την πυκνότητα των κόμβων και επομένως από την τοπολογία και χωρική κατανομή του δικτύου και δεύτερον από την πιθανότητα απομόνωσης ενός τυχαίου κόμβου η οποία εξαρτάται επιπλέον από την εμβέλεια του κόμβου και κατ' επέκταση για ασύρματα δίκτυα από την ισχύ εκπομπής και τα χαρακτηριστικά διάδοσης του διαύλου επικοινωνίας. Αν θεωρήσουμε ότι το ενδεχόμενο το δίκτυο να γίνεται συνδεδεμένο εμφανίζεται την ίδια στιγμή που και ο τελευταίος απομονωμένος κόμβος συνδέεται με άλλους, όπως έχει εξηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα, τότε η πιθανότητα να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο προσεγγίζεται από την σχέση (2.6) και  $P_{con} = P(C) = P(A)$ . Για να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο πρέπει  $P_{con} = P(C) = P(A) \rightarrow 1$  ή ισοδύναμα  $P_{iso} \rightarrow 0$ . Συχνά στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται αποτελέσματα είτε για την πιθανότητα απομόνωσης ενός κόμβου είτε και την πιθανότητα το δίκτυο να είναι συνδεδεμένο θεωρώντας ότι αποτελούν αντίστοιχο μετρικό μέγεθος για την συνδεσιμότητα του δικτύου.

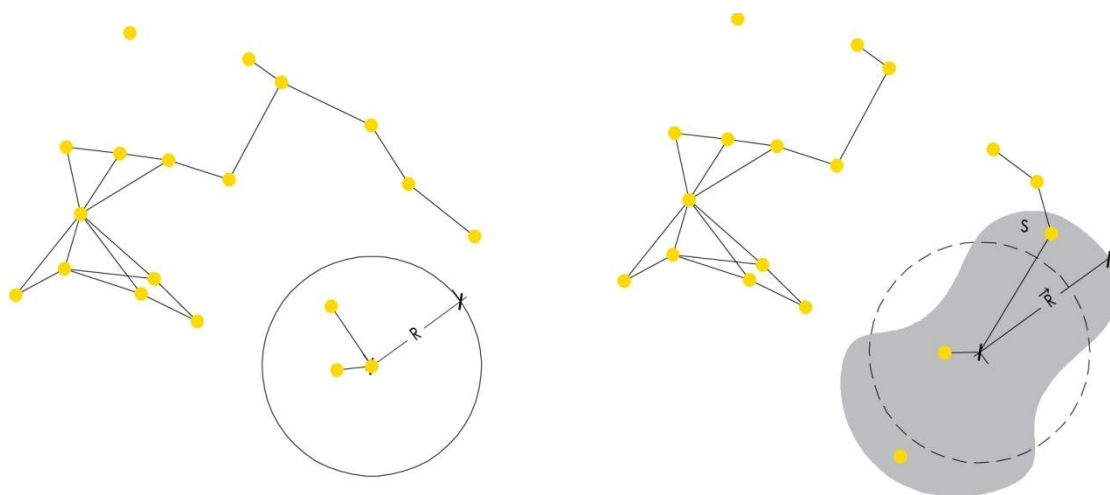
## 2.4 Γενικό μοντέλο συνδεσιμότητας

Γενικά το Poisson Boolean μοντέλο αποτελεί μια καλή αρχική προσέγγιση για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας του δικτύου. Σε αυτό συνηγορεί το γεγονός ότι έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στην βιβλιογραφία ιδιαίτερα όταν χρειάζεται να αναλυθούν ζητήματα συνδεσιμότητας σε υψηλότερα επίπεδα ενός δικτύου. Υπάρχουν επίσης αποτελέσματα που δείχνουν ότι σε αρκετές περιπτώσεις το Poisson Boolean μοντέλο τείνει να έχει χειρότερη συμπεριφορά σε σχέση με μοντέλα που θεωρούν ότι η περιοχή κάλυψης δεν έχει μορφή δίσκου αλλά ακανόνιστο σχήμα [FBC<sup>+</sup>05], κυρίως λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος χώρου του, αλλά και ότι υποτιμάει την πραγματική συνδεσιμότητα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι βασίζεται στην μέθοδο των τυχαίων σημείων Poisson αναφορικά με την ανακατασκευή και αναπαράσταση του δικτύου που αποτελεί όπως δείξαμε στην ενότητα (§2.2) μια αρκετά γενικευμένη και πρακτική μέθοδο για την θεωρητική ανάπτυξη οποιουδήποτε μοντέλου συνδεσιμότητας. Με βάσει αυτά τα στοιχεία καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μπορεί σαν μοντέλο να χρησιμοποιηθεί για μια πρώτη εκτίμηση και για την λήψη αρχικών συμπερασμάτων σε ζητήματα που σχετίζονται με την συνδεσιμότητα.

Στόχος μας είναι να μελετήσουμε διεξοδικά το ζήτημα της συνδεσιμότητας στο φυσικό επίπεδο ασύρματων πολυβηματικών δικτύων για αυτό πρέπει να ενταχθεί στην όποια μεθοδολογία αναπτυχθεί η επίδραση του καναλιού διάδοσης. Αξίζει εδώ να σημειωθεί από την προηγούμενη ανάλυση ότι τα δύο βασικά χαρακτηριστικά που



επηρεάζουν την συνδεσιμότητα ενός δίκτυο στο φυσικό του επίπεδο είναι οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του και οι σχετικές τους θέσεις. Αυτό συνεπάγεται ότι σε οποιοδήποτε υπολογισμό της συνδεσιμότητας πρέπει να λαμβάνονται με όσο το δυνατόν πληρέστερο τρόπο υπόψη τα χαρακτηριστικά και η διαθεσιμότητα των συνδέσεων μεταξύ των γειτονικών κόμβων καθώς και η τοπολογία του δικτύου.



Σχήμα 2.3: Τοπολογία δικτύου και μορφή περιοχής κάλυψης για ένα ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης (αριστερό σχήμα) και για στοχαστικό μοντέλο διάδοσης (δεξιό σχήμα).

Σε ένα πραγματικό δίκτυο η περιοχή κάλυψης ενός τυχαίου κόμβου δεν έχει την μορφή δίσκου παρά μόνο με εξαίρεση την περίπτωση που το δίκτυο είναι εγκατεστημένο σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχει διάδοση ελευθέρου χώρου, δηλαδή δεν παρεμβάλλονται αντικείμενα και εμπόδια στην περιοχή του, και παράλληλα χρησιμοποιούνται από τους κόμβους ισοτροπικές κεραιές. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η μορφή της περιοχής κάλυψης έχει ακανόνιστο σχήμα, όπως διακρίνεται και στο σχήμα 2.3, που οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως στην ύπαρξη εμποδίων στο περιβάλλοντα χώρο, στην τυχειότητα του καναλιού, στην ύπαρξη φαινομένων διαλείψεων και παρεμβολών που παρουσιάζουν έντονες χωρικές διακυμάνσεις και στο διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών των κόμβων. Η μορφή της περιοχής κάλυψης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις επιδράσεις που οφείλονται στον περιβάλλοντα χώρο και μπορεί να υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις από κόμβο σε κόμβο ιδιαίτερα για περιβάλλοντα διάδοσης με έντονες μεταβολές στην μορφολογία τους όπως οι εσωτερικοί χώροι.

Ως περιοχή κάλυψης ενός κόμβου ορίζεται η περιοχή που αν βρεθεί κάποιος άλλος τότε θα είναι εφικτή η εγκαθίδρυση επικοινωνίας μεταξύ τους. Γενικά, για την επίτευξη μίας σύνδεσης μεταξύ δύο οποιονδήποτε ασύρματων συσκευών απαιτείται η

ισχύς που λαμβάνει ο δέκτης από τον πομπό να είναι μεγαλύτερη από την ευαισθησία του για να μπορεί να αναγεννήσει σωστά το λαμβανόμενο σήμα. Αυτό συνεπάγεται ότι ο σηματοθορυβικός λόγος  $SNR$  στον δέκτη πρέπει να είναι μεγαλύτερος από μία τιμή κατωφλίου που αντιστοιχεί στην ευαισθησία του δέκτη. Ως περιοχή κάλυψης τότε ενός κόμβου μπορεί να θεωρηθεί η περιοχή που περικλείεται από την κλειστή καμπύλη που αντιστοιχεί στον γεωμετρικό τόπο των σημείων όπου ο σηματοθορυβικός λόγος είναι ίσος με την τιμή κατωφλίου του δέκτη. Για την περίπτωση του Poisson Boolean μοντέλου όπου η περιοχή κάλυψης είναι ένα δίσκος ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου ο σηματοθορυβικός λόγος είναι ίσος με την τιμή κατωφλίου αντιστοιχεί στην περίμετρο του δίσκου.

Για την γενικότερη περίπτωση ισχύει ότι η περιοχή κάλυψης  $S$  ενός τυχαίου κόμβου του δικτύου είναι η περιοχή που περικλείεται από την κλειστή κυρτή καμπύλη  $L = \{x(x_1, x_2, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d, \text{ όπου } SNR(x) = SNR_{th}\}$  που απεικονίζει τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που ο σηματοθορυβικός λόγος είναι ίσος με την τιμή κατωφλίου που απαιτείται για να είναι δυνατή η εγκαθίδρυση επικοινωνίας μεταξύ γειτονικών κόμβων. Οπότε, η πιθανότητα να είναι ένας κόμβος απομονωμένος ή να μην υπάρχει απομονωμένος κόμβος εντός του δικτύου θα υπολογίζεται πάλι από τις σχέσεις 2.4 και 2.8 αντίστοιχα με την μόνη διαφορά ότι το  $S$  αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή. Ο υπολογισμός του  $S$  μπορεί να γίνει μέσω του  $L$  με τον εξής τρόπο. Η απόσταση εμβέλειας  $R$  είναι και αυτή τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από το μοντέλο διάδοσης και την τυχειότητα του καναλιού διάδοσης και λαμβάνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με την γωνία που εμφανίζει σε σχέση με τον άξονα αναφοράς. Επομένως, αποτελεί μία διανυσματική συνάρτηση που ορίζει τα σημεία εκείνα για τα οποία ο σηματοθορυβικός λόγος είναι ίσος με την τιμή κατωφλίου και κατά συνέπεια ορίζει την κυρτή καμπύλη  $L$ . Πιο συγκεκριμένα για το επίπεδο θα ισχύει:

$$\vec{R}(x, y) = (x_1, x_2) = \{L\} \quad (2.9)$$

Το εμβαδόν της περιοχής που περικλείεται από την καμπύλη  $L$  θα δίνεται από το διπλό ολοκλήρωμα:

$$\|S\| = \iint_S d\vec{S} = \iint_S \vec{R}(x, y) dx dy \quad (2.10)$$

Ο τρόπος υπολογισμού της τυχαίας μεταβλητής  $\vec{R}(x, y)$  βασίζεται στο ορισμό της εμβέλειας ενός κόμβου. Για είναι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων πρέπει η απόσταση τους να είναι τέτοια ώστε ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη να είναι μεγαλύτερος από την ευαισθησία του. Η τιμή του σηματοθορυβικού λόγου εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που διακρίνονται σε ντετερμινιστικές και τυχαίες. Ντετερμινιστικές παράμετροι είναι οι απώλειες λόγω διάδοσης οι οποίες εξαρτώνται από την απόσταση και την συχνότητα λειτουργίας και τα κέρδη των κεραιών. Τυχαίες παράμετροι είναι οι διακυμάνσεις στην τιμή του σηματοθορυβικού λόγου που οφείλονται σε διαλείψεις, στην τυχειότητα του καναλιού διάδοσης και σε άλλα φαινόμενα τα οποία μπορούν να περιγραφούν μόνο με στατιστικά μοντέλα.

Όλα τα γνωστά μοντέλα που περιγράφουν τις απώλειες διάδοσης και τα στοχαστικά φαινόμενα του δίαυλου διάδοσης είναι μονοδιάστατα και αναφέρονται κατά μήκος της νοητής γραμμής σύνδεσης των δύο κόμβων. Επομένως, η τυχαία μεταβλητή  $\vec{R}(x, y)$  που ορίζει το ίχνος της καμπύλης  $L$  μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της απόστασης  $r$ . Με αυτό τον τρόπο μετατρέπεται ουσιαστικά η  $\vec{R}(x, y)$  σε πολικές συντεταγμένες  $\vec{R}(x, y) = \vec{R}(r)$  θεωρώντας ταυτόχρονα ότι η διανυσματική συνάρτηση εξαρτάται αποκλειστικά από το  $r$  και όχι από την γωνία  $\theta$  καθώς τα μοντέλα διάδοσης και διαλείψεων έχουν παράμετρο την σχετική απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων. Για τον υπολογισμό της περιοχής κάλυψης  $S$  απαιτείται ο υπολογισμός του εμβαδού την περιοχής που διαγράφει η  $\vec{R}(r)$  δηλαδή η ολοκλήρωση ως προς την γωνία  $\theta$ .

Αρχικά αναλύεται η απλούστερη περίπτωση που είναι το Poisson Boolean μοντέλο για να γενικευτούν τα αποτελέσματα και για μη ντετερμινιστικές περιπτώσεις αλλά και για να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων ανάμεσα στο απλό ντετερμινιστικό μοντέλο και το μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την τυχειότητα του διαύλου διάδοσης. Στο Poisson Boolean μοντέλο υπάρχει μια προκαθορισμένη απόσταση  $R$  (εμβέλεια κόμβου) εντός της οποίας μπορεί να υπάρξει επικοινωνία εφόσον βρεθεί κάποιος κόμβος. Ο σηματοθορυβικός λόγος θα δίνεται τότε γενικά από την σχέση:

$$\gamma(r) = \frac{P_t}{N} I(r) \quad (2.11)$$

Όπου  $P_t$  είναι η ισχύς εκπομπής,  $N$  η πυκνότητα ισχύος του λευκού γκαουσιανού θορύβου και  $I(r)$  η απόσβεση λόγω διάδοσης στον χώρο. Γενικά, την απόσβεση

μπορούμε να την εκφράσουμε ως  $l(r) = Kr^{-a}$  με το  $a$  να είναι ο συντελεστής απωλειών και το  $K$  μια σταθερά που συμπεριλαμβάνει την συχνότητα και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόσβεση του σήματος κατά μήκος της ασύρματης σύνδεσης. Τελικά, για την περίπτωση που  $\gamma(r) = \gamma_{th}$  λαμβάνουμε:

$$r = \left( \frac{KP_t}{N\gamma_{th}} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (2.12)$$

Ενώ η πιθανότητα απομόνωσης ενός κόμβου δίνεται από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-\rho\pi r^2} = e^{-\rho\pi \left( \frac{KP_t}{N\gamma_{th}} \right)^{\frac{2}{a}}} \quad (2.13)$$

Και η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας κόμβος απομονωμένος δίνεται αντίστοιχα από την σχέση:

$$P(B) = e^{-\lambda P_{iso}} = e^{-\lambda \cdot e^{-\rho\pi \left( \frac{KP_t}{N\gamma_{th}} \right)^{\frac{2}{a}}}} \quad (2.14)$$

Θεωρούμε την περίπτωση που το κανάλι δεν είναι ντετερμινιστικό αλλά η απόσβεση  $l(r)$  αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή που έχει πυκνότητα πιθανότητας  $f_{l_r}(\cdot|\cdot)$  και αντίστοιχη αθροιστική κατανομή  $F_{l_r}(\cdot|\cdot)$ . Η συνθήκη για να υπάρξει επικοινωνία μεταξύ δύο κόμβων που απέχουν απόσταση  $r$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος να είναι μεγαλύτερος ίσος από την ευαισθησία του δέκτη. Αν ορίσουμε σε αυτή την περίπτωση ως  $R$  την τυχαία μεταβλητή που αναπαριστά την εμβέλεια του πομπού κόμβου τότε η ακτίνα εμβέλειας του πομπού καθορίζει την πιθανότητα να υπάρχει επικοινωνία με ένα κόμβο που βρίσκεται σε απόσταση  $x$ . Επιπλέον, η αθροιστική κατανομή της εμβέλειας του κόμβου θα ικανοποιεί την συνθήκη του σηματοθορυβικού λόγου και επομένως θα ισχύει:

$$\begin{aligned} F_R(x) &= P[\gamma(x) \geq \gamma_{th}] = P\left[l(x) \geq \frac{N\gamma_{th}}{P_t}\right] = \\ &= P\left[l(r) \geq \frac{N\gamma_{th}}{P_t} \mid r = x\right] = 1 - F_{l_r}\left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t} \mid x\right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι η τυχαία μεταβλητή που περιγράφει την εμβέλεια ενός κόμβου για οποιοδήποτε κανάλι διάλειτουργίας ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτή του σηματοθορυβικού λόγου του καναλιού διάλειτουργίας. Αυτό αποτελεί μια πάρα πολύ σημαντική διαπίστωση καθώς συσχετίζει την τυχαία μορφή της καμπύλης  $L$  και κατ' επέκταση της περιοχής κάλυψης του κόμβου  $S$  με την κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου και κάνει πιο εύκολο τον υπολογισμό τους.

Επιπλέον το εμβαδόν της περιοχής κάλυψης  $S$  δεν χρειάζεται να υπολογιστεί απευθείας από την (2.10) καθώς υπάρχει το ακόλουθο θεώρημα για τον υπολογισμό της κατανομής των γειτονικών κόμβων με του οποίους μπορεί να επικοινωνεί με απευθείας μεταδόσεις.

*Θεώρημα 2.1:* Δεδομένου ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι κατανεμημένοι με μια ομογενής διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson (homogeneous Poisson point field process) παραμέτρου  $\lambda$  στο επίπεδο και η εμβέλεια των κόμβων είναι ίση με  $R$  τότε ο αριθμός των γειτονικών κόμβων θα ακολουθεί Poisson κατανομή με παράμετρο  $\rho\pi \cdot E(R^2)$ . ■

Το θεώρημα αυτό παρουσιάζεται και αποδεικνύεται στις εργασίες [OB03] και [MA05], ενώ ως άμεσο συμπέρασμα αποτελεί το γεγονός ότι η πιθανότητα απομόνωσης θα δίνεται από την παρακάτω σχέση ακόμα και αν η απόσταση  $R$  είναι τυχαία μεταβλητή:

$$P_{iso} = e^{-\rho\pi \cdot E(R^2)} \quad (2.16)$$

Επομένως, από την κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου για οποιοδήποτε μοντέλο διάδοσης προκύπτει η κατανομή της εμβέλειας του κάθε κόμβου και με υπολογισμό της μέσης τιμής του τετραγώνου της εμβέλειας προκύπτει η περιοχή κάλυψης του κόμβου  $\|S\| = \pi E(R^2)$  ενώ ο μέσος αριθμός των γειτονικών κόμβων  $d$  που επικοινωνούν απευθείας με τον κόμβο είναι:

$$E(d) = \rho\pi E(R^2) \quad (2.17)$$

## 2.5 Νέο γενικευμένο μοντέλο συνδεσιμότητας

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα είναι αρκετά γενικό και αποτελεί το βασικό μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας σε ένα πλήθος ερευνητικών εργασιών που ασχολούνται με την επίδραση του μέσου διάδοσης στην συνδεσιμότητα είτε κυψελωτών συστημάτων [ZP94], [OB03] είτε ασύρματων πολυβηματικών δικτύων [MAG08], [BH05], [Dar07]. Τα πλεονεκτήματά του είναι αρκετά. Αρχικά λαμβάνει υπόψη την τυχαιότητα του καναλιού διάδοσης και τις τυχαίες θέσεις που μπορεί να έχουν οι κόμβοι του δικτύου. Μπορεί εύκολα να υπολογιστεί θεωρητικά η περιοχή κάλυψης ή εμβέλειας ενός κόμβου απευθείας από την στατιστική κατανομή του σηματοθορυβικού λόγου βάσει των παραδοχών που έχουν γίνει για το κανάλι διάδοσης. Σε αυτό τον τομέα υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία με στατιστικές κατανομές που ακολουθούν τα διάφορα κανάλια διαλείψεων που έχουν επιβεβαιωθεί από πλήθος πειραματικών δεδομένων. Επιπρόσθετα, ο υπολογισμός της μέσης τιμής του τετραγώνου της ακτίνας εμβέλειας που απαιτείται στις σχέσεις (2.16) και (2.17) μπορεί να γίνει με αναλυτικό τρόπο για τα απλούστερα κανάλια διάλειψης ενώ για πιο πολύπλοκα κανάλια διάλειψης υπολογίζεται με την χρήση αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης. Έχει μάλιστα φανεί ότι οι μέθοδοι αριθμητικής ολοκλήρωσης συγκλίνουν αρκετά γρήγορα και με μεγάλη ακρίβεια στην λύση του προβλήματος. Βάσει των προαναφερθέντων λόγων το μοντέλο κρίνεται αρκετά καλό και χρησιμοποιείται σε αρκετά σημεία της διατριβής για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας.

Το βασικό μειονέκτημα που εμφανίζει το μοντέλο αυτό είναι ότι ο μέσος αριθμός των γειτονικών κόμβων που δίνεται από την σχέση (2.17) υπολογίζεται αποκλειστικά και μόνο λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης και τον μέσο αριθμό κόμβων που αντιστοιχεί στην περιοχή κάλυψης και όχι την χωρική κατανομή των κόμβων που βρίσκονται στην κοντινή του περιοχή [ZSF<sup>+</sup>09]. Σύμφωνα με το μοντέλο τυχαίων σημείων Poisson η θέση ενός κόμβου είναι ανεξάρτητη από την θέση οποιουδήποτε άλλου κόμβου της περιοχής, κάτι που λαμβάνεται υπόψη στο γενικό μοντέλο συνδεσιμότητας, αλλά η μεταξύ τους απόσταση ακολουθεί εκθετική κατανομή με την ίδια παράμετρο  $\lambda$ . Αυτό συνεπάγεται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από έναν κόμβο τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα να εμφανιστεί κάποιος άλλος κόμβος. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα προτείνουμε μια υπό συνθήκη κατανομή [Π1] που θα λαμβάνει υπόψη και την απόσταση βάσει της χωρικής κατανομής των γειτονικών κόμβων αλλά και την προϋπόθεση ότι ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη πρέπει να είναι μεγαλύτερος από την ευαισθησία του.

Θεωρώντας ως  $f_R(r)$  την χωρική κατανομή που έχουν οι γειτονικοί κόμβοι του δικτύου [ΚΙΤ10] και ως  $P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r]$  την πιθανότητα να είναι διαθέσιμη η επικοινωνία μεταξύ δύο σταθμών των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι ίση με  $r$  προκύπτει με εφαρμογή του θεωρήματος Bayes [ΡΡ02] η κατανομή της απόστασης των γειτονικών κόμβων που είναι συνδεδεμένοι από την σχέση:

$$f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th}) = \frac{P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r] \cdot f_R(r)}{\int_0^{\infty} P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r] \cdot f_R(r) dr} \quad (2.18)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό της περιοχής κάλυψης ενός κόμβου λαμβάνοντας όμως υπόψη και την χωρική κατανομή που έχουν οι γειτονικοί κόμβοι μέσα στην εμβέλειά του. Επομένως, μέσος αριθμός γειτονικών κόμβων προκύπτει από τον υπολογισμό της μέσης τιμής  $E(R^2 | \gamma(R = r) \geq \gamma_{th})$  και θα δίνεται αντίστοιχα με την (2.17) από την σχέση:

$$E_c(d) = \rho \pi E(R^2 | \gamma(R = r) \geq \gamma_{th}) \quad (2.19)$$

Και η πιθανότητα αποκοπής από την σχέση:

$$P_{iso,c} = e^{-\rho \pi E(R^2 | \gamma(R = r) \geq \gamma_{th})} \quad (2.20)$$

Η πιθανότητα  $P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r]$  αναφέρεται στην διαθεσιμότητα της σύνδεσης και εξαρτάται από την κατανομή που περιγράφει το κάθε κανάλι διάλειτουργίας.

Η χωρική κατανομή  $f_R(r)$  της θέσης των γειτονικών κόμβων μπορεί να υπολογιστεί εύκολα για την περίπτωση τυχαίων σημείων Poisson. Θεωρούμε ότι έχουμε έναν κόμβο στην αρχή των αξόνων και έστω  $r$  η ακτινική απόσταση με έναν γειτονικό του. Στον δακτύλιο που σχηματίζεται και έχει εσωτερική ακτίνα ( $r$ ) και εξωτερική ακτίνα ( $r + dr$ ) όπου το  $dr \rightarrow 0$  θεωρούμε ότι, ακόμα και για μη ομογενή Poisson πεδία, το  $\rho$  είναι σταθερό και υπάρχουν κατά μέσον όρο  $K$  κόμβοι οι οποίοι θα υπολογίζονται από την σχέση:

$$K = \rho \pi (r + dr)^2 - \rho \pi r^2 = 2\rho \pi r dr \quad (2.21)$$

Συνολικά, στο επίπεδο θα υπάρχουν βάσει της θεώρησης τυχαίων σημείων Poisson που είναι μια ομογενή χωρική κατανομή:

$$\hat{K} = E(N) = \lambda = \rho\pi R_A^2 \quad (2.22)$$

Επομένως, η συνάρτηση πυκνότητας της χωρικής κατανομής θα δίνεται για το επίπεδο από τον τύπο:

$$f_R(r) = \frac{K}{\hat{K}} = \frac{2r}{R_A^2}, \quad 0 \leq r \leq R_A \quad (2.23)$$

Το  $R_A$  είναι η διάσταση του δικτύου η οποία θεωρητικά τείνει στο άπειρο  $R_A \rightarrow \infty$  αλλά πρακτικά δεν είναι άπειρη απλώς πολύ μεγαλύτερη του  $r$ , δηλαδή  $R_A \gg r$ . Η  $f_R(r)$  αποτελεί όντως συνάρτηση πυκνότητας χωρικής κατανομής καθώς ισχύει:

$$F_R(r = R_A) = \lim_{R_A \rightarrow \infty} \left( \int_{-\infty}^{r=R_A} f_R(r) dr \right) = 1 \quad (2.24)$$

Και επομένως η αθροιστική κατανομή που προκύπτει από την  $f_R(r)$  γίνεται ίση με 1 ακόμα και όταν το  $R_A \rightarrow \infty$ .

Αξίζει όμως να τονιστεί ότι για πρακτικούς λόγους απαιτείται να προσδιοριστεί μία πεπερασμένη τιμή της παραμέτρου  $R_A$  που μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να συνεχίζει να ισχύει η (2.24) και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η (2.23) χωρίς περιορισμούς. Από τον ορισμό των τυχαίων σημείων Poisson προκύπτει ότι η απόσταση εμφάνισης ενός τυχαίου σημείου ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο  $\lambda$  που είναι ίδια με την παράμετρο της Poisson κατανομής. Επειδή η  $f_R(r)$  αναφέρεται στην χωρική κατανομή των γειτονικών κόμβων τότε στην χειρότερη δυνατή περίπτωση θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας κόμβος ή ένα σημείο Poisson έστω και στην οριακή απόσταση  $R = R_A$ . Επομένως θα ισχύει:

$$P(R \leq R_A) = 1 - e^{-\rho\pi R_A^2} = 1 - \varepsilon \quad (2.25)$$



Όπου το  $\varepsilon$  λαμβάνει αρκετά μικρή τιμή (π.χ  $\varepsilon = 0,01$ ) ανάλογα και με την απαιτούμενη ακρίβεια. Λύνοντας την (2.25) καταλήγουμε στον τύπο:

$$R_A = \sqrt{\frac{-\ln \varepsilon}{\rho\pi}} \quad (2.26)$$

Όπως είναι λογικό η τιμή της  $R_A$  εξαρτάται και από την πυκνότητα των κόμβων του δικτύου  $\rho$  μέσω την παραμέτρου  $\lambda$  αλλά και από την απαιτούμενη ακρίβεια.

## 2.6 Συνδεσιμότητα σε περιβάλλον διαλείψεων

### 2.6.1 Φαινόμενα διαλείψεων

Οι διαλείψεις αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες διακύμανσης της ισχύς του σήματος που λαμβάνει ένας δέκτης καθώς αυτό διαδίδεται μέσα στον δίαυλο επικοινωνίας. Οι διαλείψεις αυτές οφείλονται σε πάρα πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες που επηρεάζουν την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ασύρματο μέσο και ποικίλουν τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και σε αυτό της συχνότητας, ενώ σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζουν παράλληλα και έντονη χωρική ανομοιογένεια. Το αποτέλεσμα της ύπαρξης διαλείψεων είναι η σημαντική επιδείνωση της ποιότητας των ασύρματων συνδέσεων, η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης λανθασμένων ψηφίων (BER) και σε περιπτώσεις ισχυρών διαλείψεων (deep fading) η απώλεια και της ίδιας της ασύρματης επικοινωνίας. Για αυτό κατά τον σχεδιασμό των ασύρματων συστημάτων υπολογίζεται ένα περιθώριο διάλειψης έτσι ώστε ακόμα και σε περιβάλλον με έντονες διαλείψεις να μπορεί η λαμβανόμενη ισχύς να υπερβαίνει την ευαισθησία του δέκτη. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται τεχνικές κωδικοποίησης και διόρθωσης των λαθών για την αντιμετώπιση κυρίως των έντονων διαλείψεων και εφαρμόζονται προσαρμοστικές τεχνικές στις ψηφιακές διαμορφώσεις ώστε να γίνεται καλύτερη διαχείριση των τηλεπικοινωνιακών πόρων με γνώμονα την διατήρηση της ποιότητας και της διαθεσιμότητας της ασύρματης σύνδεσης πάνω από κάποια προκαθορισμένα επίπεδα. Επειδή το φαινόμενο των διαλείψεων παρουσιάζει έντονη χωρική και χρονική ανομοιογένεια συνήθως αποφεύγεται η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύς που μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση παρεμβολών σε άλλα γειτονικά συστήματα. Για το προσδιορισμό των διαλείψεων κατά την διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα στον ασύρματο δίαυλο χρησιμοποιούνται στοχαστικά μοντέλα που έχουν προκύψει από την

στατιστική ανάλυση των φαινομένων που εμφανίζονται στα διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης [TV05].

Γενικά, οι διαλείψεις χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες [SAZ07]: σε αυτές που οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος μέσα στο περιβάλλον διάδοσης και σε αυτές που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης λόγω ύπαρξης εμποδίων, ανθρώπινων κατασκευών και μεγάλων σκεδαστών που επηρεάζουν την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων. Η κατηγοριοποίηση αυτή χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον βασικό μηχανισμό που προκαλεί τις διαλείψεις σε κάθε περιβάλλον διάδοσης παρότι σπάνια εμφανίζεται μονάχα ο ένας εκ των δύο. Αντίστοιχα με τα παραπάνω, οι διαλείψεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αργές και γρήγορες διαλείψεις [Rap96].

Οι όροι αργές και γρήγορες διαλείψεις αναφέρονται στον ρυθμό με τον οποίο επιβάλλονται από το κανάλι διάδοσης οι μεταβολές στο πλάτος και την φάση του μεταδιδόμενου σήματος. Ο χρόνος συνοχής (coherence time) του καναλιού αποτελεί το μετρικό εκείνο μέγεθος που διαφοροποιεί τις αργές από τις γρήγορες διαλείψεις και ορίζεται ως το ελάχιστο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να θεωρούνται οι μεταβολές στο κανάλι διάδοσης που προκαλεί τις διαλείψεις ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Αντίστοιχα, μπορεί να οριστεί και ως το μέγιστο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο οι μεταβολές του διαύλου διάδοσης είναι συσχετισμένες μεταξύ τους. Ο χρόνος συνοχής επίσης σχετίζεται με το φαινόμενο Doppler.

Όταν ένας χρήστης κινείται, ή αντίστοιχα μεταβάλλεται ο περιβάλλον χώρος, η ταχύτητα του χρήστη προκαλεί ολίσθηση στην συχνότητα του σήματος που μεταδίδεται κατά μήκος της διαδρομής του σήματος. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Doppler. Σήματα που οδεύουν κατά μήκος διαφορετικών μονοπατιών διάδοσης, λόγω της ύπαρξης σκεδαστών στον περιβάλλοντα χώρο που δεν επιτρέπουν την απευθείας διάδοση, έχουν συνήθως διαφορετικές ολισθήσεις στην συχνότητα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές μεταβολές στην διαφορά φάσης. Η διαφορά στην ολίσθηση της συχνότητας που εμφανίζεται μεταξύ διαφόρων συνιστωσών του σήματος είναι γνωστή ως εξάπλωση Doppler  $D_s$  και σχετίζεται με το χρόνο συνοχής  $T_c$  βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$T_c = \frac{1}{D_s} \quad (2.27)$$

Αργές διαλείψεις (ή διαλείψεις μεγάλης κλίμακας) προκύπτουν όταν ο χρόνος συνοχής του καναλιού είναι μεγάλος σε σχέση με την καθυστέρηση του καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση οι μεταβολές στο πλάτος και στην διαφορά φάσης του

διαδιδόμενου σήματος που επιβάλλονται από το κανάλι μπορούν να θεωρηθούν σταθερές για όλη την διάρκεια χρήσης του διαύλου επικοινωνίας. Ο βασικότερος μηχανισμός που προκαλεί αργές διαλείψεις είναι η σκίαση (Shadowing). Για μεταδόσεις σε περιβάλλοντα εξωτερικών χώρων όταν ένα μεγάλο εμπόδιο, όπως ενός λόφου ή ενός μεγάλου κτιρίου ή μιας μεγάλης επιφάνειας που προκαλεί ανακλάσεις και σκεδάσεις, παρεμβάλλεται στην κύρια διαδρομή του σήματος μεταξύ του πομπού και του δέκτη δημιουργεί διαλείψεις. Αντίστοιχα για μεταδόσεις σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου η ύπαρξη τοίχων, μεγάλων αντικειμένων και επιφανειών που παρεμβάλλονται ανάμεσα στην νοητή σύνδεση πομπού και δέκτη είναι η βασικότερη αιτία εμφάνισης αργών διαλείψεων στο λαμβανόμενο από τον δέκτη σήμα.

Οι μεταβολές που προκαλούνται στην ισχύ του διαδιδόμενου σήματος λόγω διαλείψεων σκίασης τόσο για περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου όσο και για εσωτερικού χώρου συχνά μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας την λογαριθμοκανονική (Log-normal) κατανομή με τυπική απόκλιση που ποικίλει ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης, το είδος των σκεδαστών και το μοντέλο απωλειών που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της εξασθένισης του σήματος κατά την διάδοσή του.

Γρήγορες διαλείψεις (ή διαλείψεις μικρής κλίμακας) προκύπτουν όταν ο χρόνος συνοχής του καναλιού είναι αρκετά μικρός σε σχέση με την καθυστέρηση του καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση οι μεταβολές στο πλάτος και στην διαφορά φάσης του διαδιδόμενου σήματος που επιβάλλονται από το κανάλι ποικίλουν αρκετά κατά την διάρκεια χρήσης του διαύλου επικοινωνίας. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και στην χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στην διάδοση. Για την μοντελοποίηση τους χρησιμοποιούνται διάφορες κατανομές όπως η Rician, Rayleigh, Nakagami ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που έχει το περιβάλλον διάδοσης.

Ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των διαλείψεων είναι ότι οι μεταβολές στο πλάτος και την φάση του μεταδιδόμενου σήματος εξαρτώνται από την συχνότητα του σήματος. Επομένως, διαφορετικές φασματικές συνιστώσες υπόκεινται σε διαφορετικές μεταβολές κατά την διάδοσή τους μέσω του καναλιού διάλειψης. Για αυτό τον λόγο ορίζεται η έννοια της ζώνης συνοχής ως το εύρος ζώνης πέρα από το οποίο δύο φασματικές συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος θα υφίστανται ασυσχέτιστες μεταβολές στο πλάτος και την φάση τους λόγω των διαλείψεων. Αυτό συνεπάγεται ότι αν το εύρος ζώνης συχνοτήτων του μεταδιδόμενου σήματος είναι σχετικά μικρότερο από την ζώνη συνοχής τότε γίνεται η θεώρηση ότι το κανάλι διαλείψεων είναι επίπεδο και ότι όλες οι φασματικές συνιστώσες του μεταδιδόμενου

σήματος μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο. Η υπόθεση αυτή πληρείται για μη ευρυζωνικά σήματα ή διαφορετικά για σήματα στενής ζώνης συχνοτήτων. Στην αντίθετη περίπτωση που το μεταδιδόμενο σήμα είναι αρκετά ευρυζωνικό και το εύρος συχνοτήτων του είναι μεγαλύτερο από την ζώνη συνοχής τότε διάφορες φασματικές συνιστώσες του σήματος θα υφίστανται αποσυσχετισμένες διαλείψεις με αποτέλεσμα διαφορετικές μεταβολές στο πλάτος και την φάση τους. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε σε συχνοεπιλεκτικές διαλείψεις.

Στο πλαίσιο αυτής της διατριβής θα ασχοληθούμε με δύο κατηγορίες διαλείψεων. Η πρώτη κατηγορία είναι οι αργές διαλείψεις ή διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης και επηρεάζουν όλα τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είτε είναι εγκατεστημένα σε εξωτερικούς χώρους, είτε σε εσωτερικούς καθώς το περιβάλλον που ζει και δραστηριοποιείται ο άνθρωπος είναι γεμάτο από εμπόδια, κατασκευές και αντικείμενα. Η δεύτερη κατηγορία διαλείψεων, και η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο, είναι οι διαλείψεις που εμφανίζονται σε πολύ υψηλές συχνότητες, μεγαλύτερες από τα 10GHz, και οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού σήματος στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, θα θεωρείται σε όλες τις περιπτώσεις ότι το κανάλι διάλειψης δεν είναι συχνοεπιλεκτικό αλλά επίπεδο και επομένως δεν θα μας απασχολήσει ο χρόνος και το εύρος συνοχής για τον χαρακτηρισμό των διαλείψεων.

Όπως αναφέρθηκε συνοπτικά και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, ο λόγος που επιλέχθηκαν οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας είναι τριπλός. Αρχικά όλα τα δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε ζώνες ανθρώπινης δραστηριότητας παρεμβάλλονται από ανθρώπινες κατασκευές και εμπόδια που προκαλούν τέτοιου είδους διαλείψεις. Επομένως, είναι μη ρεαλιστικό να μην λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο των αργών διαλείψεων. Επιπλέον, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας ή γρήγορες διαλείψεις αναφέρονται σε χρήστες που κινούνται ή σε περιβάλλοντα που μεταβάλλεται γρήγορα η τοπολογία τους. Στα περισσότερα ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα οι χρήστες εμφανίζουν είτε μηδενική είτε χαμηλή κινητικότητα ενώ τις περισσότερες φορές ο περιβάλλον χώρος είναι σταθερός και δεν μεταβάλλεται με ρυθμούς εφάμιλλους της χρήσης του καναλιού διάδοσης από τους χρήστες του δικτύου. Ο τρίτος λόγος είναι ότι από υπάρχουσες μελέτες έχει φανεί ότι οι αργές διαλείψεις επηρεάζουν πολύ περισσότερο την συνδεσιμότητα του δικτύου. Φυσικά, εδώ πρέπει να τονιστεί ότι σε συγκεκριμένες κατηγορίες ασυρμάτων πολυβηματικών δικτύων, όπου οι κόμβοι έχουν έντονη κινητικότητα ή είναι οχήματα (Vanets-Manets δίκτυα), επιβάλλεται η αξιολόγηση και των γρήγορων διαλείψεων ως προς την συνδεσιμότητα του δικτύου [YAE<sup>+</sup>08].

## 2.6.2 Διαλείψεις λόγω σκίασης

Τα απλά μοντέλα απωλειών διάδοσης αναφέρονται σε μέσες τιμές και δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι το περιβάλλον μπορεί να είναι τελείως διαφορετικό σε δύο περιπτώσεις όπου ο πομπός και ο δέκτης απέχουν την ίδια απόσταση. Μία από τις σημαντικότερες αιτίες στην οποία οφείλονται έντονες διακυμάνσεις τις λαμβανόμενης ισχύς για ίδιες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη είναι οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης. Η σκίαση προκαλείται από εμπόδια που υπάρχουν ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη τα οποία περιορίζουν την ισχύ του σήματος μέσω της απορρόφησης, της ανάκλασης, της διάθλασης και της περίθλασης. Ανθρώπινες κατασκευές, κτίρια, μεγάλα εμπόδια και μεγάλα γενικά αντικείμενα είναι οι βασικοί παράγοντες που προκαλούν φαινόμενα σκίασης. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που συχνά καλούνται και διαλείψεις σκίασης (shadowing fading) δεν είναι απότομες και απόλυτες αλλά γίνονται συνήθως βαθμιαία, λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της περίθλασης. Το αποτέλεσμα είναι η λαμβανόμενη ισχύς είναι στην πραγματικότητα μία τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών που παρεμβάλλονται στην διαδρομή διάδοσης.

Ένα σήμα που μεταδίδεται μέσα σε ένα ασύρματο κανάλι, θα υποστεί μία τυχαία μεταβολή, εξαιτίας των εμποδίων που υπάρχουν στη διαδρομή του σήματος, αυξάνοντας τις μεταβολές της ισχύος που λαμβάνεται σε μία δεδομένη απόσταση. Έτσι, χρειάζεται ένα μοντέλο για την τυχαία εξασθένηση. Αφού η τοποθεσία, το μέγεθος και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των αντικειμένων-εμποδίων, όπως και οι αλλαγές στις επιφάνειες αντανάκλασης και στα αντικείμενα διάθλασης, που προκαλούν την τυχαία εξασθένηση, είναι γενικώς άγνωστα, στατιστικά μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηρίσουν αυτή την εξασθένηση. Το πιο συνηθισμένο μοντέλο για αυτή την επιπλέον εξασθένηση είναι η λογαριθμοκανονική σκίαση. Αυτό το μοντέλο έχει επιβεβαιωθεί εμπειρικά από ακριβή μοντέλα, με μεταβολές στην ισχύ που λαμβάνεται τόσο σε εσωτερικά όσο και σε εξωτερικά περιβάλλοντα διάδοσης.

Μία φυσική εξήγηση της λογαριθμοκανονικής συμπεριφοράς δίνεται, αν θεωρήσουμε ότι η συνολική διαδρομή από τον πομπό στον δέκτη μπορεί να χωριστεί σε  $W$  επιμέρους διαδρομές οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα στους διάφορους σκεδαστές κατά μήκος της διαδρομής και έχουν ανεξάρτητο συντελεστή εξασθένησης  $A_i$ ,  $i=1,2,\dots,W$ . Το πολλαπλασιαστικό φαινόμενο μετατρέπεται σε αθροιστικό, μετά από την λογαρίθμηση, και με την παραδοχή ότι ο αριθμός των σκεδάστων και αντίστοιχα ο αριθμός των ενδιάμεσων διαδρομών  $W$  είναι μεγάλος, τότε, λόγω του

Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος, το λαμβανόμενο από τον δέκτη σήμα θα ακολουθεί κανονική κατανομή. Εφόσον τα λογαριθμημένα μεγέθη ακολουθούν κανονική κατανομή, με από την απολογαρίθμηση των μεγεθών θα ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή.

Στο μοντέλο λογαριθμοκανονικής σκίασης, ο λόγος της μεταδιδόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ  $\psi = P_t / P_r$ , έχει προσδιοριστεί από μία λογαριθμοκανονική κατανομή, που δίνεται ως εξής:

$$p(\psi) = \frac{\xi}{\sigma_{\psi_{dB}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(10 \log_{10} \psi - \mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma_{\psi_{dB}}^2} \right], \quad \psi > 0 \quad (2.28)$$

Όπου  $\xi = 10 / \ln 10$ ,  $\mu_{\psi_{dB}}$  είναι ο μέσος της,  $\psi_{dB} = 10 \log_{10} \psi$  σε dB και  $\sigma_{\psi_{dB}}$  είναι η τυπική απόκλιση του  $\psi_{dB}$ , επίσης σε dB. Ο μέσος μπορεί να βασιστεί τόσο σε αναλυτικά μοντέλα όσο και σε εμπειρικές μετρήσεις. Για εμπειρικές μετρήσεις, το  $\mu_{\psi_{dB}}$  ισούται με την εμπειρική απώλεια διαδρομής, καθώς η μέση εξασθένιση από την σκίαση είναι ήδη ενσωματωμένη στις μετρήσεις. Για αναλυτικά μοντέλα, η  $\mu_{\psi_{dB}}$  πρέπει να συμπεριλάβει και την απώλεια διαδρομής και την μέση εξασθένιση. Αλλιώς, η απώλεια διαδρομής μπορεί να ληφθεί υπόψη ξεχωριστά από την σκίαση. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν το  $\psi$  είναι λογαριθμοκανονικό, η λαμβανόμενη ισχύ και ο δέκτης SNR είναι επίσης λογαριθμοκανονικοποιημένα μεγέθη, αφού είναι απλώς σταθερά πολλαπλάσια του  $\psi$ . Για τον δέκτη SNR, ο μέσος και η τυπική απόκλιση αυτής της λογαριθμοκανονικής τυχαίας διακύμανσης είναι επίσης σε dB. Για την λογαριθμοκανονική ισχύ που λαμβάνεται, αφού η τυχαία μεταβολή έχει μονάδες ισχύος, ο μέσος και η τυπική της απόκλιση είναι σε dBm ή dBW αντί για dB. Ο μέσος του  $\psi$  (το μέσο γραμμικό κέρδος διαδρομής) μπορεί να προκύψει [Gol05]:

$$\mu_{\psi} = E(\psi) = \exp \left[ \frac{\mu_{\psi_{dB}}}{\xi} + \frac{\sigma_{\psi_{dB}}^2}{2\xi^2} \right] \quad (2.29)$$

Η μετατροπή από τον γραμμικό μέσο στον λογαριθμικό μέσο (σε dB) προέρχεται από την παραπάνω εξίσωση ως εξής:

$$10 \log_{10} \psi = \mu_{\psi_{dB}} + \frac{\sigma_{\psi_{dB}}^2}{2\xi} \quad (2.30)$$

Η απόδοση στην λογαριθμοκανονική σκίαση είναι παραμετροποιήσιμη από το λογαριθμικό μέσο  $\mu_{\psi_{dB}}$ , το οποίο αναφέρεται ως η μέση απώλεια διαδρομής και είναι σε μονάδες dB. Με μία αλλαγή των μεταβλητών βλέπουμε ότι η κατανομή του  $\psi$  σε dB είναι κατανομή Gauss με μέσο  $\mu_{\psi_{dB}}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_{\psi_{dB}}$ :

$$p(\psi_{dB}) = \frac{1}{\sigma_{\psi_{dB}} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\psi_{dB} - \mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma_{\psi_{dB}}^2} \right] \quad (2.31)$$

Η λογαριθμοκανονική κατανομή ορίζεται από δύο παραμέτρους:  $\mu_{\psi_{dB}}$  και  $\sigma_{\psi_{dB}}$ . Αφού  $\psi = P_t / P_r$  είναι πάντα μεγαλύτερο της μονάδας, το  $\mu_{\psi_{dB}}$  είναι μεγαλύτερο ή ίσο του μηδενός. Σημειώνουμε ότι το  $\psi$  παίρνει τιμές  $0 \leq \psi \leq \infty$ . Έτσι, για  $\psi < 1$ ,  $P_r > P_t$ , το οποίο είναι φυσικά αδύνατο. Ωστόσο, αυτή η πιθανότητα θα είναι πολύ μικρή όταν το  $\mu_{\psi_{dB}}$  είναι μεγάλο και θετικό. Το λογαριθμοκανονικό μοντέλο προσεγγίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια όταν το  $\mu_{\psi_{dB}} \gg 0$ .

Τα μοντέλα που περιγράφουν την απώλεια διαδρομής μπορούν να συνδυαστούν με το προαναφερθέν μοντέλο σκίασης. Το συνδυαστικό μοντέλο που θα προκύψει μπορεί να έχει δύο ισοδύναμες μορφές: Στην πρώτη περίπτωση ο λόγος της εκπεμπόμενης προς την λαμβανόμενη ισχύ, που είναι ουσιαστικά η απόσβεση του σήματος κατά την διάδοση του, αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή  $X$  που ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή του καναλιού διάλειτουργίας με μέση τιμή  $\mu_{\psi_{dB}}$  την μέση απώλεια διαδρομής που χαρακτηρίζεται από το μοντέλο απώλειας διαδρομής σε dB ή την αντίστοιχη καθαρή τιμή. Επομένως ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη για την περίπτωση που χρησιμοποιείται γραμμική κλίμακα θα έχει την μορφή:

$$\gamma(r) = \frac{P_t}{N} \cdot X(\mu, \sigma) \quad (2.32)$$

Όπου  $\mu = l(r)$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma$  παίρνει τιμές ανάλογα με την μορφολογία του περιβάλλοντος διάδοσης και είναι συνήθως από 2 έως 12dB. Ενώ στην δεύτερη περίπτωση, η τυχαία μεταβλητή  $X$  που προσεγγίζει την στατιστική συμπεριφορά των διαλείψεων σκίασης μπορεί να αποτελέσει πολλαπλασιαστικό παράγοντα (για την γραμμική κλίμακα) ή αθροιστικό παράγοντα (για την λογαριθμική κλίμακα) της μέσης απόσβεσης που ορίζεται από το μοντέλο απώλειας

διαδρομής δεδομένου όμως ότι η μέση τιμή της  $X$  είναι ίση με μηδέν. Επομένως, η ισοδύναμη έκφραση της (2.32) δίνεται στην γραμμική κλίμακα από την σχέση:

$$\gamma(r) = \frac{P_t}{N} l(r) \cdot X(\mu = 0, \sigma) \quad (2.33)$$

### 2.6.3 Γενικό μοντέλο συνδεσιμότητας για διαλείψεις λόγω σκίασης

Σε αυτή την ενότητα ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα (§2.4) για να καταλήξουμε στις τελικές αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό την πιθανότητας ένας οποιοσδήποτε κόμβος να είναι απομονωμένος και την πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος εντός του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των αργών διαλείψεων λόγω σκίασης.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στις αργές διαλείψεις λόγω σκίασης ο σηματοθορυβικός λόγος και η εξασθένηση κατά μήκος της διαδρομής  $x$  ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή στην γραμμική κλίμακα που δίνεται από την σχέση:

$$f_{l_r}(z | x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln z - \ln(Kx^{-a})}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.34)$$

Όπου  $\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής που αντιστοιχεί στην γκαουσιανή τυπική απόκλιση  $\sigma = (\ln 10 / 10) \sigma_{\psi_{dB}}$  όταν το φαινόμενο των διαλείψεων σκίασης μελετάται στην λογαριθμική κλίμακα (dB). Η μέση τιμή της κατανομής είναι ίση με την απόσβεση λόγω απωλειών διαδρομής  $\mu = l(x) = Kx^{-a}$ . Έχει αποδειχθεί ότι η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής της εμβέλειας  $R$  ενός κόμβου ακολουθεί την ίδια κατανομή με την απόσβεση και το σηματοθορυβικό λόγο. Επομένως η μέση τιμή του τετραγώνου της ακτίνας εμβέλειας θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E(R^2) = \int_0^{+\infty} r^2 f_R(r) dr = \int_0^{+\infty} 2rP(R > r) dr \quad (2.35)$$



Το δεύτερο μέλος της εξίσωσης προκύπτει από την παρακάτω ιδιότητα, ενώ  $R > 0$ :

$$E(|X|^a) = a \int_0^{+\infty} t^{a-1} P(|X| > t) dt, \quad a > 0 \quad (2.36)$$

Επομένως, προκύπτει εν συνεχεία:

$$\begin{aligned} E(R^2) &= \int_0^{+\infty} 2r \left[ 1 - F_{l|r} \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t} | r \right) \right] dr = \\ &= \int_0^{+\infty} 2r dr \int_{\frac{N\gamma_{th}}{P_t}}^{+\infty} dz \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln z - \ln(Kr^{-a})}{\sigma} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.37)$$

Με την αντικατάσταση:

$$y = \frac{\ln z - \ln(Kr^{-a})}{\sigma} = \frac{\ln(zr^a/K)}{\sigma} \quad (2.38)$$

Προκύπτει:

$$E(R^2) = \int_0^{+\infty} 2r dr \int_{\ln\left(\frac{N\gamma_{th}r^a}{P_t K}\right)}^{+\infty} dy \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{y^2}{2} \right] \quad (2.39)$$

Επειδή τα δύο ολοκληρώματα συγκλίνουν απόλυτα, είναι δυνατή η εφαρμογή του θεωρήματος Fubini με αποτέλεσμα η (2.39) να πάρει την μορφή:

$$\begin{aligned} E(R^2) &= \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_0^{\left(\frac{e^{\sigma y} P_t K}{N\gamma_{th}}\right)^{\frac{1}{a}}} 2r \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{y^2}{2} \right] dr = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} dy \left( \frac{e^{\sigma y} P_t K}{N\gamma_{th}} \right)^{\frac{2}{a}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{y^2}{2} \right] = \\ &= \left( \frac{P_t K}{N\gamma_{th}} \right)^{\frac{2}{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} dy \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{y^2}{2} + \frac{2\sigma y}{a} \right] \end{aligned} \quad (2.40)$$

Το ολοκλήρωμα όμως αυτό υπολογίζεται αναλυτικά από [GR83]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dy \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{y^2}{2} \pm \beta x\right] = \exp\left[\frac{\beta^2}{2}\right] \quad (2.41)$$

Οπότε η (2.40) γίνεται:

$$E(R^2) = \left(\frac{P_t K}{N \gamma_{th}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} e^{\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{\alpha}\right)^2} \quad (2.42)$$

Ενώ η πιθανότητα απομόνωσης θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-\rho \pi \left(\frac{P_t K}{N \gamma_{th}}\right)^{\frac{2}{\alpha}} e^{\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{\alpha}\right)^2}} \quad (2.43)$$

Η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος μέσα στο δίκτυο  $P(C)$  προκύπτει με αντικατάσταση της  $P_{iso}$  στην σχέση (2.14). Από την παραπάνω σχέση γίνεται φανερό ότι η ύπαρξη ισχυρών διαλείψεων μεγάλης κλίμακας που μεταφράζονται με μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της πιθανότητας απομόνωσης και κατ' επέκταση βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Μία ποιοτική εξήγηση του φαινομένου αυτού είναι ότι λόγω των διαλείψεων σκίασης εμφανίζονται συνδέσεις με πιο απομακρυσμένους κόμβους που σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση δεν θα ήταν εφικτές και αυτές συμβάλλουν περισσότερο στην αποκατάσταση της συνδεσιμότητας παρά οι πιο κοντινές συνδέσεις που χάνονται πάλι λόγω του φαινομένου της σκίασης. Αναλυτικότερα συμπεράσματα προκύπτουν και θα παρουσιαστούν στις ακόλουθες ενότητες με τα αριθμητικά αποτελέσματα.

#### 2.6.4 Νέο γενικευμένο μοντέλο συνδεσιμότητας για διαλείψεις λόγω σκίασης

Αντίστοιχα με την προηγούμενη ενότητα, ακολουθεί η μεθοδολογία για τον αναλυτικό υπολογισμό των πιθανοτήτων απομόνωσης ενός κόμβου αλλά και μη ύπαρξης απομονωμένου κόμβου βάσει του νέου από εμάς γενικευμένου μοντέλου [Π1], που παρουσιάστηκε στην ενότητα (§2.5), λαμβάνοντας υπόψη περιβάλλοντα

διάδοσης με σκίαση. Από την σχέση (2.18) γίνεται φανερό ότι απαιτείται η εύρεση της χωρικής κατανομής  $f_R(r)$  και της διαθεσιμότητας της σύνδεσης για δεδομένη απόσταση  $P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r]$ . Η  $f_R(r)$  έχει αποδειχθεί ότι δίνεται από την (2.23). Ενώ για το λογαριθμικοκανονικό κανάλι διάλειψης εξαιτίας σκίασης θα ισχύει:

$$P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r] = 1 - F_{lr} \left( \frac{N\gamma_{th} R^a}{P_t K} | r \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln \left( \frac{N\gamma_{th} r^a}{P_t K} \right)}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (2.44)$$

Επομένως η σχέση (2.18) λαμβάνει την μορφή:

$$f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th}) = \frac{\operatorname{erfc} \left( \ln \left( \frac{N\gamma_{th} r^a}{P_t K} \right) / \sqrt{2}\sigma \right) \cdot \frac{r}{R_A^2}}{\int_0^\infty \operatorname{erfc} \left( \ln \left( \frac{N\gamma_{th} r^a}{P_t K} \right) / \sqrt{2}\sigma \right) \cdot \frac{r}{R_A^2} dr} \quad (2.45)$$

Αρχικά δίνεται η λύση του ολοκληρώματος στον παρανομαστή η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα Α για  $\nu=1$ :

$$\int_0^\infty \operatorname{erfc} \left( \ln \left( \frac{N\gamma_{th} r^a}{P_t K} \right) / \sqrt{2}\sigma \right) \cdot r dr = \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t K} \right)^{-\frac{2}{\alpha}} e^{\left( \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} \right)^2} \quad (2.46)$$

Τελικά η υπό συνθήκη κατανομή  $f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th})$  θα δίνεται από την σχέση:

$$f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th}) = r \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t K} \right)^{\frac{2}{\alpha}} e^{-\left( \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} \right)^2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln \left( \frac{N\gamma_{th} r^a}{P_t K} \right)}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (2.47)$$

Η κατανομή αυτή αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ δύο υπαρκτών γειτονικών κόμβων που μπορεί να «ακούει» ο ένας τον άλλο και να ανταλλάσσουν πληροφορίες. Αυτό συνεπάγεται ότι από όλους τους κόμβους που βρίσκονται σχετικά κοντά στον κόμβο αναφοράς η κατανομή συμπεριλαμβάνει μόνο το σύνολο των κόμβων που

μπορούν να επικοινωνήσουν με τον κόμβο αναφοράς και όχι με εκείνους που ενώ χωρικά δείχνουν να είναι γειτονικοί από την άλλη δεν ισχύει  $\gamma(r) \geq \gamma_{th}$ . Με χρήση της κατανομής μπορεί να υπολογιστεί ο μέσος αριθμός των γειτονικών κόμβων  $E(d)$  που συμβάλλουν στην συνδεσιμότητα του δικτύου όπως από την σχέση:

$$\begin{aligned} E(d) &= \rho\pi E\left[R^2 \mid \gamma \geq \gamma_{th}\right] = \rho\pi \int_0^{+\infty} r^2 f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r \mid \gamma \geq \gamma_{th}) dr \Rightarrow \\ &= \rho\pi \left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K}\right)^{\frac{2}{\alpha}} e^{-\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{a}\right)^2} \int_0^{+\infty} r^3 \operatorname{erfc}\left(\ln\left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K} r^a\right) / \sqrt{2}\sigma\right) dr \end{aligned} \quad (2.48)$$

Το ολοκλήρωμα σε αυτή την σχέση είναι αντίστοιχο με το προηγούμενο ολοκλήρωμα και η λύση του (βλέπε Παράρτημα Α) για  $v = 3$  είναι:

$$\int_0^{\infty} \operatorname{erfc}\left(\ln\left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K} r^a\right) / \sqrt{2}\sigma\right) \cdot r^3 dr = \frac{1}{2} \left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K}\right)^{-\frac{4}{\alpha}} e^{4\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{a}\right)^2} \quad (2.49)$$

Επομένως ο μέσος αριθμός γειτονικών κόμβων θα δίνεται από την τελική σχέση:

$$E(d) = \frac{\rho\pi}{2} \left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K}\right)^{-\frac{2}{\alpha}} e^{3\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{a}\right)^2} \quad (2.49)$$

Αντίστοιχα, η πιθανότητα απομόνωσης θα δίνεται από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-\frac{\rho\pi}{2} \left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K}\right)^{-\frac{2}{\alpha}} e^{3\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{a}\right)^2}} \quad (2.50)$$

Και η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος από την σχέση:

$$P(B) = e^{-\lambda P_{iso}} = e^{-\lambda \cdot e^{-\frac{\rho\pi}{2} \left(\frac{N\gamma_{th}}{P_t K}\right)^{-\frac{2}{\alpha}} e^{3\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{a}\right)^2}}} \quad (2.51)$$

Η τελική λύση (2.50) έχει αρκετές ομοιότητες με την (2.43) που υπολογίζει την πιθανότητα απομόνωσης βάσει του γενικού μοντέλου για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας παρότι λαμβάνει υπόψη την χωρική κατανομή των κόμβων που

βρίσκονται πλησίον του κόμβου αναφοράς και θα μπορούσαν εν δυνάμει να αποτελούν γείτονες του και να συμβάλλουν στην συνδεσιμότητα του δικτύου. Παρατηρώντας επίσης και τις δύο σχέσεις εύκολα καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι αν τα χαρακτηριστικά μετάδοσης παραμείνουν σταθερά τότε αύξηση της τυπικής απόκλισης της λογαριθμοκανονικής κατανομής που ισοδυναμεί με αύξηση των διαλείψεων σκίασης οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας απομόνωσης και αύξηση της συνδεσιμότητας.

## 2.7 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

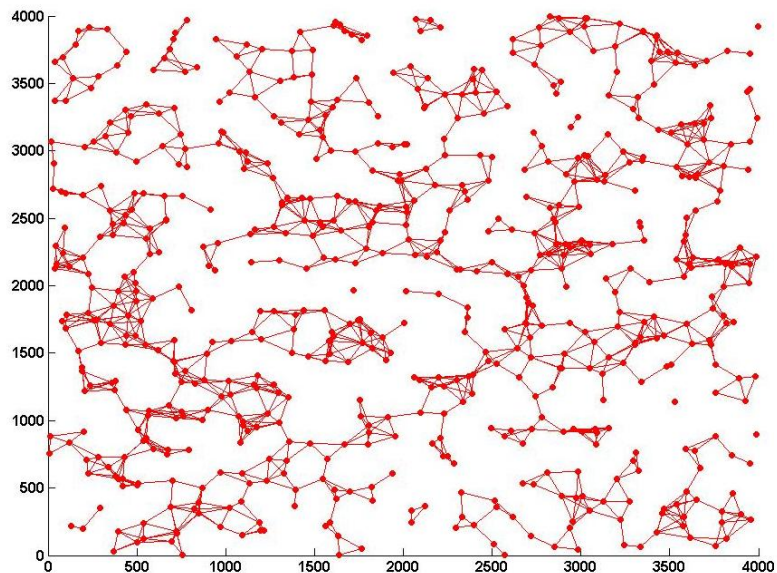
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν αριθμητικά αποτελέσματα αναφορικά με την πιθανότητα απομόνωσης, που είναι ένα από το πιο διαδεδομένα μετρικά μεγέθη για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, αλλά και την πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος μέσα στο δίκτυο, ένα μέγεθος για το οποίο όπως δείξαμε σε προηγούμενη ενότητα προσεγγίζει σε ομογενή κατανομημένο δίκτυο την πραγματική πιθανότητα να είναι συνδεδεμένο.

Τα αποτελέσματα αναφέρονται στο νέο γενικευμένο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής, ενώ υπάρχουν συγκριτικά διαγράμματα με το γενικό μοντέλο για την αξιολόγηση του. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση των διαλείψεων σκίασης μέσω της μεταβλητής της τυπικής απόκλισης της λογαριθμοκανονικής κατανομής, η επίδραση των απωλειών διάδοσης μέσω του συντελεστή απωλειών και της χωρικής κατανομής του δικτύου μέσω της πυκνότητας των κόμβων του δικτύου  $\rho$  και της παραμέτρου  $\lambda$ .

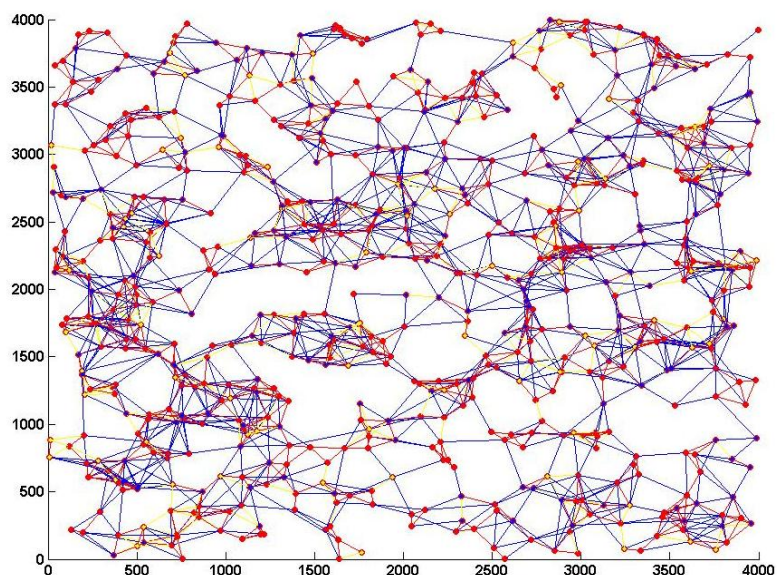
Στα σχήματα 2.4 και 2.5 φαίνεται η μορφή που έχει ένα ασύρματο πολυβηματικό δίκτυο όταν δεν υπάρχει η επίδραση των διαλείψεων σκίασης παρά μόνο οι απώλειες διάδοσης (σχήμα 2.4) και όταν συμπεριλαμβάνεται η επίδραση των αργών διαλείψεων μαζί με τις απώλειες διάδοσης (σχήμα 2.5). Όπως γίνεται φανερό, εξαιτίας των περιθλάσεων και ανακλάσεων που προκαλούν τα σκεδάζοντα εμπόδια και αντικείμενα, εμφανίζονται αρκετές συνδέσεις μεγαλύτερων αποστάσεων από αυτές που κανονικά είναι δυνατές και χάνονται κάποιες κοντινότερες συνδέσεις λόγω της παρεμβολής κάποιου εμποδίου.

Σαν πρώτο στάδιο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας παρουσιάζονται γραφικά αποτελέσματα για την επίδραση των διαφόρων παραγόντων του καναλιού διάδοσης στην συνδεσιμότητα του δικτύου. Από την σχέση (2.50) καθώς και με εφαρμογή της στην σχέση (2.8) μπορούν να υπολογιστούν εύκολα οι πιθανότητες απομόνωσης ενός

κόμβου και μη ύπαρξης απομονωμένου κόμβου εντός του δικτύου αν τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης αλλά και μετάδοσης είναι γνωστά.



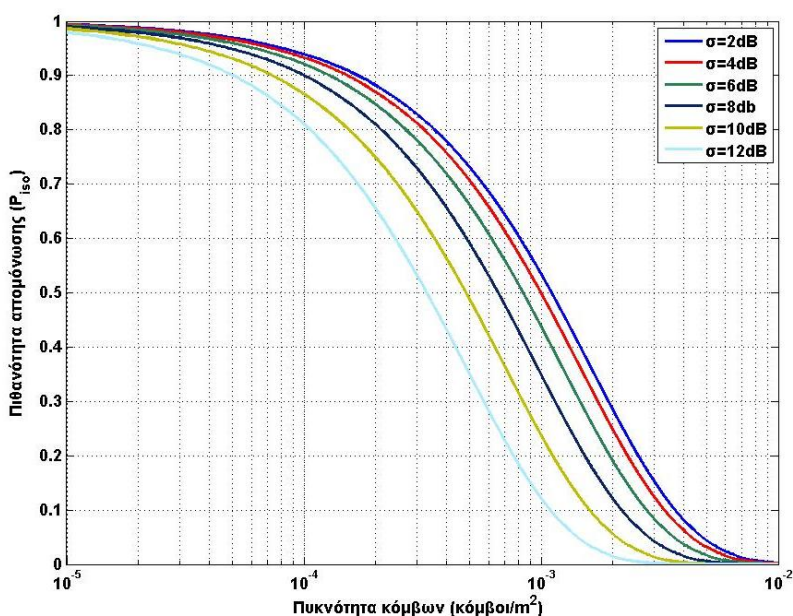
Σχήμα 2.4: Τοπολογία δικτύου σε χώρο  $A = 4000 \times 4000 \text{m}^2$  χωρίς να λαμβάνεται υπόψη οι διαλείψεις λόγω σκίασης αλλά μόνο οι απώλειες διαδρομής.



Σχήμα 2.5: Το αντίστοιχο δίκτυο με το σχήμα 2.4 όπου στις συνδέσεις που υπολογίζονται αρχικά λόγω των απωλειών διαδρομής (κόκκινες γραμμές) γίνεται προσθήκη επιπλέον συνδέσεων που εμφανίστηκαν λόγω του φαινομένου των διαλείψεων σκίασης (μπλε γραμμές) και αφαιρούνται από τις υπάρχοντες συνδέσεων αυτές που λόγω των διαλείψεων σκίασης δεν μπορούν να συνεχίσουν να υπάρχουν (κίτρινες γραμμές).

Για όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα που ακολουθούν ισχύουν οι εξής παραδοχές για τις τιμές των μεγεθών:  $P_t = 1mWatt$ ,  $N = 0.001mWatt$ ,  $\gamma_{th} = 10dB$ ,  $K = 10$ . Για τις περιπτώσεις που δεν αναφέρετε οι τιμές των υπολοίπων μεγεθών είναι:  $\sigma = 4dB$  και  $a = 3.5$ . Οι παραπάνω τιμές επιλέχθηκαν ύστερα από αναζήτηση στην αντίστοιχη βιβλιογραφία [MA05] και θεωρούνται κατάλληλες για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

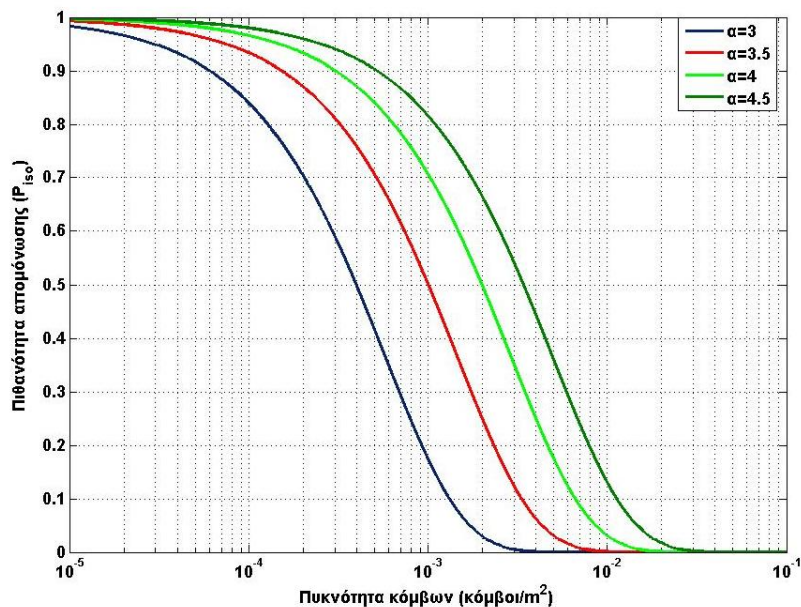
Για να χαρακτηριστεί ένα δίκτυο ως συνδεδεμένο πρέπει η πιθανότητα απομόνωσης να έχει τιμές κοντά στο μηδέν. Επομένως, σαν μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας έχει την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά. Όσο πιο γρήγορα τείνει η πιθανότητα απομόνωσης στο μηδέν τόσο καλύτερη συνδεσιμότητα έχει ένα δίκτυο.



Σχήμα 2.6: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της λογαριθμικής κατανομής.

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται αποτελέσματα της πιθανότητας απομόνωσης συναρτήσει της τυπικής απόκλισης της λογαριθμοκανονικής κατανομής του καναλιού σκίασης. Είναι εμφανές από το σχήμα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής, δηλαδή όσο εντονότερα είναι τα φαινόμενα των αργών διαλείψεων, τόσο καλύτερα συμπεριφέρεται η συνδεσιμότητα του δικτύου. Αυτή την συμπεριφορά είχαμε αναφέρει και θεωρητικά στην ενότητα (§2.6.3) από τον χαρακτηρισμό της συνάρτησης της πιθανότητας απομόνωσης. Ποιοτικά, μπορεί να εξηγηθεί βάσει της διαπίστωσης ότι λόγω των ανακλάσεων και σκεδάσεων εμφανίζονται πιο απομακρυσμένες συνδέσεις που γενικά ευνοούν την συνδεσιμότητα. Ένα επιπλέον σχόλιο αναφορικά με τα αποτελέσματα του σχήματος 2.6 είναι ότι

καθώς αυξάνεται η τυπική απόκλιση η βελτίωση της πιθανότητα απομόνωσης αυξάνεται αλλά όχι με γραμμικό τρόπο. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί με παρατήρηση της σχέσης (2.50).



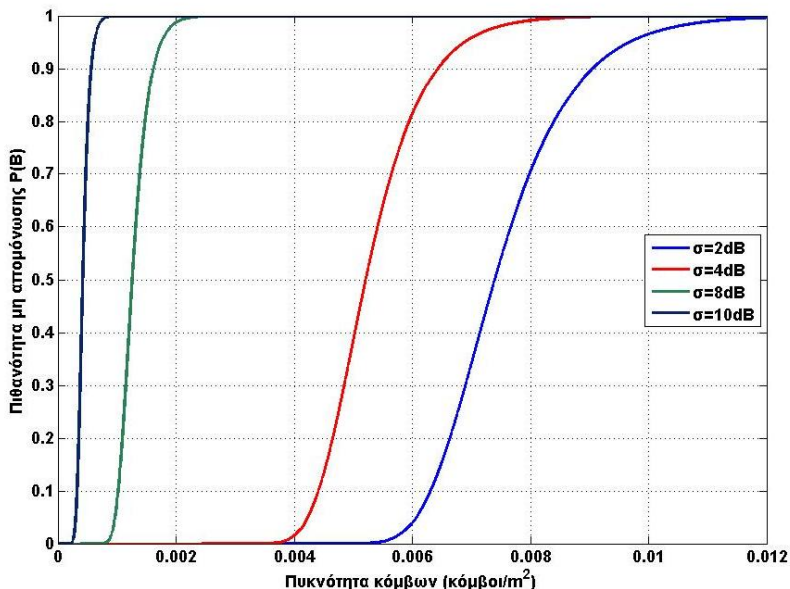
Σχήμα 2.7: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης.

Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η επίδραση του συντελεστή απωλειών διάδοσης στην πιθανότητα απομόνωσης ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου. Παρότι, η αύξηση των διαλείψεων σκίασης οδηγεί σε βελτίωση της συνδεσιμότητας προφανώς δεν ισχύει το ίδιο για τις εξασθενήσεις κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης. Οι μεγάλης κλίμακας διαλείψεις είναι ένα φαινόμενο που λειτουργεί άλλες φορές θετικά και άλλες φορές αρνητικά κατά μήκος μίας σύνδεσης επικοινωνίας ενώ αντιθέτως οι εξασθενήσεις οδηγούν πάντα σε υποβάθμιση της επικοινωνίας. Το βασικότερο όμως συμπέρασμα που προέκυψε κατά την εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι ότι οι απώλειες διάδοσης, κυρίως μέσω του συντελεστή τους, έχουν την μεγαλύτερη δυνατή επίδραση πάνω στην συνδεσιμότητα του δικτύου.

Αντίθετα με την πιθανότητα απομόνωσης ενός κόμβου, η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος μέσα στο δίκτυο, που από δω και πέρα θα την ονομάζουμε και πιθανότητα μη απομόνωσης πιο σύντομα, ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά με την συνδεσιμότητα του δικτύου. Η βασική διαφορά για τον υπολογισμό της είναι ότι πρέπει εκ των προτέρων να είναι γνωστός ο αριθμός των κόμβων που απαρτίζουν το δίκτυο. Ο αριθμός αυτός υπολογίζεται λόγω της Poisson

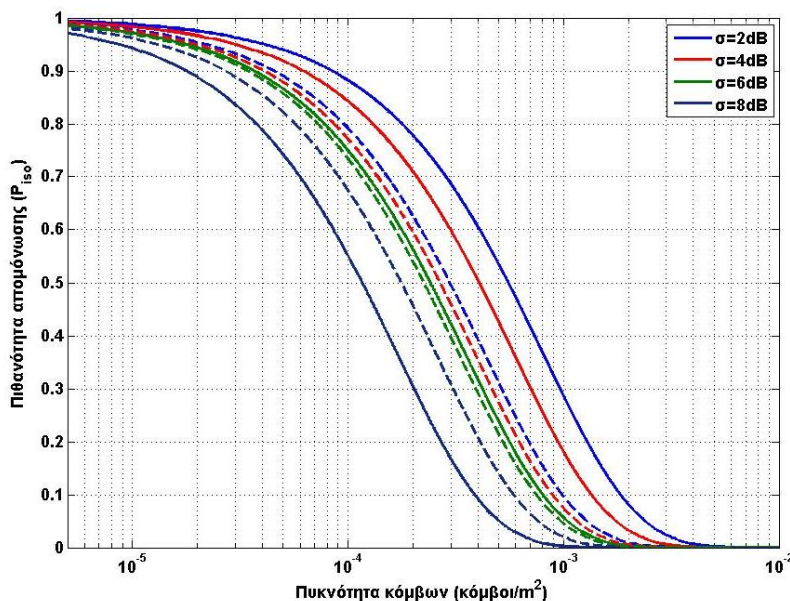


κατανομής των κόμβων ως  $E(N) = \rho A$ , όπου για τα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρήθηκε  $A = 10^6 m^2$ .



Σχήμα 2.8: Η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος εντός του δικτύου συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της λογαριθμικής κατανομής.

Η εξάρτηση της πιθανότητας μη απομόνωσης ως προς την τυπική απόκλιση της κατανομής του φαινομένου των διαλείψεων φαίνεται στο σχήμα 2.8 και δείχνει καλύτερη συμπεριφορά για μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης επιβεβαιώνοντας τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το σχήμα 2.6. Η σημαντικότερη παρατήρηση που προκύπτει από το διάγραμμα και έχει έντονο πρακτικό χαρακτήρα είναι ότι η μετάβαση από την κατάσταση όπου υπάρχουν όντως κάποιοι απομονωμένοι κόμβοι μέσα στο δίκτυο σε εκείνη που δεν υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος είναι αρκετά απότομη και εμφανίζεται για μικρές μεταβολές της πυκνότητας των κόμβων του δικτύου. Το συμπέρασμα αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την σχεδίαση και υλοποίηση τέτοιων δικτύων, ενώ κρίνεται επιπλέον αναγκαίο κατά την αξιολόγηση ασύρματων πολυβηματικών δικτύων πέρα από την πιθανότητα απομόνωσης να υπολογίζεται και η ελάχιστη κρίσιμη πυκνότητα που απαιτείται ώστε το δίκτυο να είναι με μεγάλη πιθανότητα συνδεδεμένο.



Σχήμα 2.9: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης όπου με την συνεχή γραμμή αναπαρίσταται το νέο μοντέλο και με την διακεκομμένη το γενικό μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας.

Όπως προτάθηκε και στην αρχή της ενότητας των αριθμητικών αποτελεσμάτων θα γίνει σύγκριση του νέου από εμάς μοντέλου με το γενικότερα αποδεκτό μοντέλο που υπάρχει και στην βιβλιογραφία και αναλύθηκε στην ενότητα (§2.6.3). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.9 για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της κατανομής των διαλείψεων. Με συνεχή γραμμή παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του νέου μοντέλου και με διακεκομμένη οι γραφικές παραστάσεις του γενικού μοντέλου. Φαίνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση η ύπαρξη διαλείψεων ευνοεί την συνδεσιμότητα. Παρόλο όμως που παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων σε καμία περίπτωση δεν ταυτίζονται. Ο βασικός λόγος είναι ότι παρότι οι εξισώσεις (2.50) και (2.43) από τις οποίες έχουν προκύψει τα αποτελέσματα μοιάζουν ιδιαίτερα διαφοροποιούνται ως προς τους συντελεστές των παραμέτρων τους. Στην περίπτωση του νέου μοντέλου οι αποστάσεις μεταξύ των γραφικών παραστάσεων είναι αρκετά μεγαλύτερες από ότι στο γενικό μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λαμβάνεται υπόψη η χωρική κατανομή των γειτονικών κόμβων για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού γειτόνων  $E(d)$  και όχι απλά η μέση τιμή τους που αντιστοιχεί στην περιοχή κάλυψης του κόμβου αναφοράς. Οπότε, καθώς αυξάνεται η εμβέλεια ενός κόμβου ως προς μία κατεύθυνση αυξάνεται και η πιθανότητα να υπάρχει στην πραγματικότητα γειτονικός κόμβος με τον οποίο να μπορεί να συνδεθεί ενώ όσο πιο μικρή είναι η ακτίνα εμβέλειας μειώνεται αντίστοιχα και η πιθανότητα να βρεθεί τόσο κοντά κάποιος γειτονικός κόμβος.

Από τις γραφικές παραστάσεις γίνεται φανερό ότι για τις χαμηλότερες τιμές της τυπικής απόκλισης ( $\sigma = 2dB, 4dB$ ) το νέο μοντέλο κάνει χειρότερη εκτίμηση για την τιμή της πιθανότητας απομόνωσης σε σχέση με το γενικό μοντέλο ενώ για υψηλότερες τιμές της τυπικής απόκλισης ( $\sigma > 8dB$ ) το νέο μοντέλο κάνει καλύτερη εκτίμηση για την τιμή της πιθανότητας απομόνωσης. Για την τιμή μάλιστα όπου ( $\sigma = 6dB$ ) τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων ταυτίζονται οριακά.

## 2.8 Κρίσιμη πυκνότητα κόμβων για την συνδεσιμότητα

Όπως αναφέραμε και κατά την εξαγωγή των συμπερασμάτων από τα γραφικά αποτελέσματα κρίνεται αναγκαίο πέρα από τον χαρακτηρισμό της συνδεσιμότητας βάσει της πιθανότητας απομόνωσης ενός κόμβου, ή την αντίστοιχη πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας κόμβος απομονωμένος, να υπολογίζεται και η κρίσιμη πυκνότητα των κόμβων του δικτύου για την οποία μπορεί να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα στα απαιτούμενα επίπεδα βάσει των λειτουργικών προδιαγραφών των κόμβων. Από την (2.51) έχουμε:

$$P(B) = e^{-\rho\Lambda \cdot e^{-\rho E(d)}} \quad (2.52)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η επιθυμητή πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας κόμβος απομονωμένος και να θεωρείται το δίκτυο συνδεδεμένο είναι ίση με  $t$  τότε η (2.15) πρέπει να λυθεί ως προς  $\rho$  και το αποτέλεσμα αποτελεί την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας κόμβων. Γενικά, οι εξισώσεις της μορφής:

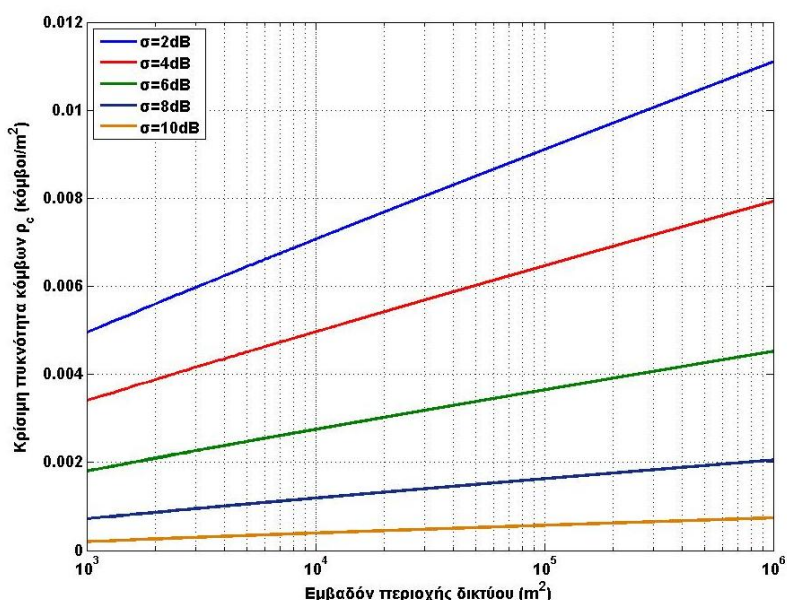
$$f(x) = W(x)e^{W(x)} \quad (2.53)$$

λύνονται με την βοήθεια της συνάρτησης Lambert (W) η οποία όμως δεν είναι μονοσήμαντη σε όλο το διάστημα ορισμού της. Συγκεκριμένα, στο διάστημα  $-1/e \leq x < 0$  η συνάρτηση Lambert (W) δίνει δύο λύσεις για αυτό χρειάζεται να επιλεγεί ένας από τους δύο κλάδους που την ορίζουν για να είναι η  $W(x)$  μία καλώς ορισμένη συνάρτηση και να έχει μονοσήμαντη λύση.

Επιλέγοντας τον μη κύριο κλάδο της που συμβολίζεται με  $w_{-1}(\cdot)$  καταλήγουμε στην ακόλουθη λύση που μπορεί να υπολογιστεί από οποιοδήποτε μαθηματικό πρόγραμμα:

$$\rho_c = -\frac{1}{E(d)} w_{-1}\left(\frac{E(d) \cdot \ln t}{A}\right) \quad (2.53)$$

Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της κρίσιμης πυκνότητα που πρέπει να έχουν οι κόμβοι ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου σε περιβάλλον διαλείψεων σκίασης για πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας κόμβος απομονωμένος ίση με 99% ( $t=0.99$ ). Η πυκνότητα αυτή είναι φυσικά και η ελάχιστη απαιτούμενη για να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο για αυτό και πολλές φορές θα χρησιμοποιηθεί αυτός ο χαρακτηρισμός ως ισοδύναμος με την κρίσιμη πυκνότητα.



Σχήμα 2.10: Η κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_c$  των κόμβων του δικτύου για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της κατανομής των διαλείψεων σκίασης συναρτήσει του εμβαδού της περιοχής  $A$  που καταλαμβάνει το δίκτυο.

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι καθώς το εμβαδόν  $A$  της περιοχής που καταλαμβάνει το δίκτυο μεγαλώνει, αυξάνεται ταυτόχρονα και η τιμή της ελάχιστης πυκνότητας για να μπορεί να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα. Επιπλέον, όπως συμπεράναμε και από προηγούμενα αποτελέσματα για συνθήκες όπου η πιθανότητα απομόνωσης τείνει πιο γρήγορα στο μηδέν απαιτείται μικρότερη πυκνότητα κόμβων για να επιτευχθεί η απαραίτητη συνδεσιμότητα εντός του δικτύου. Η πρακτική χρήση ενός διαγράμματος της παρακάτω μορφής είναι ο καθορισμός της ελάχιστης

απαιτούμενης πυκνότητας του δικτύου αν είναι έστω και προσεγγιστικά γνωστά η έκταση του δικτύου και τα βασικά χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης.

## 2.9 Συμπεράσματα

Στο κεφαλαίο αυτό έγινε μια πρώτη αναφορά στην έννοια της συνδεσιμότητας και στον τρόπο που μπορεί να μοντελοποιηθεί η μορφή και η τοπολογία ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου χρησιμοποιώντας μαθηματικά εργαλεία και μεθοδολογίες της χωρικής ανάλυσης. Εν συνεχεία, μετά από μια σύντομη περιγραφή της μεθοδολογίας των τυχαίων σημείων Poisson και του Poisson Boolean μοντέλου παρουσιάστηκε αναλυτικά η γενική μεθοδολογία μοντελοποίησης και υπολογισμού της συνδεσιμότητας ενός δικτύου στο φυσικό του επίπεδο. Η μεθοδολογία αυτή αποτέλεσε την βάση του νέου μοντέλου που εισάγει την χωρική κατανομή των γειτονικών κόμβων στην μέθοδο υπολογισμού της συνδεσιμότητας για την λήψη αρτιότερων αποτελεσμάτων. Το μοντέλο παρότι είναι γενικό αξιολογείται για την περίπτωση ύπαρξης στο κανάλι διάδοσης διαλείψεων μεγάλης κλίμακας που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης. Χρήσιμα συμπεράσματα λαμβάνονται για την επίδραση των διαλείψεων στην συνδεσιμότητα του δικτύου ενώ παράλληλα το νέο συγκρίνεται με το υπάρχον για τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας.



## Κεφάλαιο 3

# Βελτίωση συνδεσιμότητας με χρήση μεθόδων διαφορισμού

### 3.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση μεθόδων διαφορικής λήψης σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε εσωτερικούς χώρους και που λειτουργούν πχ. στην περιοχή συχνοτήτων των 60GHz με σκοπό την βελτίωση της συνδεσιμότητας τους [Σ1]. Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για γρήγορες ταχύτητες στις ευρυζωνικές τεχνολογίες και κατ' επέκταση για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης έχει οδηγήσει στην ανάγκη χρήσης όλο και υψηλότερων συχνοτήτων. Στο εύρος συχνοτήτων 10-66GHz που ορίζεται από το IEEE 802.16 πρότυπο [802.16a] παρέχεται μια οικονομικώς αποδοτική λύση για όλα τα είδη των ασύρματων πολυβηματικών δικτύων. Σε αυτό το εύρος συχνοτήτων εξακολουθούν να υπάρχουν ελεύθερες μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, οι οποίες παρέχουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τις ανάγκες οποιασδήποτε εφαρμογής που σχετίζεται με ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Υπάρχουν επίσης μια σειρά από νέα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών, τα οποία εκμεταλλεύονται νέες στρατηγικές προκειμένου να αυξηθεί η διαθεσιμότητα του ραδιοφάσματος για μελλοντικές ασύρματες εφαρμογές [Fis07]. Σε αυτά τα συστήματα πραγματοποιείται χρήση του εύρους ζώνης των 60GHz για τις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων που απαρτίζουν το δίκτυο. Η χρήση αυτών των συχνοτήτων επιτρέπει μεταδόσεις με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης επιτυγχάνοντας παράλληλα μειωμένο κόστος μεταφοράς ανά bit. Επιπλέον, παρέχει την απαραίτητη λειτουργικότητα για να μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες των μελλοντικών υπηρεσιών και εφαρμογών.

Τα περισσότερα από τα προτεινόμενα συστήματα αναφέρονται, ανάλογα με τον ρόλο που πρέπει να επιτελέσουν και τις εφαρμογές τους, σε δίκτυα που εγκαθίστανται είτε σε περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων ή σε περιβάλλοντα εξωτερικών χώρων κυρίως αστικών περιοχών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο σχεδιασμός των ασύρματων

δικτύων να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τυχαιότητα του περιβάλλοντος διάδοσης εντός του οποίου λειτουργούν. Ο διαχωρισμός σε δίκτυα εσωτερικού χώρου και εξωτερικού είναι πάρα πολύ σημαντικός εξαιτίας των διαφορετικών μηχανισμών εξασθένησης που παρουσιάζει το μέσω διάδοσης σε τόσο υψηλές συχνότητες. Για τα δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε εσωτερικούς χώρους οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας είναι από τους βασικότερους μηχανισμούς εξασθένησης. Αντιθέτως στα δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε εξωτερικούς χώρους οι μεταδόσεις τους είναι πιο ευάλωτες σε μια σειρά από φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση των χιλιοστομετρικών ραδιοκυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας και που προκαλούν έντονες εξασθενήσεις στο μεταδιδόμενο σήμα. Αν μάλιστα θεωρηθεί ότι στο δίκτυο περιλαμβάνονται και συνδέσεις μεγαλύτερες από κάποιες εκατοντάδες μέτρα τότε κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη απευθείας σύνδεσης (οπτική επαφή) μεταξύ των δύο κόμβων που απαρτίζουν την σύνδεση γιατί οι απώλειες διάδοσης είναι πολύ μεγάλες στις υψηλές συχνότητες. Σύμφωνα λοιπόν με την υπόθεση ύπαρξης απευθείας συνδέσεων, η εξασθένηση λόγω διαλείψεων βροχής είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός επιδείνωσης και υποβάθμισης της ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος. Ένα άλλο ατμοσφαιρικό φαινόμενο που οδηγεί σε περαιτέρω επιδείνωση της ποιότητας των συνδέσεων είναι οι απώλειες λόγω οξυγόνου που συνδέονται με την συχνότητα των 60GHz. Σε αυτή την συχνότητα τα μόρια του οξυγόνου απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με αποτέλεσμα να υπάρχει αυτή η πρόσθετη εξασθένηση στο σήμα. Η βασική διαφορά με τις διαλείψεις που οφείλονται στην βροχή είναι ότι το φαινόμενο αυτό δεν παρουσιάζει στοχαστικότητα και είναι συνήθως υποδεέστερη η εξασθένηση που προσθέτει.

Το αντικείμενο αυτής της ενότητας είναι η εισαγωγή μεθόδων διαφορικής λήψης στην μεθοδολογία για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας που στόχο έχουν την βελτίωσή της. Παρότι η μεθοδολογία και οι σχέσεις που θα παρουσιαστούν είναι γενικές και ισχύουν για οποιαδήποτε λειτουργικά χαρακτηριστικά των κόμβων του δικτύου, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα μόνο για μεταδόσεις στην ζώνη συχνοτήτων των 60GHz. Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων είναι γιατί το φαινόμενο των διαλείψεων σκίασης μπορεί να αποτελέσει την βασικότερη αιτία ισχυρών διακυμάνσεων της ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος ακόμα και για συνδέσεις λίγων μέτρων. Ως συνέπεια αυτών των απότομων αλλαγών στην ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος είναι η απώλεια της συνδεσιμότητας του δικτύου και η σημαντική μείωση της απόδοσης του δικτύου.

Ως αντισταθμιστικό μέτρο για να ισοσταθμιστεί η επίδραση των ισχυρών διαλείψεων από σκίαση αλλά και των μέσων απωλειών διάδοσης στην συνδεσιμότητα του δικτύου προτείνεται η χρήση μεθόδων διαφορικής λήψης στον δέκτη κάθε



κόμβου. Στην ενότητα αυτή θα γίνει χρήση δύο βασικών μεθόδων διαφορικής λήψης: της τεχνικής Συνδυασμού με Επιλογή (Selection Combining-SC) και της τεχνικής Συνδυασμού Μέγιστου Λόγου (Maximal Ratio Combining-MRC) για την επίτευξη υψηλότερης διαθεσιμότητας στις συνδέσεις του δικτύου και κατ' επέκταση για την αύξηση της συνολικής συνδεσιμότητας [Stu01]. Επιπλέον, θα ελέγχει η συμπεριφορά της συνδεσιμότητας του δικτύου συναρτήσει των σημαντικότερων παραμέτρων του δικτύου αλλά και του μέσου διάδοσης. Τέτοιες παράμετροι είναι η τυπική απόκλιση της κατανομής των διαλείψεων σκίασης, ο συντελεστής συσχέτισης των δύο κλάδων την συνολικής ζεύξης, η ισχύς εκπομπής και οι μέσες απώλειες διάδοσης.

### 3.2 Διαθεσιμότητα καναλιού μετάδοσης

Βάσει όσων αναφερθήκαν στην εισαγωγή, γίνεται φανερό ότι η χρήση του φάσματος των 60GHz είναι αρκετά βολική για δίκτυα εσωτερικού χώρου. Σε τέτοια δίκτυα οι αποστάσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων είναι της τάξης των μερικών μέτρων ενώ οι απώλειες λόγω οξυγόνου βοηθούν στην απομόνωση των δικτύων σε σχέση με άλλα γειτονικά δίκτυα και επιτυγχάνουν την καλύτερη επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Λόγω των χαμηλών επιπέδων παρεμβολής, οι κανονισμοί της FCC επιτρέπουν μέχρι 40dBm ισοδύναμης ισοτροπικά ακτινοβολούμενης ισχύς (EIRP) που είναι αρκετά υψηλότερη από ότι σε πολλά άλλα ασύρματα συστήματα [FCC02]. Παρόλα αυτά, η ισχύς αυτή έχει περισσότερο νόημα για δίκτυα εξωτερικού χώρου παρά για εσωτερικού.

Καθώς το σήμα διαδίδεται σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου υφίσταται έντονες σκεδάσεις και περιθλάσεις που οφείλονται στην ύπαρξη εμποδίων όπως τοίχοι, δάπεδα, αντικείμενα που υπάρχουν στον εσωτερικό χώρο ενώ ακόμα και η ίδια η παρουσία ανθρώπων μπορεί να αποτελέσει πηγή σκέδασης. Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι λόγω της ιδιαίτερα υψηλής συχνότητας του διαδιδόμενου σήματος ακόμα και τα μικρά εμπόδια, τα οποία σε άλλα συστήματα το διαδιδόμενο σήμα θα τα «προσπέρναγε» χωρίς να υποστεί κάποια αλλοίωση, αποτελούν σε αυτή την περίπτωση αιτίες σκέδασης και συνεισφέρουν στην αύξηση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας. Αυτοί οι μηχανισμοί προκαλούν μεγάλη διακύμανση στην διαθεσιμότητα των συνδέσεων μεταθέτοντας την επίδραση αυτή και στην συνδεσιμότητα του δικτύου. Πέρα όμως από τους μηχανισμούς διάλειψης που προκαλούν μια έντονη διακύμανση στα χαρακτηριστικά της σύνδεσης, ανάλογα με το αν είναι αθροιστική η συνεισφορά τους στο τελικό αποτέλεσμα ή αφαιρετική, υπάρχουν και οι έντονες απώλειες διάδοσης. Αυτές εξασθενούν σημαντικά, ιδιαίτερα στους εσωτερικούς χώρους, την σχετικά περιορισμένη ισχύ εκπομπής. Η πιο προφανής λύση για να

βελτιωθεί η διαθεσιμότητα των συνδέσεων για τα αντίστοιχα λειτουργικά χαρακτηριστικά των κόμβων του δικτύου είναι η χρήση τεχνικών διαφορικής λήψης και οι δύο προτεινόμενες τεχνικές είναι αυτές του Συνδυασμού με Επιλογή (SC) και του Συνδυασμού Μέγιστου Λόγου (MRC).

Πρώτο βήμα για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας είναι να χαρακτηριστεί η συνολική διαθεσιμότητα που θα έχει μια τυχαία σύνδεση μέσα στο δίκτυο. Δεδομένου ότι θα χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές συνδυασμού με επιλογή και συνδυασμού μέγιστου λόγου για την ανάκτηση του σήματος, ο δέκτης είναι εφοδιασμένος με δύο κεραίες. Επομένως, κάθε σύνδεση θα απαρτίζεται από δύο επιμέρους απλές ζεύξεις οι οποίες είναι και έντονα συσχετισμένες. Την κάθε μία από τις ζεύξεις που απαρτίζουν την σύνδεση θα την καλούμε από εδώ και στο εξής και κλάδο της σύνδεσης. Η ύπαρξη καθενός από αυτούς τους κλάδους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης και την κατανομή που ακολουθούν οι διαλείψεις. Ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη για κάθε κλάδο της σύνδεσης  $j$  θα δίνεται σε γραμμική κλίμακα από την σχέση:

$$\gamma_j = \gamma_{p,j} X_j \quad (3.1)$$

Όπου το  $\gamma_{p,j}$  αναφέρεται στην εξασθένιση λόγω απωλειών διάδοσης και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\gamma_{p,j} = \frac{P_{t,j}}{N} K R_j^{-a} \quad (3.2)$$

το  $K$  είναι μια σταθερά που περιλαμβάνει τις απώλειες εξαιτίας της συχνότητας εκπομπής και τα κέρδη των κεραίων του πομπού και του δέκτη και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K = G_t G_r \left( \frac{c}{4\pi f d_0} \right)^2 \quad (3.3)$$

και τέλος το  $X_j$  είναι η τυχαία μεταβλητή που περιγράφει το φαινόμενο των διαλείψεων σκίασης και ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή. Επιπρόσθετα, τα  $a$ ,  $R_j$  είναι, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα κεφάλαια, ο συντελεστής απωλειών διάδοσης και το μήκος της ζεύξης αντίστοιχα.

Κάθε κόμβος έχει την δυνατότητα να λαμβάνει δύο σήματα με διαφορετικό σηματοθορυβικό λόγο  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  αντίστοιχα από τις δύο κεραίες του οι οποίες είναι τοποθετημένες σε πολύ κοντινή απόσταση. Και οι δύο σηματοθορυβικοί λόγοι είναι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές κυρίως λόγω των ομοιοτήτων ανάμεσα στα μονοπάτια διάδοσης των δύο κοντινών κλάδων της σύνδεσης. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη κατά την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας γιατί ανταποκρίνεται σε πραγματικά περιβάλλοντα διάδοσης εσωτερικού χώρου. Επιπλέον, κάθε κόμβος μπορεί να εφαρμόζει κάποια από τις προτεινόμενες τεχνικές διαφορικής λήψης. Ανάλογα όμως με την τεχνική που χρησιμοποιείται ο τελικός σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη θα είναι ίσος με τον μεγαλύτερο από τους δύο σηματοθορυβικούς λόγους που λαμβάνει η κάθε μία κεραία, για την περίπτωση συνδυασμού με επιλογή, ή με το άθροισμά τους, για την περίπτωση συνδυασμού μεγίστου λόγου. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\gamma_r = \begin{cases} \max(\gamma_1, \gamma_2) & , \text{για SC} \\ \gamma_1 + \gamma_2 & , \text{για MRC} \end{cases} \quad (3.4)$$

Για την απλή περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη καμία τεχνική διαφορικής λήψης ο σηματοθορυβικός λόγος δίνεται κανονικά από την σχέση 3.1 αφού δεν υπάρχει δεύτερος κλάδος στην σύνδεση των κόμβων. Το απλό σενάριο που αναφέρεται στην απουσία διαφορικής λήψης θα φανεί χρήσιμο στα τελικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση της επίδοσης των δύο προτεινόμενων τεχνικών.

Υπό την ρεαλιστική υπόθεση ότι οι δύο σηματοθορυβικοί λόγοι  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  αποτελούν συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή, καταλήγουμε στο ότι η από κοινού τους κατανομή είναι μια διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_{\gamma_1 \gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\gamma_1\gamma_2\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \left[ \left( \frac{\ln \gamma_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right)^2 + \left( \frac{\ln \gamma_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right)^2 - 2\rho \left( \frac{\ln \gamma_1 - \mu_1}{\sigma_1} \right) \left( \frac{\ln \gamma_2 - \mu_2}{\sigma_2} \right) \right] \right\} \quad (3.5)$$

Όπου  $\mu_j, \sigma_j$  είναι οι στατιστικοί παράμετροι της κατανομής σε νέπερ κλίμακα ( $\sigma_j = (\ln 10/10) \sigma_{j(dB)}$ ) και  $\rho$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης των δύο γειτονικών κλάδων της σύνδεσης [SYT10]. Λόγω της ιδιαίτερα μικρής απόστασης μεταξύ των δύο κεραιών που υπάρχουν στον δέκτη αναμένεται ότι οι σηματοθορυβικοί λόγοι παρουσιάζουν υψηλή συσχέτιση και επομένως ο συντελεστής συσχέτισης θα είναι σχετικά υψηλός.

Για να θεωρούνται δύο κόμβοι γείτονες μέσα στα πλαίσια του δικτύου όπου ανήκουν πρέπει να υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους με υψηλή διαθεσιμότητα. Η συνθήκη για αυτό το ενδεχόμενο είναι ο σηματοθορυβικός λόγος να είναι υψηλότερος από την τιμή κατωφλίου που αντιστοιχεί στην ευαισθησία του δέκτη. Οπότε, η διαθεσιμότητα της διαφορικής σύνδεσης θα συμβολίζεται με  $P_{d\_link} = P(\gamma_r > \gamma_{th})$  και θα δίνεται από την σχέση:

$$P_{d\_link} = 1 - P(\gamma_r < \gamma_{th}) = 1 - \int_{-\infty}^{\gamma_{th}} \int_{-\infty}^{\gamma_{th}} f(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (3.6)$$

Το ολοκλήρωμα της σχέσης, το οποίο είναι η πιθανότητα αποκοπής της σύνδεσης, μπορεί να λυθεί αρκετά ευκολότερα αν παρατηρηθεί ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2)$  προκύπτει από την αντίστοιχη διδιάστατη κανονική κατανομή αν σε αυτή εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός [PP02]:

$$u_j = (\ln \gamma_j - \mu_j) / \sigma_j, \quad j = 1, 2 \quad (3.7)$$

Χρησιμοποιώντας αντίστοιχα τον μετασχηματισμό στην σχέση (3.5) και κατόπιν εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes καταλήγουμε στην νέα σχέση για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας (βλέπε μεθοδολογία υπολογισμού στο παράρτημα Β) της διαφορικής σύνδεσης [SSP<sup>+</sup>09a]:

$$P_{d\_link} = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\ln \gamma_{th} - \mu_1}{\sigma_1}} f_{u_1}(u_1) \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{w_2 - \rho u_1}{\sqrt{2(1-\rho^2)}} \right) \right) du_1 \quad (3.8)$$

Όπου  $f_{u_1}(u_1) = e^{-u_1^2/2} / \sqrt{2\pi}$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής.

Το  $w_2$  υπολογίζεται ανάλογα με την τεχνική από τις σχέσεις:

$$w_2 = \begin{cases} (\ln \gamma_{th} - \mu_2) / \sigma_2 & , \text{για SC} \\ (\ln(\gamma_{th} - e^{\sigma_1 u_1 + \mu_1}) - \mu_2) / \sigma_2 & , \text{για MRC} \end{cases} \quad (3.9)$$

Η συνάρτηση εντός του ολοκληρώματος της (3.8) είναι συνεχής και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές στην συμπεριφορά της για όλο το πεδίο ορισμού της, οπότε ο υπολογισμός του ολοκληρώματος συγκλίνει γρήγορα για οποιαδήποτε ακρίβεια και για οποιαδήποτε αριθμητική μέθοδο επιλεγεί. Τέλος, η διαθεσιμότητα της σύνδεσης για την απλή περίπτωση που δεν εφαρμόζεται καμία τεχνική διαφορικής λήψης υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{s\_link} = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\ln \gamma_{th} - \mu_1}{\sigma_1}} f_{u_1}(u_1) du_1 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln \gamma_{th} - \mu_1}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \quad (3.10)$$

### 3.3 Αξιολόγηση συνδεσιμότητας για διαφορική λήψη

Ήδη στα προηγούμενα κεφαλαία έχουμε αναφερθεί εκτενώς στα μοντέλα συνδεσιμότητας και έχουν αξιολογηθεί υπάρχοντα μοντέλα ενώ έχουν προταθεί νέες μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της συνδεσιμότητας. Σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα (§2.4) για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ενώ οι τελικές σχέσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε λογαριθμική κλίμακα.

Για την μοντελοποίηση του δικτύου καταφεύγουμε πάλι σε μία ομογενή διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson με  $\lambda$  πυκνότητα κόμβων (για να αποφευχθεί σύγχυση με το συντελεστή συσχέτισης) ενώ ο μέσος αριθμός κόμβων του δικτύου θα είναι  $E(n) = \lambda A$ . Η πιθανότητα απομόνωσης θα δίνεται γενικά από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-\lambda E(d)} = \exp \left\{ -\lambda \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} P(\gamma_r > \gamma_{th}) r dr d\phi \right\} \quad (3.11)$$

Η τελική σχέση για την περίπτωση που υπάρχει διαφορική λήψη στον δέκτη θα είναι:

$$P_{iso,d} = \exp \left\{ -2\pi\lambda \int_0^\infty r dr \left[ 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\ln\gamma_{th} - \mu_1}{\sigma_1}} f_{u_1}(u_1) \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{w_2 - \rho u_1}{\sqrt{2(1-\rho^2)}} \right) \right) du_1 \right] \right\} \quad (3.12)$$

Με το  $w_2$  να υπολογίζεται από την (3.9). Ενώ για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται κάποια τεχνική διαφορικής λήψης στον δέκτη θα είναι:

$$P_{iso,s} = \exp \left\{ -\pi\lambda \int_0^\infty \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln\gamma_{th} - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) \right] r dr \right\} \quad (3.13)$$

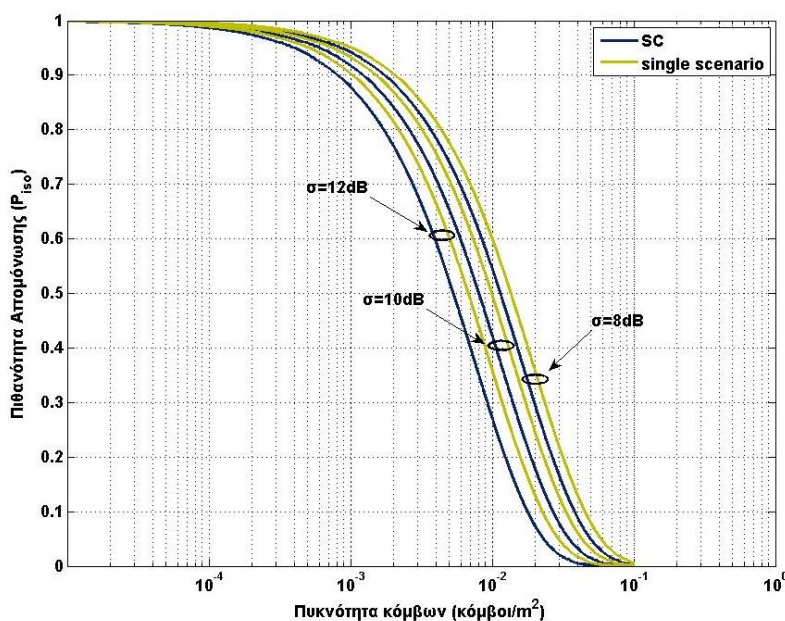
Οι τιμές  $\mu_1$  και  $\mu_2$  θεωρείται ότι αντιστοιχούν στις μέσες απώλειες λόγω διάδοσης όπως περιγράφονται από την σχέση (3.2).

### 3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την υλοποίηση της παραπάνω μεθοδολογίας για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας για ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων και λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων των 60GHz. Ο σκοπός του κεφαλαίου είναι να μελετηθεί η βελτίωση που μπορεί να προσφέρει η χρήση της τεχνικής συνδυασμού με επιλογή ή συνδυασμού μέγιστου λόγου στην συνολική συνδεσιμότητα του δικτύου. Επιπλέον, γίνεται διερεύνηση της απόδοσής τους για διαφορετικά χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης, όπως η τυπική απόκλιση της διδιάστατης κατανομής των συσχετισμένων διαλείψεων, του συντελεστή συσχέτισης και του συντελεστή απωλειών διάδοσης, ενώ διερευνάτε και η απόδοση τους για διαφορετικά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύς. Τέλος, παρουσιάζονται και συγκριτικά αποτελέσματα της απόδοσης των δύο τεχνικών διαφορικής λήψης και κυρίως σύγκριση με την περίπτωση που δεν υπάρχει χρήση διαφορική λήψης για να φανεί το κέρδος που μπορούν να προσφέρουν αυτές οι τεχνικές.

Σε όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα και εφόσον δεν αναφέρεται τίποτα άλλο, έχουν χρησιμοποιηθεί οι εξής τιμές για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου και προέρχονται από την βιβλιογραφία και αποτελούν τυπικές τιμές για ασύρματα

δίκτυα επικοινωνιών:  $G_t = G_r = 2.5\text{dBi}$ ,  $\gamma_{th} = 10\text{dB}$ ,  $N = -60\text{dBm}$ , και  $d_o = 1\text{m}$ . Παρότι σε αυτές τις συχνότητες τα κέρδη κεραιών είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα αναφερόμενα, η διαφορά αυτή, εφόσον υπάρχουν πραγματικά στοιχεία, μπορεί να εξισορροπηθεί με αντίστοιχη μείωση στην λογαριθμική κλίμακα της εκπεμπόμενης ισχύς ή αύξησης της ευαισθησίας του δέκτη.

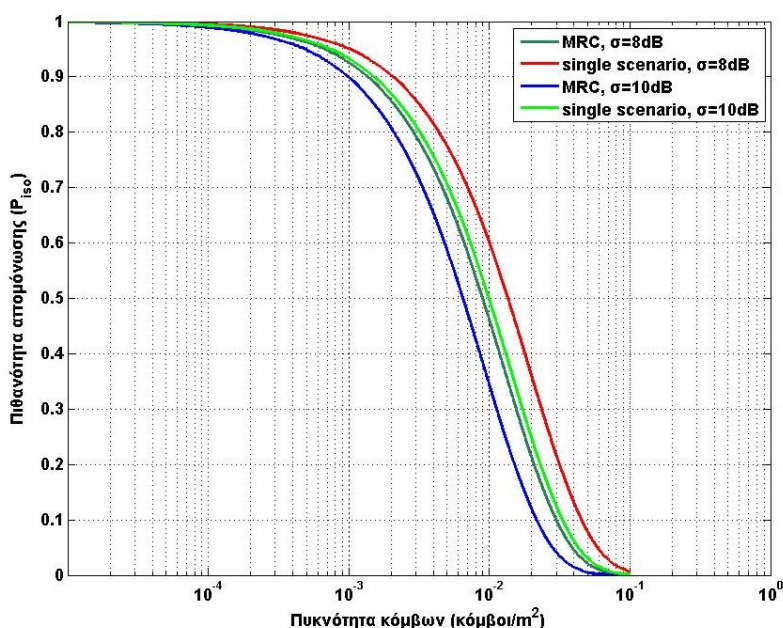


Σχήμα 3.1: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\lambda$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της διδιάστατης λογαριθμικής κατανομής με χρήση της τεχνικής επιλεκτικού συνδυασμού (SC).

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται αποτελέσματα για την πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας των κόμβων για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της διδιάστατης κατανομής των συσχετισμένων διαλείψεων εξαιτίας σκίασης. Τα αποτελέσματα αναφέρονται μόνο για την περίπτωση της τεχνικής διαφορισμού του επιλεκτικού συνδυασμού (SC) ενώ παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες περιπτώσεις χωρίς την χρήση διαφορικής λήψης. Η ισχύς εκπομπής έχει θεωρηθεί ίση με  $P_t = 30\text{dBm}$  ο συντελεστής απωλειών διάδοσης ίσος με  $a = 3.5$  και ο συντελεστής συσχέτισης των γειτονικών κλάδων ίσος με  $\rho = 0.9$ . Η τελευταία παράμετρος αναφέρεται σε έντονα συσχετισμένα κανάλια.

Από τα γραφικά αποτελέσματα παρατηρείτε ότι η συνδεσιμότητα αυξάνεται με την χρήση της μεθόδου συνδυασμού με επιλογή στον δέκτη. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο γραφικών παραστάσεων που αναφέρονται, για τις ίδιες λειτουργικές παραμέτρους, στην ύπαρξη ή όχι της μεθόδου διαφορικής λήψης αποτελούν το

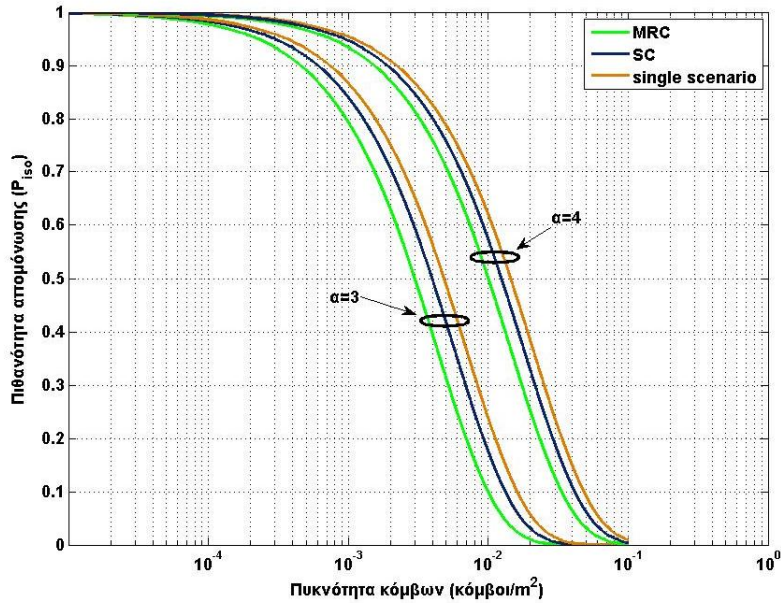
διαφορικό κέρδος της συνδεσιμότητας. Ένα επιπλέον συμπέρασμα που μπορεί να ληφθεί από το σχήμα 3.1 είναι μείωση της πιθανότητας απομόνωσης που εμφανίζεται κατά την αύξηση της τυπικής απόκλισης των διαλείψεων εξαιτίας σκίασης. Το συμπέρασμα αυτό το έχουμε σχολιάσει και σε προηγούμενα κεφάλαια ενώ αξίζει να τονιστεί ότι οι υψηλές τιμές της τυπικής απόκλισης που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κεφάλαιο είναι χαρακτηριστικές τιμές για διάδοση σε εσωτερικούς χώρους με αρκετούς σκεδαστές.



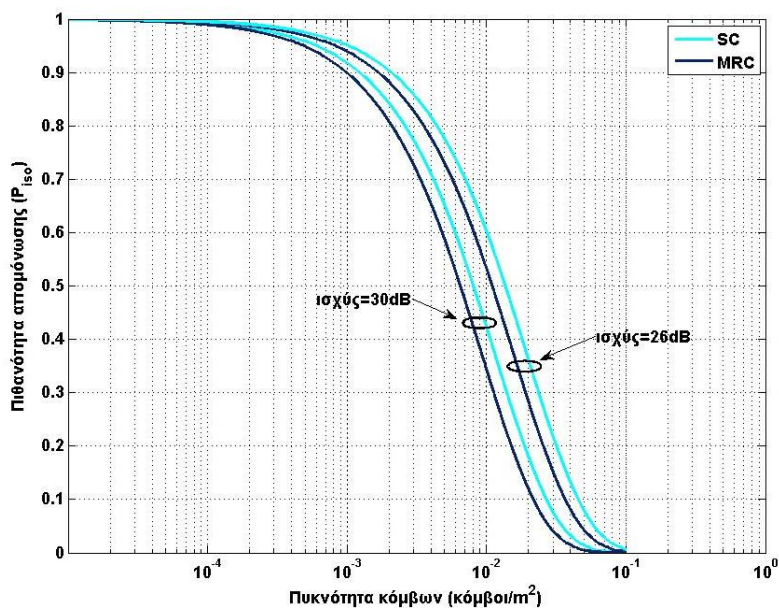
Σχήμα 3.2: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\lambda$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της διδιάστατης λογαριθμικής κατανομής με χρήση της τεχνικής συνδυασμού μεγίστου λόγου (MRC).

Ομοίως στο σχήμα 3.2, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα του σχήματος 3.1 με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται η τεχνική του συνδυασμού μεγίστου λόγου (MRC) στον δέκτη. Και σε αυτή την περίπτωση προκύπτει η θετική συνεισφορά των διαλείψεων σκίασης στην συνδεσιμότητα του δικτύου. Η βελτίωση της συνδεσιμότητας και η μείωση της απαιτούμενη πυκνότητας κόμβων για τον μηδενισμό της πιθανότητας απομόνωσης είναι επίσης εμφανής. Κάτι που αναμενόταν εξ αρχής, καθώς οι τεχνικές διαφορική λήψης χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την διαθεσιμότητα της σύνδεσης και να αυξήσουν την συνολική ροή δεδομένων. Το διαφορικό κέρδος συνδεσιμότητας είναι υψηλότερο για την τεχνική συνδυασμού μεγίστου λόγου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, κάτι που αναμενόταν καθώς στην βιβλιογραφία [SSP<sup>+</sup>09b] η τεχνική συνδυασμού μεγίστου λοβού αποδίδει πάντα καλύτερα σε σχέση με την τεχνική συνδυασμού με επιλογή.





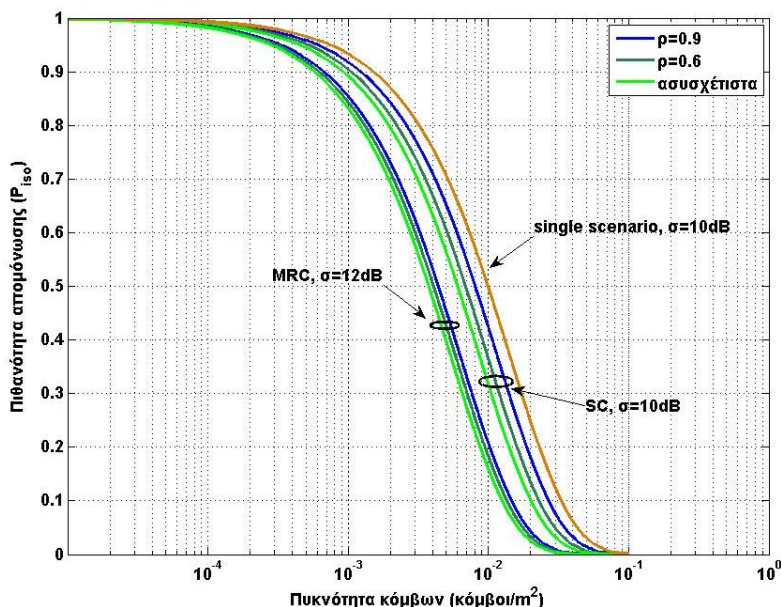
Σχήμα 3.3: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\lambda$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή απωλειών διαδρομής με χρήση και των δύο τεχνικών διαφορικής λήψης (SC/MRC).



Σχήμα 3.4: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\lambda$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές της ισχύς εκπομπής με χρήση και των δύο τεχνικών διαφορικής λήψης (SC/MRC).

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που προκύπτει παρατηρώντας το σχήμα 3.3 είναι η μεγάλη επίδραση των απωλειών διαδρομής στην συνδεσιμότητα του δικτύου. Παρόλα αυτά είναι ένας παράγοντας του οποίου η επίδραση μπορεί εύκολα να προβλεφτεί και

να αντιμετωπιστεί κατά την σχεδίαση και υλοποίηση του δικτύου. Αντίστοιχα συμπεράσματα λαμβάνονται και από το σχήμα 3.4 για την ισχύ εκπομπής.



Σχήμα 3.5: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\lambda$  των κόμβων για διαφορετικές τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος με χρήση και των δύο τεχνικών διαφορικής λήψης (SC/MRC).

Τέλος, στο σχήμα 3.5, παρουσιάζεται η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των γειτονικών κλάδων της σύνδεσης για την περίπτωση που έχει εφαρμοστεί μία από τις δύο τεχνικές διαφορικής λήψης. Υψηλότερες τιμές του συντελεστή συσχέτισης που αναφέρονται σε έντονα συσχετισμένα κανάλια οδηγούν σε υψηλότερες τιμές της πιθανότητας απομόνωσης και κατά συνέπεια σε μείωση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Αντίστοιχα, μείωση του συντελεστή συσχέτισης οδηγεί σε μείωση της πιθανότητας απομόνωσης και άρα αύξηση της συνδεσιμότητας, ενώ η περίπτωση των ασυσχέτιστων καναλιών αποτελεί την ιδανική περίπτωση όσον αφορά την αύξηση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που πρέπει να εξετάζονται οι συσχετίσεις γειτονικών καναλιών και να μην θεωρούνται ασυσχέτιστα για την απλούστευση της ανάλυσης καθώς οδηγούν σε υπερεκτίμηση των πραγματικών υπό εξέταση μεγεθών. Πάντως, η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στην συνδεσιμότητα του δικτύου είναι μικρότερη από άλλου παράγοντες που έχουν ήδη διερευνηθεί. Ενώ, τέλος, ότι ο συντελεστής συσχέτισης παίζει μεγαλύτερο ρόλο στην περίπτωση της διαφορικής τεχνικής συνδυασμού μέγιστου λόγου παρά στην διαφορική τεχνική συνδυασμού με επιλογή.

### 3.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η βελτίωση της συνδεσιμότητα σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε εσωτερικούς χώρους και λειτουργούν στην ζώνη συχνοτήτων των 60GHz χρησιμοποιώντας τεχνικές διαφορικής λήψης. Η χρήση τεχνικών διαφορικής λήψης μπορεί να αποτελέσει υποχρεωτική ανάγκη για να εξισορροπηθεί η επιβάρυνση της συνδεσιμότητας και της απόδοσης του δικτύου από τις ισχυρές απώλειες διάδοσης που υπάρχουν σε αυτή την συχνότητα λειτουργίας ακόμα και για συνδέσεις ολίγων μέτρων. Επιπλέον, το μοντέλο που περιγράφηκε για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας λαμβάνει υπόψη και το φαινόμενο των αργών διαλείψεων όπως και την συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών καναλιών που απαρτίζουν την νοητή διαφορική σύνδεση. Ο ακριβής υπολογισμό της πιθανότητας απομόνωσης και κατ' επέκταση της συνδεσιμότητας είναι πολύ σημαντικός για την ανάπτυξη και την απόδοση αυτών των μελλοντικών δικτύων.



## Κεφάλαιο 4

# Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας

### 4.1 Εισαγωγή

Ένας από τους πρωταρχικούς και πιο σημαντικούς στόχους που τέθηκαν κατά την διάρκεια της διδακτορικής έρευνας ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου συνδεσιμότητας που θα υπολογίζει αποτελεσματικά την συνδεσιμότητα των ασυρμάτων δικτύων νέας γενιάς [Π1]. Επειδή όλη η διδακτορική έρευνα αναφέρεται στην φυσική συνδεσιμότητα του δικτύου, δηλαδή στην συνδεσιμότητα του φυσικού επιπέδου του δικτύου, το νέο μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο την συμπεριφορά του μέσου διάδοσης της πληροφορίας, όσο και την χωρική κατανομή των κόμβων του δικτύου. Επιπλέον, πρέπει να είναι δυνατή η προσθήκη στο μοντέλο και άλλων παραγόντων και παραμέτρων του δικτύου που είτε δυσχεραίνουν την επίτευξη συνδεσιμότητας, όπως η ύπαρξη παρεμβολών, είτε βελτιώνουν και βοηθούν στην επίτευξη πλήρους συνδεσιμότητας, όπως τεχνικές διαφορικής λήψης και τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ένα μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας είναι η δυνατότητα εφαρμογής του σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό συνεπάγεται ότι παρότι η ανάπτυξη του βασίζεται σε βάσιμες υποθέσεις και θεωρήσεις θα πρέπει επίσης να είναι αποτελεσματικό και εφαρμόσιμο σε συνθήκες πραγματικών δεδομένων με στόχο να μπορεί να αποτελέσει μέτρο αξιολόγησης για τα πρωτόκολλα των σύγχρονων ασυρμάτων δικτύων.

Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί με ακρίβεια η πλήρης συνδεσιμότητα ενός τυχαίου δικτύου [Hal88]. Για τον ακριβή υπολογισμό της συνδεσιμότητας πρέπει να πληρούνται υποχρεωτικά οι εξής προϋποθέσεις: να είναι γνωστός ο αριθμός των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο, να είναι γνωστές οι ακριβείς θέσεις τους, ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν οι μεταξύ τους αποστάσεις, και τέλος απαιτείται οι συνδέσεις του δικτύου να εμφανίζονται σύμφωνα με κάποιο ντετερμινιστικό μοντέλο. Εφόσον, πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις είναι δυνατή η εύρεση της συνδεσιμότητας ενός δικτύου με πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Διαφορετικά, πρέπει να γίνει προσέγγιση της πραγματικής συνδεσιμότητας του

δικτύου βάσει των διαθέσιμων πληροφοριών για τις λειτουργικές παραμέτρους του και θεωρώντας γενικές υποθέσεις και τυχαίες διαδικασίες για ότι από τα προαναφερθέντα δεν είναι γνωστό.

Τα μοντέλα συνδεσιμότητας που υπάρχουν στην βιβλιογραφία βασίζονται κυρίως σε ένα μέτρο αξιολόγησης που είναι η πιθανότητα απομόνωσης ενός κόμβου. Η επιλογή της πιθανότητας απομόνωσης δεν είναι τυχαία, όπως θα εξηγήσουμε ευθύς αμέσως, αλλά προκύπτει από τις θεωρήσεις που γίνονται για την μελέτη ενός τυχαίου δικτύου. Άλλα μοντέλα που βασίζονται στην πιθανότητα εμφάνισης μίας μεγάλης συνεκτικής συνιστώσας εντός του δικτύου [DBT05], [DTH02] αναφέρονται σε δίκτυα με μη πεπερασμένο αριθμό κόμβων και έχουν περιγραφεί αναλυτικότερα στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Όπως έχουμε αναφέρει η γενικότερη θεώρηση που μπορεί να γίνει για την τυχαία χωρική κατανομή του δικτύου βασίζεται στα τυχαία σημεία Poisson. Αυτό συνεπάγεται ότι οι θέσεις των κόμβων είναι εντελώς τυχαίες και ανεξάρτητες μεταξύ τους ενώ ο αριθμός των κόμβων που απαρτίζουν το δίκτυο ακολουθεί Poisson κατανομή με συγκεκριμένη παράμετρο  $\lambda$ . Η παράμετρος αυτή είναι χαρακτηριστική της κατανομής Poisson και εξαρτάται από την πυκνότητα και τις διαστάσεις του δικτύου που είναι και τα μοναδικά μεγέθη που χρειάζεται να προσδιοριστούν βάσει της συγκεκριμένης μεθοδολογίας. Η απόσταση ενός τυχαίου κόμβου από τον πλησιέστερο του γείτονα ακολουθεί εκθετική κατανομή. Οπότε εύκολα μπορεί να προκύψει η πιθανότητα απομόνωσης ενός τυχαίου κόμβου ως η πιθανότητα ο πλησιέστερος κόμβος να βρίσκεται εκτός της εμβέλειας του. Η πιθανότητα απομόνωσης θα δίνεται τότε από το συμπλήρωμα της αθροιστικής συνάρτησης της εκθετικής κατανομής (βλέπε σχέση 2.4). Γίνεται λοιπόν σαφές ότι το μετρικό αυτό μέγεθος δεν προέκυψε τυχαία ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά γενικό.

Από την πιθανότητα απομόνωσης μπορεί να προκύψει η πιθανότητα κανένας κόμβος μέσα στο δίκτυο να μην είναι απομονωμένος εφόσον είναι γνωστός ο αριθμός των κόμβων του δικτύου ο οποίος δίνεται από την Poisson κατανομή. Επομένως, η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονάχα σε δίκτυα με πεπερασμένο αριθμό κόμβων και όχι για δίκτυα που θεωρείται ότι επεκτείνονται συνεχώς. Παρόλο που η μεθοδολογία αυτή είναι αρκετά γενική έχει δύο βασικά μειονεκτήματα. Το πρώτο μειονέκτημα είναι ότι η πιθανότητα να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο ταυτίζεται με την πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος. Τα ενδεχόμενα αυτά στην πραγματικότητα δεν ταυτίζονται αλλά για ομογενής χωρικές κατανομές μπορεί να θεωρηθεί ότι το ένα αποτελεί καλή προσέγγιση του άλλου (βλέπε ενότητα §2.3.2). Πάντα βέβαια η πιθανότητα να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο θα είναι μικρότερη από την πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος

[BH05]. Το δεύτερο και βασικότερο μειονέκτημα που εντοπίζεται στην παραπάνω μέθοδο υπολογισμού της συνδεσιμότητας είναι ότι ενώ ο προσδιορισμός της συνδεσιμότητας γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης δεν λαμβάνονται υπόψη οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων του δικτύου. Αυτό αποτελεί και σαφές μειονέκτημα για την εφαρμογή ενός τέτοιου μοντέλου στον υπολογισμό μέτρων αξιολόγησης της συνδεσιμότητας ενός πραγματικού δικτύου, καθώς οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων προσδιορίζονται σχετικά εύκολα κατά την λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου.

Βάσει των παραπάνω δύο μειονεκτημάτων που παρατηρήθηκαν κατά την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας προέκυψε η ιδέα για την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου συνδεσιμότητας [Π1] που θα λαμβάνει υπόψη του και την χωρική κατανομή του δικτύου αλλά και τις διαθεσιμότητες των συνδέσεών του. Το νέο μοντέλο προσεγγίζει την έννοια της συνδεσιμότητας από μία διαφορετική οπτική γωνία. Στοιχεία από την θεωρία γράφων και τα συνδεδεμένα δένδρα συνδυάζονται με την χωρική κατανομή του δικτύου που περιγράφεται από την μέθοδο τυχαίων σημείων Poisson και την εμβέλεια που έχει ο κάθε κόμβος του δικτύου. Η προσέγγιση της πραγματικής συνδεσιμότητας βασίζεται στον υπολογισμό της πιθανότητας του γεγονότος που αντιστοιχεί στην κρίσιμη και οριακή περίπτωση όπου όλοι οι κόμβοι δημιουργούν μια συνδεδεμένη οντότητα μέσα στον δίκτυο. Οι τιμές των παραμέτρων του δικτύου που απαιτούνται για να εμφανιστεί αυτή η συνδεδεμένη οντότητα αποτελούν τις κρίσιμες τιμές που πρέπει ικανοποιούνται έτσι ώστε να υπάρξει πλήρης συνδεσιμότητα εντός του δικτύου. Στις επόμενες ενότητες θα αποδείξουμε ότι η πιθανότητα να εμφανιστεί μια συνεκτική οντότητα που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του δικτύου σχετίζεται με την εμφάνιση του πρώτου συνδεδεμένου δέντρου (spanning tree) στον γράφο του δικτύου.

Επιπρόσθετα, το νέο μοντέλο συνδεσιμότητας που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη και τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης που περιγράφει τις συνδέσεις του δικτύου. Η αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου βασίζεται, στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου, σε κανάλια που χαρακτηρίζονται από αργές διαλείψεις. Το μοντέλο βέβαια είναι γενικό και μπορεί να επεκταθεί και να παραμετροποιηθεί για οποιοδήποτε κανάλι διάλειψης απαιτείται. Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου μοντέλου είναι η δυνατότητα ανάπτυξης σχέσεων γειτνίασης μεταξύ τυχαίων κόμβων του δικτύου. Το γεγονός αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη κάθε είδους συσχετίσεων μεταξύ γειτονικών κόμβων και γειτονικών συνδέσεων. Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική καθώς επιτρέπει την είσοδο στο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας μεθοδολογιών συσχετισμένων καναλιών διάλειψης που ανταποκρίνονται περισσότερο στα πραγματικά περιβάλλοντα

διάδοσης. Για τον λόγο αυτό αντί για την απλουστευμένη περίπτωση που αντιστοιχεί στην χρήση ασυσχέτιστων καναλιών διάλειψης, που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία [BH05], [MAG08], [Dar07], [DM02], θεωρήθηκε ότι οι γειτονικές συνδέσεις κατά μήκος της διάδοσης της πληροφορίας είναι συσχετισμένες και περιγράφονται από την διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή για διαλείψεις εξαιτίας σκίασης.

Σκοπός, λοιπόν, αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση ενός νέου μοντέλου υπολογισμού την συνδεσιμότητας. Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί αναλυτικά το προτεινόμενο μοντέλο ενώ κατόπιν θα υπολογιστούν οι παράμετροι του μοντέλου για περιβάλλοντα διάδοσης όπου οι διαλείψεις σκίασης είναι ο βασικός μηχανισμός περιγραφής της τυχαιότητας του καναλιού διάδοσης. Έπειτα, θα προσδιοριστούν οι δεσμευμένες διαθεσιμότητες για διπλά συσχετισμένα λογαριθμοκανονικά κανάλια που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου. Κατόπιν, καταφεύγουμε σε τεχνικές διαφορικής λήψης για την βελτίωση της συνδεσιμότητας παρουσιάζοντας την αντίστοιχη προσαρμογή του νέου μοντέλου συνδεσιμότητας στην περίπτωση χρήσης τέτοιων τεχνικών στις συνδέσεις των δικτύων. Τέλος, προτείνονται νέα μέτρα αξιολόγησης της βελτίωσης της συνδεσιμότητας εξαιτίας της χρήσης τεχνικών διαφορισμού ενώ παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις από τα οποία προκύπτουν και σχολιάζονται σημαντικά συμπεράσματα.

## 4.2 Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας

### 4.2.1 Συνδεσιμότητα γράφων

Ένα ασύρματο δίκτυο ορίζεται ως συνδεδεμένο όταν κάθε τυχαίος κόμβος του δικτύου μπορεί να επικοινωνήσει με έναν οποιοδήποτε άλλο κόμβο που ανήκει στο δίκτυο χρησιμοποιώντας ως αναμεταδότες άλλους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου. Η διατύπωση αυτή αποτελεί και τον ορισμό της συνδεσιμότητας για όλα τα είδη δικτύων και πρέπει να ικανοποιείται από τα μοντέλα που προτείνονται για τον υπολογισμό της. Παρότι, ο ορισμός είναι αρκετά γενικός και περιγραφικός δίνει μια σαφή ένδειξη για τις ελάχιστες προδιαγραφές που πρέπει να έχει ένα δίκτυο ώστε να υπάρχει πλήρης συνδεσιμότητα. Η ελάχιστη προδιαγραφή εντοπίζεται στην ύπαρξη τουλάχιστον μίας συνδεδεμένης διαδρομής στο εσωτερικό του δικτύου μεταξύ κάθε τυχαία επιλεγμένου ζευγαριού κόμβων του δικτύου. Επιπλέον μονοπάτια επικοινωνίας για την ικανοποίηση της σύνδεσης δύο κόμβων αυξάνουν την αξιοπιστία της συνδεσιμότητας και την απόδοση του δικτύου.



Για να προχωρήσουμε με την θεωρητική ανάλυση και ανάπτυξη του μοντέλου συνδεσιμότητας θα μεταβούμε αρχικά από την θεωρία δικτύων στην θεωρία γράφων. Ένα τυχαίο δίκτυο μπορεί να περιγραφεί με την χρήση ενός τυχαίου γεωμετρικού γράφου (random geometric graph) [Pen03] ο οποίος θα συμβολίζεται ως  $G(V, E)$  όπου  $V(G)$  ή  $V$  είναι το σύνολο των κόμβων του δικτύου και  $E(G)$  ή  $E$  είναι το σύνολο των συνδέσεων του δικτύου. Οι τυχαίοι γεωμετρικοί γράφοι αποτελούν μια ειδική κατηγορία των τυχαίων γράφων [Bo101] και έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά. Πρώτον, οι κόμβοι τους είναι τυχαία κατανεμημένοι στο επίπεδο και δεύτερον οι μεταξύ τους συνδέσεις δεν εμφανίζονται τυχαία αλλά ακολουθούν κάποιο μαθηματικό μοντέλο. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά τους κατατάσσουν ως τα καταλληλότερα μαθηματικά εργαλεία της θεωρίας γράφων για την μοντελοποίηση οποιουδήποτε ασύρματου δικτύου.

Η έννοια της συνδεσιμότητας είναι ένα από τα πιο θεμελιώδη ζητήματα στην θεωρία γράφων τόσο από θεωρητικής απόψεως όσο και από πρακτικής. Από θεωρητικής πλευράς η συνδεσιμότητα κυρίως βασίζεται στην ύπαρξη ελάχιστων ή μέγιστων αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού, όπως αυτών που προβλέπει το θεώρημα Menger και οι διάφορες παραλλαγές του. Το θεώρημα Menger αποτελεί και το κεντρικό θεώρημα για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ενός γράφου. Πριν όμως την παρουσίαση του θεωρήματος παρουσιάζονται μερικές βασικές έννοιες και ορισμοί της θεωρίας γράφων που σχετίζονται με την συνδεσιμότητα.

*Ορισμός 4.1:* Ένας μη κενός γράφος  $G$  θα χαρακτηρίζεται ως συνδεδεμένος όταν δύο οποιοδήποτε κόμβοι του θα συνδέονται μεταξύ τους με ένα μονοπάτι  $P$  εντός του  $G$ .

*Ορισμός 4.2:* Επιπλέον, αν  $U \subseteq V(G)$  και το  $G(U)$  είναι επίσης συνδεδεμένο τότε θα θεωρείται ότι και το σύνολο των κόμβων που απαρτίζουν το  $U$  θα αποτελούν ένα συνδεδεμένο γράφο εντός του  $G$ .

*Ορισμός 4.3:* Αν το  $U$  είναι στο μέγιστο δυνατό βαθμό συνδεδεμένο, δηλαδή δεν υπάρχουν άλλοι κόμβοι του γράφου  $G$  που να μπορούν να συνδεθούν με το σύνολο των κόμβων που αποτελούν το  $U$ , τότε το  $G(U)$  θα ονομάζεται συνεκτική συνιστώσα ή συνιστώσα του  $G$ .

Οι όροι που μόλις διατυπώθηκαν είναι χρήσιμοι για την κατανόηση των θεωρημάτων και προτάσεων που θα παρουσιαστούν εν συνέχεια. Εδώ αξίζει να τονιστεί ότι γενικά ο όρος περιγραφής της συνδεσιμότητας στην θεωρία γράφων είναι η  $k$ -συνδεσιμότητα η οποία προσδιορίζεται από τους παρακάτω ισοδύναμους ορισμούς [GY04].

*Ορισμός 4.4:* Η συνδεσιμότητα κόμβων (vertex connectivity) που θα συμβολίζεται με  $\kappa(G)$  για τον  $G$  γράφο είναι ο ελάχιστος αριθμός κόμβων που μπορούν να αφαιρεθούν και να παραμείνει ο γράφος  $G$  συνδεδεμένος ή μηδενικός.

*Ορισμός 4.5:* Η συνδεσιμότητα συνδέσεων (edge connectivity) που θα συμβολίζεται με  $\lambda(G)$  για τον  $G$  γράφο είναι ο ελάχιστος αριθμός συνδέσεων που μπορούν να αφαιρεθούν και να παραμείνει ο γράφος  $G$  συνδεδεμένος ή μηδενικός.

Γενικά, ισχύει για οποιονδήποτε μη μηδενικό (κενό) γράφο ότι:

$$\kappa(G) \leq \lambda(G) \leq \delta(G) \quad (4.1)$$

Όπου  $\delta(G)$  είναι ο βαθμός του γράφου που αντιστοιχεί στον ελάχιστο βαθμό που εμφανίζουν οι κόμβοι του γράφου. Επομένως, η συνδεσιμότητα ενός γράφου μπορεί να χαρακτηριστεί βάσει των παρακάτω θεωρημάτων.

*Θεώρημα 4.1 (Menger 1927):* Έστω ο γράφος  $G(V, E)$  και  $A, B \subseteq V$ . Τότε ο ελάχιστος αριθμός κόμβων που διαχωρίζουν μεταξύ τους τα σύνολα  $A$  και  $B$  εντός του γράφου  $G$  είναι ίσος με τον μέγιστο αριθμό των διαφορετικών διαδρομών μεταξύ των  $A-B$  εντός του γράφου  $G$ . ■

Η απόδειξη του θεωρήματος μπορεί να βρεθεί στο [Die05] όπως και η απόδειξη για την γενική έκδοση του θεωρήματος που παρουσιάζεται επίσης.

*Θεώρημα 4.2 (Global version of Menger's Theorem):*

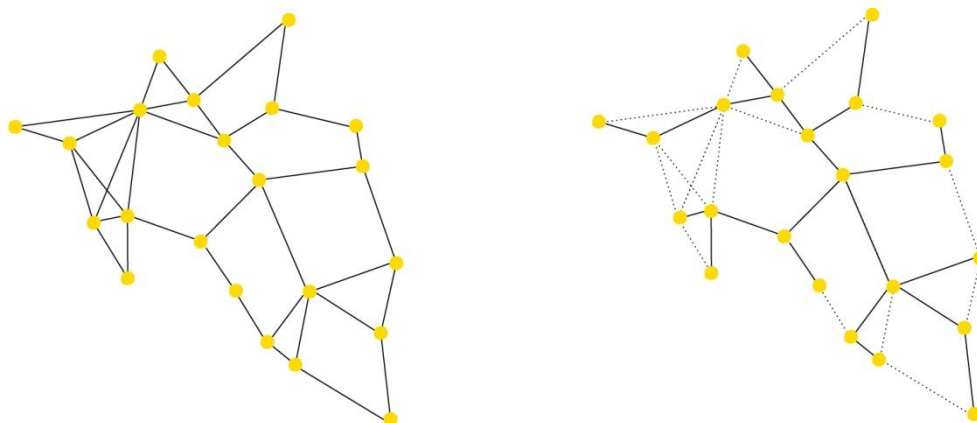
- (i) Ένας γράφος είναι  $\kappa$ -συνδεδεμένος αν και μόνο αν περιέχει  $\kappa$  ανεξάρτητες (μέσω διαφορετικών κόμβων) διαδρομές μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων του.
- (ii) Ένας γράφος είναι  $\kappa$ -συνδέσεων συνδεδεμένος αν και μόνο αν περιέχει  $\kappa$  ανεξάρτητες (μέσω διαφορετικών συνδέσεων) διαδρομές μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων του. ■

Σε αρκετές περιπτώσεις η γενική έκδοση του θεωρήματος του Menger αναφέρεται και ως θεώρημα του Whitney [GY04]. Στην βιβλιογραφία τόσο των δικτύων όσο και των γράφων συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένας από τους δύο ορισμούς και επειδή στα ασύρματα δίκτυα θεωρούμε ότι οι κόμβοι υπάρχουν αλλά συνήθως οι μεταξύ τους συνδέσεις εμφανίζονται ως διαθέσιμες ή μη διαθέσιμες τότε με τον όρο  $\kappa$ -συνδεσιμότητα θα αναφερόμαστε πάντα στην  $\kappa$ -συνδέσεων-συνδεσιμότητα ( $\kappa$ -edge-connectivity) του δικτύου.

#### 4.2.2 Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας βασισμένο σε συνδεδετικά δένδρα

Έστω ένα τυχαίο δίκτυο στην γενικότερη δυνατή μορφή του το οποίο περιγράφεται από ένα τυχαίο γεωμετρικό γράφο  $G(V, E)$ . Σύμφωνα με την γενική έκδοση του θεωρήματος Menger (θεώρημα Menger-Whitney's), έχει αποδειχθεί ότι ο γράφος  $G$  του δικτύου θα είναι  $k$ -συνδεδεμένος αν και μόνο αν περιέχει  $k$  ανεξάρτητες διαδρομές μεταξύ ενός τυχαίου ζευγαριού κόμβων. Η οριακή περίπτωση που αντιστοιχεί στην 1-συνδεσιμότητα (1-συνδέσεων-συνδεσιμότητα) αναφέρεται σε έναν συνδεδεμένο γράφο που απαρτίζεται από μία μοναδική συνεκτική συνιστώσα και στον οποίο αν αφαιρεθεί έστω και μία μονάχα σύνδεση θα πάψει να είναι συνδεδεμένος και θα έχουμε τελικά απώλεια της συνδεσιμότητας.

Η 1-συνδεσιμότητα ταυτίζεται με την εμφάνιση του πρώτου συνδεδετικού δένδρου εντός του γράφου του δικτύου γεγονός που αποδεικνύεται από τον ορισμό που δίνεται παρακάτω για την έννοια των συνδεδετικών δένδρων. Η ύπαρξη περισσότερων του ενός συνδεδετικών δένδρων αντιστοιχεί σε υψηλότερη τάξη της  $k$ -συνδεσιμότητας. Παρόλο που σε ένα δίκτυο οι υψηλότερες τάξεις της  $k$ -συνδεσιμότητας διασφαλίζουν αξιοπιστία, ευρωστία στις επιλογές για δρομολόγηση, ανοχή στην απώλεια συνδέσεων και ευελιξία στα υψηλότερα επίπεδα του δικτύου, η 1-συνδεσιμότητα αποτελεί το κρίσιμο σημείο για τον χαρακτηρισμό της συνδεσιμότητας ενός γράφου γιατί διαχωρίζει τον συνδεδεμένο γράφο από τον μη συνδεδεμένο.



Σχήμα 4.1: Αριστερά η τοπολογία του γράφου  $G$  με  $k$ -συνδεσιμότητα και δεξιά ένα συνδεδετικό δένδρο  $S$  του γράφου που αντιστοιχεί στην 1-συνδεσιμότητα.

**Ορισμός 4.6:** Ως συνδεδετικό δένδρο  $S(V, E')$  ενός γράφου  $G$  ορίζεται οποιοσδήποτε υπογράφος του  $G$  ο οποίος περιλαμβάνει όλους του κόμβους  $V(G)$  του γράφου και το ελάχιστο δυνατό σύνολο των ακμών του γράφου ( $E'(G) \subseteq E(G)$ ) οι οποίες απαιτούνται για συνδέονται όλοι οι κόμβοι μεταξύ τους.

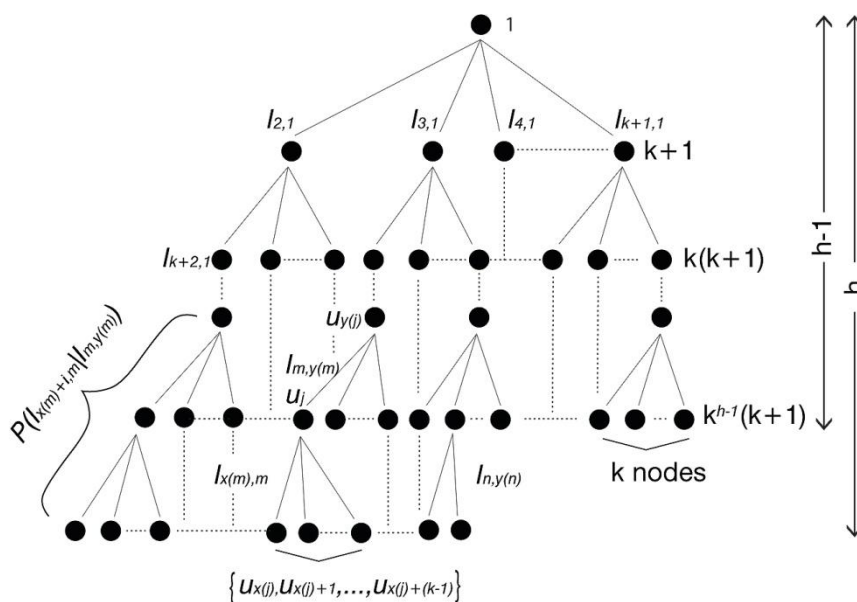
Παρότι το σύνολο των ακμών που απαρτίζουν το  $E'(G)$  δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό, ο αριθμός όμως των απαιτούμενων ακμών είναι πάντα ίσος με:

$$|E'(G)| = |V(G)| - 1.$$

Υπό την υπόθεση ότι εμφανίζεται στον γράφο του δικτύου ένα συνδεδεμένο δένδρο, το δίκτυο θα απαρτίζεται από μια μονάχα συνεκτική συνιστώσα που θα περιλαμβάνει και θα διατηρεί συνδεδεμένους όλους τους κόμβους του δικτύου. Το δίκτυο σε αυτή την περίπτωση μεταβαίνει από την υποκρίσιμη στην υπερκρίσιμη κατάσταση [Pen03], [MR96]. Οι δύο αυτοί όροι χρησιμοποιούνται συχνά στην βιβλιογραφία και αναφέρονται στην μετάβαση από την μη συνδεδεμένη κατάσταση στην συνδεδεμένη.

Το προτεινόμενο μοντέλο συνδεσιμότητας θεωρεί ότι η συνδεσιμότητα του δικτύου είναι άμεσα συσχετισμένη με την εμφάνιση της 1-συνδεσιμότητας και επομένως μπορεί να προσεγγιστεί με την εμφάνιση τουλάχιστον ενός συνδεδεμένου συνδεδεμένου δένδρου στον γράφο του δικτύου όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω κάθε συνδεδεμένο δένδρο έχει συγκεκριμένο αριθμό ακμών και συνδέσεων ο οποίος είναι κατά μία μονάδα μικρότερος από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Συνεπώς, η τυχαία μορφή που θα έχει το πρώτο συνδεδεμένο δένδρο που θα εμφανιστεί εντός του γράφου του δικτύου και θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση οριακής συνδεσιμότητας δεν έχει καμία επίδραση στην αξιολόγηση της συνδεσιμότητας. Για απλότητα και χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα του μοντέλου, χρησιμοποιούμε το ισοζυγισμένο συνδεδεμένο δένδρο (balanced spanning tree), του οποίου όλοι οι κόμβοι του έχουν τον ίδιο βαθμό, ως το υπό θεώρηση δένδρο που θα εμφανιστεί αρχικά στον οριακά συνδεδεμένο γράφο. Το προτεινόμενο ισοζυγισμένο συνδεδεμένο δένδρο (σχήμα 4.2) έχει δύο πολύ βασικά χαρακτηριστικά τα οποία δεν υπάρχουν σε οποιοδήποτε τυχαίο συνδεδεμένο δένδρο. Το πρώτο το αναφέραμε ήδη και είναι ότι όλοι οι κόμβοι του δένδρου έχουν ακριβώς τον ίδιο βαθμό  $d$ , με εξαίρεση τα τελευταία φύλλα του. Το  $d$  θα θεωρείται ότι είναι και ο βαθμός του συνδεδεμένου δένδρου. Ο λόγος που τονίζεται ιδιαίτερα αυτό το χαρακτηριστικό οφείλεται στο γεγονός ότι στην βιβλιογραφία της θεωρίας γράφων συνηθίζεται οι κόμβοι των ισοζυγισμένων δένδρων να έχουν το ίδιο αριθμό φύλλων και όχι τον ίδιο βαθμό. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι ότι η απόσταση των τελευταίων φύλλων, που βρίσκονται στην βάση του συνδεδεμένου δένδρου, από την κορυφή μπορεί να διαφέρει μόνο κατά μια μονάδα. Στην ειδικότερη περίπτωση που αυτή η απόσταση είναι ίδια για όλα τα φύλλα το δέντρο θα χαρακτηρίζεται και ως πλήρες.



Σχήμα 4.2: Δομή του ισοζυγισμένου συνδετικού δένδρου.

Η κατασκευή του προτεινόμενου ισοζυγισμένου δένδρου η δομή του οποίου απεικονίζεται λεπτομερώς στο σχήμα 4.2 μπορεί να εφαρμοστεί ακολουθώντας τα εξής βήματα:

*Αρχικοποίηση:* Ως συνδετικό δένδρο θα θεωρείται οποιοσδήποτε υπογράφος του  $G(V, E)$  για τον οποίο θα ισχύει:  $\{S(V, E') \mid u_i \in V \ i=1, \dots, n \text{ and } l_{i,j} \in E' \ i,j=1, \dots, n\}$ .

*Βήμα πρώτο:* Θεωρείται ένας τυχαίος κόμβος  $u_1$  ως η κορυφή του συνδετικού δένδρου.

*Βήμα δεύτερο:* Τοποθετούνται οι κόμβοι  $u_i$  όπου  $i=2, \dots, d+1$  ως φύλλα της κορυφής του δένδρου.

*Βήμα τρίτο:* Θεωρείται ότι  $k = d - 1$  και τότε  $\forall u_i \in V, i \geq 2$  τοποθετούνται διαδοχικά  $k$  φύλλα σε κάθε κόμβου του δένδρου μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες  $|V| = n$  και  $|E'| = n - 1$ .

Η επιλογή του ισοζυγισμένου συνδετικού δένδρου στο οποίο όλοι οι κόμβοι του έχουν τον ίδιο βαθμό, με εξαίρεση τους κόμβους που αντιστοιχούν στο τελευταίο επίπεδό του, δεν βοηθάει μόνο στην διατήρηση της γενικότητας του μοντέλου αλλά παρέχει επιπλέον την δυνατότητα υπολογισμού του ύψους του δένδρου καθώς και σχέσεων γειτνίασης μεταξύ των κόμβων του. Στις δύο προτάσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται και αποδεικνύονται τελικές σχέσεις για τον υπολογισμό του ύψους του υπό θεώρηση συνδετικού δένδρου και τον καθορισμό των σχέσεων γειτνίασης μεταξύ των κόμβων του. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί αυτοί

προτάσσονται για πρώτη φορά και θα βοηθήσουν αρκετά στην ενσωμάτωση μεθόδων συσχέτισης μεταξύ γειτονικών συνδέσεων στο μοντέλο συνδεσιμότητας.

*Πρόταση 4.1:* Το ύψος του μη τετριμμένου ισοζυγισμένου συνδετικού δένδρου  $S(V, E')$  θα δίνεται από την σχέση:

$$h = \left\lceil \log_{10} \left( \frac{(n-2)(k-1)}{(k+1)} + 1 \right) / \log_{10}(k) \right\rceil + 1$$

Με την προϋπόθεση ότι  $n > k + 2$ .

*Απόδειξη:* Στο υπό θεώρηση ισοζυγισμένο συνδετικό δένδρο όλοι οι κόμβοι έχουν  $k$  φύλλα και έναν ανώτερο κόμβο που βρίσκεται στο προηγούμενο επίπεδο. Για τα φύλλα ενός κόμβου χρησιμοποιείται αρκετές φορές και ο όρος παιδιά, ενώ ο ανώτερος κόμβος που βρίσκεται στο προηγούμενο επίπεδο χαρακτηρίζεται συχνά και ως γονέας. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν η κορυφή  $u_1$  του δένδρου που έχει  $d = k + 1$  φύλλα και οι κόμβοι του τελευταίου επιπέδου που έχουν μονάχα ένα γονέα και κατά συνέπεια μοναδιαίο βαθμό.

Είναι προφανές ότι η παραπάνω πρόταση ισχύει για μικρές τιμές των παραμέτρων  $n, k$  οι οποίες συμφωνούν με τις συνθήκες της πρότασης. Επομένως, πρέπει να αποδειχθεί ότι ισχύει και για οποιαδήποτε τυχαία  $n, k$ .

Για ένα τυχαίο επίπεδο, έστω  $h'$ , του  $S(V, E')$  ο αριθμός των κόμβων του επιπέδου θα είναι ίσος με  $k^{h'-1}(k+1)$ . Σύμφωνα με αυτό, ο συνολικός αριθμός των κόμβων που έχει ένα πλήρες δένδρο με ύψος  $h'$  θα προκύπτει από το άθροισμα των κόμβων που περιλαμβάνονται στο κάθε επίπεδο και θα δίνονται από την σχέση:

$$1 + \sum_{t=0}^{h'-1} k^t (k+1) = 1 + (k+1) \left( \frac{k^{h'-1} - 1}{k-1} \right) \quad (4.2)$$

Παρόλο που το πλήρες δένδρο αποτελεί μια ειδική περίπτωση, η παραπάνω σχέση θα χρησιμοποιηθεί, όπως θα δείξουμε παρακάτω, για τον υπολογισμό της γενικής περίπτωσης. Ένα δένδρο τώρα με  $n$  κόμβους θα θεωρείται ότι έχει ύψος  $h$  εφόσον έχει τουλάχιστον ένα κόμβο στο  $h$  επίπεδο. Αυτό συνεπάγεται ότι το δένδρο θα αποτελείται στην οριακή περίπτωση από ένα πλήρες δένδρο με ύψος  $h-1$  και από έναν μονάχα κόμβο που βρίσκεται στο  $h$  επίπεδο.

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο (4.2) προκύπτει ότι:

$$n = \sum_{t=0}^{h-1} k^t (k+1) + 2 \Leftrightarrow$$

$$h = \left\lfloor \log_{10} \left( \frac{(n-2)(k-1)}{(k+1)} + 1 \right) / \log_{10}(k) \right\rfloor + 1 \quad (4.3)$$

Ο τελεστής  $\lfloor \cdot \rfloor$  αναφέρεται στην ακέραια τιμή του περιεχόμενου αριθμού που προκύπτει ύστερα από αποκοπή των δεκαδικών ψηφίων ■

*Πρόταση 4.2:* Για ένα τυχαίο κόμβο  $u_j \in S(V, E')$  ισχύουν τα εξής:

- (i) Το σύνολο  $\{u_{x(j)}, u_{x(j)+1}, \dots, u_{x(j)+(k-1)}\}$  αποτελεί τα φύλλα του κόμβου.
- (ii) Ο κόμβος  $u_{y(j)}$  είναι ο γονέας του.

Ενώ, αποδεικνύεται ότι  $x(j) = j + (k+1) + (j-2)(k-1)$ ,  $y(j) = \lfloor (j+k-3)/k \rfloor$  για  $n > k+2$ .

*Απόδειξη:* Έστω το μη τετριμμένο συνδεδεμένο δένδρο  $S(V, E')$ . Τότε,  $\forall h' \neq h$  επίπεδο του δένδρου ο αριθμός των κόμβων που βρίσκονται από την δεξιά πλευρά ενός τυχαίου κόμβου  $u_j$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$W_j = (k+1) \frac{(k^{h'-1} - 1)}{(k-1)} - (j-1) \quad (4.4)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει εύκολα αν από την θέση που αντιστοιχεί στον τελευταίο κόμβο του επιπέδου  $h'$  αφαιρέσουμε τον κόμβο  $u_j$ . Με αντίστοιχο τρόπο, αν αφαιρέσουμε από τον  $u_j$  την θέση του τελευταίου κόμβου του επιπέδου  $h'-1$  προκύπτει ο αριθμός των κόμβων που βρίσκονται από την αριστερή πλευρά του και δίνεται από τον τύπο:

$$Z_j = \left[ (j-1) - \left( (k+1) \frac{(k^{h'-2} - 1)}{(k-1)} + 1 \right) \right] \quad (4.5)$$

Υπολογίζοντας την απόσταση μεταξύ του  $u_j$  και του πρώτου φύλλου του ή παιδιού του  $u_{x(j)}$  λαμβάνεται τελικά βάσει των (4.4) και (4.5) η τελική σχέση για την θέση του  $u_{x(j)}$ :

$$x(j) = j + W_j + kZ_j + 1 = j + (k+1) + (j-2)(k-1) \quad (4.6)$$

Οι υπόλοιποι  $k-1$  κόμβοι που ακολουθούν τον κόμβο  $u_{x(j)}$  μαζί με αυτόν συνθέτουν το σύνολο των φύλλων του  $u_j$ . Η θέση τώρα του γονέα του  $u_j$  μπορεί να προκύψει με αντίστοιχο τρόπο από τον τύπο:

$$y(j) = j - x_{y(j)} \Leftrightarrow y(j) = \lfloor (j+k-3)/k \rfloor \quad (4.7)$$

Η χρήση του τελεστή  $\lfloor \rfloor$  κρίνεται αναγκαία καθώς η αντιστοίχιση μεταξύ των φύλλων και του γονέα κόμβου δεν είναι μονοσήμαντη αφού πολλά φύλλα αντιστοιχούν σε ένα γονέα κόμβο. Ακέραια τιμή για το  $y(j)$  προκύπτει μονάχα για το πρώτο φύλλο. ■

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το προτεινόμενο μοντέλο συνδεσιμότητας βασίζεται στο γεγονός ότι η 1-συνδεσιμότητα σχετίζεται με την εμφάνιση του πρώτου συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου στον γράφο του δικτύου. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαπίστωσης, η πιθανότητα ύπαρξης ενός συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου μπορεί να αποτελέσει ένα άνω όριο για τον πραγματικό υπολογισμό της συνδεσιμότητας του δικτύου. Επομένως, η σχέση μεταξύ της πιθανότητας ύπαρξης του συνδεδεμένου συνεκτικού δένδρου  $P(\text{sp. tree connected})$  και του να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο ορίζεται γενικά από την σχέση:

$$\begin{aligned} P(\text{network connected}) &\leq P(\text{sp. tree connected}) = \\ &= P(l_{n,y(n)}, l_{n-1,y(n-1)}, \dots, l_{3,1}, l_{2,1}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Ο λόγος που η πιθανότητα αυτή αποτελεί ένα άνω όριο για την πιθανότητα να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο βασίζεται στο γεγονός ότι αντιστοιχεί στην κρίσιμη φάση κατά την οποία ένα δίκτυο παύει να χαρακτηρίζεται ως μη συνδεδεμένο και μεταπίπτει οριακά στην συνδεδεμένη κατάσταση. Άμεση συνέπεια των παραπάνω είναι ότι οι κρίσιμες τιμές των παραμέτρων του δικτύου που ικανοποιούν την



πιθανότητα ύπαρξης ενός συνδεδεμένου συνδεδετικού δένδρου αποτελούν τις ελάχιστες δυνατές απαιτήσεις για να υπάρξει συνδεσιμότητα στο δίκτυο. Επιπλέον, η σχέση (4.8) είναι γενική και δεν αναφέρεται μονάχα στο υπό θεώρηση ισοζυγισμένο δένδρο που περιγράφεται στην ενότητα αλλά σε οποιοδήποτε συνδεδετικό δένδρο του δικτύου.

Το πιο σημαντικό όμως πλεονέκτημα του προτεινόμενου μοντέλου είναι το γεγονός ότι ο υπολογισμός της συνδεσιμότητας γίνεται μέσω της από κοινού πιθανότητας των διαθεσιμοτήτων συγκεκριμένου αριθμού συνδέσεων του δικτύου. Αυτό συνεπάγεται ότι το μοντέλο δεν απαιτεί την διαθεσιμότητα ενός συνόλου από συγκεκριμένες συνδέσεις, καθώς αυτό θεωρείται αδύνατο για ένα τυχαίο δίκτυο που δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων η δομή και η τοπολογία του, αλλά να είναι τουλάχιστον διαθέσιμες  $n-1$  συνδέσεις που αντιστοιχούν στον αριθμό των ακμών ενός οποιοδήποτε συνδεδετικού δένδρου του δικτύου. Αν η δομή και η τοπολογία του δικτύου ήταν γνωστή, τότε σαφώς και θα μπορούσε να γίνει η σωστή επιλογή των κρισιμότερων συνδέσεων και να οδηγηθούμε σε ακριβή υπολογισμό της συνδεσιμότητας του δικτύου. Για την γενική και τυχαία όμως περίπτωση, για την οποία έχει αποδειχθεί ότι είναι αδύνατος ο ακριβής υπολογισμός της συνδεσιμότητας [Hal88], απαιτείται ο προσδιορισμός ενός κάτω ορίου της συνδεσιμότητας ή αντίστοιχα ενός άνω ορίου για την πιθανότητα ύπαρξης συνδεσιμότητας το οποίο προσδιορίζεται από τις παραμέτρους του δικτύου.

Ο υπολογισμός της (4.8) είναι ιδιαίτερα απλός αν θεωρηθεί ότι όλες οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων  $I_{j,y(j)}$  προκύπτουν από ασυσχέτιστα κανάλια διάλειψης. Υπό αυτές τις συνθήκες η από κοινού πιθανότητα της (4.8) ισοδυναμεί με το γινόμενο των πιθανοτήτων σύνδεσης των αντίστοιχων ανεξάρτητων συνδέσεων. Σε πραγματικά όμως ασύρματα δίκτυα, τα γειτονικά κανάλια είναι συνήθως έντονα συσχετισμένα και όχι ανεξάρτητα, καθώς οι πηγές που προκαλούν την εμφάνιση των φαινομένων διάλειψης είναι σχεδόν ταυτόσημες. Μια πρώτη προσέγγιση, η οποία μπορεί να μελετηθεί και αναλυτικά, είναι να γίνει η υπόθεση ότι όλες οι γειτονικές συνδέσεις κατά μήκος του πολυβηματικού μονοπατιού διάδοσης της πληροφορίας είναι ανά δύο συσχετισμένες. Για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν συσχετισμένα κανάλια διάλειψης στην γενική εξίσωση προσδιορισμού της συνδεσιμότητας (4.8) πρέπει να χρησιμοποιηθούν κανόνες γειτνίασης και συσχέτισης μεταξύ των  $I_{j,y(j)}$ . Εδώ έρχεται να χρησιμοποιηθεί η τοπολογία του ισοζυγισμένου συνδεδετικού δένδρου που προτάθηκε πριν και του οποίου οι κόμβοι έχουν τον ίδιο βαθμό.

Από την τοπολογία του προτεινόμενου συνδεδετικού δένδρου, γίνεται προφανές ότι το δένδρο αποτελείται από αλυσίδες επικοινωνίας και μετάδοσης της πληροφορίας που έχουν ύψη  $h$  και  $h-1$  αντίστοιχα και συνδέουν τα τελευταία φύλλα του δένδρου με την κορυφή του. Κατά συνέπεια, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι το σύνολο των

συσχετισμένων γειτονικών συνδέσεων συνίσταται από κάθε ζευγάρι συνδέσεων που έχει έναν κοινό κόμβο κατά μήκος κάθε πολυβηματικής αλυσίδας επικοινωνίας [ΑΑΜ08]. Δεδομένου των προαναφερθέντων υποθέσεων, οι μεταδόσεις πληροφορίας διηθούνται εντός του δικτύου διαμέσου γειτονικών διαδοχικών συνδέσεων οι οποίες είναι ανά δύο συσχετισμένες. Η πιθανότητα τότε να είναι συνδεδεμένο το υπό θεώρηση συνδετικό δένδρο μπορεί να αναλυθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} P(l_{n,y(n)}, \dots, l_{2,1}) &= P(l_{n,y(n)} | l_{n-1,y(n-1)}, \dots, l_{2,1}) P(l_{n-1,y(n-1)}, \dots, l_{2,1}) = \\ &= P(l_{n,y(n)} | l_{y(n),y(y(n))}) P(l_{n-1,y(n-1)} | l_{y(n-1),y(y(n-1))}) \dots \\ &\dots P(l_{m,y(m)} | l_{y(m),y(y(m))}) \dots P(l_{k+2,2}) \dots P(l_{2,1}) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Όπου  $P(l_{m,y(m)} | l_{y(m),y(y(m))})$  είναι η πιθανότητα ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ γειτονικών κόμβων που απέχουν δύο βήματα κατά μήκος της διαδρομής από την κορυφή του δένδρου ως τα φύλλα του τελευταίου επιπέδου του  $S$  συνδετικού δένδρου. Σε πλήρη αντιστοιχία με τα προηγούμενα, μπορούμε να αναφέρουμε ότι η πιθανότητα  $P(l_{m,y(m)} | l_{y(m),y(y(m))})$  εκφράζει επίσης την υπό συνθήκη διαθεσιμότητα της  $l_{m,y(m)}$  σύνδεσης δεδομένου ότι η ακριβώς προηγούμενη σύνδεση στην αλυσίδα επικοινωνίας είναι διαθέσιμη και κατά συνέπεια υπάρχει πληροφορία για περαιτέρω μετάδοση.

Αναπτύσσοντας την σχέση (4.9) χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις της πρότασης 4.2, καταλήγουμε στην τελική αναλυτική έκφραση της πιθανότητας να είναι συνδεδεμένο το συνδετικό δένδρο που δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} P(\text{sp. tree connected}) &= \left\{ \prod_{m=2}^{k+2} \left[ P(l_{m,1}) \times \prod_{i=0}^{k-1} P(l_{x(m)+i,m} | l_{m,1}) \right] \right\} \times \\ &\left\{ \prod_{m=k+3}^{y(n)-1} \prod_{i=0}^{k-1} P(l_{x(m)+i,m} | l_{m,y(m)}) \right\} \times \quad (4.10) \\ &\prod_{m=x(y(n))}^n P \left( l_{m,y(m)} | l_{y(m), \lfloor \frac{y(m)+k-3}{k} \rfloor} \right) \end{aligned}$$

Η σχέση αυτή είναι γενική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά ως ένα άνω όριο για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας του δικτύου όταν οι απλές και δεσμευμένες πιθανότητες της ύπαρξης των συνδέσεων είναι εκ των προτέρων γνωστές ή μπορούν να καθοριστούν μέσω θεωρητικών υποθέσεων. Ενώ, πέρα από τις διαθεσιμότητες των συνδέσεων η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε απαιτεί μονάχα τον

καθορισμό του αριθμού  $n$  των κόμβων του δικτύου και του βαθμό  $d$  του δένδρου για την άμεση εφαρμογή της σε οποιοδήποτε δίκτυο. Επίσης, η εξίσωση (4.10) μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε κανάλι διάλειτουργίας απαιτείται [SA00].

Ένα άλλο μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά στα τυχαία δίκτυα [Gri99], [Pen97] και αναφέρεται επίσης και σε θέματα συνδεσιμότητας [CR89], είναι το μακρύτερο μονοπάτι που μπορεί να εμφανιστεί εντός ενός τυχαίου δικτύου ή ο μέγιστος αριθμός βημάτων που μπορεί να απαιτηθούν για την σύνδεση δύο απομακρυσμένων κόμβων [MAH07]. Τόσο στο [CR89] όσο και στο [MAH07] υπολογίζεται η πιθανότητα μετάδοσης της πληροφορίας για συγκεκριμένο αριθμό βημάτων ενώ σε άλλες περιπτώσεις το ζήτημα αυτό τείνει να ταυτίζεται με την διάδοση της πληροφορίας κατά μήκος μονοδιάστατων δικτύων [DM02], [GE06]. Βάσει της μεθοδολογίας που προτάθηκε σε αυτήν την ενότητα μπορεί να δοθεί μία μέση εκτίμηση για τον μέγιστο αριθμό βημάτων που μπορεί να απαιτηθεί εντός ενός τυχαίου δικτύου πεπερασμένων κόμβων και την πιθανότητα να είναι συνδεδεμένη αυτή η διαδρομή.

Γενικά, δεν μπορεί να είναι γνωστή η τοπολογία ενός τυχαίου δικτύου. Αν όμως θεωρήσουμε ότι ως κορυφή του δένδρου έχει ληφθεί ένας από τους κεντρικότερους κόμβους του δικτύου τότε με μεγάλη πιθανότητα, βάσει της διαδικασίας κατασκευής του δένδρου, τα φύλλα του τελευταίου επιπέδου θα αναφέρονται στους πιο απομακρυσμένους κόμβους. Η μεγαλύτερη διαδρομή εντός του δικτύου θα αναφέρεται στον αριθμό βημάτων που απαιτούνται για να επικοινωνήσουν δύο απομακρυσμένοι κόμβοι. Επομένως, και πάντα σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο του ισοζυγισμένου δένδρου, μια μέση εκτίμηση για την μεγαλύτερη διαδρομή μπορεί να θεωρηθεί το διπλάσιο του ύψους του δένδρου που ισοδυναμεί με την σύνδεση δύο φύλλων που ανήκουν στο τελευταίο και πιο απομακρυσμένο επίπεδο. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη και την πρόταση 4.1 προκύπτει η μέση εκτίμηση για τον μέγιστο αριθμό βημάτων που μπορεί να απαιτηθεί εντός του δικτύου:

$$E(L_{\max}) = 2 \left\{ \left\lceil \log_{10} \left( \frac{(n-2)(k-1)}{(k+1)} + 1 \right) / \log_{10}(k) \right\rceil + 1 \right\} \quad (4.11)$$

Ενώ η πιθανότητα να διατηρείται συνδεδεμένη η αλυσίδα επικοινωνίας των  $2h$  βημάτων θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P(E(L_{\max})) = \prod_{m=1}^h P(l_{x(m),m} | l_{m,y(m)}) \quad (4.12)$$

## 4.3 Αξιολόγηση νέου μοντέλου για διαλείψεις σκίασης

### 4.3.1 Χωρική κατανομή κόμβων

Το πρακτικό αποτέλεσμα αυτής της ενότητας είναι η ανάπτυξη και παρουσίαση αναλυτικών σχέσεων για τον υπολογισμό τόσο του βαθμού  $d$  του δένδρου, ο οποίος ταυτίζεται με τον μέσο αριθμό γειτόνων που μπορεί να έχει ένας οποιοσδήποτε τυχαίος κόμβος, όσο και για τον συνολικό αριθμό  $n$  των κόμβων του δικτύου. Οι συγκεκριμένοι παράμετροι είναι αυτοί που τελικά συμπεριλαμβάνουν την χωρική κατανομή των κόμβων του δικτύου στο προτεινόμενο μοντέλο για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας. Επιπρόσθετα, επιλέχθηκε ο υπολογισμός τους να πραγματοποιηθεί για περιβάλλοντα διάδοσης με διαλείψεις εξαιτίας σκίασης που μοντελοποιούνται βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου. Για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού των γειτονικών κόμβων χρησιμοποιείται το νέο γενικευμένο μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας και παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Παρότι οι τελικές σχέσεις έχουν παρουσιαστεί και στην ενότητα (§2.6.4) θα παρουσιαστούν εν συντομία και εδώ για λόγους συνοχής με το υπόλοιπο μοντέλο συνδεσιμότητας.

Βάσει της προτεινόμενης μεθοδολογία, απαιτείται να εκφραστεί η κατανομή  $f_R(r | \gamma \geq \gamma_{th})$  των αποστάσεων ανάμεσα σε κάθε ζευγάρι κόμβων που έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους. Αρχικά, θεωρούμε ως γείτονες τους κόμβους εκείνους που ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος  $\gamma$  είναι μεγαλύτερος από μία τιμή κατωφλίου  $\gamma_{th}$  που αντιστοιχεί στην ευαισθησία του δέκτη και που είναι ίδια για όλους τους κόμβους του δικτύου. Τότε, ο σηματοθορυβικός λόγος σε απόσταση  $r$  από έναν δεδομένο κόμβο θα δίνεται σε γραμμική κλίμακα από την σχέση:

$$\gamma(r) = \frac{P_t}{N} K r^{-a} \quad (4.13)$$

Όπου:

$$K = G_t G_r \left( \frac{c}{4\pi f d_0} \right)^2 \quad (4.14)$$

Ενώ,  $P_t$  είναι η ισχύς εκπομπής,  $N$  είναι η πυκνότητα ισχύος του λευκού γκαουσιανού θορύβου,  $a$  είναι ο συντελεστής απωλειών και το  $K$  μια σταθερά που όπως προκύπτει από την (4.14) αντιπροσωπεύει την μέση απώλεια διάδοσης για την

συχνότητα λειτουργίας της σύνδεσης. Τέλος,  $X$  είναι μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με τυπική απόκλιση  $\sigma$  και που μοντελοποιεί την τυχειότητα του καναλιού διάλειψης. Επομένως, η πιθανότητα ύπαρξης μιας τυχαίας απλής σύνδεσης  $l_{i,j}$  θα δίνεται από την σχέση:

$$P(l_{i,j}) = P[\gamma \geq \gamma_{th} | R = r] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln \left( \frac{\gamma_{th} N}{P_t K} r^a \right)}{\sqrt{2} \sigma} \right) \quad (4.15)$$

Η τυχαία δομή του ασύρματου πολυβηματικού δικτύου που λειτουργεί σε μία πεπερασμένη περιοχή  $A$  με ακτίνα  $R_A$ , υποθέτουμε ότι προκύπτει από την εφαρμογή μίας ομογενούς διαδικασίας τυχαίων σημείων Poisson [MR96]. Τα σημεία που παράγονται από την διαδικασία αναπαριστούν τον αριθμό και την θέση των κόμβων του δικτύου. Επομένως, αν θεωρήσουμε ότι η διαδικασία πραγματοποιείται για πυκνότητα κόμβων ίση με  $\lambda$  κόμβους/m<sup>2</sup> τότε η μέση εκτίμηση για τον αριθμό των κόμβων του δικτύου είναι [BH05]:

$$E(n) = \lambda A \quad (4.16)$$

Η παραπάνω σχέση είναι η βάση για τον καθορισμό του συνόλου των κόμβων που αποτελούν το υπό εξέταση τυχαίο δίκτυο. Η χωρική κατανομή  $f_R(r)$  της θέσης των γειτονικών κόμβων θα υπολογίζεται όπως έχει αποδειχθεί στην ενότητα (§2.5) από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_R(r) = \frac{2r}{R_A^2}, \quad 0 \leq r \leq R_A \quad (4.17)$$

Κατόπιν εφαρμογής του θεωρήματος Bayes [PP02] η κατανομή  $f_R(r | \gamma \geq \gamma_{th})$  της απόστασης των γειτονικών κόμβων που είναι συνδεδεμένοι θα προκύπτει από την σχέση:

$$f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th}) = \frac{P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r] \cdot f_R(r)}{\int_0^{\infty} P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R = r] \cdot f_R(r) dr} \quad (4.18)$$

Εφαρμόζοντας της σχέσεις (4.16) και (4.17) στην (4.18) και υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα του παρανομαστή (βλέπε παράρτημα Α) προκύπτει η τελική αναλυτική μορφή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th}) = r \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t K} \right)^{\frac{2}{\alpha}} e^{-\left(\frac{\sqrt{2}\sigma}{a}\right)^2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t K} r^a \right)}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (4.19)$$

Η κατανομή αυτή αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ δύο υπαρκτών γειτονικών κόμβων που μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Με χρήση της παραπάνω κατανομής μπορεί να υπολογιστεί ο μέσος αριθμός των γειτονικών κόμβων  $E(d)$  που συμβάλλουν στην συνδεσιμότητα του δικτύου από την σχέση:

$$E(d) = \lambda \pi E \left[ R^2 | \gamma \geq \gamma_{th} \right] = \lambda \pi \int_0^{+\infty} r^2 f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma \geq \gamma_{th}) dr \Rightarrow \quad (4.20)$$

$$E(d) = \frac{\lambda \pi}{2} \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t K} \right)^{-\frac{2}{\alpha}} e^{3 \left( \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} \right)^2}$$

Τελικά, τα ακέραια μέρη  $\lfloor E(n) \rfloor$  και  $\lfloor E(d) \rfloor$  των αποτελεσμάτων των σχέσεων (4.16) και (4.20) αντίστοιχα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως  $n$  και  $d$  στο προτεινόμενο μοντέλο που παρουσιάστηκε και συγκεκριμένα στην σχέση (4.10) υπολογισμού της συνδεσιμότητας.

### 4.3.2 Δεσμευμένη πιθανότητα σύνδεσης

Το μοντέλο συνδεσιμότητας που προτάθηκε καταλήγει σε μία σχέση (4.10) όπου το τελικό αποτέλεσμα για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας προκύπτει από ένα γινόμενο δεσμευμένων πιθανοτήτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα γειτονικά κανάλια διάλειψης εμφανίζουν έντονες συσχετίσεις μεταξύ τους με αποτέλεσμα η διαθεσιμότητα του ενός να είναι άμεσα συσχετισμένη με την διαθεσιμότητα του γειτονικού του. Κάθε μια από τις δεσμευμένες πιθανότητες μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P(l_{x(m)+i,m} | l_{m,y(m)}) = \frac{P(l_{x(m)+i,m}, l_{m,y(m)})}{P(l_{m,y(m)})} \quad (4.21)$$

Όπου  $P(l_{m,y(m)})$  είναι η πιθανότητα ύπαρξης μίας απλής σύνδεσης που για δεδομένη απόσταση  $r$  υπολογίζεται από την σχέση (4.15) ενώ  $P(l_{x(m)+i,m}, l_{m,y(m)})$  είναι η πιθανότητα ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ κόμβων που απέχουν όχι ένα αλλά δύο βήματα. Οι δύο αυτοί κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με την μεσολάβηση ενός αναμεταδότη και επομένως απαιτούνται δύο διαδοχικές συνδέσεις για να γίνει αυτό εφικτό. Οι δύο γειτονικές διαδοχικές συνδέσεις είναι, βάσει των θεωρήσεων, συσχετισμένες και επομένως οι σηματοθορυβικοί λόγοι  $\gamma_2$  και  $\gamma_1$  αντίστοιχα αποτελούν συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές [SSP<sup>+</sup>10a]. Η από κοινού πιθανότητα που αντιστοιχεί στην ταυτόχρονη ύπαρξη των δύο αυτών συνδέσεων θα υπολογίζεται γενικά από την σχέση:

$$P(l_{x(m)+i,m}, l_{m,y(m)}) = \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f_{\gamma_1, \gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (4.22)$$

Όπου  $f_{\gamma_1, \gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2)$  είναι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής. Η κατανομή αυτή μπορεί να προκύψει από την αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της διδιάστατης κανονικής κατανομής, που θα συμβολίζεται με  $f_{w_1, w_2}(w_1, w_2)$ , και η οποία μπορεί να αναζητηθεί στο [PP02 Κεφάλαιο 7.2], χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο μαθηματικό μετασχηματισμό:

$$w_t = \frac{\left( \ln \gamma_t - \ln \left( \frac{P_t}{N} K r_t^{-a} \right) \right)}{\sigma_t}, \quad t = 1, 2 \quad (4.23)$$

Όπου ο σηματοθορυβικός λόγος  $\gamma_t$  είναι σε γραμμική κλίμακα και η τυπική απόκλιση  $\sigma_t$  είναι σε νέπερ κλίμακα. Επειδή όμως στα μοντέλα διάδοσης οι χαρακτηριστικές τιμές της τυπικής απόκλισης δίνονται σε dB κλίμακα η  $\sigma_t$  θα υπολογίζεται βάσει της αντίστοιχης σε dB τιμή της από τον τύπο:

$$\sigma_t = \frac{\ln 10}{10} \cdot \sigma_{t(dB)} \quad (4.24)$$

Μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού (4.23) στο ολοκλήρωμα της (4.22) και χρησιμοποιώντας το θεώρημα Bayes, η πιθανότητα ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ

κόμβων που απέχουν δύο βήματα θα υπολογίζεται μετά την χρήση απλών μαθηματικών (για αναλυτικότερα βλέπε παράρτημα Β) από την σχέση:

$$P_{w_2, w_1} = \int_{w_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{w_2^2}{2}\right) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{w_{th} - \rho w_2}{\sqrt{2(1-\rho^2)}}\right) \right] dw_2 \quad (4.25)$$

Όπου  $\rho$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης των δύο γειτονικών καναλιών διαλείψεων σκίασης. Η παραπάνω σχέση για την δεσμευμένη πιθανότητα σύνδεσης μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης όπου η λογαριθμοκανονική κατανομή χρησιμοποιείται για να περιγράψει φαινόμενα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας. Τα πιο χαρακτηριστικά από αυτά είναι τα αστικά περιβάλλοντα διάδοσης και τα περιβάλλοντα διάδοσης εσωτερικού χώρου. Αναφορικά με τον συντελεστή συσχέτισης δύο γειτονικών καναλιών διάλειψης, μια λεπτομερή μεθοδολογία για τον υπολογισμό του σε δίκτυα που βασίζονται στο IEEE 802.16 πρωτόκολλο μπορεί να βρεθεί στο [802.16b]. Διαφορετικά, μπορεί να προκύψει με στατιστική ανάλυση πραγματικών μετρήσεων από ασύρματα δίκτυα. Τελικά, οι δεσμευμένες πιθανότητες τις σχέσεις (4.10) που αναφέρονται στην πιθανότητα ύπαρξης σύνδεσης μεταξύ δύο κόμβων με την χρήση αναμεταδότη θα υπολογίζονται από την σχέση:

$$P(l_{x(m)+i,m} | l_{m,y(m)}) = \operatorname{erfc}^{-1}\left(\ln\left(\frac{\gamma_{th} N}{P_t K} r^a\right) / \sqrt{2}\sigma_1\right) \cdot \int_{w_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{w_2^2}{2}\right) \cdot \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{w_{th} - \rho w_2}{\sqrt{2(1-\rho^2)}}\right) \right] dw_2 \quad (4.26)$$

Η συνάρτηση εντός του ολοκληρώματος της (4.26) είναι συνεχής και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές στην συμπεριφορά της για όλο το πεδίο ορισμού της, οπότε ο υπολογισμός του ολοκληρώματος συγκλίνει γρήγορα για οποιαδήποτε ακρίβεια και για οποιαδήποτε αριθμητική μέθοδο επιλεγεί.

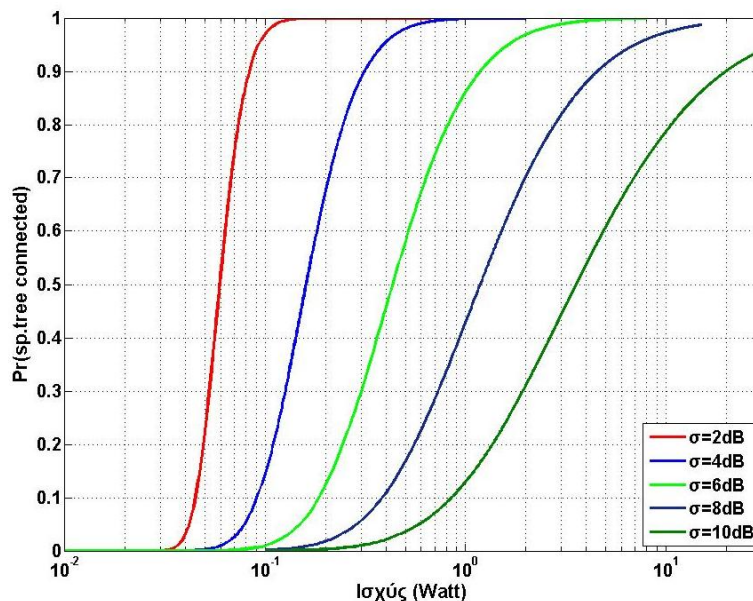


### 4.3.3 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται χρήσιμα αριθμητικά αποτελέσματα και σημαντικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας βάσει του νέου προτεινόμενου μοντέλου. Τα συγκεκριμένα αριθμητικά αποτελέσματα προέκυψαν υπό την υπόθεση ότι όλοι οι κόμβοι έχουν αντίστοιχες λειτουργικές δυνατότητες. Επιπρόσθετα, παρόλο που το προτεινόμενο μοντέλο συνδεσιμότητας παρέχει την δυνατότητα χρήσης διαφορετικών υποθέσεων για τα χαρακτηριστικά κάθε μίας σύνδεσης του δικτύου, για την λήψη των αποτελεσμάτων θεωρήθηκε ότι τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης είναι παρόμοια για όλες τις συνδέσεις.

Αρχικά αξιολογείται η επίδραση στην συνδεσιμότητα του δικτύου των διαφόρων χαρακτηριστικών του καναλιού διάδοσης όπως η τυπική απόκλιση των διαλείψεων σκίασης, ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ γειτονικών συνδέσεων αλλά και οι απώλειες διάδοσης κατά μήκος της σύνδεσης. Επιπλέον, διερευνάται η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας στην συνδεσιμότητα του δικτύου αλλά και η συμπεριφορά της πιθανότητας ύπαρξης συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου ως προς τον αριθμό των γειτόνων και των συνολικών κόμβων οι οποίοι εξαρτώνται από την χωρική κατανομή του δικτύου.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των γραφικών αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν είναι ότι η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου υπολογίζεται συναρτήσει της ισχύς εκπομπής και όχι της πυκνότητας των κόμβων. Αυτό συμβαίνει σε αντιπαράθεση με τα γραφικά αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων για δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος είναι ότι στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς θα παρέχεται η δυνατότητα στους κόμβους τους να ρυθμίζουν τα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος με στόχο να επιτυγχάνεται συνδεσιμότητα στο δίκτυο, να περιορίζονται φαινόμενα παρεμβολών αλλά και να προσαρμόζεται η ποιότητα υπηρεσίας των συνδέσεων στις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι το ίδιο το προτεινόμενο μοντέλο είναι προσαρμοσμένο να βασίζεται ιδιαίτερα στις διαθεσιμότητες των συνδέσεων περιλαμβάνοντας όμως παράλληλα και την χωρική κατανομή του δικτύου. Επομένως, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η αξιολόγηση της συνδεσιμότητας πρέπει να πραγματοποιηθεί συναρτήσει της ισχύς εκπομπής που καθορίζει τόσο τις διαθεσιμότητες των συνδέσεων όσο, και σε ένα μεγάλο βαθμό, το πλήθος των γειτονικών κόμβων.



Σχήμα 4.3: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδεμένου δένδρου συναρτήσει της ισχύος εκπομπής  $P_t$  για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  της κατανομής των διαλείψεων σκίασης.

Οι τιμές των λειτουργικών παραμέτρων και των συνδέσεων του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των υπό παρουσίαση διαγραμμάτων είναι, για τις περιπτώσεις που δεν αναφέρεται, οι ακόλουθες:  $\gamma_{th} = 10dB$ ,  $N = -60dBm$ ,  $a = 3.5$ ,  $K = 10$ ,  $\sigma = 4dB$ ,  $\rho = 0.9$  και  $r_t = 125m$ . Αντίστοιχα, θεωρείται ότι η πυκνότητα των κόμβων είναι:  $\lambda = 0.0001$  κόμβοι/ $m^2$  σε δίκτυο διαστάσεων  $A = 10^6 m^2$  και επομένως σύμφωνα με την (4.16) το δίκτυο θα περιέχει  $n = 100$  κόμβους. Η συχνότητα λειτουργίας ορίστηκε στα 2.4GHz που αποτελεί ελεύθερη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων και χρησιμοποιείται από διάφορα ασύρματα δίκτυα όπως αυτά που βασίζονται στο IEEE 802.11 πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η πιθανότητα ύπαρξης συνδεδεμένου συνδεδεμένου δένδρου η οποία θα αναφέρεται αντίστοιχα και ως πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδεμένου δένδρου. Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδεμένου δένδρου αποτελεί, όπως αποδείχθηκε σε προηγούμενες ενότητες, ένα άνω όριο για την πραγματική πιθανότητα να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ασφαλή υπολογισμό των ελάχιστα απαιτούμενων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου που ανταποκρίνονται στην κρίσιμη φάση της εμφάνισης συνδεσιμότητας σε ένα τυχαίο δίκτυο με τα υπό θεώρηση χαρακτηριστικά. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα διαγράμματα του σχήματος 4.3 είναι η επιδείνωση της συνδεσιμότητας καθώς αυξάνονται οι τυπικές αποκλίσεις  $\sigma$  της κατανομής και κατά συνέπεια τα φαινόμενα διαλείψεων εντός του δικτύου. Είναι προφανές ότι για τυπικές

αποκλίσεις μεγαλύτερες των 8dB απαιτείται αρκετά υψηλότερη ισχύς για να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα του δικτύου.

Το γεγονός αυτό φαίνεται να αντιβαίνει τα συμπεράσματα της ενότητας (§2.7), αλλά και τις δημοσιευμένες εργασίες [MAG08], [BH05] όπου τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρη βελτίωση της συνδεσιμότητας παράλληλα με την αύξηση της τυπικής απόκλισης της κατανομής των διαλείψεων σκίασης. Στην πρώτη περίπτωση η αξιολόγηση της συνδεσιμότητας έγινε μέσω του υπολογισμού της πιθανότητας απομόνωσης όπως προκύπτει από το νέο τροποποιημένο μοντέλο υπολογισμού της, ενώ στην περίπτωση των δημοσιευμένων εργασιών η αξιολόγηση βασίστηκε και εκεί στον υπολογισμό της πιθανότητας απομόνωσης βάσει όμως της απλής διαδεδομένης μεθοδολογία που περιγράφεται λεπτομερώς στο 2 κεφάλαιο.

Το παραπάνω συμπέρασμα οδηγεί στην ανάγκη αναλυτικότερης μελέτης και διερεύνησης της απόκλισης στην συμπεριφορά της συνδεσιμότητας που προκύπτει από τα δύο μοντέλα υπολογισμού της. Ξεκινώντας τη διερεύνηση από το απλούστερο μοντέλο συνδεσιμότητας, που χρησιμοποιείται στις εργασίες των Miorandi [MA05], [MAG08] και Bettstetter [BH05] και που παρουσιάστηκε στην ενότητα (§2.6.3), διαπιστώνουμε ότι καθώς αυξάνονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  της κατανομής των διαλείψεων σκίασης αυξάνεται αντίστοιχα και το εμβαδό κάλυψης ενός τυχαίου κόμβου που δίνεται από την σχέση:

$$Cov = \pi E \left[ R^2 \mid \gamma \geq \gamma_{th} \right] \quad (4.27)$$

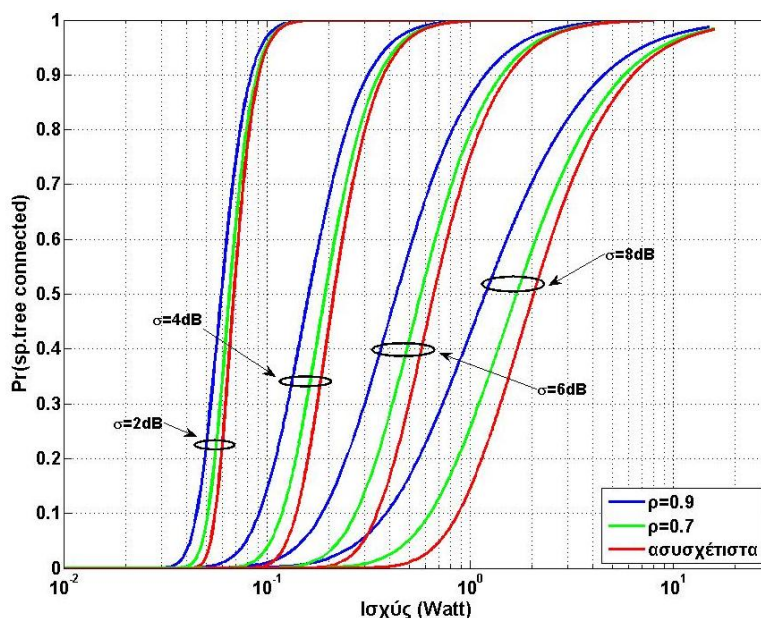
Κατά συνέπεια υπάρχει αύξηση του μέσου αριθμού των γειτονικών κόμβων  $E(d)$  που συνεπάγεται αντίστοιχη μείωση της πιθανότητας απομόνωσης, όπως φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$P_{iso} = e^{-E(d)} = e^{-\rho \pi \left[ R^2 \mid \gamma \geq \gamma_{th} \right]} \quad (4.28)$$

Η μείωση της πιθανότητας απομόνωσης ενός τυχαίου κόμβου ισοδυναμεί με βελτίωση της συνδεσιμότητας κάτι που ορθά αναφέρεται στις δημοσιευμένες εργασίες. Τα ίδια συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν όμως και από το προτεινόμενο μοντέλο. Από την σχέση (4.20) γίνεται σαφές ότι ο μέσος αριθμός γειτονικών κόμβων αυξάνεται με την αύξηση της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  και το ίδιο θα συμβεί και στην πιθανότητα απομόνωσης η οποία όμως δεν απαιτείται από την μεθοδολογία να υπολογιστεί. Παρόλα αυτά, η πιθανότητα ύπαρξης συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου, η οποία προτείνεται ως μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας

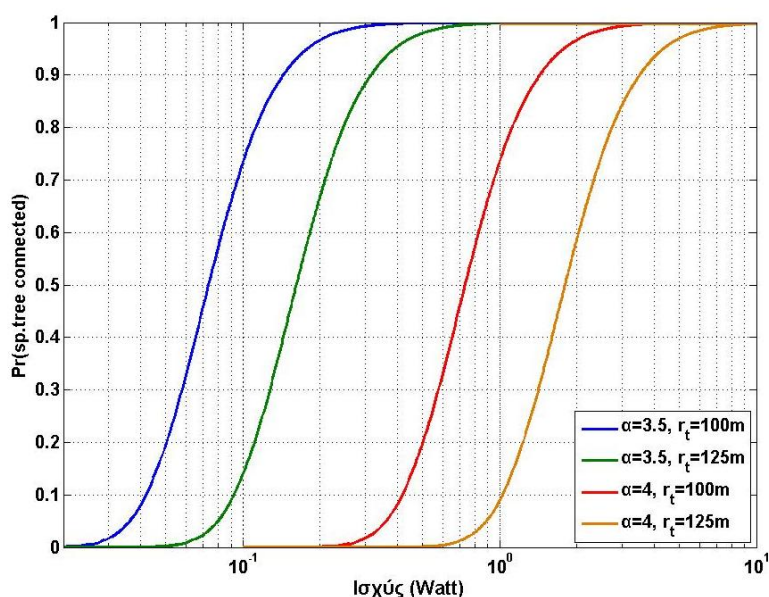
αντί της πιθανότητας απομόνωσης, λαμβάνει επιπλέον υπόψη και την διαθεσιμότητα των συνδέσεων. Όμως, τόσο η διαθεσιμότητα της απλής σύνδεσης  $P(l_{m,y(m)})$  όσο και η δεσμευμένη διαθεσιμότητα των δύο συνδέσεων  $P(l_{x(m)+i,m}, l_{m,y(m)})$  εξαρτώνται σημαντικά από τις τιμές της τυπικής απόκλισης και για τις υψηλότερες τιμές του  $\sigma$  μπορεί να εμφανιστούν μειωμένες.

Από την τελική εξίσωση (4.10) του προτεινόμενου μοντέλου, γίνεται σαφές ότι υποβάθμιση των διαθεσιμοτήτων στις συνδέσεις ενός πεπερασμένου τυχαίου δικτύου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της συνδεσιμότητας του. Επομένως, γίνεται τελικά κατανοητό ότι η κατάληξη σε διαφορετικά συμπεράσματα οφείλεται στην εμφάνιση ενός επιπλέον παράγοντα στην μεθοδολογία υπολογισμού της συνδεσιμότητας που είναι οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων του δικτύου. Αντίστοιχα συμπεράσματα έχουν προκύψει στην εργασία [SCA05] όπου παρουσιάζονται εκτενείς προσομοιώσεις για δίκτυα που βασίζονται σε IEEE 802.11 πρωτόκολλα και που λειτουργούν σε περιβάλλοντα με έντονα φαινόμενα διαλείψεων εξαιτίας σκίασης. Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι από τα διαγράμματα τους φαίνεται ότι για πολύ υψηλές τιμές της τυπικής απόκλισης μπορεί το δίκτυο να οδηγηθεί σε περιορισμένη συνδεσιμότητα.



Σχήμα 4.4: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύος εκπομπής  $P_t$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  της διδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής για τις αντίστοιχες τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ .

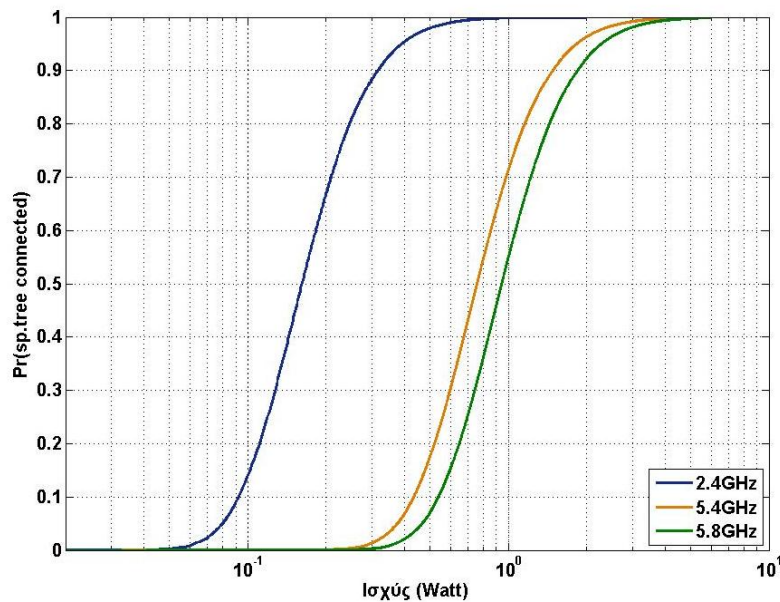
Στο σχήμα 4.4, παρουσιάζεται η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής  $P_t$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  της διδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής που περιγράφει τα συσχετισμένα κανάλια διαλείψεων σκίασης. Οι συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζονται για διάφορες τυπικές αποκλίσεις της παραπάνω κατανομής. Ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι η μείωση των συντελεστών συσχέτισης οδηγεί σε μείωση της συνδεσιμότητας καθώς απαιτείται περισσότερη ισχύς για να φτάσει η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδετικού δένδρου σε υψηλές τιμές. Αυτό οφείλεται εν μέρει και στον τρόπο που επιλέχθηκαν οι συσχετισμένες συνδέσεις στο προτεινόμενο μοντέλο. Επιπλέον, μπορεί να φανεί ότι οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης επηρεάζουν σε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό την συνδεσιμότητα καθώς αυξάνεται η τιμή της τυπικής απόκλισης. Αυτό είναι λογικό καθώς υψηλές τιμές του  $\sigma$  ισοδυναμούν με έντονα φαινόμενα διαλείψεων και μεγαλύτερη επίδραση του φαινομένου στην συνδεσιμότητα και την απόδοση του δικτύου.



Σχήμα 4.5: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής  $P_t$  για διαφορετικές τιμές των χαρακτηριστικών των μέσων απωλειών διάδοσης.

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την συνδεσιμότητα ενός δικτύου είναι οι μέσες απώλειες διάδοσης. Σε αντίθεση όμως με τα φαινόμενα διαλείψεων η επίδραση τους μπορεί να αξιολογηθεί και να προβλεφθεί πολύ ευκολότερα καθώς δεν αποτελούν στοχαστικό φαινόμενο και υπολογίζονται συνήθως από εμπειρικά ντετερμινιστικά μοντέλα. Στο σχήμα 4.5, φαίνεται η

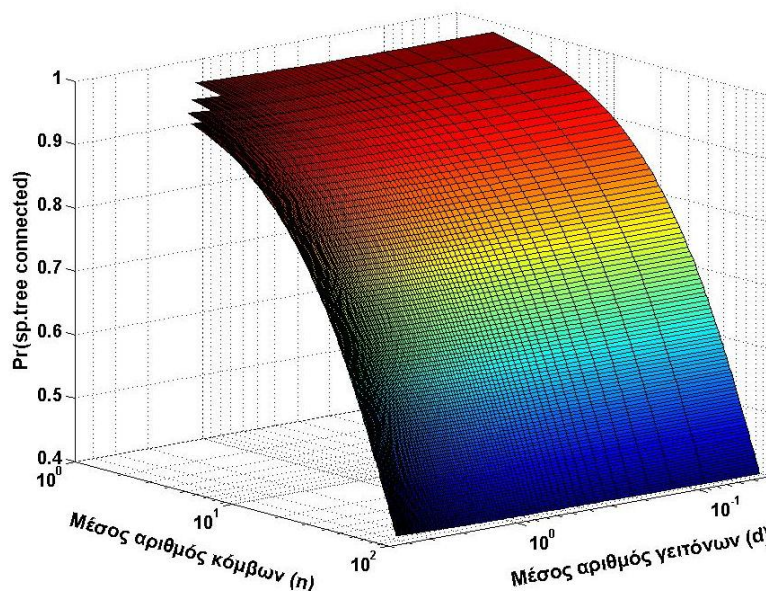
επίδραση του συντελεστή απωλειών διάδοσης  $\alpha$  και της μέσης απόστασης  $r_i$  που αντιστοιχούν στις συνδέσεις του δικτύου. Πρακτικά, τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μέσης τιμή του σηματοθορυβικού λόγου  $\gamma_{av} = \frac{P_t}{N} K r_i^{-\alpha}$  στην σχέση (4.23) που αναφέρεται στην μέση εξασθένιση κατά μήκος μίας σύνδεσης χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα διαλείψεων. Από τα διαγράμματα του σχήματος 4.5 γίνεται σαφές ότι η αύξηση του μέσου σηματοθορυβικού λόγου επηρεάζει σημαντικά την συνδεσιμότητα του δικτύου και αποτελεί έναν από τους πρωταρχικούς παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα αρχικά στάδια της σχεδίασης των ασύρματων δικτύων.



Σχήμα 4.6: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύος εκπομπής  $P_t$  για διάφορες τιμές της συχνότητας λειτουργίας των συνδέσεων του δικτύου.

Η συχνότητα λειτουργίας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους ενός ασύρματου δικτύου καθώς η επιλογή της σχετίζεται με το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το δίκτυο και την μέγιστη ρυθμαπόδοση (throughput) που μπορεί να επιτευχθεί. Παρόλο που οι υψηλότερες συχνότητες παρέχουν την δυνατότητα υψηλότερων ταχυτήτων στις συνδέσεις του δικτύου, οδηγούν σε σημαντική μείωση της συνδεσιμότητας του. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 4.6 όπου παρουσιάζονται αποτελέσματα για μερικές από τις αναμενόμενες ζώνες συχνοτήτων που θα λειτουργούν τα ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα νέας γενιάς. Η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας οδηγεί σε αύξηση των μέσων

απωλειών διάδοσης και σε υψηλότερα φαινόμενα διαλείψεων με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της συνδεσιμότητας.



Σχήμα 4.7: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου συναρτήσει του μέσου αριθμού των γειτόνων  $E(d)$  ενός κόμβου και του συνολικού αριθμού των κόμβων του δικτύου  $E(n)$  για τυπική απόκλιση  $\sigma = 6dB$ , συντελεστή απωλειών  $a = 3$  και ισχύ εκπομπής  $P_t = 1Watt$ .

Ένας από τους σημαντικότερους και καθοριστικότερους παράγοντες από τον οποίο εξαρτάται η συνδεσιμότητα του δικτύου βάσει του προτεινόμενου μοντέλου είναι η χωρική κατανομή των κόμβων του δικτύου. Από την αρχή της διδακτορικής διατριβής έχει θεωρηθεί ότι η χωρική κατανομή ενός τυχαίου δικτύου περιγράφεται από μία ομογενή διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson που αποτελεί, όπως δείξαμε στην αρχή του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου, την γενικότερη δυνατή περίπτωση. Η εξάρτηση της πιθανότητας σύνδεσης του συνδετικού δένδρου από τα χαρακτηριστικά της χωρικής κατανομής των κόμβων του δικτύου γίνεται μέσω του υπολογισμού τόσο του συνολικού αριθμού των κόμβων του δικτύου από την σχέση (4.16) όσο και του υπολογισμού του μέσου αριθμού γειτόνων που αντιστοιχεί σε έναν τυχαίο κόμβο του δικτύου σύμφωνα με την τελική σχέση (4.20). Τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της χωρικής κατανομής, ενώ και η μεθοδολογία υπολογισμού τους προέρχεται από την χωρική ανάλυση.

Η εξάρτηση της συνδεσιμότητας από την χωρική κατανομή του δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7 όπου η πιθανότητα ύπαρξης συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου μεταβάλλεται συναρτήσει του μέσου συνολικού αριθμού των κόμβων του δικτύου που ξεκινάει από ένα ελάχιστο αριθμό και φτάνει μέχρι 100 κόμβους αλλά

και συναρτήσει του μέσου αριθμού γειτόνων που μπορεί να έχει ένας τυχαίος κόμβος του οποίου οι τιμές ξεκινάνε από μία ελάχιστη τιμή και φθάνουν μέχρι 10 γειτονικούς κόμβους. Το τρισδιάστατο διάγραμμα του σχήματος 4.7 προέκυψε για τυπική απόκλιση  $\sigma = 6dB$ , συντελεστή απωλειών  $a = 3$  και ισχύ εκπομπής  $P_t = 1Watt$ .

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κόμβων του δικτύου και επομένως υπάρχει και αντίστοιχη μείωση της συνδεσιμότητας. Η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως φυσιολογική καθώς οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων σε περιβάλλοντα διαλείψεων δεν είναι ποτέ ίσες με την μονάδα και επομένως το γινόμενο των πιθανοτήτων της (4.20), που απαρτίζεται από τις διαθεσιμότητες των συνδέσεων, μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των όρων που απαριθμούν τις συνδέσεις του δικτύου. Η συμπεριφορά αυτή της συνδεσιμότητας έχει παρατηρηθεί σε αρκετές δημοσιευμένες εργασίας όπου μελετάται η ασυμπτωτική συμπεριφορά της για μη πεπερασμένα δίκτυα [GK98], [DFT06]. Επιπρόσθετα, οι Gupta και Kumar [GK98] απέδειξαν ότι ο αριθμός των γειτόνων πρέπει να αυξάνεται λογαριθμικά ως προς των συνολικό αριθμό των κόμβων του δικτύου για να διατηρείται η πλήρης συνδεσιμότητα του δικτύου.

Αντίστοιχα, τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του μέσου αριθμού των γειτονικών κόμβων του δικτύου δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την συνδεσιμότητα του δικτύου. Το συμπέρασμα αυτό όμως προκύπτει για την ειδική περίπτωση όπου θεωρείται ότι όλες οι συνδέσεις του δικτύου έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά διάδοσης. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν διαφορετικά χαρακτηριστικά για τις συνδέσεις του δικτύου αναμένεται να προκύψουν και διαφορετικά αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του μέσου αριθμού των γειτόνων στην συνδεσιμότητα του δικτύου.

Τέλος, κλείνοντας με την ενότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων, υπολογίζεται η κρίσιμη πυκνότητα των κόμβων ( $\lambda_c$ ) που απαιτείται ώστε το δίκτυο να διατηρήσει την συνδεσιμότητα του. Η έκφραση στην σχέση (4.10) απαιτεί την γνώση των απλών και των υπό συνθήκη πιθανοτήτων που αντιστοιχούν στις διαθεσιμότητες των συνδέσεων, με τον τρόπο που αυτές έχουν οριστεί από το προτεινόμενο μοντέλο, ώστε να λυθεί αντίστροφα για κάθε δεδομένη τιμή της πιθανότητας σύνδεσης του συνδετικού δένδρου. Παρόλα αυτά, μπορεί να θεωρηθούν τα ίδια χαρακτηριστικά για όλες τις συνδέσεις του δικτύου και οι τιμές επομένως των απλών και των υπό συνθήκη πιθανοτήτων σύνδεσης να υπολογιστούν βάσει των τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για το σύνολο των αριθμητικών αποτελεσμάτων.



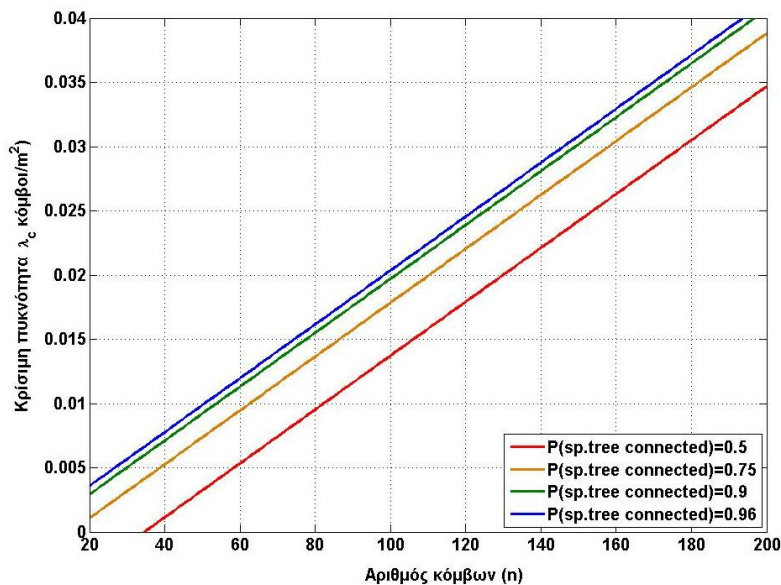
Επομένως, για δεδομένη τιμή της πιθανότητας σύνδεσης  $P(\text{sp. tree connected}) = p$  η κρίσιμη πυκνότητα κόμβων θα υπολογίζεται λογαριθμίζοντας την:

$$P(\text{sp. tree connected}) = P(l_{m,y(m)})^d \times P(l_{x(m),m} | l_{m,y(m)})^{n-d-1} \quad (4.29)$$

Και λύνοντας αντίστροφα προκύπτει η σχέση:

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{E(d)} \cdot \frac{\log_{10}(p) + (n-1) \log_{10}\left(\frac{P(l_{m,y(m)})}{P(l_{x(m),m} | l_{m,y(m)})}\right)}{2 \log_{10}(P(l_{m,y(m)})) - \log_{10}\left(P(l_{x(m),m} | l_{m,y(m)})\right)} \quad (4.30)$$

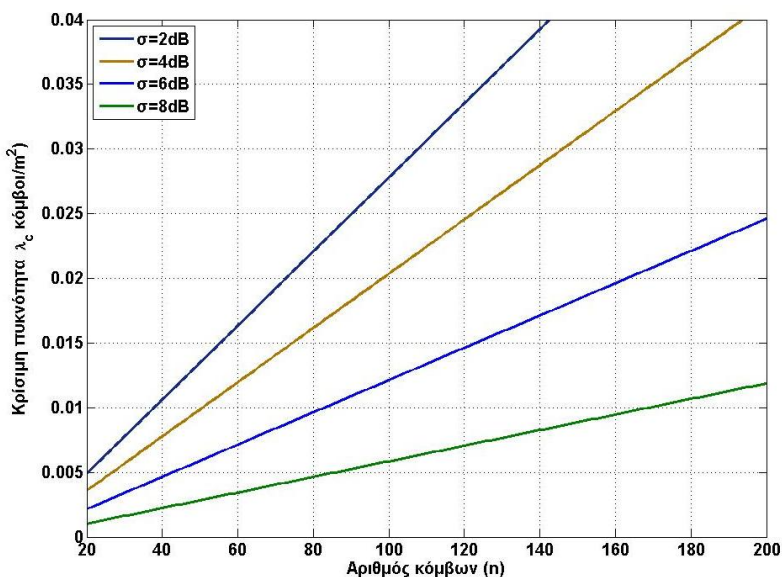
Από την τελευταία σχέση λαμβάνονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 4.8 και 4.9.



Σχήμα 4.8: Η κρίσιμη πυκνότητα για την σύνδεση του δικτύου  $\lambda_c$  για διαφορετικές πιθανότητες σύνδεσης του συνδετικού δένδρου θεωρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.

Στο σχήμα 4.8, παρουσιάζεται η κρίσιμη πυκνότητας  $\lambda_c$  για διαφορετικές πιθανότητες σύνδεσης του συνδετικού δένδρου ενώ στο σχήμα 4.9 για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της κατανομής των διαλείψεων με σταθερή πιθανότητα σύνδεσης ίση με 0.96. Και στα δύο διαγράμματα όλες οι υπόλοιπες παράμετροι θεωρούνται σταθερές. Είναι προφανές ότι καθώς ο αριθμός των κόμβων αυξάνει απαιτείται υψηλότερη πυκνότητα κόμβων για να διατηρηθεί το δίκτυο συνδεδεμένο

για προκαθορισμένη πιθανότητα σύνδεσης. Παράλληλα, όταν η απαίτηση για υψηλότερη πιθανότητα σύνδεσης αυξάνει, αυξάνει και η αντίστοιχη τιμή του  $\lambda_c$  που θα κρατήσει το δίκτυο συνδεδεμένο. Στο τελευταίο σχήμα μπορούν επίσης να διαπιστωθούν τα παραπάνω δύο συμπεράσματα για διαφορετικές όμως τυπικές αποκλίσεις, που όπως διαπιστώνεται, επηρεάζουν τον ρυθμό αύξησης της απαιτούμενης κρίσιμης πυκνότητας κόμβων.



Σχήμα 4.9: Η κρίσιμη πυκνότητα για την σύνδεση του δικτύου  $\lambda_c$  για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης της κατανομής των διαλείψεων εξαιτίας σκίασης για σταθερή πιθανότητα σύνδεσης ίση με 0.96.

## 4.4 Βελτίωση συνδεσιμότητας με χρήση τεχνικών διαφορισμού

### 4.4.1 Νέο μοντέλο συνδεσιμότητας με χρήση μεθόδων διαφορισμού

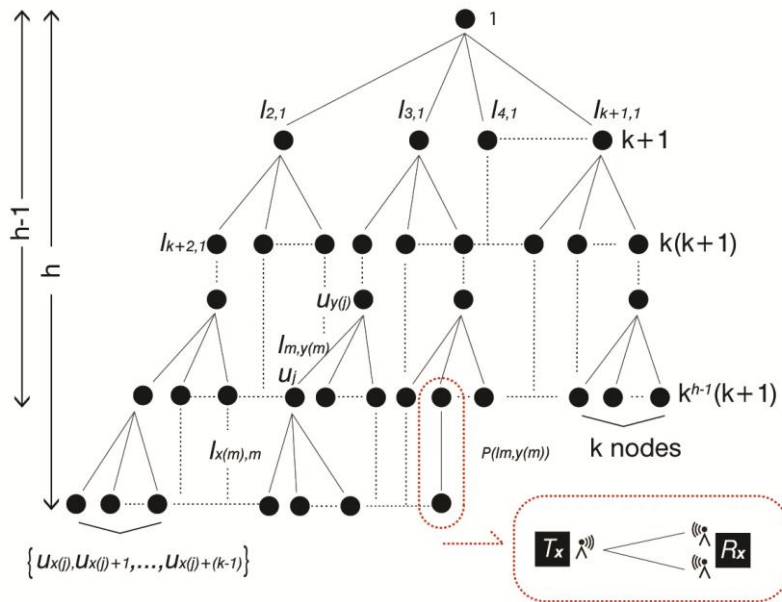
Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας που χρησιμοποιεί ως μέτρο αξιολόγησης την πιθανότητα να υπάρχει ένα συνδεδεμένο συνδετικό δένδρο εντός του γράφου του δικτύου. Το μοντέλο αυτό αξιολογήθηκε κατόπιν για περιβάλλοντα διάδοσης συσχετισμένων διαλείψεων μεγάλης κλίμακας που ανταποκρίνονται ιδιαίτερα στα φυσικά περιβάλλοντα που αναμένεται να λειτουργήσουν τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Πέρα όμως από το ζήτημα της αξιολόγησης της συνδεσιμότητας, προκύπτει και το ζήτημα της

βελτίωσής της. Στο φυσικό επίπεδο ενός δικτύου οι επιλογές είναι συγκεκριμένες [LTW04]. Η πιο διαδεδομένη και με εύκολη εφαρμογή σε αυτά τα συστήματα είναι η χρήση τεχνικών διαφορικής λήψης [Ala98] που βελτιώνουν την διαθεσιμότητα των συνδέσεων με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Τέτοιες τεχνικές έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν καλή λύση για πολυβηματικές μεταδόσεις όπου λόγω της επιδείνωσης του μεταδιδόμενου σήματος κατά μήκος των συνδέσεων απαιτείται αύξηση της ποιότητας τους [BFY04].

Το αντικείμενο, επομένως, της συγκεκριμένης ενότητας είναι η παραμετροποίηση του προτεινόμενου μοντέλου έτσι ώστε να ενσωματώνει της μεθόδους διαφορικής λήψης στον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ασύρματων πολυβηματικών δικτύων. Κατόπιν, ακολουθεί η αξιολόγηση του για περιβάλλοντα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (σκίασης) ώστε να υπολογιστεί το τελικό κέρδος που επιφέρει στην συνδεσιμότητα η εφαρμογή τέτοιων μεθόδων. Οι δύο προτεινόμενες τεχνικές που θα αξιολογηθούν στα πλαίσια αυτής της ενότητας είναι αυτές του Συνδυασμού με Επιλογή (SC) και του Συνδυασμού Μέγιστου Λόγου (MRC). Για την εφαρμογή των δύο αυτών τεχνικών θεωρούμε ότι κάθε δέκτης λαμβάνει το σήμα από δύο διαφορετικές κεραίες και πραγματοποιεί επιλογή ή άθροιση των λαμβανόμενων σηματοθορυβικών λόγων που αντιστοιχούν στους δύο επιμέρους κλάδους της σύνδεσης.

Στην πραγματικότητα, όλη η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην ενότητα (§4.2) είναι γενική και ισχύει ακόμα και για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μέθοδοι διαφορικής λήψης στις συνδέσεις του δικτύου. Συνοπτικά, λοιπόν μπορούμε να αναφέρουμε ότι η κρίσιμη στιγμή μετάβασης του δικτύου από την μη συνδεδεμένη κατάσταση στην συνδεδεμένη χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση της 1-συνδεσιμότητας η οποία ταυτίζεται με την εμφάνιση του πρώτου συνδεδεμένου συνδεδετικού δένδρου στον γράφο που απεικονίζει το τυχαίο δίκτυο. Η πιθανότητα αυτού του ενδεχομένου θα αποτελέσει κατά τα γνωστά το μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας καθώς αποτελεί ένα άνω όριο για την πραγματική πιθανότητα να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο. Χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα μπορούμε και σε αυτή την περίπτωση να θεωρήσουμε ότι πρώτο συνδεδετικό δένδρο που θα εμφανιστεί είναι το ισοζυγισμένο του οποίου όλοι οι κόμβοι με εξαίρεση τα φύλλα του τελευταίου επιπέδου έχουν τον ίδιο βαθμό  $d$ . Το δένδρο αυτό, το οποίο παρουσιάζεται λεπτομερώς στο σχήμα 4.10 και κατασκευάζεται σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται στη ενότητα (§4.2.2), έχει την βασική ιδιότητα ότι κάθε νοητή σύνδεση μεταξύ δύο γειτονικών κόμβων αντιπροσωπεύει τους δύο κλάδους της διαφορικής ζεύξης. Επομένως, η πιθανότητα ύπαρξης κάθε μίας από τις συνδέσεις του δένδρου

ταυτίζεται με την πιθανότητα ύπαρξης ή αντίστοιχα την διαθεσιμότητα της διαφορικής ζεύξης που εξαρτάται από την επιλεγμένη τεχνική διαφορισμού.



Σχήμα 4.10: Δομή του ισοζυγισμένου συνδετικού δένδρου βάσει χρήσης τεχνικών διαφορισμού.

Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη θεωρηθεί, ο υπολογισμός της συνδεσιμότητας του δικτύου θα προκύπτει από την σχέση:

$$\begin{aligned}
 P(\text{network connected}) &\leq P(\text{sp. tree connected}) = \\
 &= P(l_{n,y(n)}, l_{n-1,y(n-1)}, \dots, l_{3,1}, l_{2,1})
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

Γενικά, στα διαφορικά κανάλια διάλειασης οι σηματοθορυβικοί λόγοι που αντιστοιχούν σε κάθε έναν από τους κλάδους μίας σύνδεσης είναι συνήθως έντονα συσχετισμένοι. Επομένως, η πιθανότητα ύπαρξης  $P(l_{j,y(j)})$  για κάθε τυχαία σύνδεση  $l_{j,y(j)}$  του συνδετικού δένδρου θα προκύπτει από την από κοινού κατανομή που περιγράφει την συσχετισμένη διαφορική ζεύξη. Στο σχήμα 4.10 αναπαρίσταται η πραγματική δομή κάθε νοητής σύνδεσης με την χρήση δύο κόμβων (ενός πομπού  $T_x$  και ενός δέκτη  $R_x$ ) που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δύο διαφορετικών διαδρομών διάδοσης. Εξαιτίας του συγκεκριμένου γεγονότος, βοηθάει για την συνέχιση της ανάλυσης να θεωρηθεί ότι οι συνδέσεις του υπό θεώρηση δένδρου είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστες καθώς, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε σύνδεση

περιέχει συσχετισμένα κανάλια. Η επιλογή αυτή αποτελεί και μία από τις βασικές διαφορές της παρούσας μεθοδολογίας σε σχέση με αυτή που έχει ήδη παρουσιασθεί στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου.

Υπό αυτές τις συνθήκες η από κοινού πιθανότητα της (4.31) ισοδυναμεί με το γινόμενο των πιθανοτήτων σύνδεσης των αντίστοιχων ανεξάρτητων συνδέσεων όπως ορίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned}
 & P(l_{n,y(n)}, l_{n-1,y(n-1)}, \dots, l_{j,y(j)}, \dots, l_{k+2,2}, \dots, l_{2,1}) = \\
 & = P(l_{n,y(n)}) \cdot P(l_{n-1,y(n-1)}) \cdot \dots \cdot P(l_{j,y(j)}) \cdot \dots \cdot P(l_{k+2,2}) \cdot \dots \cdot P(l_{2,1}) = \quad (4.32) \\
 & = \prod_{\text{all } n-1 \text{ links}} P(\text{link availability})
 \end{aligned}$$

Από την τοπολογία του σχήματος 4.10 είναι προφανές ότι το συνδεδεμένο δένδρο αποτελείται από αλυσίδες επικοινωνίας με ύψη  $h$  και  $h-1$  αντίστοιχα. Λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις αποδεδειγμένες προτάσεις 4.1 και 4.2 προκύπτει η τελική σχέση για τον υπολογισμό της πιθανότητας ύπαρξης συνδεδεμένου συνδεδετικού δένδρου:

$$\begin{aligned}
 P(\text{sp. tree connected}) = & \left\{ \prod_{j=2}^{d+1} \left[ P(l_{j,1}) \times \prod_{i=0}^{d-2} P(l_{x(j)+i,j}) \right] \right\} \times \\
 & \left\{ \prod_{j=d+2}^{y(n)-1} \prod_{i=0}^{d-2} P(l_{x(j)+i,j}) \right\} \times \left\{ \prod_{j=x(y(n))}^n P(l_{j,y(j)}) \right\} \quad (4.33)
 \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας απαιτείται τελικά ο προσδιορισμός των πιθανοτήτων  $P(l_{j,y(j)})$  καθώς και η εκτίμηση τόσο του συνολικού αριθμού  $n$  των κόμβων του δικτύου όσο και του αριθμού των γειτόνων  $d$  που μπορεί να έχει ένας τυχαίος κόμβος του δικτύου.

#### 4.4.2 Διαθεσιμότητα διαφορικών συνδέσεων

Το πρώτο βήμα για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας είναι να χαρακτηριστεί η πιθανότητα ύπαρξης  $P(l_{j,y(j)})$  μίας τυχαίας σύνδεσης του συνδεδετικού δένδρου. Δεδομένου ότι θα χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές συνδυασμού με επιλογή (SC) και συνδυασμού μέγιστου λόγου (MRC) για την ανάκτηση του σήματος, ο δέκτης είναι εφοδιασμένος με δύο κεραιές. Επομένως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, κάθε σύνδεση θα

απαρτίζεται από δύο επιμέρους απλές ζεύξεις (κλάδους της σύνδεσης) οι οποίες είναι και έντονα συσχετισμένες. Η ύπαρξη καθενός από αυτούς τους κλάδους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης και την κατανομή που ακολουθούν οι διαλείψεις. Ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη για κάθε κλάδο της σύνδεσης  $j$  θα δίνεται σε γραμμική κλίμακα από την σχέση:

$$\gamma_i = \gamma_{p,i} X_i \quad i=1,2 \quad (4.34)$$

Όπου  $X_i$  είναι η τυχαία μεταβλητή που περιγράφει το φαινόμενο των διαλείψεων, ενώ  $\gamma_{p,i}$  είναι η εξασθένηση λόγω απωλειών διάδοσης και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\gamma_{p,i} = \frac{P_{t,i}}{N} K R_i^{-a} \quad (4.35)$$

Κάθε κόμβος έχει την δυνατότητα να λαμβάνει δύο σήματα με διαφορετικό σηματοθορυβικό λόγο,  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  αντίστοιχα, από τις δύο κεραιές του οι οποίες είναι τοποθετημένες σε πολύ κοντινή απόσταση. Ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται ο τελικός σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_r = \begin{cases} \max(\gamma_1, \gamma_2) & , \text{για SC} \\ \gamma_1 + \gamma_2 & , \text{για MRC} \end{cases} \quad (4.36)$$

Και σε αυτή την περίπτωση θα θεωρηθεί ότι η βασική αιτία εμφάνισης τυχαιότητας στο κανάλι διάδοσης είναι οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας που οφείλονται σε φαινόμενα σκίασης. Επομένως, η τυχαία μεταβλητή  $X_i$  θα περιγράφεται από την λογαριθμοκανονική κατανομή. Οι δύο σηματοθορυβικοί λόγοι που αναφέρονται στην σχέση (4.36) είναι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές κυρίως λόγω των ομοιοτήτων ανάμεσα στα μονοπάτια διάδοσης των δύο κοντινών κλάδων της σύνδεσης. Η από κοινού κατανομή τους είναι μια διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που περιγράφεται από την σχέση (3.5) του προηγούμενου κεφαλαίου.

Η διαθεσιμότητα της διαφορικής σύνδεσης θα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P(l_{j,y(j)}) = 1 - P(\gamma_r < \gamma_{th}) = 1 - \int_{-\infty}^{\gamma_{th}} \int_{-\infty}^{\gamma_{th}} f(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (4.37)$$

Ακολουθώντας την μεθοδολογία που αναλύεται στο παράρτημα Β προκύπτει η τελική σχέση της πιθανότητας ύπαρξης  $P(l_{j,y(j)})$  μίας τυχαίας σύνδεσης του συνδετικού δένδρου:

$$P(l_{j,y(j)}) = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{\ln \gamma_{th} - \mu_1}{\sigma_1}} f_{u_1}(u_1) \left( 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{w_2 - \rho u_1}{\sqrt{2(1-\rho^2)}} \right) \right) du_1 \quad (4.38)$$

Στην (4.38),  $f_{u_1}(u_1) = e^{-u_1^2/2} / \sqrt{2\pi}$  είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής ενώ το  $w_2$  υπολογίζεται ανάλογα με την τεχνική από την παρακάτω σχέση:

$$w_2 = \begin{cases} (\ln \gamma_{th} - \mu_2) / \sigma_2 & , \text{για SC} \\ (\ln(\gamma_{th} - e^{\sigma_1 u_1 + \mu_1}) - \mu_2) / \sigma_2 & , \text{για MRC} \end{cases} \quad (4.39)$$

Τα  $\mu_i, \sigma_i$  είναι οι στατιστικοί παράμετροι της κατανομής σε νέπερ κλίμακα ( $\sigma_i = (\ln 10/10) \sigma_{i(dB)}$ ) και  $\rho$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης των δύο γειτονικών κλάδων της σύνδεσης [SSP<sup>+</sup>10b]. Η συνάρτηση εντός του ολοκληρώματος της (4.38) είναι συνεχής και δεν παρουσιάζει απότομες αλλαγές στην συμπεριφορά της για όλο το πεδίο ορισμού της, οπότε ο υπολογισμός του ολοκληρώματος συγκλίνει γρήγορα για οποιαδήποτε ακρίβεια και για οποιαδήποτε αριθμητική μέθοδο επιλεγεί.

#### 4.4.3 Χωρική κατανομή κόμβων

Για τον τελικό προσδιορισμό της συνδεσιμότητας πρέπει να γίνει πρώτα εκτίμηση των παραμέτρων  $n, d$  του δικτύου. Το  $n$  εξαρτάται αποκλειστικά από την χωρική κατανομή του δικτύου και καθορίζεται μέσω του υπολογισμού της μέσης τιμής του αριθμού των συνολικών κόμβων από την εξίσωση  $E(n) = \lambda A$ . Το  $d$  εξαρτάται τόσο

από τα χωρικά χαρακτηριστικά του δικτύου (πυκνότητα κόμβων) όσο και από τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης. Ο υπολογισμός του βασίζεται στο νέο γενικευμένο μοντέλο που απαιτεί αρχικά την εύρεση της κατανομής  $f_R(r | \gamma \geq \gamma_{th})$ .

Η κατανομή της απόστασης των γειτονικών κόμβων που είναι συνδεδεμένοι θα προκύπτει, όπως έχει εξηγηθεί και λεπτομερέστερα, από την σχέση:

$$f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th}) = \frac{P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R=r] \cdot f_R(r)}{\int_0^{\infty} P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R=r] \cdot f_R(r) dr} \quad (4.40)$$

Στην παραπάνω σχέση η κατανομή της απόστασης θα είναι  $f_R(r) = 2r/R_A^2$  ενώ η πιθανότητα ύπαρξης της σύνδεσης  $P[\gamma(r) \geq \gamma_{th} | R=r] = P(l_{j,y(j)})$  θα υπολογίζεται από την σχέση (4.38). Γίνεται, επομένως, προφανές ότι η κατανομή της (4.40) δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά αλλά μόνο μέσα από μεθόδους μαθηματικής ολοκλήρωσης. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ολοκλήρωσης χρησιμοποιούνται εν συνεχεία για τον υπολογισμό του μέσου αριθμού των γειτονικών κόμβων  $E(d)$  που συμβάλλουν στην συνδεσιμότητα του δικτύου από την σχέση:

$$E(d) = \lambda \pi E[R^2 | \gamma \geq \gamma_{th}] = \lambda \pi \int_0^{+\infty} r^2 f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma \geq \gamma_{th}) dr \quad (4.41)$$

Τελικά, τα ακέραια μέρη  $\lfloor E(n) \rfloor$  και  $\lfloor E(d) \rfloor$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως  $n$  και  $d$  στην σχέση υπολογισμού της συνδεσιμότητας (4.33) του προτεινόμενου μοντέλου.

#### 4.4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Στα πλαίσια ανάπτυξης του προτεινόμενου μοντέλου για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας με χρήση τεχνικών διαφορικής λήψης σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα που λειτουργούν σε περιβάλλον διαλείψεων παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα για την αξιολόγηση της επίδοσης του. Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός της βελτίωσης που επιτυγχάνεται στην συνδεσιμότητα του φυσικού επιπέδου ενός δικτύου από την χρήση τεχνικών διαφορισμού. Στα πλαίσια της παραπάνω αξιολόγησης θα παρουσιαστούν διαγράμματα της πιθανότητας σύνδεσης



του συνδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης αλλά και του συντελεστή συσχέτισης της διδιάστατης κατανομής των διαλείψεων σκίασης. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προκύπτουν αν δεν θεωρηθούν τεχνικές διαφορικής λήψης στις συνδέσεις του δικτύου. Ο λόγος που πραγματοποιείται αυτό είναι για να γίνεται εμφανής σε κάθε περίπτωση η βελτίωση της συνδεσιμότητας εξαιτίας της εφαρμογής τεχνικών διαφορισμού.

Για αυτό τον σκοπό ορίζονται δύο νέα μεγέθη που βοηθούν στην καλύτερη αξιολόγηση της βελτίωσης της συνδεσιμότητας. Το πρώτο μέγεθος αναφέρεται στα διαφορετικές τιμές που μπορεί να λάβει το μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας, που είναι η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου, για δεδομένη τιμή της ισχύς εκπομπής εξαιτίας της χρήσης ή μη μίας τεχνικής διαφορισμού. Έστω, για την περίπτωση που χρησιμοποιείται κάποια τεχνική διαφορισμού ότι  $p_d(P_t)$  είναι η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου για δεδομένη ισχύ εκπομπής ίσης με  $P_t$  και  $p_s(P_t)$  είναι η αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται καμία τεχνική διαφορισμού. Τότε, με το όρο κέρδος συνδεσιμότητας (connectivity gain) θα ορίζεται η διαφορά των παραπάνω τιμών της συνδεσιμότητας. Δηλαδή:

$$\text{Κέρδος συνδεσιμότητας} = p_d(P_t) - p_s(P_t) \quad (4.42)$$

Το συγκεκριμένο μέγεθος αντιστοιχεί στην κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των τιμών της πιθανότητας σύνδεσης για την περίπτωση που γίνεται χρήση μεθόδου διαφορισμού και όταν δεν γίνεται ενώ η ισχύς εκπομπής και τα υπόλοιπα λειτουργικά χαρακτηριστικά παραμένουν ίδια. Ουσιαστικά, το κέρδος συνδεσιμότητας αντιπροσωπεύει την αύξηση της συνδεσιμότητας εξαιτίας της χρήσης κάποιας τεχνικής διαφορισμού. Το κέρδος συνδεσιμότητας μπορεί επίσης να οριστεί και σε (%) μονάδες και επομένως η (4.42) παίρνει την μορφή:

$$\text{Κέρδος συνδεσιμότητας (\%)} = \frac{p_d(P_t) - p_s(P_t)}{p_s(P_t)} (\%) \quad (4.43)$$

Σε αυτή την περίπτωση το κέρδος συνδεσιμότητας (%) περιγράφει την ποσοστιαία αύξηση της συνδεσιμότητας σε (%) μονάδες. Οι τιμές των  $p_d(P_t)$  και  $p_s(P_t)$  μπορούν γενικά να υπολογιστούν εύκολα από την (4.33). Στην πρώτη περίπτωση θεωρώντας ότι η  $P(l_{j,y(j)})$  υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.38) για οποιαδήποτε τεχνική διαφορισμού εφαρμοστεί ενώ στην δεύτερη περίπτωση από την σχέση (4.15) που αναφέρεται σε απλά μη συσχετισμένα κανάλια διάλειτουργίας.

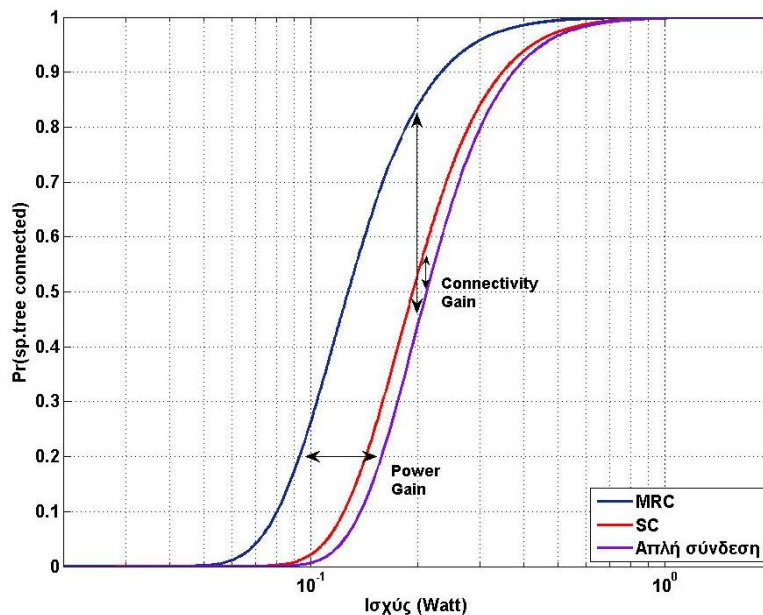
Αντίστοιχα με το κέρδος συνδεσιμότητας μπορεί να οριστεί και το κέρδος ισχύος (power gain) εξαιτίας της χρήσης κάποιας από τις τεχνικές διαφορικής λήψης. Το κέρδος ισχύος αναφέρεται στην μειωμένη τιμή ισχύος που χρειάζεται να εκπέμπουν οι κόμβοι του δικτύου ώστε να εμφανιστεί το ίδιο ποσοστό συνδεσιμότητας στο δίκτυο με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται κάποια τεχνική διαφορικής λήψης. Έστω, ότι  $p_d(P_t) = p$  και  $p_d(P_t') = p$ , όπου το  $p$  είναι μια τιμή της πιθανότητας σύνδεσης του συνδετικού δένδρου. Τότε, το κέρδος ισχύος θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{Κέρδος ισχύος} = P_t(p_s = p) - P_t(p_d = p) \quad (4.44)$$

Ουσιαστικά, η σχέση (4.44) αναφέρεται στην οριζόντια απόσταση μεταξύ των διαγραμμάτων της πιθανότητας σύνδεσης μεταξύ των περιπτώσεων που γίνεται χρήση τεχνικών διαφορισμού και σε αυτή που δεν γίνεται. Το κέρδος ισχύος είναι ιδιαίτερα χρήσιμο μέτρο αξιολόγησης κυρίως για δίκτυα που έχουν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα ενώ δείχνει ότι οι τεχνικές διαφορισμού μπορεί να περιορίσουν την συνολική κατανάλωση ενέργειας εφόσον η επεξεργασία των λαμβανομένων σημάτων δεν είναι περισσότερο ενεργοβόρα από το κέρδος ισχύος που επιτυγχάνεται. Το κέρδος ισχύος μπορεί να εκφραστεί και αυτό σε (%) μονάδες από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Κέρδος ισχύος (\%)} = \frac{P_t(p_s = p) - P_t(p_d = p)}{P_t(p_d = p)} \quad (\%) \quad (4.45)$$

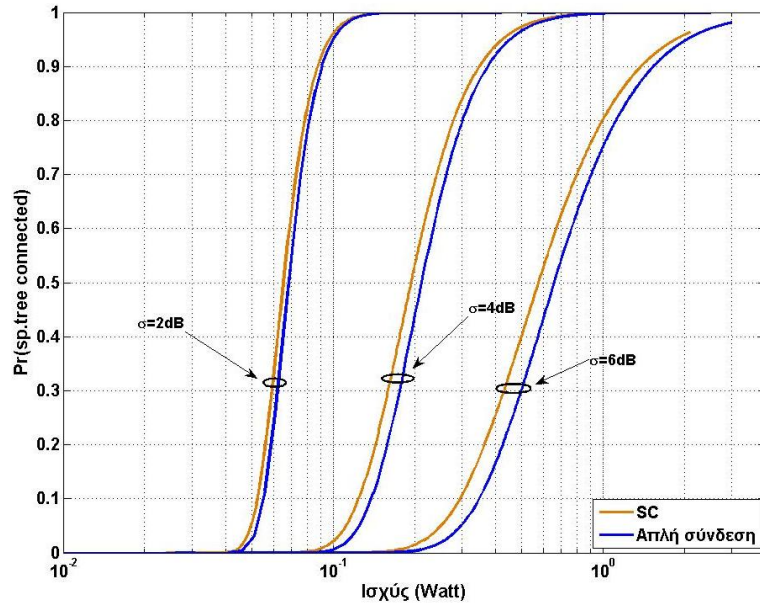
Για την λήψη των αριθμητικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων που θεωρήθηκαν και στην ενότητα (§4.3.3) και οι οποίες εν συντομία παρουσιάζονται:  $\gamma_{th} = 10dB$ ,  $N = -60dBm$ ,  $a = 3.5$ ,  $K = 10$  και  $r_t = 125m$ . Αντίστοιχα, θεωρείται ότι η πυκνότητα των κόμβων είναι:  $\lambda = 0.0001 \text{ κόμβοι} / m^2$  σε δίκτυο διαστάσεων  $A = 10^6 m^2$  και επομένως το δίκτυο θα περιέχει  $n = 100$  κόμβους. Για τις περιπτώσεις που δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό η τυπική απόκλιση της διδιάστατης κατανομής θεωρείται ίση με  $\sigma = 4dB$  και ο συντελεστής συσχέτισης ίσος με  $\rho = 0.8$ . Η συχνότητα λειτουργίας ορίστηκε στα 2.4GHz που αποτελεί ελεύθερη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων και χρησιμοποιείται από διάφορα ασύρματα δίκτυα όπως αυτά που βασίζονται στο IEEE 802.11 πρωτόκολλο επικοινωνίας.



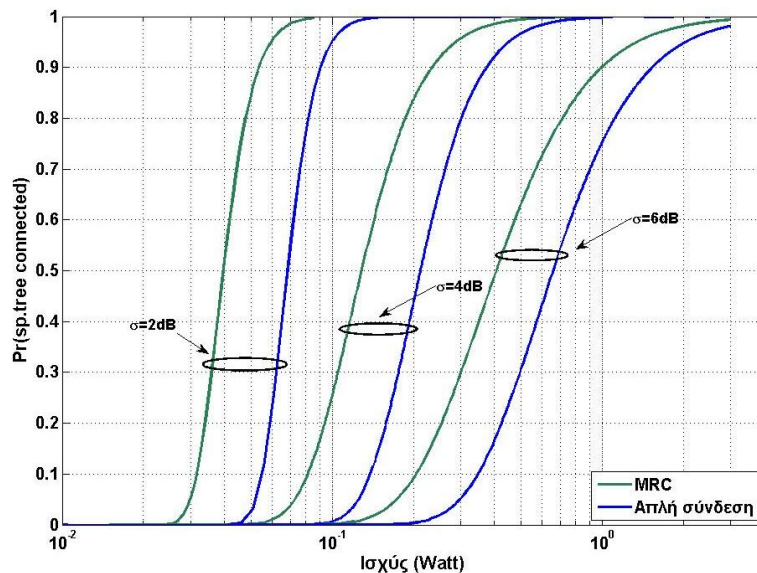
Σχήμα 4.11: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύος εκπομπής  $P_t$  για τις δύο τεχνικές διαφορικής λήψης καθώς και για την απλή περίπτωση.

Στο σχήμα 4.11, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο προτεινόμενων τεχνικών διαφορικής λήψης (SC και MRC) στις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου για τις ίδιες παραμέτρους λειτουργίας. Είναι φανερό ότι η χρήση της MRC τεχνικής βελτιώνει σημαντικά την συνδεσιμότητα. Αντίστοιχα, και η χρήση της SC τεχνικής βελτιώνει την συνδεσιμότητα άλλα σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι αναμενόμενα καθώς έχει αποδειχθεί και σε άλλες εφαρμογές ότι οι τεχνικές διαφορικής λήψης συμβάλουν πάντα θετικά στην βελτίωση της διαθεσιμότητας των συνδέσεων και κατ' επέκταση όλων των μεγεθών που εξαρτώνται από την διαθεσιμότητα των συνδέσεων. Αυτό που αξίζει περισσότερο να παρατηρηθεί στο σχήμα 4.11, είναι το μέγεθος του κέρδους συνδεσιμότητας που προκύπτει από την χρήση των τεχνικών διαφορικής λήψης και κυρίως από την MRC τεχνική. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της MRC τεχνικής το κέρδος συνδεσιμότητας υπολογίζεται κοντά στο 70%, με αποτέλεσμα η συνδεσιμότητα να αυξάνεται κατά 70% σε σχέση με την απλή περίπτωση, ενώ αντίστοιχα για την τεχνική SC η συνδεσιμότητα αυξάνεται μονάχα 10%. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αποτελεί σαφή ένδειξη ότι, εφόσον συμφέρουν οικονομικά, οι τεχνικές διαφορικής λήψης και οι τεχνικές MIMO [Rap96], [SPZ07] πρέπει να ενσωματωθούν στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Αντίστοιχη συμπεριφορά εμφανίζει και το κέρδος ισχύος καθώς γίνεται φανερό ότι με την χρήση τεχνικών διαφορικής λήψης απαιτούνται αρκετά

χαμηλότερα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύς για να επιτευχθεί η ίδια συνδεσιμότητα εντός του δικτύου.

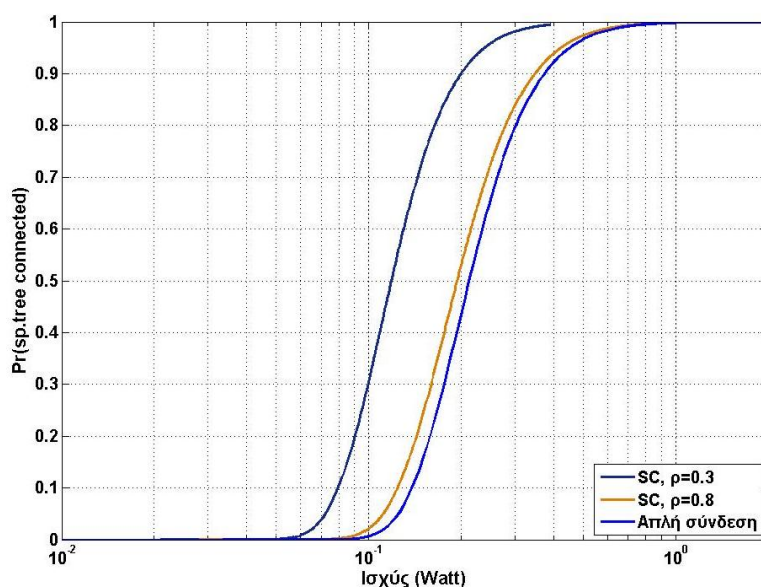


Σχήμα 4.12: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδεμένου δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής  $P_r$  για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  της διδιάστατης κατανομής των διαλείψεων για την SC τεχνική διαφορικής λήψης.



Σχήμα 4.13: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδεδεμένου δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής  $P_r$  για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  της διδιάστατης κατανομής των διαλείψεων για την MRC τεχνική διαφορικής λήψης.

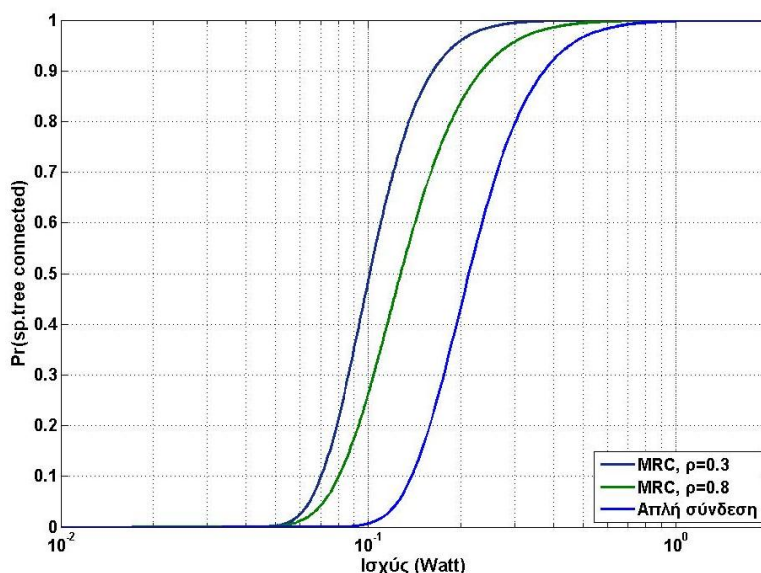
Στα σχήματα 4.12 και 4.13 φαίνεται η βελτίωση που εμφανίζει πιθανότητα ύπαρξης συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  της διδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής των διαλείψεων σκίασης που περιγράφει την από κοινού κατανομή των σηματοθορυβικών λόγων για τους δύο συσχετισμένους κλάδους της σύνδεσης. Όπως φαίνεται από τα δύο σχήματα, και σε αυτή την περίπτωση το κέρδος συνδεσιμότητας είναι αρκετά μεγαλύτερο για την περίπτωση της MRC τεχνικής ανεξαρτήτως από τις τιμές της τυπικής απόκλισης. Επιπρόσθετα, φαίνεται από το σχήμα 4.12 ότι υπάρχει μικρή αύξηση του κέρδους συνδεσιμότητας μονάχα για την περίπτωση της τεχνικής συνδυασμού με επιλογή καθώς αυξάνονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης.



Σχήμα 4.14: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής  $P_t$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  της διδιάστατης κατανομής των διαλείψεων για την SC τεχνική διαφορετικής λήψης.

Τέλος, μία άλλη παράμετρος που παίζει καθοριστικό ρόλο όταν γίνεται αναφορά σε συσχετισμένα μεγέθη, και στην παρούσα φάση σε συσχετισμένα κανάλια διαλείψεων, είναι ο συντελεστής συσχέτισης των δύο τυχαίων μεταβλητών. Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται η επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στην πιθανότητα σύνδεσης για την SC τεχνική ενώ στο σχήμα 4.15 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την MRC τεχνική. Γίνεται φανερό και στις δύο περιπτώσεις ότι η συνδεσιμότητα αυξάνεται όταν τα κανάλια είναι σε μικρότερο βαθμό συσχετισμένα, περίπτωση όπου  $\rho = 0.3$ , παρότι όταν εμφανίζουν μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης, περίπτωση όπου  $\rho = 0.8$ . Ενώ τέλος, η καλύτερη δυνατή περίπτωση και

το μεγαλύτερο κέρδος συνδεσιμότητας εμφανίζεται όταν τα κανάλια είναι ασυσχέτιστα. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι είναι διαφορετική περίπτωση η απλή σύνδεση, όπου υπάρχει μόνο ένας κλάδος κατά μήκος της νοητής σύνδεσης των δύο κόμβων του δικτύου, από την περίπτωση που θεωρείται τεχνική διαφορισμού αλλά οι δύο κλάδοι της νοητής σύνδεσης είναι ασυσχέτιστοι.



Σχήμα 4.15: Η πιθανότητα σύνδεσης του συνδετικού δένδρου συναρτήσει της ισχύς εκπομπής  $P_t$  για διαφορετικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  της διδιάστατης κατανομής των διαλείψεων για την MRC τεχνική διαφορικής λήψης.

## 4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ένα νέο μοντέλο για την αναλυτική αξιολόγηση της συνδεσιμότητας που είναι εμπνευσμένο από τη θεωρία γράφων και τα συνδετικά δένδρα. Η νέα μεθοδολογία προτείνει ως μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας ενός τυχαίου δικτύου την πιθανότητα εμφάνισης ενός συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου στο γράφο του δικτύου. Η μεθοδολογία αυτή είναι γενική, ενώ αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο μέτρο αξιολόγησης αποτελεί ένα άνω φράγμα για την πραγματική πιθανότητα να είναι συνδεδεμένο το δίκτυο. Το βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι η πιθανότητα που χρησιμοποιείται ως μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας λαμβάνει υπόψη τόσο την χωρική τυχαιότητα του δικτύου όσο και την στοχαστική συμπεριφορά του καναλιού διάδοσης των συνδέσεων. Αυτό γίνεται εφικτό, καθώς ο υπολογισμός της πιθανότητας ύπαρξης ενός συνδεδεμένου συνδετικού δένδρου εξαρτάται ταυτόχρονα

από την χωρική κατανομή του δικτύου, τα χαρακτηριστικά του καναλιού διάδοσης αλλά και τις διαθεσιμότητες των συνδέσεων του δικτύου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του προτεινόμενου μοντέλου είναι η δυνατότητα υπολογισμού της συνδεσιμότητας είτε από θεωρητικές εκτιμήσεις είτε από πραγματικά δεδομένα και η απευθείας χρήση της κατά την σχεδίαση των ασυρμάτων δικτύων νέας γενιάς.

Η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου αξιολογήθηκε για κανάλια συσχετισμένων διαλείψεων σκίασης με τελικό αποτέλεσμα την λήψη σημαντικών συμπερασμάτων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τέτοιων δικτύων. Γενικά, το μοντέλο αυτό παραμετροποιείται εύκολα και για οποιοδήποτε άλλο κανάλι διάλειψης.

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία ενσωματώθηκε κατόπιν και η δυνατότητα χρήσης τεχνικών διαφορισμού για την βελτίωση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Νέες τελικές σχέσεις προέκυψαν για το μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας ενώ μελετήθηκε η απόδοση του μοντέλου για την περίπτωση των διαφορικών τεχνικών επιλογής με συνδυασμό και επιλογής μεγίστου λόγου για κανάλια συσχετισμένων διαλείψεων σκίασης. Χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν για την απόδοση των τεχνικών αυτών ως προς την βελτίωση της συνδεσιμότητας.





## Κεφάλαιο 5

# Αξιολόγηση συνδεσιμότητας σε ασύρματα δίκτυα κορμού κυψελωτών δικτύων νέας γενιάς

### 5.1 Εισαγωγή

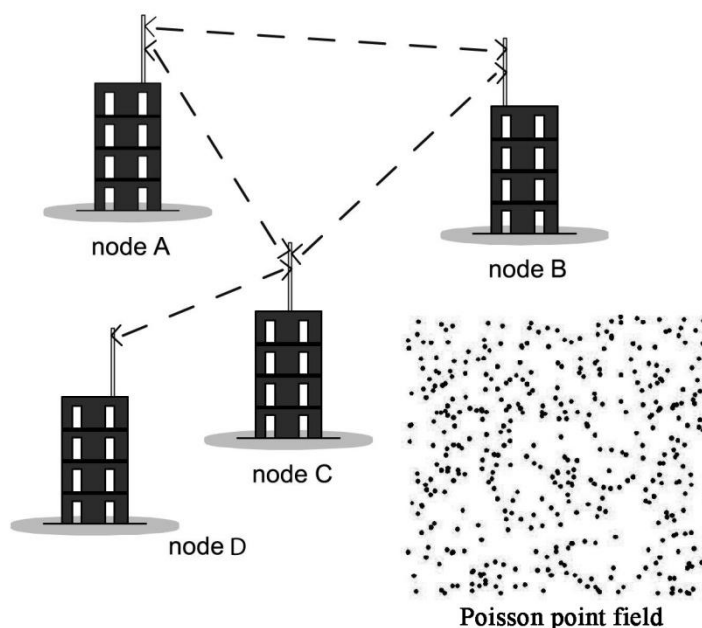
Τα ασύρματα δίκτυα κορμού κυψελωτών δικτύων νέας γενιάς αποτελούν την κύρια λύση για το σχεδιασμό μιας γρήγορης και αξιόπιστης υποδομής που παρέχει την απαραίτητη συνδεσιμότητα μεταξύ των σταθμών βάσης των κυψελωτών δικτύων. Για τις περιοχές όπου η ενσύρματη τηλεπικοινωνιακή υποδομή δεν έχει αναπτυχθεί, οι ασύρματες συνδέσεις αποτελούν τον αποκλειστικό τρόπο σύνδεσης των σταθμών βάσης τόσο μεταξύ τους όσο και με τον πυρήνα του συστήματος. Το σύνολο αυτών των κόμβων και των μεταξύ τους ασύρματων συνδέσεων απαρτίζουν το δίκτυο κορμού. Στο προσεχές μέλλον αυτά τα δίκτυα αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο καθώς πέρα από την διασύνδεση των σταθμών βάσης των σύγχρονων κυψελωτών δικτύων πρόκειται να υποστηρίξουν την διασύνδεση ετερογενών δικτύων μεταξύ τους, την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο, αλλά και την παροχή υπηρεσιών σε τελικούς χρήστες. Στην βάση της αρχιτεκτονικής των ασύρματων δικτύων νέας γενιάς αναμένεται να αναπτυχθούν και τα σύγχρονα δίκτυα κορμού που θα υποστηρίξουν πληθώρα υπηρεσιών και μεθόδων πρόσβασης ώστε να αποτελέσουν τον κορμό των σύγχρονων κυψελωτών και μητροπολιτικών δικτύων.

Τα ασύρματα δίκτυα κορμού αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία των δικτύων νέας γενιάς καθώς παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Συνοπτικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι πρόκειται για δίκτυα που εγκαθίστανται σε εξωτερικούς χώρους, οι κόμβοι τους βρίσκονται εγκατεστημένοι συνήθως στις οροφές κτιρίων, και γενικά εμφανίζουν σταθερή τοπολογία (σχήμα 5.1). Παράλληλα, οι συνδέσεις μεταξύ των γειτονικών τους κόμβων γίνονται με χρήση μικροκυματικών ή χιλιοστομετρικών συνδέσεων που παρέχουν την δυνατότητα υψηλών ρυθμών μετάδοσης [CGB09].

Δεδομένου ότι αριθμός των κόμβων τους θα είναι αρκετά μεγάλος και λόγω της τυχαίας αλλά και αμετάβλητης τοπολογίας τους, τα δίκτυα κορμού μπορούν να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με την διαδικασία τυχαίων σημείων Poisson που έχει παρουσιαστεί στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Ενώ, η ακτίνα κάλυψης των κόμβων μπορεί να επιτευχθεί ως προς όλες τις κατευθύνσεις με την χρήση έξυπνων κεραιών με ηλεκτρονικό έλεγχο του διαγράμματος ακτινοβολίας τους. Επίσης, η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να υπολογίζεται βάσει του αριθμού των κτιρίων που συμμετέχουν στο δίκτυο ή από τον αριθμό των χρηστών που θεωρητικά αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο του δικτύου.

Η χρήση μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών συχνοτήτων, δηλαδή συχνοτήτων της περιοχής 10-60GHz, μαζί με το μεγάλο διαθέσιμο φάσμα που αντιστοιχεί σε αυτές τις συχνότητες δίνει την δυνατότητα επίτευξης πολύ υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης. Οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση καθώς τα δίκτυα κορμού αναλαμβάνουν την μετάδοση πληροφορίας που προέρχεται και συναθροίζεται από διάφορα δίκτυα. Η χρήση όμως υψηλών συχνοτήτων εμπεριέχει αρκετά μειονεκτήματα. Οι απώλειες διαδρομής κατά την μήκος του μονοπατιού διάδοσης εξαιτίας της συχνότητας είναι πολύ μεγάλες προκαλώντας υψηλές εξασθενήσεις στο διαδιδόμενο σήμα. Αυτές εν μέρει μπορούν να ισοσταθμιστούν από τα υψηλά κέρδη που συνήθως έχουν οι κεραιές σε αυτές τις συχνότητες. Επιπρόσθετα, σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων τα ασύρματα δίκτυα είναι πιο επιρρεπή σε μια σειρά από φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση των ραδιοκυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας (της τροπόσφαιρας) και προκαλούν μεγάλες εξασθενήσεις στο διαδιδόμενο σήμα [Cra96].

Μια σημαντική ανησυχία κατά το σχεδιασμό των ασύρματων δικτύων νέας γενιάς σε συχνότητες άνω των 10GHz είναι κατά πόσον υπάρχει οπτική επαφή (LOS) μεταξύ των δύο κόμβων που ανταλλάσσουν δεδομένα [Mou09], [LH02]. Για το λόγο αυτό, κατά τη γενική ανάλυση που προτείνεται, και θα ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, θεωρείται ότι στο 60% ή περισσότερο της πρώτης ζώνης Fresnel δεν υπάρχουν καθόλου εμπόδια και αντικείμενα να παρεμβάλλουν στη σύνδεση και επομένως ικανοποιούνται τα χαρακτηριστικά ελεύθερης διάδοσης (LOS) [DPC07], [FHF02]. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση, ο κυρίαρχος μηχανισμός εξασθένισης κατά την διάδοση του σήματος σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων είναι οι διαλείψεις λόγω βροχής, ενώ αποτελεί και το μοναδικό ατμοσφαιρικό φαινόμενο που εμφανίζει σημαντική χωρική ανομοιογένεια εντός των αποστάσεων που μας ενδιαφέρουν [HBF02]. Όσον αφορά την μοντελοποίηση των διαλείψεων εξαιτίας βροχής αυτή μπορεί να γίνει μέσω της στατιστική κατανομής που ακολουθεί η επιπλέον εξασθένιση που προκαλείται από το φαινόμενο των διαλείψεων.



Σχήμα 5.1: Μορφή δικτύου κορμού και η χωρική του τοπολογία.

Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού και αξιολόγησης της συνδεσιμότητας για τα μελλοντικά δίκτυα κορμού λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση που έχουν στην συνδεσιμότητα οι διαλείψεις εξαιτίας των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων με κυριότερες τις διαλείψεις εξαιτίας βροχής. Τα προτεινόμενα μοντέλα μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε εργαλεία σχεδιασμού για την ανάπτυξη και την υλοποίηση ασυρμάτων δικτύων κορμού σε παγκόσμια κλίμακα.

Για την μοντελοποίηση των διαλείψεων καταφεύγουμε σε τρία διαφορετικά φυσικά μοντέλα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές στατιστικές κατανομές για την προσέγγιση του φαινομένου των διαλείψεων. Οι κατανομές αυτές έχουν προκύψει από επεξεργασία μετρήσεων και προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα ανάλογα με την γεωγραφική θέση όπου βρίσκεται το υπό μελέτη δίκτυο. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διατριβής θα εξεταστεί η συνδεσιμότητα δικτύων κορμού λαμβάνοντας υπόψη τη λογαριθμοκανονική κατανομή [Π3] που συνήθως θεωρείται για τις εύκρατες περιοχές [PK03a], την γάμμα κατανομή [Π3] που προσεγγίζει καλύτερα τις περιοχές με τροπικό και υποτροπικό κλίμα [PK03b], και τέλος την Weibull κατανομή [Π2] που παρουσιάζει πολύ καλή προσέγγιση και για τις εύκρατες αλλά και για τις υποτροπικές περιοχές [PAK<sup>+</sup>02]. Τα φυσικά μοντέλα της εξασθένησης βροχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια και αξιοπιστία στην ζώνη συχνοτήτων 10-50GHz, δεδομένου ότι έχουν επιβεβαιωθεί για αυτές τις συχνότητες με πειραματικά δεδομένα [PK03a], [PK03b], [PAK<sup>+</sup>02]. Παρόλα αυτά, σε

αρκετές περιπτώσεις και κυρίως για υψηλότερες συχνότητες των 50GHz η πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων είναι αναγκαία για την ακριβέστερη μοντελοποίηση του φαινομένου και την απόδειξη της εγκυρότητας των προτεινόμενων αποτελεσμάτων.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα παρουσιαστούν αρχικά τα βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων κορμού και κατόπιν, συνοπτικά, η μεθοδολογία από την οποία προκύπτουν οι αποσβέσεις λόγω βροχής ξεκινώντας από την στατιστική κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης που λαμβάνεται από μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Εν συνεχεία, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας για καθένα από τα φυσικά μοντέλα που περιγράφουν τις αποσβέσεις λόγω βροχής αφού πρώτα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού της διαθεσιμότητας κάθε σύνδεσης του δικτύου βάσει της κατανομής του φυσικού μοντέλου. Ως πρώτο μοντέλο θα παρουσιαστεί το λογαριθμοκανονικό [Σ5], κατόπιν το μοντέλο που βασίζεται στην γάμμα κατανομή και τέλος αυτό που βασίζεται στην Weibull κατανομή. Ειδικά για την περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής θα εξεταστεί και η δυνατότητα χρήσης διπλά πολωμένων σημάτων για την αύξηση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου (διπλασιασμό της χωρητικότητας) και πως αυτό επιδράει στην συνδεσιμότητα του δικτύου [Σ3]. Αντίστοιχα για το Weibull μοντέλο πραγματοποιείται μελέτη για την απόδοση των συνδέσεων του δικτύου και προτείνεται η τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης (Adaptive Modulation) για την διατήρηση, όποτε κρίνεται αναγκαίο, της συνδεσιμότητας και της διαθεσιμότητας των συνδέσεων [Π2].

## 5.2 Ασύρματα δίκτυα κορμού (Backhaul networks)

Τα ασύρματα δίκτυα κορμού ή υποδομής, τα οποία μέχρι τώρα αποτελούν για τα κυψελωτά συστήματα το τμήμα των υποδομών που παρέχει την εσωτερική σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης και του πυρήνα του συστήματος, αναμένεται να λάβει έντονη πίεση τα επόμενα χρόνια εξαιτίας της απαίτησης για ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου ώστε να μπορούν να υποστηριχθούν νέες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Επιπρόσθετα, τα σύγχρονα δίκτυα κορμού δεν θα αποτελούν μόνο τη «ραχοκοκαλιά» του δικτύου των κυψελωτών συστημάτων, αλλά πρόκειται να αποτελέσουν αυτόνομα δίκτυα που θα υποστηρίζουν την διασύνδεση διαφορετικού τύπου δικτύων και θα παρέχουν μια οικονομική και αποδοτική λύση για την τελική σύνδεση του απλού χρήστη στο διαδίκτυο όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα ενσύρματης σύνδεσης.

Γίνεται επομένως κατανοητό ότι τα μελλοντικά δίκτυα κορμού θα χαρακτηρίζονται από μία πλειάδα διαφορετικού τύπου εφαρμογών και υπηρεσιών ενώ θα παρουσιάζουν έντονη διαλειτουργικότητα για να είναι δυνατή η προσάρτηση σε αυτά ενός συνόλου από διαφορετικού τύπου δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες τόσο σε σταθερούς όσο και κινητούς κόμβους. Οι παραπάνω απαιτήσεις οδηγούν στην αναγκαιότητα τα σύγχρονα ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα κορμού να είναι σχεδιασμένα βάσει της IP-Ethernet αρχιτεκτονικής [Eric08a], [Eric08b], [Lit09]. Η χρήση πρωτοκόλλων μεταφοράς της πληροφορίας με την μορφή πακέτων δεδομένων βοηθάει στη δυναμική διαχείριση των πόρων του δικτύου, στον ορθότερο διαμερισμό της χωρητικότητάς του και παρέχει αποδοτική συνάθροιση της πληροφορίας, στατιστική πολυπλεξία και δυνατότητα παράλληλης μετάδοσης πληροφοριών. Οι αναφερθέντες παράγοντες οδηγούν στην επίτευξη μειωμένου κόστους μεταφοράς ανά bit και παρέχουν τα αναγκαία λειτουργικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται από τις σύγχρονες δικτυακές υπηρεσίες. Είναι πιθανό ότι οι προηγμένες αρχιτεκτονικές που χρησιμοποιούνται από τα 3G και 4G κυψελωτά συστήματα θα οδηγήσουν το σχεδιασμό και την υλοποίηση του δικτύου, έτσι ώστε να απαιτούνται ταχύτητες της τάξης του 1Gb/s ανά κυψέλη και ταχύτητες δεδομένων συγκεντρωτικά στον κορμό του δικτύου από 2,5Gb/s έως και 10Gb/s [LP09]. Πέρα όμως από το δίκτυο διασύνδεσης κυψελωτών συστημάτων τα δίκτυα κορμού εξελίσσονται για να αποτελέσουν την βασική δομή μητροπολιτικών δικτύων και ως λύση διασύνδεσης διάφορων ετερογενών δικτύων και χρηστών στον παγκόσμιο διαδικτυακό ιστό.

Οι μικροκυματικές ζεύξεις, ως μια από τις καταλληλότερες τεχνολογίες για ευρυζωνικές σημείο προς σημείο συνδέσεις, έρχεται να αποτελέσει βασική επιλογή για να υποστηρίξει και στο μέλλον τις υψηλών ρυθμών συνδέσεις των δικτύων κορμού. Για να μην αποτελέσουν τα δίκτυα κορμού, την αχίλλειο πτέρνα των σύγχρονων συστημάτων τηλεπικοινωνιών και να μπορέσουν να επιτύχουν τους ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που προδιαγράφονται από τις μελλοντικές εφαρμογές απαιτείται να γίνει χρήση όλο και υψηλότερων συχνοτήτων. Στις υψηλές χιλιοστομετρικές συχνότητες υπάρχει αρκετό διαθέσιμο φάσμα και αποτελεί την βασικότερη λύση για την επίτευξη των απαιτούμενων προδιαγραφών για τους ρυθμούς μετάδοσης και μια τεχνική λύση για την διασύνδεση τόσο των κυψελωτών συστημάτων μεταξύ τους όσο και ετερογενών ασύρματων δικτύων που αναζητούν πρόσβαση στο παγκόσμιο ιστό με υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Οι συνθήκες αυτές σηματοδοτούν μια μεγάλη ευκαιρία για την ανάπτυξη υψηλού ρυθμού επικοινωνιών σε σταθερά ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν τις μικροκυματικές

και χιλιοστομετρικές συχνότητες άνω των 10GHz για την σύνδεση των κόμβων τους [P.1410-4].

Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκε το 2003 όταν η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) έδωσε άδεια για την χρήση αποκλειστικά από δίκτυα κορμού των αδειοδοτημένων ζωνών συχνοτήτων από 71-76GHz και 81-86GHz [FCC]. Η FCC επίσης όρισε αυστηρές απαιτήσεις για τα ελάχιστα κέρδη και την μέγιστη ισχύ των πλευρικών λοβών των κεραιών που θα χρησιμοποιούνται για αυτές τις συνδέσεις αλλά οι κανόνες αυτοί περιέχουν σημαντικό περιθώριο ευελιξίας έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα στην πράξη χωρίς να περιορίζουν τον σχεδιασμό ενός δικτύου κορμού [FCC03]. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη παρεμβολών λόγω των αυστηρών απαιτήσεων για ιδιαίτερα υψηλά κέρδη κεραιών, η FCC επέτρεψε την ελεύθερη χρήση οποιασδήποτε τεχνικής ψηφιακής διαμόρφωσης για τις αδειοδοτημένες μπάντες των 5GHz καθώς και την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των ίδιων καναλιών ακόμα και για πολύ κοντινές ή και παράλληλες συνδέσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την εφαρμογή 16QAM διαμόρφωσης στην μπάντα των 5GHz μπορεί να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης έως και 10 Gb/s [LP09].

Από την άλλη πλευρά, οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες (FSO) αποτελούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για τις συνδέσεις των δικτύων κορμού αλλά και ως τεχνολογία για την γρήγορη και προσωρινή ανάπτυξη τέτοιου είδους δικτύων. Το βασικό πλεονέκτημα των ασύρματων οπτικών συνδέσεων έναντι των μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών ραδιοεπικοινωνιών είναι το πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων που παρέχουν και κατ' επέκταση οι πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Ωστόσο, οι ασύρματες οπτικές συνδέσεις περιορίζονται πρακτικά σε συνδέσεις μόνο μερικών εκατοντάδων μέτρων κυρίως εξαιτίας την σχετικά χαμηλής ισχύς εκπομπής των οπτικών πομπών και την ιδιαίτερα υψηλής κατευθυντικότητας των πηγών Laser. Επιπλέον, οι ασύρματες οπτικές ζεύξεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε διάφορους παράγοντες όπως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες (ομίχλη, βροχή, χιόνι), τα δυναμικά φορτία ανέμου, τις θερμικές διαστολές και τις δονήσεις κυρίως από αδύναμους σεισμούς που υποχρεώνουν τα κτίρια σε ταλάντωση. Τέλος, έχουν προταθεί τεχνολογικές λύσεις χρησιμοποιώντας υβριδική τεχνολογία RF/FSO, ώστε να παρέχουν σε οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα.

### 5.3 Απόσβεση λόγω βροχής

Στην περιοχή συχνοτήτων 10-50GHz που αναμένεται να λειτουργήσουν τα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς, όπως είναι τα Backhaul δίκτυα, το WiMax και τα 802.16 δίκτυα, οι διαλείψεις λόγω βροχής είναι ο βασικός μηχανισμός υποβάθμισης της απόδοσης των συνδέσεων τους. Οι διαλείψεις εξαιτίας βροχής είναι καθαρά μηχανισμός εξασθένησης που δημιουργεί έντονες αποσβέσεις και αποπολώσεις στο διαδιδόμενο σήμα. Οι διαλείψεις αυτές μεταβάλλονται τόσο χρονικά όσο και χωρικά καθώς δεν είναι δυνατόν να βρέχει συνεχώς και δεν είναι η ένταση της βροχής σταθερή και ίση σε μία μεγάλη σχετικά περιοχή. Για αυτό, η ανάλυση που ακολουθεί και τα μοντέλα που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια του κεφαλαίου βασίζονται στην χωρο-χρονική μεταβολή του φαινομένου. Η μελέτη του φαινομένου βασίζεται στην χρονική κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης και στον αντίστοιχο υπολογισμό της κατανομής της απόσβεσης για όλες τις χρονικές περιόδους (δηλαδή όταν βρέχει και όταν δεν βρέχει), ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπόψη, μέσω συγκεκριμένων μεγεθών που θα παρουσιαστούν, η χωρική ανομοιογένεια του φαινομένου [CBE09].

Σε εύρος συχνοτήτων των 10-50GHz η χωρική δομή της βροχής περιγράφεται μακροσκοπικά από το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων, που αναφέρεται κυρίως σε σχετικά υψηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης ( $R > 10mm/hr$ ) [PAK<sup>+</sup>07]. Για την περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιείται η μη δεσμευμένη (unconditional) λογαριθμοκανονική κατανομή η οποία έχει αποδειχθεί ότι προσεγγίζει πολύ καλά τη στατιστική τόσο του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης  $R$  όσο και της απόσβεσης της βροχής εκφρασμένης σε dB. Η μη δεσμευμένη κατανομή αναφέρεται στον ολικό χρόνο που περιλαμβάνει τόσο το χρόνο στον οποίο βρέχει όσο και το χρόνο κατά τον οποίο δεν βρέχει. Οι στατιστικοί παράμετροι της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης εξαρτώνται από τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της βροχής για κάθε γεωγραφική θέση. Οπότε, λαμβάνεται υπόψη η σύσταση της ITU-R P.837-5 για τους χάρτες βροχής [P.837-5] βάσει της οποίας μπορούν να υπολογιστούν οι λογαριθμοκανονικές παράμετροι του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης για κάθε τοποθεσία της γης χρησιμοποιώντας τη γνωστή μέθοδο παλινδρόμησης (regression fitting). Από τις στατιστικές παραμέτρους του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης υπολογίζονται κατόπιν και οι στατιστικοί παράμετροι της κατανομής της απόσβεσης. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η λογαριθμοκανονική κατανομή ήταν η πρώτη κατανομή που χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης από τον Lin ενώ αργότερα προτάθηκαν και άλλες κατανομές που προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση δεδομένων από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές.

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

$$A = \int_0^L A_0 dl \quad (5.1)$$

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 είναι μια λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή [Lin75], ως εξής:

$$A_0 = \alpha R^b \quad (5.2)$$

Οι παράμετροι  $a, b$  της σχέσης (5.2) εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας, το είδος της πόλωσης του κύματος, τη θερμοκρασία και τέλος την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων της βροχής [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:

$$A = \alpha R^b L \quad (5.3)$$

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

$$\alpha = [\alpha_H + \alpha_V + (\alpha_H - \alpha_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)] / 2 \quad (5.4)$$

και:

$$b = [\alpha_H b_H + \alpha_V b_V + (\alpha_H b_H - \alpha_V b_V) \cos^2 \theta \cos(2\tau)] / 2\alpha \quad (5.5)$$

Στις προηγούμενες εξισώσεις,  $\theta$  είναι η γωνία ανύψωσης της ζεύξης η οποία για την περίπτωση επίγειων συστημάτων είναι συνήθως  $\theta = 0^\circ$ ,  $\tau$  είναι η γωνία πόλωσης ως προς τον ορίζοντα για γραμμική πόλωση, ενώ  $\tau = 45^\circ$  για κυκλική πόλωση. Τέλος,



$a_H, a_V, b_H, b_V$  είναι οι τιμές των παραμέτρων  $a, b$  για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα και ο υπολογισμός τους παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ.

Από την σχέση (5.3) γίνεται φανερό ότι η απόσβεση λόγω διαλείψεων βροχής ακολουθεί την ίδια κατανομή με την ρυθμό σημειακής ένστασης της βροχής και οι στατιστικοί παράμετροι της κατανομής, για τον πλήρη χαρακτηρισμό της απόσβεσης, μπορούν να υπολογιστούν από τις αντίστοιχες παραμέτρους της κατανομής του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης.

Ανεξάρτητα πάντως από την κατανομή που ακολουθούν οι διαλείψεις εξαιτίας βροχής, η συνολική εξασθένηση κατά μήκος μια μικροκυματικής ή χιλιοστομετρικής ζεύξης θα μοντελοποιείται σύμφωνα με την σχέση:

$$Path Loss \propto 10^{A_j/10} \times d_j^2 \quad (5.6)$$

Με την απόσβεση  $A_j$  να είναι εκφρασμένη σε dB και να εξαρτάται από την γεωγραφική θέση που είναι εγκατεστημένο το δίκτυο καθώς και από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ζεύξης.

## 5.4 Υπολογισμός συνδεσιμότητας: Λογαριθμοκανονικό μοντέλο

### 5.4.1 Απόσβεση διαλείψεων βροχής: Λογαριθμοκανονικό μοντέλο

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 με εύκρατο κλίμα όπως οι περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Επομένως για ασύρματα δίκτυα που είναι εγκατεστημένα σε τέτοιες περιοχές, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - pdf) της απόσβεσης  $A$  για μια σύνδεση με μήκος  $d_j$  (km) δίνεται από τον παρακάτω τύπο [P.1057-1]:

$$f_A(A_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_{a,j}(d_j) A_j} \exp\left(-\frac{(\ln A_j - \ln A_{m,j})^2}{2S_{a,j}^2}\right) \quad (5.7)$$

Όπου,  $A_{m,j}$  και  $S_{a,j}$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης για την  $j$  σύνδεση. Η λογαριθμοκανονική κατανομή της προηγούμενης εξίσωσης προκύπτει από την κανονική κατανομή  $N(\mu,\sigma)$ , 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  $u = (\ln A - \ln A_m)/S_a$  [PP02]. Επιπλέον, οι παράμετροι της απόσβεσης  $A_{m,j}$  και  $S_{a,j}$  κατά μήκος της σύνδεσης υπολογίζονται από της σχέσεις [PAK<sup>+</sup>07]:

$$S_{a,j}^2 = \ln \left[ 1 + \frac{H_1}{d_j^2} (\exp(b^2 S_r^2) - 1) \right] \quad (5.8)$$

και

$$A_{m,j} = a R_m^b d_j \exp \left[ \frac{b^2 S_r^2 - S_{a,j}^2}{2} \right] \quad (5.9)$$

Στις εξισώσεις (5.8) και (5.9)  $R_m$  και  $S_r$  είναι οι παράμετροι του ρυθμού βροχόπτωσης  $R$  και 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. Οι παράμετροι  $a, b$  της ειδικής απόσβεσης δίνονται από τους τύπους (5.4) και (5.5). Ενώ, τέλος, ο συντελεστής  $H_1$  εκφράζει τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής σε μία ζεύξη και ορίζεται γενικά από την σχέση:

$$H_1 = \int_0^d \int_0^d \rho_0(L = |x - y|) dx dy \quad (5.10)$$

Στην εξίσωση αυτή, 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  $L = |z_i - z_j|$  μεταξύ των δύο αυτών σημείων και από τη χωρική μορφή της βροχόπτωσης. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων και θεωρώντας ιστροπικό μοντέλο διάδοσης [Lin75], ο σημειακός συντελεστής συσχέτισης δίνεται από τον τύπο:

$$\rho_0(L(z_i, z_j)) = \begin{cases} G/\sqrt{G^2 + L^2(z_i, z_j)}, & L(z_i, z_j) \leq D_r \\ G/\sqrt{G^2 + D_r^2}, & L(z_i, z_j) > D_r \end{cases} \quad (5.11)$$

Στον προηγούμενο τύπο, οι σταθερές  $G$  και  $D_r$  (μέση διάμετρος βροχοπυρήνων) είναι εκφρασμένες σε χιλιόμετρα και 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  $L$  υπολογίζεται ως  $L(z_i, z_j) = |z_i - z_j|$ .

Εν τέλει, από τις σχέσεις (5.10) και (5.11) υπολογίζεται ο συντελεστής  $H_1$  από την τελική σχέση [PAK<sup>+</sup>07]:

$$H_1 = \begin{cases} 2dG \sinh^{-1}(d/G) + 2G^2 \left[ 1 - \sqrt{(d/G)^2 + 1} \right], & d \leq D_r \\ 2dG \sinh^{-1}(D_r/G) + 2G^2 \left[ 1 - \sqrt{(D_r/G)^2 + 1} \right] + \frac{G(d - D_r)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^2}}, & d > D_r \end{cases} \quad (5.12)$$

Συνήθως οι συνδέσεις των ασύρματων δικτύων νέας γενιάς είναι αρκετά μικρότερες από την ελάχιστη τιμή του  $D_r$ , οπότε ο συντελεστής  $H_1$  θα υπολογίζεται σχεδόν αποκλειστικά από το άνω σκέλος της εξίσωσης (5.12).

#### 5.4.2 Υπολογισμός συνδεσιμότητας

Σύμφωνα με τον μοντέλο διάδοσης που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα και λαμβάνοντας υπόψη την ισοτροπικότητα του φυσικού φαινομένου της βροχής [PK03a], γίνεται σαφές ότι για να θεωρηθεί ότι υπάρχει μία σύνδεση με συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) πρέπει η εκπεμπόμενη ισχύς να είναι τέτοια ώστε να υπερβαίνει το περιθώριο διάλειψης της βροχής. Ως περιθώριο διάλειψης της βροχής αναφέρεται η επιπλέον απόσβεση, πέρα των απωλειών διαδρομής, που μπορεί να προκύψει λόγω έντονων καιρικών φαινομένων. Επειδή το φαινόμενο είναι χρονικά μεταβλητό και εφόσον δεν έχει ληφθεί υπόψη κάποια τεχνική προσαρμογή της εκπεμπόμενης ισχύς, απαιτείται ο καθορισμός της μέγιστης δυνατής απόσβεσης που μπορεί να προκληθεί εξαιτίας διαλείψεων βροχής για το χρονικό ποσοστό διαθεσιμότητας που ορίζεται για τις συνδέσεις του δικτύου βάσει της

προκαθορισμένης ποιότητας υπηρεσιών. Η πιθανότητα αποκοπής τότε της σύνδεσης θα οφείλεται σε πιθανή υπέρβαση της απόσβεσης σε σχέση με το καθορισμένο περιθώριο διάλειψης  $M_f$  (dB) και δίνεται από την σχέση:

$$P(A(d_j) > M_f) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln M_f - \ln A_m(d_j)}{\sqrt{2} S_a(d_j)} \right) \quad (5.13)$$

Αντίστοιχα, μπορεί από την ακόλουθη σχέση να υπολογιστεί και η διαθεσιμότητα της  $j$  σύνδεσης του ασύρματου δικτύου ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους, έστω  $n_1$  και  $n_2$ , των οποίων η απόσταση είναι  $d_j$ :

$$P(n_1, n_2) = P[A(d_j) < M_f] = P_0 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln M_f - \ln A_m(d_j)}{\sqrt{2} S_a(d_j)} \right) \quad (5.14)$$

Το  $P_0$  στην εξίσωση (5.14) είναι η μακροπρόθεσμη πιθανότητα ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης να είναι μεγαλύτερος από μηδέν  $P(R > 0)$ . Εδώ κάνουμε τη βασική υπόθεση ότι αντιπροσωπεύει και την πιθανότητα ύπαρξης αποσβέσεων λόγω βροχής καθώς όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση η μη δεσμευμένη λογαριθμοκανονική κατανομή που αναφέρεται στον συνολικό χρόνο και όχι στην διάρκεια του χρόνου που εμφανίζονται οι διαλείψεις βροχής. Το  $P_0$  εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων της περιοχής και μπορεί να υπολογιστεί για οποιαδήποτε περιοχή παγκοσμίως βάσει μεθοδολογίας που υπάρχει στην σύσταση ITU-R P.837-5 [P.837-5].

Το αναλυτικό μοντέλο για την εκτίμηση της συνδεσιμότητας προέρχεται από τον υπολογισμό της πιθανότητας απομόνωσης. Η χρήση της πιθανότητας απομόνωσης ως μετρικό μέγεθος της συνδεσιμότητας έχει παρουσιαστεί λεπτομερώς στην ενότητα (§2.4). Η χρήση αυτού του μέτρου αξιολόγησης κρίνεται αναγκαία για τον προσδιορισμό της συνδεσιμότητας τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όπου μόνο υποθέσεις μπορούν να γίνουν για την τοπολογία και τις συνδέσεις του δικτύου, όσο και για πραγματικά δίκτυα όπου ο ακριβής υπολογισμός της συνδεσιμότητας απαιτεί και την γνώση όλων των συνδέσεων του δικτύου αλλά και ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Θεωρώντας ότι ο μέσος αριθμός γειτονικών κόμβων συμβολίζεται με  $E(d)$  και  $R_{cov}$  (km) είναι η ακτίνα εμβέλειας ενός κόμβου (η ίδια για όλους τους κόμβους του δικτύου), τότε η το  $E(d)$  θα υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (2.17) από:

$$\begin{aligned}
 E(d) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho P(n_1, n_2) r dr d\varphi = \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho \left[ P_0 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln M_f - \ln A_m(d_j)}{\sqrt{2} S_a(d_j)} \right) \right] r dr d\varphi
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

Η ακτίνα εμβέλειας  $R_{cov}$  αναφέρεται στην απόσταση που μπορούν να έχουν οι κόμβοι  $n_1$  και  $n_2$  μεταξύ τους και καθορίζεται από την εκπεμπόμενη ισχύ του πομπού, την ευαισθησία του δέκτη και από τις προδιαγραφές για την διαθεσιμότητα των συνδέσεων του δικτύου.

Η πιθανότητα απομόνωσης τότε θα υπολογίζεται βάσει των παραπάνω και σύμφωνα με την (2.16) από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-E(d)} = \exp \left\{ -2\pi\rho \int_0^{R_{cov}} \left[ P_0 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln M_f - \ln A_m(d_j)}{\sqrt{2} S_a(d_j)} \right) \right] r dr \right\} \tag{5.16}$$

Το ολοκλήρωμα της σχέσης (4.16) δεν λύνεται αναλυτικά καθώς τόσο τα  $A_m$  και  $S_a$  όσο και το περιθώριο διάλειψης  $M_f$  εξαρτώνται από την απόσταση  $d_j$  της σύνδεσης. Παρόλα αυτά μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με χρήση αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης.

## 5.5 Υπολογισμός Συνδεσιμότητας: Γάμμα μοντέλο

### 5.5.1 Απόσβεση διαλείψεων βροχής: Γάμμα μοντέλο

Ενώ η λογαριθμοκανονική κατανομή προσεγγίζει καλά τον σημειακό ρυθμό βροχόπτωσης για εύκρατα κλίμακα η γάμμα κατανομή κρίνεται καταλληλότερη για την μοντελοποίηση του ρυθμού βροχόπτωσης και της απόσβεσης της βροχής σε τροπικά και υποτροπικά κλίματα [PK02b]. Επομένως τόσο ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης όσο και η απόσβεση των διαλείψεων εξαιτίας βροχής θα

μοντελοποιούνται ως μία γάμμα τυχαία μεταβλητή και η στατιστική κατανομή της δίνεται από [PP02]:

$$f_X(x) = \frac{\beta^v}{\Gamma(v)} x^{v-1} e^{-\beta x} \quad (5.17)$$

όπου  $\Gamma(v)$  είναι η συνάρτηση γάμμα που ορίζεται από τον τύπο [Abr65]:

$$\Gamma(v) = \int_0^{\infty} t^{v-1} e^{-t} dt \quad (5.18)$$

Επομένως, η απόσβεση που οφείλεται στις διαλείψεις εξαιτίας βροχής που ακολουθούν γάμμα κατανομή θα έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) που δίνεται από την σχέση:

$$f_A(A_j) = \frac{\beta_{a,j}^{v_{a,j}}}{\Gamma(v_{a,j})} A_j (d_j)^{v_{a,j}-1} e^{-\beta_{a,j} A_j (d_j)} \quad (5.19)$$

Οι παράμετροι  $v_{a,j}$  και  $\beta_{a,j}$  της γάμμα κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής υπολογίζονται συναρτήσει των αντίστοιχων παραμέτρων  $v_R$  και  $\beta_R$  του ρυθμού βροχόπτωσης, από τους παρακάτω τύπους [PK02b]:

$$v_{a,j} = \frac{d_j^2}{H_1} \cdot \frac{\Gamma^2(v_R + b)}{(\Gamma(v_R)\Gamma(v_R + 2b) - \Gamma^2(v_R + b))} \quad (5.20)$$

και

$$\beta_{a,j} = \frac{\beta_R^b d_j}{a H_1} \cdot \frac{\Gamma(v_R)\Gamma(v_R + b)}{(\Gamma(v_R)\Gamma(v_R + 2b) - \Gamma^2(v_R + b))} \quad (5.21)$$

Στους παραπάνω τύπους,  $d_j$  (km) είναι το μήκος της ζεύξης, ενώ οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  της ειδικής απόσβεσης υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.4) και (5.5). Οι παράμετροι  $v_R, \beta_R$  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 των ελαχίστων τετραγώνων [P.837-5]. Επιπλέον, ο συντελεστής  $H_1$  που εκφράζει τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής σε μία ζεύξη, ορίζεται ακριβώς όπως και για την λογαριθμοκανονική κατανομή από τον τύπο (5.10). Για τροπικά όμως και υποτροπικά κλίματα, ο συντελεστής συσχέτισης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [MH76]:

$$\rho_0(L(z_i, z_j)) = \begin{cases} \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{L(z_i, z_j)}) & , L(z_i, z_j) \leq D_r \\ \exp(-\alpha_s \cdot \sqrt{D_r}) & , L(z_i, z_j) > D_r \end{cases} \quad (5.22)$$

Στην προηγούμενη σχέση, η σταθερά  $a_s$  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 ορισθεί στην παράγραφο 5.4.1 και οι τιμές της κυμαίνονται από 15 ως 30km.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, ο συντελεστής  $H_1$  τελικά υπολογίζεται ως εξής [PK02b]:

$$H_1 = \begin{cases} 4 \frac{(\alpha_s^2 d_j - 6 + 2(3 + 3\alpha_s \sqrt{d_j} + \alpha_s^2 d_j) \cdot \exp(-\alpha_s \sqrt{d_j}))}{\alpha_s^4} & , d_j \leq D_r \\ 4 \frac{(\alpha_s^2 d_j - 6 + (\alpha_s^3 (D_r - d_j) \sqrt{D_r} + \alpha_s^2 (3D_r - d_j) + 6 + 6\alpha_s \sqrt{D_r}) \exp(-\alpha_s \sqrt{d_j}))}{\alpha_s^4} + \\ \quad + \exp(-\alpha_s \sqrt{D_r}) + (d_j - D_r)^2 & , d_j > D_r \end{cases} \quad (5.23)$$

Και σε αυτή την περίπτωση επειδή αναμένεται για τα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς να ισχύει η περίπτωση  $d_j \leq D_r$ , ο συντελεστής  $H_1$  θα υπολογίζεται από την άνω σκέλος της εξίσωσης (5.23).

### 5.5.2 Υπολογισμός συνδεσιμότητας

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

$$P(X \geq a) = 1 - P(X \leq a) \quad (5.24)$$

Ολοκληρώνοντας τη γάμμα κατανομή της σχέσης (5.17), η πιθανότητα υπέρβασης τελικά υπολογίζεται:

$$P(X \geq a) = 1 - \frac{\gamma(v_a, \beta_a a)}{\Gamma(v_a)} = 1 - \Gamma(v_a, \beta_a a) \quad (5.25)$$

Η ατελής γάμμα συνάρτησης (incomplete gamma function) ορίζεται ως [Abr65]:

$$\gamma(v, x) = \int_0^x t^{v-1} e^{-t} dt \quad (5.26)$$

ή εναλλακτικά ως:

$$\Gamma(v, x) = \frac{\gamma(v, x)}{\Gamma(v)} \quad (5.27)$$

Επομένως, η πιθανότητα υπέρβασης ή αποκοπής θα δίνεται τελικά από τον τύπο:

$$P[A(d_j) > M_f] = 1 - \frac{\gamma(v_a(d_j), \beta_a(d_j) \cdot M_f)}{\Gamma(v_a(d_j))} \quad (5.28)$$

Στους παραπάνω τύπους, οι συναρτήσεις  $\gamma(\ )$  και  $\Gamma(\ )$  υπολογίζονται αριθμητικά από οποιοδήποτε μαθηματικό πρόγραμμα (π.χ. MATLAB). Ενώ η πιθανότητα του ενδεχομένου ( $c \leq X \leq d$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \frac{\gamma(v_a, \beta_a x_2)}{\Gamma(v_a)} - \frac{\gamma(v_a, \beta_a x_1)}{\Gamma(v_a)} = \Gamma(v_a, \beta_a x_2) - \Gamma(v_a, \beta_a x_1) \quad (5.29)$$



Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, η διαθεσιμότητα της  $j$  σύνδεσης του ασύρματου δικτύου ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους, έστω  $n_1$  και  $n_2$ , των οποίων η απόσταση είναι  $d_j$  υπολογίζεται σύμφωνα με την (5.25) και είναι ίση με:

$$P(n_1, n_2) = P[A(d_j) < M_f] = P_0 - \left[ 1 - \frac{\gamma(v_a(d_j), \beta_a(d_j) \cdot M_f)}{\Gamma(v_a(d_j))} \right] \quad (5.30)$$

Ο μέσος αριθμός γειτονικών κόμβων τώρα προκύπτει από την σχέση:

$$\begin{aligned} E(d) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho P(n_1, n_2) r dr d\varphi = \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho \left[ P_0 - \left( 1 - \frac{\gamma(v_a(d_j), \beta_a(d_j) \cdot M_f)}{\Gamma(v_a(d_j))} \right) \right] r dr d\varphi \end{aligned} \quad (5.31)$$

Ενώ, τέλος, η πιθανότητα απομόνωσης για ένα ασύρματο δίκτυο κορμού που είναι εγκατεστημένο σε μία περιοχή με υποτροπικό ή τροπικό κλίμα θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-E(d)} = \exp \left\{ -2\pi\rho \int_0^{R_{cov}} \left[ P_0 - \left( 1 - \frac{\gamma(v_a(d_j), \beta_a(d_j) \cdot M_f)}{\Gamma(v_a(d_j))} \right) \right] r dr \right\} \quad (5.32)$$

Το ολοκλήρωμα της σχέσης (5.32) δεν λύνεται αναλυτικά αλλά μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με χρήση αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης.

## 5.6 Υπολογισμός συνδεσιμότητας: Weibull μοντέλο

### 5.6.1 Απόσβεση διαλείψεων βροχής: Weibull μοντέλο

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε για την κατανομή της απόσβεσης εξαιτίας βροχής το λογαριθμοκανονικό μοντέλο που αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση για σχετικά χαμηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης που εμφανίζονται σε περιοχές με εύκρατα κλίματα και το μοντέλο που βασίζεται στην γάμμα κατανομή που αντίστοιχα προσεγγίζει πολύ καλύτερα τους υψηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης που εμφανίζονται κυρίως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Για αυτό το σκοπό σε

αυτή την ενότητα, επιλέχθηκε η Weibull κατανομή για τον χαρακτηρισμό της απόσβεσης εξαιτίας βροχής καθώς έχει αποδειχθεί ότι παρέχει πολύ καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό της απόσβεσης εξαιτίας βροχής σε συνδέσεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz τόσο για χαμηλούς όσο και για υψηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης [PAK<sup>+</sup>05].

Η κατανομή Weibull περιγράφεται γενικά από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_x(x) = \begin{cases} ax^{\beta-1}e^{-ax^\beta/\beta} & x \geq 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (5.33)$$

Επομένως, η απόσβεση των διαλείψεων εξαιτίας βροχής θα είναι μια τυχαία μεταβλητή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) που δίνεται από την σχέση:

$$f_A(A) = w_A m_A a^{m_A-1} e^{-w_A a^{m_A} A} \quad (5.34)$$

Οι  $w_A$  και  $m_A$  αποτελούν τις στατιστικές παραμέτρους της Weibull κατανομής για την απόσβεση λόγω βροχής και υπολογίζονται συναρτήσει των αντίστοιχων παραμέτρων  $w_R$  και  $m_R$  του ρυθμού βροχόπτωσης [PAK<sup>+</sup>05]. Οι τιμές των  $w_R$  και  $m_R$  υπολογίζονται, όπως και για τις προηγούμενες κατανομές, για κάθε μέρος της γης είτε από τοπικές μετρήσεις του ρυθμού βροχόπτωσης είτε από τα δεδομένα που προέρχονται από τους χάρτες βροχής της σύστασης ITU-R P.837-5. Για μία σύνδεση μήκους  $d_j$  σε (km) η παράμετρος  $m_{A_j}$  θα υπολογίζεται λύνοντας την ακόλουθη υπερβατική εξίσωση:

$$\frac{\Gamma\left(\frac{2}{m_{A_j}}+1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{m_{A_j}}+1\right)} = \frac{H_1 \cdot \Gamma\left(\frac{2b}{m_r}+1\right) - (H_1 - d_j^2) \cdot \Gamma^2\left(\frac{b}{m_r}+1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{b}{m_r}+1\right) \cdot d_j^2} \quad (5.35)$$

Στην σχέση (5.34) το  $\Gamma()$  είναι η γνωστή συνάρτηση γάμμα που δίνεται και από την σχέση (5.18). Τα  $a, b$  είναι οι παράμετροι της ειδικής απόσβεσης και υπολογίζονται από τους τύπους (5.4) και (5.5). Ενώ, ο συντελεστής  $H_1$  που εκφράζει

τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής σε μία ζεύξη, υπολογίζεται ακριβώς όπως και στην λογαριθμοκανονική κατανομή από την τελική σχέση:

$$H_1 = 2d_j G \sinh^{-1}(d_j/G) + 2G^2 \left[ 1 - \sqrt{(d_j/G)^2 + 1} \right] \quad (5.36)$$

Όπου το  $G$  είναι σταθερά της οποίας η τιμή κυμαίνεται μεταξύ 1 και 1.75km και εξαρτάται από τη μακροσκοπική δομή του μέσου βροχής της θεωρούμενης γεωγραφικής περιοχής. Τέλος, η στατιστική παράμετρος  $w_A$  θα υπολογίζεται βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$w_{A_j} = \exp \left\{ -m_{A_j} \cdot \ln \left( \frac{a \cdot w_r^{-\frac{b}{m_r}} \cdot \Gamma \left( \frac{b}{m_r} + 1 \right) \cdot d_j}{\Gamma \left( \frac{1}{m_{A_j}} + 1 \right)} \right) \right\} \quad (5.37)$$

### 5.6.2 Υπολογισμός συνδεσιμότητας

Η αθροιστική συνάρτηση της Weibull κατανομής δίνεται από τον παρακάτω τύπο [Abr65]:

$$P(X \leq a) = 1 - \exp \left( -\frac{a}{\beta} x^\beta \right) \quad (5.38)$$

Από την σχέση (5.24) προκύπτει η πιθανότητα υπέρβασης της τυχαίας μεταβλητής που περιγράφει την απόσβεση εξαιτίας διαλείψεων βροχής και δεδομένου ότι  $w_A = a/\beta$  και  $m_A = \beta$ .

$$P[A(d_j) > M_f] = \exp(-w_A M_f^{m_A}) \quad (5.39)$$

Επομένως, η διαθεσιμότητα της  $j$  σύνδεσης του ασύρματου δικτύου ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους, έστω  $n_1$  και  $n_2$ , των οποίων η απόσταση είναι  $d_j$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$P(n_1, n_2) = P[A(d_j) < M_f] = P_0 - \exp(-w_A M_f^{m_A}) \quad (5.40)$$

Ο μέσος αριθμός γειτονικών κόμβων τώρα προκύπτει από την σχέση:

$$\begin{aligned} E(d) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho P(n_1, n_2) r dr d\varphi = \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho [P_0 - \exp(-w_A M_f^{m_A})] r dr d\varphi \end{aligned} \quad (5.41)$$

Ενώ τέλος, η πιθανότητα απομόνωσης θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-E(d)} = \exp \left\{ -2\pi\rho \int_0^{R_{cov}} [P_0 - \exp(-w_A M_f^{m_A})] r dr \right\} \quad (5.42)$$

Το ολοκλήρωμα της σχέσης (4.42) δεν λύνεται αναλυτικά αλλά μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με χρήση αριθμητικών μεθόδων ολοκλήρωσης. Ενώ το  $P_0$  είναι το ίδιο για όλες τις κατανομές καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων υπό εξέτασης περιοχής.

## 5.7 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

### 5.7.1 Γενικά

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα κορμού που λειτουργούν εντός του εύρους συχνοτήτων των 10-50GHz. Για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας υπολογίζονται η πιθανότητα απομόνωσης ενός τυχαίου κόμβου του δικτύου και η κρίσιμη πυκνότητα των κόμβων που απαιτείται για να παραμένει το δίκτυο συνδεδεμένο. Τα αποτελέσματα αυτών των μεγεθών παρουσιάζονται για τις προτεινόμενες κατανομές, ενώ η επιλογή της κατανομής για την μοντελοποίηση της απόσβεσης εξαιτίας διαλείψεων βροχής

γίνεται σύμφωνα με τον κλιματολογικό χαρακτηρισμό της θεωρούμενης περιοχής. Στόχος μας είναι να διερευνηθεί η επίδραση στην συνδεσιμότητα βασικών παραμέτρων του δικτύου όπως η συχνότητα λειτουργίας, η εκπεμπόμενη ισχύς αλλά και η επίδραση στην συνδεσιμότητα των διαφορετικών μακροσκοπικών κλιματικών χαρακτηριστικών που έχει κάθε γεωγραφική τοποθεσία.

Οι πιθανότητες αποκοπής ή υπέρβασης μίας σύνδεσης όπως υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.13), (5.28) και (5.32), για κάθε μία από τις προτεινόμενες κατανομές, βασίζεται στην πιθανότητα η απόσβεση εξαιτίας βροχής να υπερβεί το περιθώριο διάλειψης  $M_f$  που έχει προκαθοριστεί για κάθε σύνδεση του βάσει των προδιαγραφών ποιότητας του δικτύου. Κατά τον αρχικό σχεδιασμό του δικτύου είναι γνωστό ότι για τις περιόδους που υπάρχουν βροχοπτώσεις θα υπάρξει μια επιπλέον αιτία σημαντικών απωλειών για την ισχύ του διαδιδόμενου σήματος με αποτέλεσμα το λαμβανόμενο στον δέκτη σήμα να είναι σημαντικά υποβαθμισμένο και να μην λαμβάνεται σωστά. Αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να προσδιοριστεί εκ των προτέρων το ύψος των επιπρόσθετων αποσβέσεων εξαιτίας διαλείψεων βροχής και είτε να ισοσταθμιστεί με αντίστοιχη αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύς, είτε να χρησιμοποιηθεί κάποια τεχνική προσαρμογής της εκπεμπόμενης ισχύς ή αλλαγής της ψηφιακής διαμόρφωσης ώστε να μειωθεί η απαιτούμενη ευαισθησία του δέκτη για την ορθή λήψη του σήματος πληροφορίας.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν το περιθώριο διάλειψης θα υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$M_f = SNR_{cs} - SNR_{th} \quad (5.43)$$

Όπου  $SNR_{cs}$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη μίας σύνδεσης που αναφέρεται στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει το φαινόμενο των διαλείψεων βροχής και επομένως δεν υπάρχουν επιπλέον εξασθενήσεις ενώ ως  $SNR_{th}$  συμβολίζεται το κατώφλι του σηματοθορυβικού λόγου που αντιστοιχεί στην ευαισθησία του δέκτη βάσει των προδιαγραφών ποιότητας του δικτύου. Ο προσδιορισμός του  $SNR_{cs}$  στην είσοδο του δέκτη κάθε σύνδεσης για διάδοση ελευθέρου χώρου (LOS) και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη εξασθενήσεις από ατμοσφαιρικά φαινόμενα, όπως οι αποσβέσεις λόγω βροχής, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$SNR_{cs}(d_j) = P_{t,j} + G_{t,j} + G_{r,j} - 20 \log \left( \frac{4\pi d_j}{\lambda} \right) - N \quad (j=1, \dots, n) \quad (5.44)$$

Σε αυτή την σχέση όλα τα μεγέθη είναι σε (dB) κλίμακα, καθώς η στατιστική κατανομή των αποσβέσεων εξαιτίας βροχής που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες αναφέρεται σε (dB) κλίμακα. Επιπρόσθετα, για κάθε σύνδεση  $P_{t,j}$  είναι η εκπεμπόμενη από τον πομπό ισχύς ενώ  $G_{t,j}$  και  $G_{r,j}$  σε (dBi) είναι τα κέρδη της κεραίας του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα. Τέλος,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του διαδιδόμενου σήματος και  $N$  είναι πυκνότητα ισχύος του λευκού Γκαουσιανού θορύβου (AWGN) που υπολογίζεται σε (dBm) από τον τύπο:

$$N = 10 \log(KT_j B) \quad (5.45)$$

Στον τύπο (5.45),  $k = 1.38 \times 10^{-23} (J/K)$  είναι η σταθερά Boltzmann's,  $B(Hz)$  είναι το εύρος ζώνης του φίλτρου μετά την είσοδο της κεραίας και  $T_j(K)$  είναι η θερμοκρασία θορύβου.

Λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (5.44) μπορεί να γίνει εύκολα ο προσδιορισμός του  $R_{cov}$  που αποτελεί το άνω όριο ολοκλήρωσης για τις σχέσεις (5.16), (5.32) και (5.42) καθώς αποτελεί την μέγιστη δυνατή εμβέλεια ενός κόμβου και ανταποκρίνεται σε συνθήκες διάδοσης καθαρού ουρανού. Επομένως το  $R_{cov}$  θα υπολογίζεται εύκολα από τον τύπο:

$$R_{cov} = \frac{\lambda}{4\pi} 10^{\left[ \frac{(P_{t,j} + G_{t,j} + G_{r,j} - N) - SNR_{th}}{20} \right]} \quad (5.46)$$

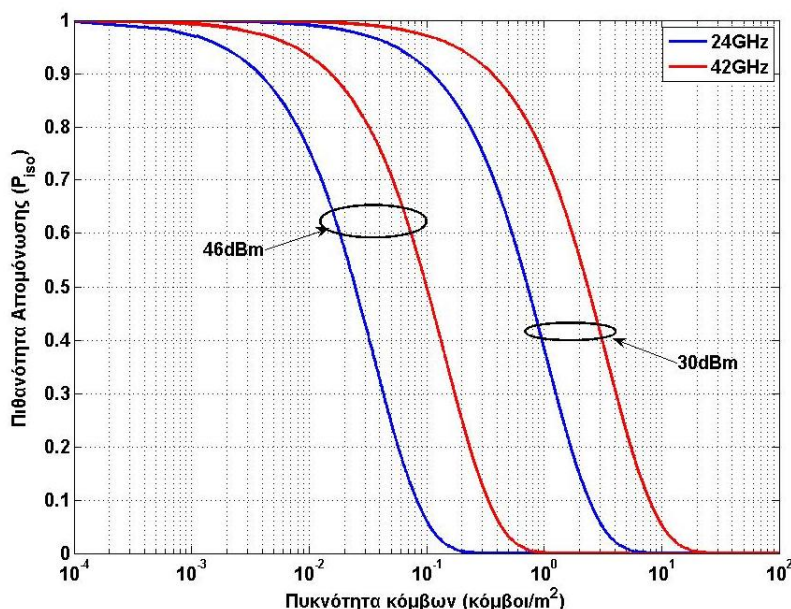
Σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις, οι τιμές των παραμέτρων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την λήψη των αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι:  $G_{t,j} = G_{r,j} = 27.5dBi$ ,  $N = -60dBm$  και  $SNR_{th} = 15dB$  για τα αποτελέσματα που γίνεται χρήση της λογαριθμοκανονικής και γάμμα κατανομής ενώ  $SNR_{th} = 10dB$  για τα αποτελέσματα που γίνεται χρήση της Weibull κατανομής. Οι τιμές αυτές των λειτουργικών παραμέτρων προέρχονται από την βιβλιογραφία και αποτελούν τυπικές τιμές για τα ασύρματα δίκτυα κορμού των κυψελωτών συστημάτων.

### 5.7.2 Πιθανότητα απομόνωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αποτελέσματα αναφορικά με την πιθανότητα απομόνωσης ενός κόμβου χρησιμοποιώντας και τα τρία προαναφερθέντα μοντέλα υπολογισμού της απόσβεσης εξαιτίας της βροχής. Στα τρία πρώτα σχήματα (5.2-5.4) διερευνάται η επίδραση στην πιθανότητα απομόνωσης της συχνότητας λειτουργίας και της εκπεμπόμενης ισχύς, ενώ στα επόμενα σχήματα (5.5-5.7), εξετάζεται η επίδραση των μακροσκοπικών κλιματικών χαρακτηριστικών της βροχής ανάλογα με την γεωγραφική θέση της περιοχής στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί το υπό θεώρηση δίκτυο. Οι στατιστικοί παράμετροι των διαλείψεων βροχής που χρησιμοποιούνται για τα αριθμητικά αποτελέσματα προέρχονται από τους χάρτες βροχής που υπάρχουν στην σύσταση ITU-R P.837.5 [P.837.5].

Στο σχήμα 5.2, απεικονίζεται η πιθανότητα απομόνωσης  $P_{iso}$  συναρτήσει της πυκνότητας των κόμβων  $\rho$  ενός ασύρματου δικτύου κορμού που βρίσκεται στην Αθήνα (Ελλάδα) για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας 24, 42GHz και διαφορετικά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύς 30dBm και 46dBm αντίστοιχα. Η Αθήνα ανήκει στις περιοχές με εύκρατο κλίμα επομένως γίνεται χρήση του λογαριθμοκανονικού μοντέλου [PK03a] και η πιθανότητα απομόνωσης υπολογίζεται από την σχέση (5.16). Ομοίως, στο σχήμα 5.3 απεικονίζεται η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας των κόμβων για το Τόκιο (Ιαπωνία). Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση του γάμμα μοντελου [PK03b] και οι υπολογισμοί προέρχονται από την σχέση (5.32) καθώς από τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά η περιοχή χαρακτηρίζεται ως υποτροπική. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας 17GHz και 24GHz αλλά και σε διαφορετικά επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος 30dBm, 42dBm. Τέλος, αντίστοιχα διαγράμματα απεικονίζονται και στον σχήμα 5.4 με χρήση του Weibull μοντέλου και της σχέσης (5.42) για την πόλη της Νέας Υόρκης (ΗΠΑ) που χαρακτηρίζεται από εύκρατο κλίμα. Οι συχνότητες λειτουργίας που έχουν επιλεγεί σε αυτή την περίπτωση είναι 26GHz και 42GHz, ενώ τα επίπεδα εκπεμπόμενης ισχύος 30dBm και 40dBm αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ακτίνες κάλυψης, ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας αλλά και την εκπεμπόμενη ισχύ, κυμαίνονται από 1,5 μέχρι 20 χιλιόμετρα. Αυτό συνεπάγεται ότι οι επιλεγμένες τιμές στα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι με τέτοιο τρόπο επιλεγμένες ώστε να καλύπτουν όλες τις δυνατές απαιτήσεις που μπορεί να έχουν τα μελλοντικά δίκτυα κορμού. Επιπρόσθετα, οι σχετικά υψηλές τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος μπορούν να αντισταθμιστούν από υψηλότερη κέρδη στις κεραιές λήψης και εκπομπής. Οι τιμές κερδών κεραιών που έχουν χρησιμοποιηθεί για

τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι χαρακτηριστικές για την χαμηλότερες συχνότητες και σχετικά μικρές για τις υψηλότερες συχνότητες του εύρους ζώνης των 10-50GHz.

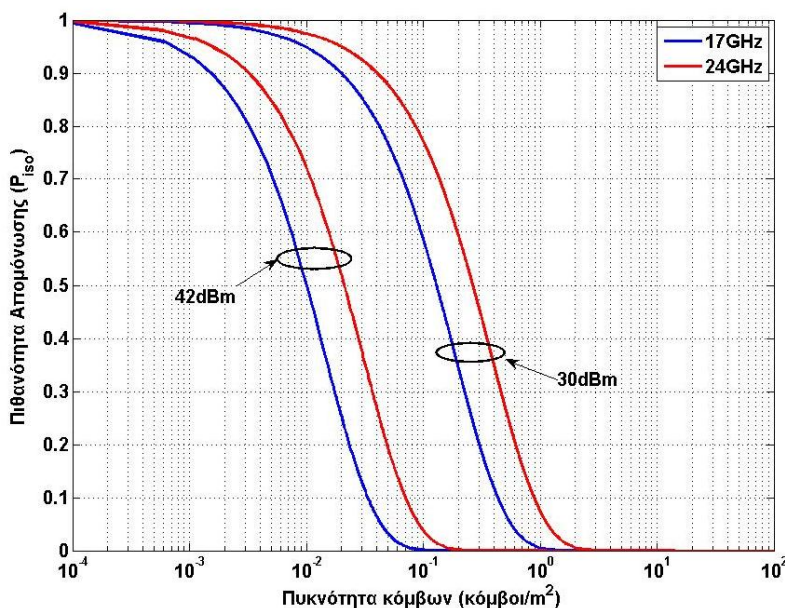


Σχήμα 5.2: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και τιμές εκπεμπόμενης ισχύς για την περιοχή της Αθήνας, Ελλάδα.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν παρατηρώντας τα σχήματα 5.2-5.4, είναι η μεγάλη επίδραση της συχνότητας λειτουργίας στην πιθανότητα απομόνωσης και κατά συνέπεια στην συνδεσιμότητα του δικτύου. Η συνδεσιμότητα του δικτύου μειώνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η εξάρτηση τόσο των απωλειών διαδρομής όσο και των αποσβέσεων εξαιτίας του φαινομένου των διαλείψεων βροχής από την συχνότητα λειτουργίας της σύνδεσης. Παρόλο που αυτό είναι προφανές για την περίπτωση των απωλειών διαδρομής, για τις εξασθενήσεις λόγω βροχής πρέπει να ανατρέξει κανείς στον τρόπο υπολογισμού την ειδικής απόσβεσης της βροχής  $A_0$ , και ειδικότερα στις παραμέτρους της ειδικής απόσβεσης  $a, b$  και πως αυτές υπολογίζονται μέσω των  $a_H, a_V, b_H, b_V$  στο Παράρτημα Γ, για να παρατηρήσει την σημαντική εξάρτηση που έχουν αυτές οι εξασθενήσεις από την συχνότητα. Πχ. στο σχήμα 5.4 μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι μια αύξηση της τάξης των 10dBm στην ισχύ εκπομπής δεν είναι σε θέση να αντισταθμίσει την επιδείνωση της συνδεσιμότητας του δικτύου σε μία μετάβαση της φέρουσας συχνότητας από τα 26GHz (πράσινη καμπύλη) στα 42GHz (μπλε καμπύλη). Αυτή η συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη δεδομένου ότι η επίδραση της

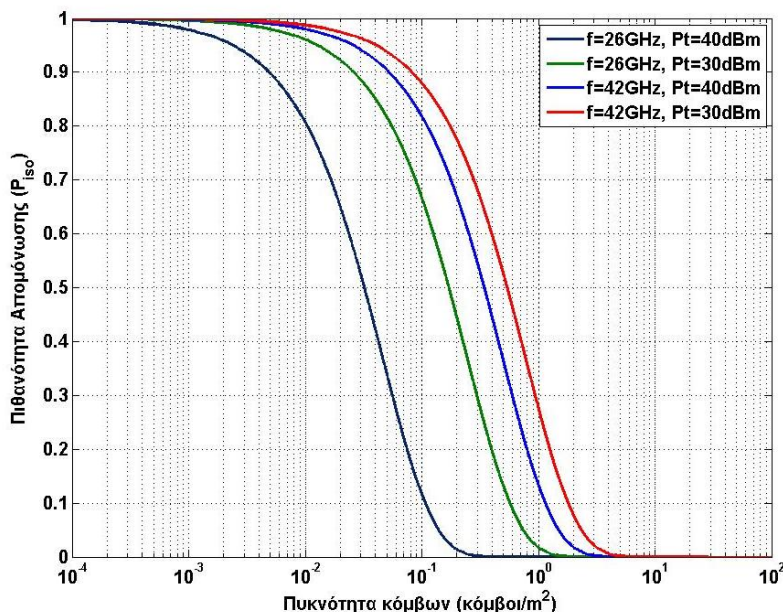


εξασθένησης βροχής είναι πολύ εντονότερη για υψηλότερες συχνότητες. Από τα αριθμητικά αποτελέσματα φάνηκε ότι η συχνότητα λειτουργίας είναι ο παράγοντας με την μεγαλύτερη επίδραση στη επίτευξη συνδεσιμότητας εντός του δικτύου γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή των συχνοτήτων λειτουργίας του δικτύου ιδιαίτερα για περιοχές με έντονα καιρικά φαινόμενα.



Σχήμα 5.3: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του γάμμα μοντέλου για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και τιμές εκπεμπόμενης ισχύος για την περιοχή του Τόκιου, Ιαπωνίας.

Πέρα από την επίδραση της συχνότητας λειτουργίας, στα προηγούμενα σχήματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει και την εξάρτηση της συνδεσιμότητας από τα επίπεδα της εκπεμπόμενης ισχύος. Δεδομένου ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη φαινόμενα παρεμβολών, επειδή όπως αναφέραμε στην εισαγωγή οι κεραιές είναι αρκετά κατευθυντικές σε αυτές τις συχνότητες και βάσει των συστάσεων της FCC οι παρεμβολές μπορούν να αμεληθούν, παρατηρούμε ότι η αύξηση της ισχύος οδηγεί αντίστοιχα σε αύξηση της συνδεσιμότητας. Το ενδιαφέρον όμως, που μπορεί να προκύψει ακολουθώντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο, είναι η εύρεση της επιπλέον ισχύος που απαιτείται για την επίτευξη συνδεσιμότητας εντός του δικτύου όταν μεταβάλλονται άλλοι λειτουργικοί παράμετροι όπως η συχνότητα λειτουργίας.

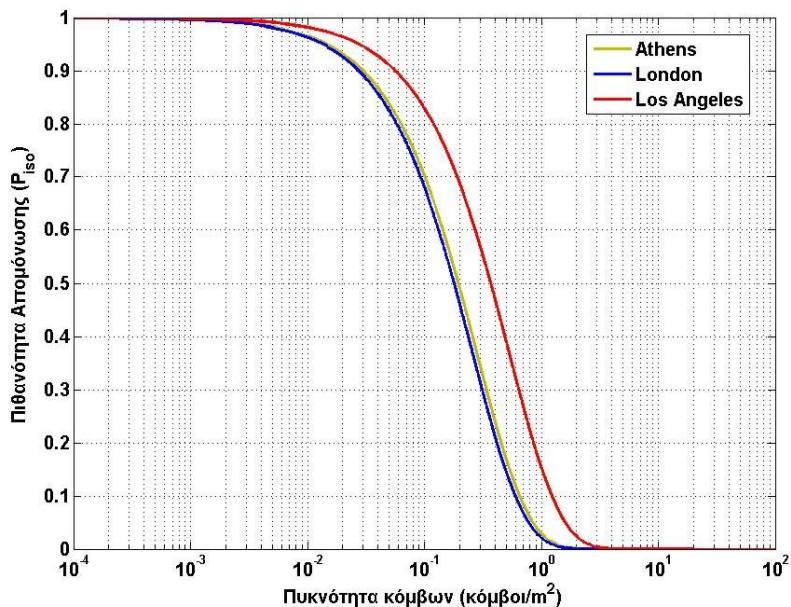


Σχήμα 5.4: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του Weibull μοντέλου για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και τιμές εκπεμπόμενης ισχύς για την περιοχή της Νέας Υόρκης, ΗΠΑ.

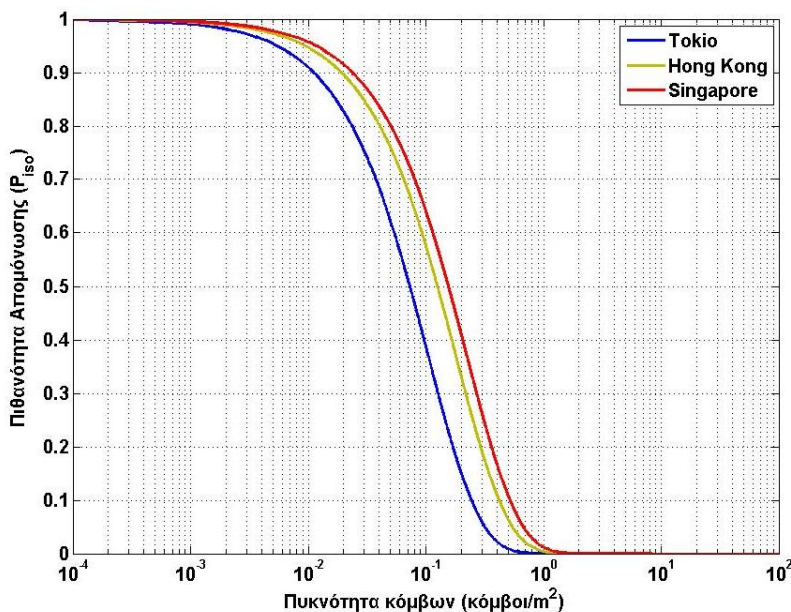
Εξίσου σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται τόσο η συνδεσιμότητα όσο και η απόδοση ενός ασύρματου δικτύου κορμού είναι οι κλιματικές συνθήκες της γεωγραφικής θέσης στην οποία είναι εγκατεστημένο το δίκτυο. Την εξάρτηση αυτή περιγράφουν οι στατιστικοί παράμετροι των κατανομών της απόσβεσης λόγω βροχής που προέρχονται από την στατιστική κατανομή του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης. Η γνώση αυτών των παραμέτρων μπορεί να προκύψει είτε μέσω τοπικών μετρήσεων στις περιοχές ενδιαφέροντος είτε σε παγκόσμια κλίμακα από τους χάρτες βροχής που περιέχονται στην σύσταση ITU-R P.837.5 [P.837.5].

Στα σχήματα 5.5-5.7, απεικονίζεται η πιθανότητα απομόνωσης  $P_{iso}$  συναρτήσει της πυκνότητας των κόμβων  $\rho$  για διαφορετικές πόλεις στις οποίες οι τοπικές κλιματικές συνθήκες διαφέρουν μεταξύ τους ή κατηγοριοποιούνται σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες και κατά συνέπεια μοντελοποιούνται διαφορετικά οι διαλείψεις τους. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της πιθανότητας απομόνωσης για τρεις διαφορετικές πόλεις: Αθήνα, Λονδίνο και Λος Άντζελες, που περιλαμβάνονται στις εύκρατες περιοχές και μοντελοποιούνται βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου. Για τα συγκεκριμένα διαγράμματα η συχνότητα λειτουργίας ορίστηκε στα 24GHz και η εκπεμπόμενη ισχύς στα 36dBm. Αντίστοιχα, στο σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της πιθανότητας απομόνωσης πάλι για τρεις διαφορετικές πόλεις: Τόκιο, Χονγκ Κονγκ και Σιγκαπούρη που περιλαμβάνονται στις υποτροπικές και τροπικές περιοχές και μοντελοποιούνται βάσει

του γάμμα μοντέλου χρησιμοποιώντας τις ίδιες λειτουργικές παραμέτρους με το λογαριθμοκανονικό μοντέλο.

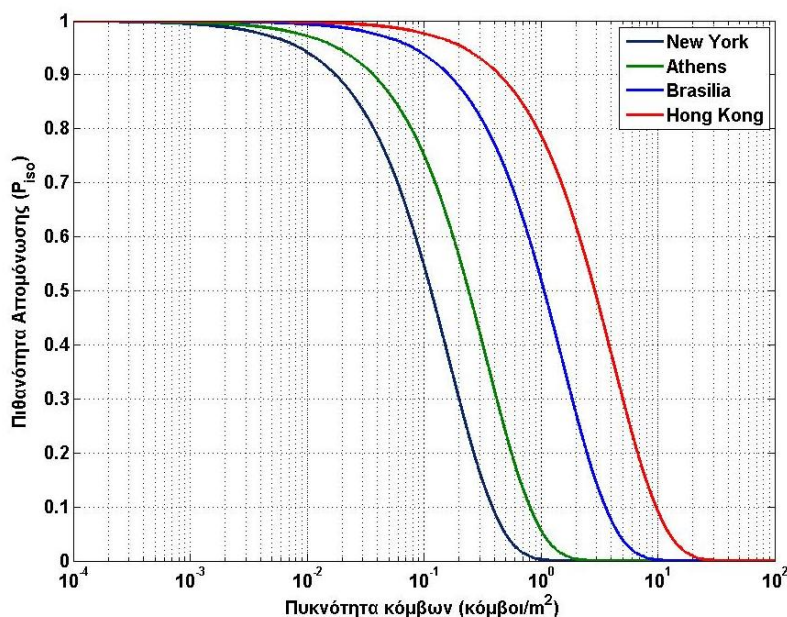


Σχήμα 5.5: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για διαφορετικές κλιματικές περιοχές για συχνότητα λειτουργίας 24GHz και 36dBm εκπεμπόμενης ισχύς.



Σχήμα 5.6: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του γάμμα μοντέλου για διαφορετικές κλιματικές περιοχές για συχνότητα λειτουργίας 24GHz και 36dBm εκπεμπόμενης ισχύς.

Τέλος, στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της πιθανότητας απομόνωσης για τις πόλεις: Νέα Υόρκη, Αθήνα, Μπραζιλία και Χονγκ Κονγκ με τις δύο πρώτες να περιλαμβάνονται στις εύκρατες κλιματικές ζώνες και τις άλλες δύο στις υποτροπικές/τροπικές κλιματικές ζώνες. Η μοντελοποίηση των αποσβέσεων βροχής έγινε βάσει του Weibull μοντέλου ενώ ως συχνότητα λειτουργίας ορίστηκαν τα 26GHz και η εκπεμπόμενη ισχύς ορίστηκε στα 36dBm.



Σχήμα 5.7: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του Weibull μοντέλου για διαφορετικές κλιματικές περιοχές για συχνότητα λειτουργίας 26GHz και 32dBm εκπεμπόμενης ισχύς.

Από τα αντίστοιχα διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η πιθανότητα απομόνωσης είναι μεγαλύτερη στις περιοχές με τα πιο έντονα κλιματικά φαινόμενα με την σύγκριση να γίνεται για τα ίδια λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Το συμπέρασμα αυτό είναι γενικό και ανεξάρτητο από την κατανομή που χρησιμοποιήθηκε. Με την έννοια έντονα κλιματικά φαινόμενα χαρακτηρίζουμε τις περιπτώσεις που ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές και όχι την συχνότητα με την οποία εμφανίζεται το φαινόμενο των βροχοπτώσεων. Όπως εύκολα μπορεί κανείς να διακρίνει, η πιθανότητα απομόνωσης εμφανίζει την χειρότερη επίδοση στις πόλεις που βρίσκονται εντός της τροπικής ζώνης όπως το Χονγκ Κονγκ και η Σιγκαπούρη. Για αυτό τον λόγο είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα διαλείψεων εξαιτίας βροχής κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ασύρματου δικτύου σε υψηλές ζώνες συχνοτήτων καθώς, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, ένα δίκτυο μπορεί να παρουσιάζει υψηλή

συνδεσιμότητα σε μια περιοχή και πολύ χαμηλή συνδεσιμότητα σε κάποια άλλη γεωγραφική θέση όπου υπάρχουν έντονα καιρικά φαινόμενα.

### 5.7.3 Κρίσιμη πυκνότητα κόμβων

Στην προηγούμενη ενότητα η πιθανότητα απομόνωσης χρησιμοποιήθηκε ως το μέτρο αξιολόγησης για την εκτίμηση της συνδεσιμότητας. Παρότι στην βιβλιογραφία η πιθανότητα απομόνωσης θεωρείται ως ο πιο διαδεδομένος τρόπος για τον θεωρητικό υπολογισμό της συνδεσιμότητας, δεν είναι εξίσου χρήσιμος για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός δικτύου. Όσον αφορά την υλοποίηση και την ανάπτυξη ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου, η ελάχιστη απαιτούμενη πυκνότητα των κόμβων του δικτύου ώστε να διατηρείται συνδεδεμένο αποτελεί ένα εύχρηστο μετρικό μέγεθος της συνδεσιμότητας τόσο για το σχεδιασμό του δικτύου όσο και την αξιολόγηση της απόδοσής του. Λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, για ενεργειακά αποδοτικά δίκτυα και παράλληλα τους περιορισμούς στην εκπεμπόμενη ισχύς, τότε πρακτικά η διατήρηση μιας κρίσιμης πυκνότητας κόμβων στο εσωτερικό του δικτύου είναι ένας εύκολος τρόπος για την εξασφάλιση των της λειτουργίας του δικτύου.

Από την ανάλυση του μοντέλου συνδεσιμότητας στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γνωρίζουμε ότι η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας κόμβος απομονωμένος δίνεται από την σχέση:

$$P(B) = e^{-\rho A \cdot P_{iso}} = e^{-\rho A \cdot e^{-E(d)}} \quad (5.47)$$

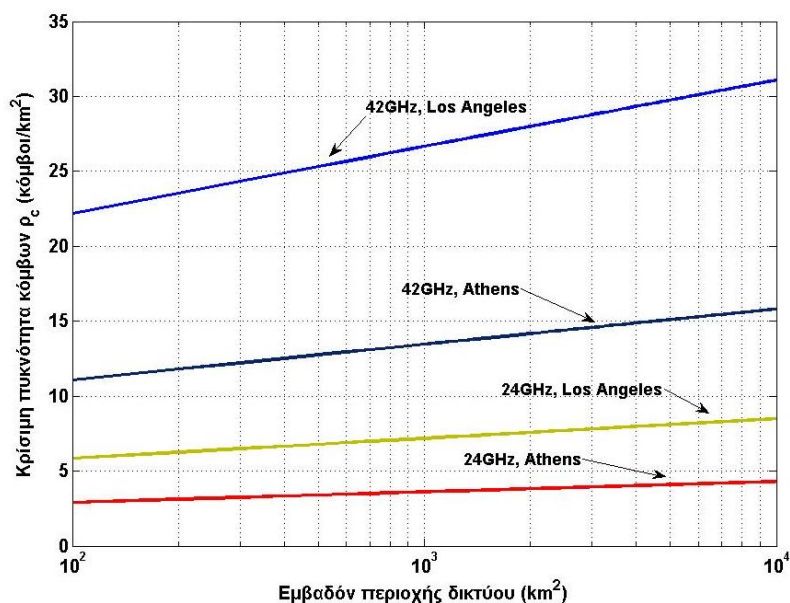
Επομένως, η κρίσιμη πυκνότητα των κόμβων μπορεί να υπολογιστεί για μία δεδομένη τιμή της πιθανότητας να μην υπάρχει κανένας κόμβος απομονωμένος  $P(B) = t$  όπου  $t \rightarrow 1$ . Λύνοντας την (5.47) ως προς  $\rho$  με την βοήθεια της συνάρτησης Lambert (W) λαμβάνουμε την κρίσιμη πυκνότητα των κόμβων από την σχέση:

$$\rho_c = -\frac{1}{2\pi\Lambda} W_{-1}\left(\frac{2\pi\Lambda \ln(t)}{A}\right) \quad (5.48)$$

Όπου:

$$\Lambda = \int_0^{R_{cov}} P(n_1, n_2) r dr \quad (5.49)$$

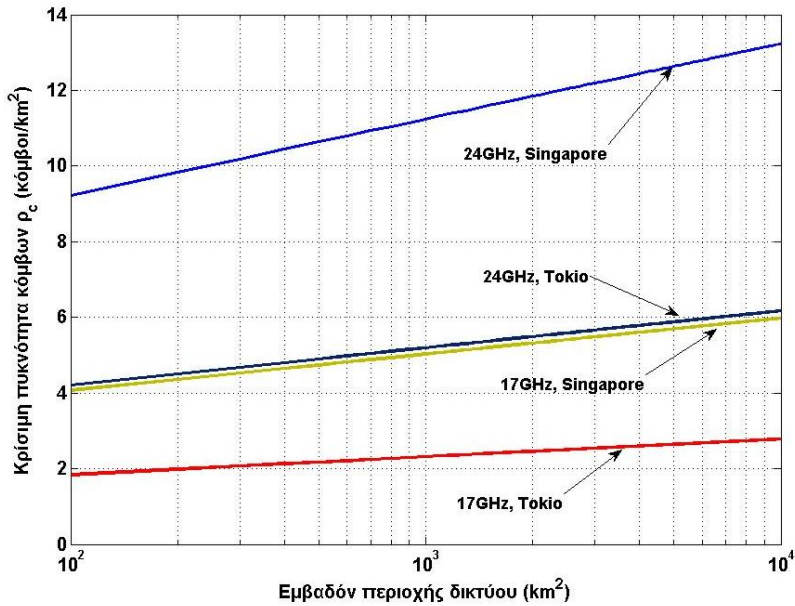
Το  $P(n_1, n_2)$  δίνεται για κάθε μία από τις προτεινόμενες κατανομές από τις σχέσεις (5.14), (5.30) και (5.40). Ένα σχεδόν συνδεδεμένο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί για  $t = 0.99$  [BH05].



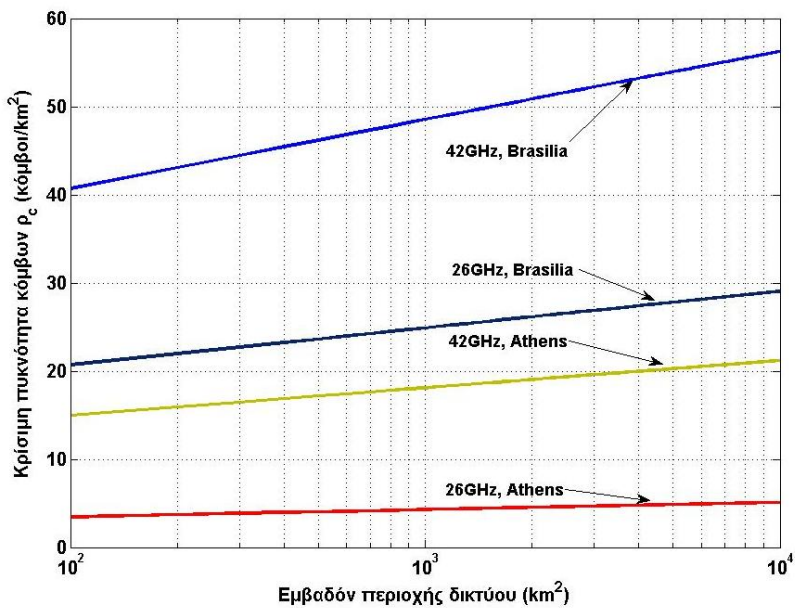
Σχήμα 5.8: Η κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_c$  των κόμβων του δικτύου συναρτήσει του εμβαδού της περιοχής  $A$  του δικτύου βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις, συχνότητες λειτουργίας και για εκπεμπόμενη ισχύς 36dBm.

Στα σχήματα 5.8-5.10 παρουσιάζονται αποτελέσματα για την κρίσιμη πυκνότητα κόμβου  $\rho_c$  αντίστοιχα με αυτά που παρουσιάστηκαν και για την πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει όμως την περιοχής που καταλαμβάνει το δίκτυο  $A(km^2)$ . Σαν πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα και των τριών κατανομών που χρησιμοποιήθηκαν είναι ότι η φέρουσα συχνότητα και τα κλιματικά χαρακτηριστικά της γεωγραφικής περιοχής λειτουργίας του δικτύου αποτελούν τους καθοριστικότερους παράγοντες για τον καθορισμό της κρίσιμης πυκνότητας κόμβων. Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας και όσο πιο έντονα είναι τα καιρικά φαινόμενα στην περιοχή που θα εγκατασταθεί το δίκτυο τόσο πυκνότερη πρέπει να είναι η τοπολογία των κόμβων και πιο μικρές οι αποστάσεις των συνδέσεων τους ώστε να μπορούν οι γειτονικοί κόμβοι να επικοινωνούν μεταξύ τους και να παραμένει το δίκτυο συνδεδεμένο. Επιπρόσθετα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο η πιθανότητα να μην υπάρχει κανένας απομονωμένος κόμβος εντός δικτύου μειώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κρίσιμη πυκνότητα κόμβων. Αυτό φαίνεται και από την κλίση που έχουν οι καμπύλες

στα διαγράμματα, ενώ γίνεται επίσης φανερό ότι η τάση αυτή της κρίσιμης πυκνότητας χειροτερεύει όταν αυξάνεται η συχνότητα ή όταν αναφερόμαστε σε περιοχές με έντονα καιρικά φαινόμενα.



Σχήμα 5.9: Η κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_c$  των κόμβων του δικτύου συναρτήσει του εμβαδού της περιοχής  $A$  του δικτύου βάσει του γάμμα μοντέλου για διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις, συχνότητες λειτουργίας και για εκπεμπόμενη ισχύς 30dBm.



Σχήμα 5.10: Η κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_c$  των κόμβων του δικτύου συναρτήσει του εμβαδού της περιοχής  $A$  του δικτύου βάσει του Weibull μοντέλου για διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις, συχνότητες λειτουργίας και για εκπεμπόμενη ισχύς 32dBm.

## 5.8 Αξιολόγηση συνδεσιμότητας με χρήση διπλής πόλωσης

### 5.8.1 Γενικά

Η βασικότερη απαίτηση την οποία πρέπει να εκπληρώσουν τα μελλοντικά δίκτυα κορμού είναι η δυνατότητα παροχής όλο και υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης της πληροφορίας για την εξυπηρέτηση ενός πλήθους ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η προφανής λύση, όπως περιγράφηκε αναλυτικότερα στην αρχή του κεφαλαίου, είναι η χρήση μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών συνδέσεων. Στις υψηλές συχνότητες, άνω των 10GHz, υπάρχουν ελεύθερες υψηλής χωρητικότητας ζώνες συχνοτήτων που αποτελούν την κύρια προοπτική για ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Επιπλέον, η χρήση διπλής πόλωσης στις συνδέσεις του δικτύου, δηλαδή η ταυτόχρονη εκπομπή δύο σημάτων ίδιας συχνότητας με ορθογώνιες μεταξύ τους πολώσεις, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της χωρητικότητας των συνδέσεων και των ταχυτήτων μετάδοσης χωρίς την απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Η χρήση διπλής πόλωσης και τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων έχει εφαρμοστεί ήδη σε δορυφορικά και επίγεια συστήματα και πιστεύουμε ότι μπορεί αντίστοιχα να αποτελέσει μια εφικτή λύση για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης στα μελλοντικά πολυβηματικά δίκτυα.

Η χρήση γενικά ορθογώνιων πολώσεων στην ίδια φέρουσα συχνότητα για να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης της πληροφορίας αποτελεί μια τεχνική επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας που μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα εφόσον διατηρηθεί μια επαρκής απομόνωση εξαιτίας της διασταύρωσης πόλωσης μεταξύ των κάθετα πολωμένων σημάτων. Το πρόβλημα εμφανίζεται όταν υπάρξει ελάττωση αυτής της απομόνωσης και συνεπώς το ένα σήμα παρεμβάλει στο άλλο. Η ελάττωση της απομόνωσης οφείλεται στην αποπόλωση των μεταδιδόμενων σημάτων όταν αυτά μεταδίδονται κατά μήκος της ασύρματης σύνδεσης. Ενώ, η κύρια αιτία για την εμφάνιση αποπόλωσης, ειδικά σε συχνότητες άνω των 10GHz, είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις του μέσου διάδοσης και κυρίως οι διαλείψεις εξαιτίας βροχής.

Βασικά μεγέθη για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αποπόλωσης ενός σήματος είναι η Διασταύρωση Πόλωσης (XPD), η Απομόνωση Διασταύρωσης Πόλωσης (XPI) και τέλος η Ομοπολική Απόσβεση (CPA). Η ομοπολική απόσβεση ουσιαστικά συμπίπτει με την συνολική απόσβεση που δέχεται το σήμα καθώς διαδίδεται και οφείλεται είτε σε απώλειες διαδρομής είτε σε αποσβέσεις εξαιτίας βροχής και παρεμβολές από γειτονικά κανάλια.



Η διασταύρωση πόλωσης αποτελεί το βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό της αποπόλωσης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$(XPD) = 20 \log \left| \frac{E_{cc}}{E_{cx}} \right| \quad (5.50)$$

Όπου  $E_{cc}$  είναι η ένταση του λαμβανόμενου πεδίου στην ίδια πόλωση με το μεταδιδόμενο σήμα και  $E_{cx}$  είναι το λαμβανόμενο σήμα στην ίδια μεταδιδόμενη κατεύθυνση που οφείλεται σε παρεμβολές από το κάθετο κανάλι.

Το αντικείμενο της παρούσας ενότητας είναι να αναπτυχθεί μοντέλο για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας σε ασύρματα δίκτυα κορμού που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και χρησιμοποιούν διπλά πολωμένα κανάλια για την αύξηση της χωρητικότητας των συνδέσεών τους. Επομένως, οι διαλείψεις εξαιτίας βροχής δεν προκαλούν μονάχα πρόσθετες εξασθενήσεις στο διαδιδόμενο σήμα αλλά και αποπόλωση των δύο κάθετα πολωμένων σημάτων που οδηγεί σε περαιτέρω επιδείνωση της απόδοσης και διαθεσιμότητας της σύνδεσης. Αυτό που θα εξεταστεί σε αυτήν την ενότητα είναι κατά πόσο αυτές οι αποπολώσεις μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά την συνδεσιμότητα ενός δικτύου κορμού και αν τελικά κρίνεται ωφέλιμη η χρήση τέτοιων τεχνικών επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε τέτοιου είδους δίκτυα.

### 5.8.2 Μεθοδολογία υπολογισμού συνδεσιμότητας

Αρχικά, γίνεται η θεώρηση ότι σε όλες τις συνδέσεις του δικτύου υπάρχουν συνθήκες διάδοσης ελευθέρου χώρου ενώ όλοι οι κόμβοι έχουν αντίστοιχες δυνατότητες εκπομπής. Στις συχνότητες άνω των 10GHz υπάρχουν έντονες εξασθενήσεις που οφείλονται στις διαλείψεις εξαιτίας βροχής και περιορίζουν την απόδοση των συνδέσεων του δικτύου. Επιπρόσθετα, όπως προαναφέρθηκε, οι διαλείψεις βροχής προκαλούν και απόπολωση στα διαδιδόμενα σήματα με αποτέλεσμα τα κάθετα πολωμένα σήματα να παρεμβάλλουν το ένα με το άλλο. Η παρεμβολή αυτή προσδιορίζεται ποσοτικά από την διασταύρωση πόλωσης (XPD) και υπολογίζεται μέσω εμπειρικών τύπων που έχουν προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και παρουσιάζονται στην συνέχεια της ενότητας.

Βάσει των παραπάνω υποθέσεων ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στον δέκτη της  $j$  σύνδεσης για κάθε ένα ξεχωριστά από τα κάθετα πολωμένα σήματα θα δίνεται από τον τύπο:

$$SNR_j = SNR_{cs} - A_j - \log \left( 1 + 10^{\frac{SNR_{cs} - A_j - XPD(A_j)}{10}} \right) \quad (5.51)$$

Όπου το  $SNR_{cs}$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη για συνθήκες καθαρού ουρανού που αναφέρεται βέβαια στο ένα από τα κάθετα πολωμένα σήματα,  $A_j$  σε (dB) είναι η τυχαία μεταβλητή που περιγράφει τις αποσβέσεις εξαιτίας των διαλείψεων βροχής (βλέπε ενότητες §5.4-§5.6) και  $XPD(A_j)$  σε (dB) είναι η διασταύρωση πόλωσης που εξαρτάται από την απόσβεση βροχής καθώς αποτελούν την αιτία αποπόλωσης των σημάτων.

Σε μία διπλά πολωμένη ασύρματη σύνδεση, κάθε μία από τις πολώσεις μπορεί να προκαλέσει ομοδιαυλική παρεμβολή στην άλλη καθώς οι μεταδόσεις γίνονται στην ίδια φέρουσα συχνότητα. Η παρεμβολή αυτή, όπως προαναφέρθηκε, προσδιορίζεται ποσοτικά από την διασταύρωση πόλωσης. Η μείωση της διασταύρωσης πόλωσης που προκαλείται από την απόσβεση βροχής, που εμφανίζεται κατά περιόδους στο κανάλι διάδοσης, αυξάνει την ομοδιαυλική παρεμβολή μεταξύ των δύο κάθετα πολωμένων σημάτων και επιδεινώνει τον σηματοθορυβικό λόγο του κάθε ενός από τα σήματα που λαμβάνει ο δέκτης. Στην σύσταση ITU-R P.530-13 παρουσιάζεται αναλυτικό μοντέλο για την μη δεσμευμένη κατανομή της διασταύρωσης πόλωσης που οφείλεται σε ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις [P.530-13]. Αυτό το μοντέλο, που ευθύς αμέσως θα παρουσιαστεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνδέσεις στις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις ή λεπτομερής προβλέψεις.

Μια πρώτη εκτίμηση της στατιστικής κατανομής του  $XPD$  σε (dB) μπορεί να βρεθεί μέσω την κατανομής της ομοπολικής απόσβεσης λόγω βροχής (CPA) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση που αναφέρεται στην ίδια πιθανότητα υπέρβασης:

$$XPD(A_j) = U - V(f) \log(CPA) \quad (5.52)$$

και εφαρμόζεται για γραμμική αλλά και για κυκλική πόλωση του μεταδιδόμενου σήματος. Οι συντελεστές  $U$  και  $V(f)$  εξαρτώνται γενικά από έναν αριθμό μεταβλητών και εμπειρικών παραμέτρων, που περιλαμβάνουν και την συχνότητα

λειτουργίας ( $f$ ). Για μικροκυματικές και χιλιοστομετρικές συνδέσεις οπτικής επαφής με μικρές γωνίες ανύψωσης που χρησιμοποιούν οριζόντια ή κατακόρυφη πόλωση, αυτοί συντελεστές μπορεί να προσεγγισθούν μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$U = U_0 + 30 \log(f) \quad (5.53)$$

Και

$$V(f) = \begin{cases} 12.8 f^{0.19}, & 8 \leq f \leq 20 \text{GHz} \\ 26 & , \quad 20 \leq f \leq 35 \text{GHz} \end{cases} \quad (5.54)$$

Για τον συντελεστή  $U_0$  που είναι ανεξάρτητος της συχνότητας  $f$ , έχει βρεθεί μία μέση τιμή περίπου 15dB, με κάτω άκρο τα 9dB, που ισχύει για τιμές αποσβέσεων οφειλόμενες στην βροχή μεγαλύτερες από 15dB. Σημειώνεται ότι η μεταβλητότητα στις τιμές των  $U$  και  $V(f)$  είναι τέτοια ώστε η διαφορά μεταξύ των τιμών της ομοπολικής απόσβεσης (CPA) που αναφέρεται σε κατακόρυφη και οριζόντια πόλωση να μην είναι αισθητή όταν υπολογίζουμε το  $XPD$ . Ενώ αν θεωρήσουμε ότι και οι αποσβέσεις βροχής είναι αντίστοιχα ίδιες και για τις δύο πολώσεις τότε θα έχουμε για την ομοπολική απόσβεση ότι  $CPA = A_j$ .

Η συνδεσιμότητα σε ένα ασύρματο δίκτυο κορμού που λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων 10-50GHz και χρησιμοποιεί διπλά πολωμένα σήματα, με κόμβους τυχαία και ομοιόμορφα κατανεμημένους, θα υπολογίζεται όπως και στις άλλες περιπτώσεις από την σχέση:

$$P_{iso} = e^{-E(d)} \quad (5.55)$$

Όπου

$$E(d) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{cov}} \rho P(n_1, n_2) r dr d\varphi \quad (5.56)$$

Η διαθεσιμότητα των συνδέσεων  $P(n_1, n_2) = P(SNR_j \geq SNR_{th})$  των παραπάνω σχέσεων υπολογίζεται, ανάλογα με την κατανομή που έχει θεωρηθεί για τις εξασθενήσεις εξαιτίας βροχής, από τις σχέσεις (5.14) για το λογαριθμοκανονικό μοντέλων αποσβέσεων, (5.30) για το γάμμα μοντέλο και (5.40) για το Weibull μοντέλο. Τα ίδια ισχύουν αντίστοιχα για τον υπολογισμό της κρίσιμης πυκνότητας

των κόμβων που απαιτούνται για να μείνει το δίκτυο συνδεδεμένο και που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho_c = -\frac{1}{2\pi\Lambda} w_{-1} \left( \frac{2\pi\Lambda \ln(t)}{A} \right) \quad (5.57)$$

Με το  $\Lambda$  να υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της (5.49).

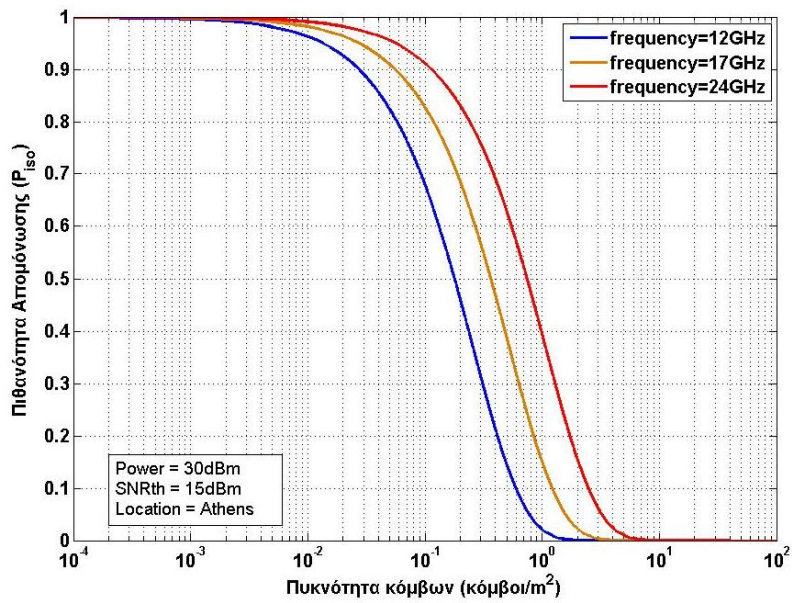
### 5.8.3 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να διερευνηθεί η επίδραση που μπορεί να έχει η χρήση διπλά πολωμένων σημάτων στην συνδεσιμότητα ασύρματων δικτύων νέας γενιάς. Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αποπόλωσης των σημάτων δείχνει ότι υπάρχει έντονη εξάρτηση του φαινομένου με την επιπρόσθετη απόσβεση που υπεισέρχεται στις συνδέσεις εξαιτίας βροχής. Για την μοντελοποίηση της βροχής και την λήψη αριθμητικών αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθεί η λογαριθμοκανονική κατανομή. Αντίστοιχα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποια από τις άλλες κατανομές ενώ τα τελικά συμπεράσματα αναμένεται να ταυτίζονται. Σύμφωνα με το λογαριθμοκανονικό μοντέλο η διαθεσιμότητα μίας τυχαίας  $j$  σύνδεσης του δικτύου θα υπολογίζεται από τον τύπο:

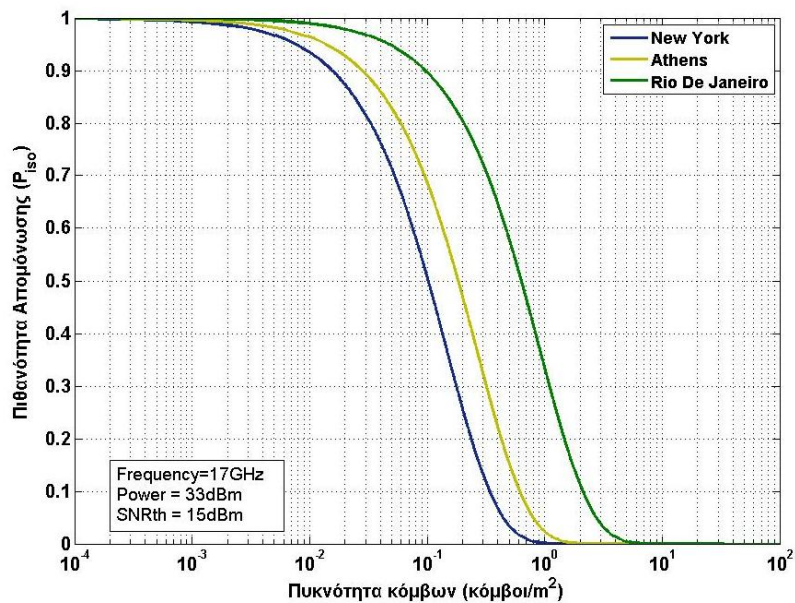
$$P(n_1, n_2) = P(SNR_j \geq SNR_{th}) = P_0 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln A_j(d_j) - \ln A_m(d_j)}{\sqrt{2} S_a(d_j)} \right) \quad (5.58)$$

Το περιθώριο διάλειψης  $M_f$  δεν είναι όμως το περιθώριο που μπορεί να λαμβάνει η απόσβεση λόγω βροχής καθώς σε αυτή την περίπτωση δεν είναι ο μοναδικός μηχανισμός εξασθένησης αλλά υπάρχει και η ομοδιαυλική παρεμβολή μεταξύ των κάθετα πολωμένων σημάτων που προσδιορίζεται από την διασταύρωση πόλωσης. Επομένως, η τιμή του  $A_j(d_j)$  στην σχέση (5.58) θα προσδιοριστεί με επίλυση της υπερβατικής εξίσωσης (5.51). Με τον αντίστοιχο τρόπο θα προκύψει και η τιμή της ακτίνας εμβέλειας  $R_{cov}$  από την (5.51).

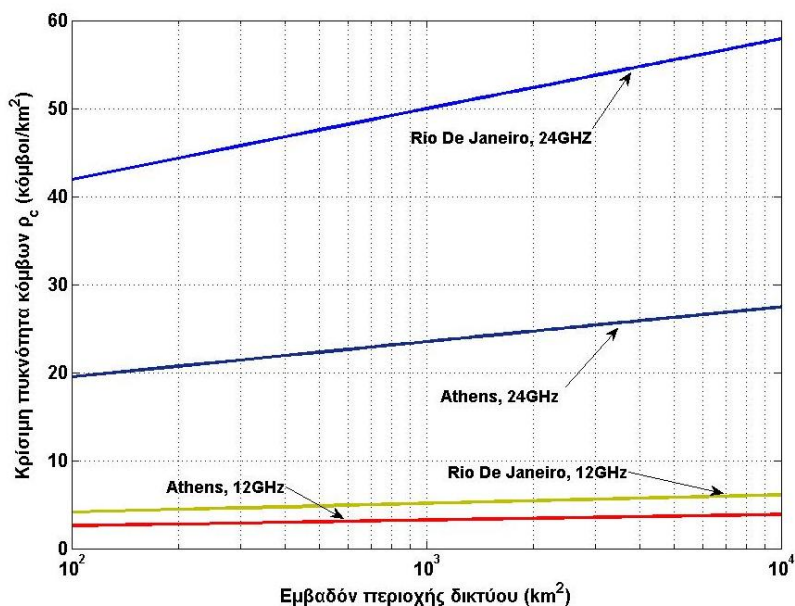
Για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν γίνει οι εξής υποθέσεις για τις λειτουργικές παραμέτρους του δικτύου:  $G_{t,j} = G_{r,j} = 27.5 \text{dBi}$ ,  $N = -60 \text{dBm}$  και  $SNR_{th} = 15 \text{dB}$  για να μπορεί να γίνει σύγκριση και τα αποτελέσματα προηγούμενων ενοτήτων.



Σχήμα 5.10: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας για την περιοχή της Αθήνας.



Σχήμα 5.11: Η πιθανότητα απομόνωσης συναρτήσει της πυκνότητας  $\rho$  των κόμβων βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για διαφορετικές κλιματικές περιοχές και συχνότητα λειτουργίας τα 17GHz.



Σχήμα 5.12: Η κρίσιμη πυκνότητα  $\rho_c$  των κόμβων του δικτύου συναρτήσει του εμβαδού της περιοχής  $A$  του δικτύου βάσει του λογαριθμοκανονικού μοντέλου για διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις, συχνότητες λειτουργίας και για εκπεμπόμενη ισχύς 30dBm.

## 5.9 Ανάλυση απόδοσης δικτύου

### 5.9.1 Πιθανότητα ανίχνευσης σφάλματος

Η απόδοση μίας σύνδεσης και η διαθεσιμότητά της είναι τα δύο βασικότερα κριτήρια που καθορίζουν την ποιότητα μίας ασύρματης σύνδεσης. Από την μία πλευρά, η απόδοση σχετίζεται με την επίτευξη μίας συγκεκριμένης τιμής για την πιθανότητα εμφάνισης λάθους (BEP) κατά την λήψη του σήματος ή αντίστοιχα ενός συγκεκριμένου ρυθμού εσφαλμένων bits (BER) που πρέπει να επιτευχθεί για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας της σύνδεσης. Από την άλλη πλευρά, η διαθεσιμότητα σχετίζεται με τον συνολικό χρόνο που παραμένει μία σύνδεση ανενεργή κατά την διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους. Κατά την διάρκεια βροχοπτώσεων, η επιπρόσθετη απόσβεση που προκαλεί το φαινόμενο επιδεινώνει την απόδοση των ασύρματων συνδέσεων και τις καθιστά σε ορισμένες περιπτώσεις μη διαθέσιμες με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική διαθεσιμότητα της σύνδεσης. Παράλληλα, λόγω της μείωσης του σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη υπάρχει ταυτόχρονα και αύξηση της πιθανότητας ανίχνευσης λάθους κατά την λήψη των δεδομένων πληροφορίας. Κύριος στόχος μας είναι να ερευνηθεί η μείωση της απόδοσης των συνδέσεων ενός ασύρματου πολυβηματικού δικτύου που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz.

Τα ασύρματα δίκτυα κορμού που λειτουργούν στις χιλιοστομετρικές συχνότητες επηρεάζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις αλλαγές των κλιματολογικών συνθηκών επομένως απαιτείται σωστός σχεδιασμός για την υλοποίηση ενός τέτοιου δικτύου και σωστός χειρισμός ώστε να μπορεί να λειτουργεί βάσει των προδιαγραφών ποιότητας του. Διαφορετικά, ειδικά για δίκτυα που λειτουργούν σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες των 10GHz, είναι πολύ πιθανό το ενδεχόμενο να παραμένουν για αρκετά διαστήματα μη διαθέσιμα εξαιτίας των έντονων αποσβέσεων που προκαλεί το φαινόμενο των διαλείψεων βροχής. Για αυτό το λόγο προτείνονται τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης [HWY02] ακολουθώντας τις μεταβολές του ασύρματου καναλιού έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται οι μέγιστοι δυνατοί φασματικοί πόροι και να επιτυγχάνονται οι υψηλότεροι δυνατοί ρυθμοί μετάδοσης διατηρώντας ταυτόχρονα την ποιότητα και την διαθεσιμότητα των συνδέσεων του δικτύου στα προκαθορισμένα επίπεδα που ορίζει η ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου (QoS).

Οι τεχνικές προσαρμοστικής διαμόρφωσης αναφέρονται στην δυνατότητα ρύθμισης της ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στις ασύρματες συνδέσεις του δικτύου με απώτερο στόχο να αποτραπεί το ενδεχόμενο οι επιπρόσθετες αποσβέσεις εξαιτίας του φαινομένου της βροχής να οδηγήσουν σε απώλεια της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Σύμφωνα με τον μηχανισμό προσαρμογής της διαμόρφωσης πάντα επιλέγεται η υψηλότερη διαθέσιμη διαμόρφωση που αντιστοιχεί και στον υψηλότερο δυνατόν ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας. Όταν υπάρξουν εξασθενήσεις στο διαδιδόμενο σήμα εξαιτίας των αποσβέσεων βροχής τότε ο μηχανισμός προσαρμογής επιλέγει μία διαμόρφωση χαμηλότερης τάξεως που απαιτεί χαμηλότερη ευαισθησία από την πλευρά του δέκτη για την ορθή λήψη του σήματος πληροφορίας. Εφόσον οι καιρικές συνθήκες είναι καλές, προτείνουμε την χρήση της ψηφιακής διαμόρφωσης 32 QAM ή 64 QAM που επιτρέπει την επίτευξη υψηλής ρυθμαπόδοσης (throughput) στις συνδέσεις του δικτύου και κάνει καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος. Αξίζει εδώ να τονιστεί ότι όσο υψηλότερης τάξεως διαμόρφωση χρησιμοποιείται τόσο υψηλότερος πρέπει να είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη για να μπορεί να διατηρηθεί ο ρυθμός εσφαλμένων bit (BER) σε ανεκτά επίπεδα. Κατά την διάρκεια έντονων καιρικών φαινομένων, η επιπρόσθετη εξασθένηση εξαιτίας βροχής μειώνει τον λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο στον δέκτη με αποτέλεσμα μία χαμηλότερης τάξης διαμόρφωση όπως η QPSK να χρειάζεται ώστε να διατηρηθεί η διαθεσιμότητα της σύνδεσης στα επίπεδα που προδιαγράφονται από την ποιότητα υπηρεσιών (QoS) του δικτύου.

Για τον καθορισμό της απόδοσης κάθε σύνδεσης του δικτύου απαιτείται πρώτα να υπολογιστεί η πιθανότητα αποκοπής ή υπέρβασης για μία τυχαία σύνδεση συναρτήσει της πιθανότητας λάθος ανίχνευσης σφάλματος στην μεταδιδόμενη πληροφορία. Η πιθανότητα υπέρβασης τότε θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{out,j} = P(BEP_j > BEP_{th}) \quad (5.59)$$

Το  $P_{out,j}$  αναφέρεται στην πιθανότητα το  $BEP$  στον αποκωδικοποιητή του δέκτη να υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου  $BEP_{th}$  η οποία έχει καθοριστεί από τις απαιτήσεις των υπηρεσιών που παρέχει το δίκτυο. Το  $BEP$  σχετίζεται με την τιμή του λόγου  $(E_b/N)$  στην έξοδο του αποκωδικοποιητή του δέκτη το οποίο με την σειρά του εξαρτάται από τον τύπο της ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Αν η επίδραση της απόσβεσης εξαιτίας βροχής  $A_j$  που προστίθεται κατά μήκος της σύνδεσης  $j$  του ασύρματου δικτύου κορμού ενσωματωθεί στο μοντέλο, τότε η πιθανότητα υπέρβασης θα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} P_{out,j} &= P \left[ BEP \left\{ \left( \frac{E_b}{N} \right)_{cs} - A_j \right\} > BEP_{th} \right] = \\ &= P \left[ A_j > \left( \frac{E_b}{N} \right)_{cs} - \left( \frac{E_b}{N} \right)_{th} \right] \end{aligned} \quad (5.60)$$

Η παραπάνω σχέση καταλήγει στις κατανομές της απόσβεσης της βροχής που μελετήθηκαν σε προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου με την μόνη διαφορά ότι αντί για συνθήκη βάσει του σηματοθορυβικού λόγου στον δέκτη έχουμε συνθήκη βάσει του λόγου ενέργειας προς θόρυβο ανά bit  $(E_b/N)$ . Επομένως, για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης ή αποκοπής της σύνδεσης βάσει του  $BEP$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις προτεινόμενες κατανομές ώστε τα αποτελέσματα να έχουν παγκόσμια εμβέλεια. Επιπλέον, στην παραπάνω σχέση ως  $(E_b/N)_{cs}$  είναι ο λόγος ενέργειας προς θόρυβο ανά bit στην είσοδο του αποκωδικοποιητή του δέκτη για συνθήκες καθαρού ουρανού, δηλαδή ελλείψει αποσβέσεων εξαιτίας βροχής. Η τιμή αυτού του λόγου εξαρτάται από την εκπεμπόμενη ισχύ προς τον δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη της απώλειες ελευθέρου χώρου, τα κέρδη κεραιών και τα επίπεδα θορύβου της σύνδεσης. Η τιμή, επομένως, του  $(E_b/N)_{cs}$  σε (dB) σχετίζεται άμεσα με την τιμή του σηματοθορυβικού λόγου για



συνθήκες διάδοσης καθαρού ουρανού  $SNR_{cs}$  που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, ενώ η μεταξύ τους σχέση προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$\left(\frac{E_b}{N}\right)_{cs} = SNR_{cs} - 10 \log\left(\frac{R_b}{B}\right) \quad (5.61)$$

Στην σχέση αυτή  $R_b$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης bit σε μονάδες σύμβολα ανά δευτερόλεπτα (symbols/sec) και  $B$  είναι το εύρος του καναλιού σε (Hz). Για τις ψηφιακές διαμορφώσεις M-PSK, ASK και QAM ο λόγος της φασματικής απόδοσης ( $R_b/B$ ) είναι συνήθως ελάχιστα μεγαλύτερος από την μονάδα, ενώ για υψηλότερης τάξης QAM διαμορφώσεις ο λόγος φασματικής απόδοσης ( $R_b/B$ ) είναι αρκετά μεγαλύτερος από την μονάδα. Τέλος, η τιμή του  $(E_b/N)_{th}$  προσδιορίζεται από το αντίστοιχο  $BEP_{th}$  μέσω της συνάρτησης υπολογισμού του  $BEP$  ανάλογα με την διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Η συνάρτηση αυτή είναι χαρακτηριστική της κάθε ψηφιακή διαμόρφωσης. Στα πλαίσια αυτής της ενότητας γίνεται χρήση των ψηφιακών διαμορφώσεων QPSK, 16 QAM, 32 QAM και 64 QAM που κρίνονται ως οι καταλληλότερες για την συγκεκριμένη εφαρμογή, αλλά αυτό δεν είναι περιοριστικό καθώς η μεθοδολογία ισχύει για όλες τις ψηφιακές διαμορφώσεις. Αναφορικά με τις διαμορφώσεις που θα χρησιμοποιηθούν ο υπολογισμός της πιθανότητας ανίχνευσης εσφαλμένου bit ( $BEP$ ) θα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις [Gol05]:

$$P_b \approx Q(\sqrt{2\gamma_b}) \quad , \text{ για QPSK} \quad (5.62)$$

και:

$$P_b \approx \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3\gamma_b \log_2 M}{(M-1)}}\right) \quad , \text{ για M-QAM} \quad (5.63)$$

Όπου  $\gamma_b = E_b/N$  σε γραμμική κλίμακα,  $M$  είναι η τάξη της διαμόρφωσης και  $Q(x)$  είναι η συνάρτηση Q που ισούται με:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (5.64)$$

Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι η QPSK διαμόρφωση είναι ισοδύναμη με την 4 QAM.

Από την παραπάνω ανάλυση, μπορεί να προκύψει η πιθανότητα αποκοπής μιας σύνδεσης από την (5.60) αλλά αντίστοιχα και του αθροιστικού χρόνου σε ετήσια βάση κατά τον οποίο η συγκεκριμένη σύνδεση παύει να λειτουργεί. Ο ετήσιος χρόνος αποκοπής της σύνδεσης θα υπολογίζεται σε λεπτά ανά χρόνο από τον τύπο:

$$T_{out} = 525,600 \cdot P(BEP_j > BEP_{th}) \quad (5.65)$$

### 5.9.2 Αριθμητικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Ακολουθώντας την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, προέκυψαν κάποια πολύ χρήσιμα αποτελέσματα για την αξιολόγηση της απόδοσης και της διαθεσιμότητας των ασύρματων συνδέσεων των δικτύων κορμού. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν βασίζονται στα χαρακτηριστικά του δικτύου και την μοντελοποίηση του καναλιού που παρουσιάστηκε στις ενότητες (§5.4)- (§5.6) τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας του δικτύου. Θεωρούμε επίσης ότι υπάρχει πλήρης αντιστοιχία μεταξύ των μεγεθών  $SNR_{cs}$ ,  $SNR_{th}$  με τα αντίστοιχα  $(E_b/N)_{cs}$  και  $(E_b/N)_{th}$ .

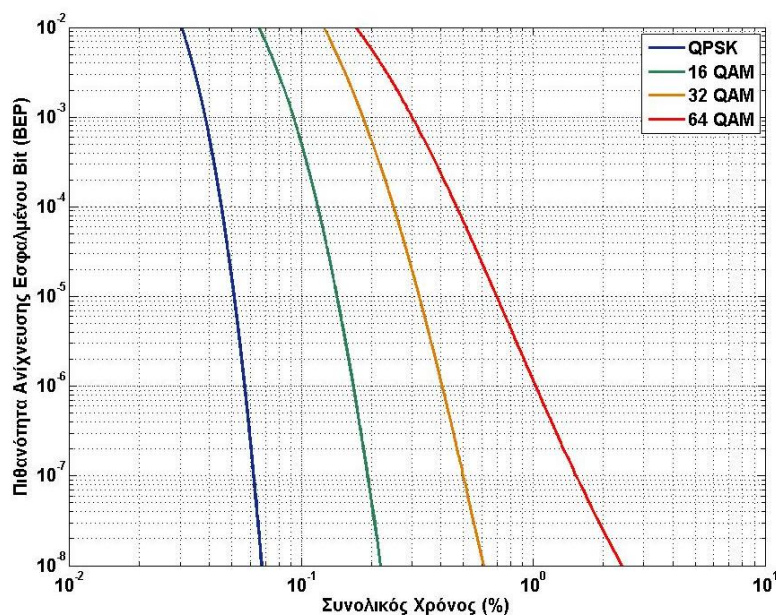
Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέκυψαν θεωρώντας, χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα των συμπερασμάτων, ότι οι εξασθενήσεις εξαιτίας βροχής προσεγγίζονται στατιστικά από την Weibull κατανομή. Επομένως, η πιθανότητα αποκοπής της τυχαίας σύνδεσης  $j$  του δικτύου, όπως περιγράφεται από την (5.60) θα προκύπτει από την σχέση:

$$P_{out,j} = \exp \left\{ -w_{A_j} \left[ \left( \frac{E_b}{N} \right)_{cs} - \left( \frac{E_b}{N} \right)_{th} \right]^{m_{A_j}} \right\}, \quad \text{για } \left( \frac{E_b}{N} \right)_{cs} > \left( \frac{E_b}{N} \right)_{th} \quad (5.66)$$

Ο υπολογισμός του  $(E_b/N)_{cs}$  προκύπτει μέσω της (5.61) ενώ ο υπολογισμός του  $(E_b/N)_{th}$  σε (dB) για δεδομένο  $BEP_{th}$  υπολογίζεται λύνοντας αντίστροφα την (5.63) και καταλήγοντας στον τύπο:

$$\left( \frac{E_b}{N} \right)_{th} = 20 \log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{2(M-1)}{3 \log_2 M}} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{\sqrt{M} \log_2 M}{2(\sqrt{M}-1)} \cdot BEP_{th} \right) \right\} \quad (5.67)$$

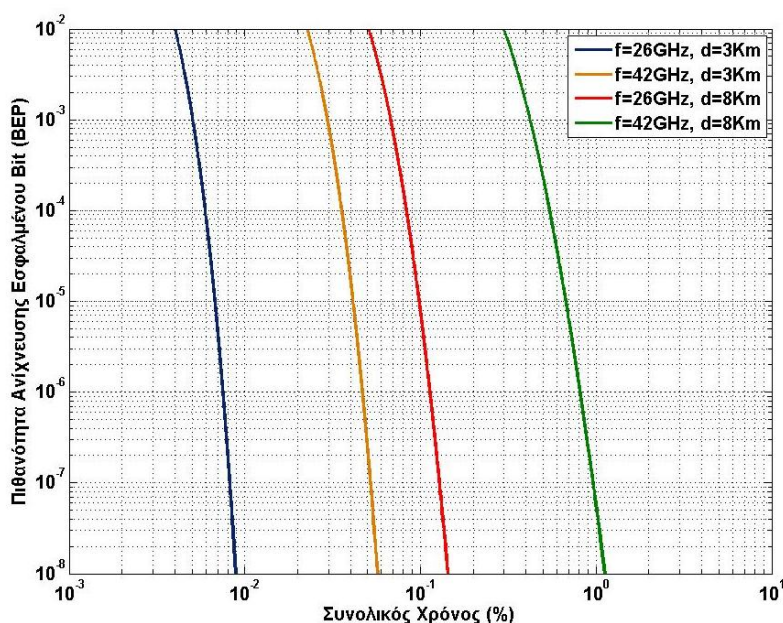
Η επιλογή της συγκεκριμένης κατανομής έγινε εξαιτίας της δυνατότητά της να προσεγγίζει εξίσου καλά τις αποσβέσεις βροχής τόσο για περιοχές με χαμηλούς ρυθμούς έντασης βροχοπτώσεων όσο και για περιοχές με υψηλότερους ρυθμούς βροχοπτώσεων. Οι παράμετροι κάθε σύνδεσης είναι ίδιοι, όπως προαναφέραμε, με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα του κεφαλαίου και είναι:  $G_{t,j} = G_{r,j} = 27.5dBi$  και  $N = -60dBm$ . Ενώ, τέλος θεωρούμε ότι  $BEP_{th} = 10^{-8}$ .



Σχήμα 5.13: Η πιθανότητα ανίχνευσης εσφαλμένου bit ( $BEP$ ) συναρτήσει του συνολικού χρόνου διαθεσιμότητας της σύνδεσης για διαφορετικές διαμορφώσεις με εκπεμπόμενη ισχύς 50dBm, 42GHz συχνότητα λειτουργίας και μήκος σύνδεσης 4Km στην περιοχή της Αθήνας.

Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της πιθανότητας ανίχνευσης εσφαλμένου bit ( $BEP$ ) στον δέκτη συναρτήσει του χρόνου διαθεσιμότητας της σύνδεσης για διαφορετικές ψηφιακές διαμορφώσεις. Η συχνότητα λειτουργίας έχει οριστεί στα 42GHz, η εκπεμπόμενη ισχύς στα 50dBm και το μήκος της σύνδεσης στα 4Km, ενώ έχουν θεωρηθεί οι στατιστικοί παράμετροι της απόσβεσης βροχής για την περιοχή της Αθήνας. Στο σχήμα φαίνεται η ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά της QPSK ενώ η πιθανότητα ανίχνευση εσφαλμένου bit αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η τάξη της QAM διαμόρφωσης. Επομένως, η αύξηση της ρυθμαπόδοσης (throughput) και της χωρητικότητας της σύνδεσης χρησιμοποιώντας υψηλής τάξεως διαμορφώσεις οδηγεί σε αύξηση της πιθανότητας ανίχνευσης σφάλματος κατά την λήψη ή αντίστοιχα σε μείωση της διαθεσιμότητας της σύνδεσης ώστε να επιτευχθούν οι

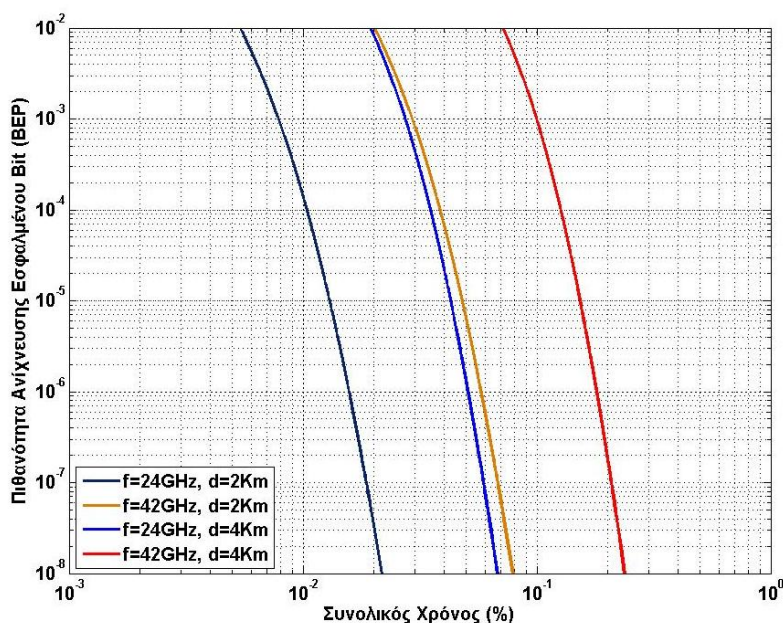
προδιαγραφές ποιότητας του δικτύου. Τέλος, το σχήμα 5.13, αποτελεί απόδειξη της ανάγκης χρήσης ενός μηχανισμού προσαρμογής της διαμόρφωσης ώστε να διατηρείται η ποιότητα και η διαθεσιμότητα των συνδέσεων του δικτύου σταθερή καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε αυξάνοντας την τάξη της διαμόρφωσης στις χρονικές περιόδους όπου επικρατούν καλά καιρικά φαινόμενα με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας της σύνδεσης είτε μειώνοντας αντίστοιχα την τάξη της διαμόρφωσης στις χρονικές περιόδους έντονων καιρικών φαινομένων με απώτερο στόχο να διατηρηθεί η σύνδεση διαθέσιμη.



Σχήμα 5.14: Η πιθανότητα ανίχνευσης εσφαλμένου bit (*BEP*) συναρτήσει του συνολικού χρόνου διαθεσιμότητας της σύνδεσης για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και μήκη σύνδεσης με εκπεμπόμενη ισχύς 33dBm και QPSK διαμόρφωση στην περιοχή της Αθήνας.

Στα σχήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της πιθανότητας ανίχνευσης εσφαλμένου bit (*BEP*) στον δέκτη συναρτήσει του χρόνου διαθεσιμότητας της σύνδεσης για διαφορετικές τιμές της συχνότητας και για διαφορετικά μήκη σύνδεσης στην περιοχή της Αθήνας. Στο σχήμα 5.14 θεωρείται QPSK διαμόρφωση και εκπεμπόμενη ισχύς 33dBm ενώ στο σχήμα 5.15 θεωρείται 16 QAM διαμόρφωση και εκπεμπόμενη ισχύς 45dBm. Είναι φανερό ότι καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας και το μήκος της σύνδεσης τότε αυξάνεται η πιθανότητα ανίχνευσης εσφαλμένου bit ενώ αντίστοιχα μειώνεται η διαθεσιμότητα για συγκεκριμένη τιμή (*BEP*). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας αλλά και η αύξηση του μήκους μίας σύνδεσης οδηγεί σε

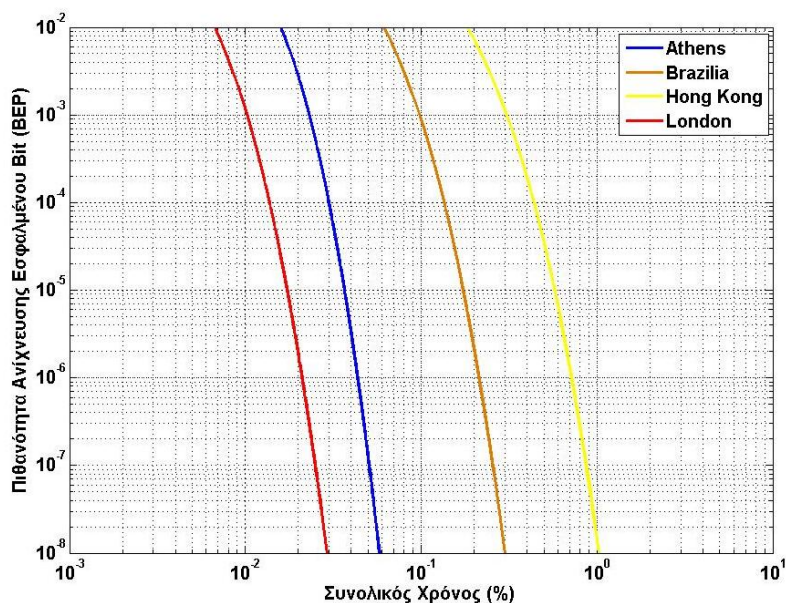
υψηλότερες εξασθενήσεις εξαιτίας βροχής και κατά συνέπεια σε περαιτέρω υποβάθμιση της σύνδεσης. Το γεγονός αυτό μεταφράζεται σε μειωμένη αξιοπιστία στις μεταδόσεις (μεγαλύτερες τιμές *BEP*) και μειωμένη διαθεσιμότητα.



Σχήμα 5.15: Η πιθανότητα ανίχνευσης εσφαλμένου bit (*BEP*) συναρτήσει του συνολικού χρόνου διαθεσιμότητας της σύνδεσης για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και μήκη σύνδεσης με εκπεμπόμενη ισχύς 33dBm και 16 QAM διαμόρφωση στην περιοχή της Αθήνας.

Τέλος στο σχήμα 5.16 παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα για πόλεις που αναφέρονται σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται στο διάγραμμα δύο πόλεις με εύκρατο κλίμα όπως η Αθήνα και το Λονδίνο όπου εμφανίζονται σχετικά χαμηλοί ρυθμοί έντασης βροχοπτώσεων και δύο πόλεις με υποτροπικό/τροπικό κλίμα όπως η Μπραζιλία και το Χονγκ Κονγκ όπου εμφανίζονται σχετικά υψηλοί ρυθμοί έντασης βροχοπτώσεων. Η συχνότητα λειτουργίας έχει οριστεί στα 42GHz, η εκπεμπόμενη ισχύς στα 45dBm, το μήκος σύνδεσης στα 2Km ενώ θεωρήθηκε 16 QAM διαμόρφωση. Είναι εμφανές πόσο έντονα επηρεάζεται η πιθανότητα ανίχνευσης εσφαλμένου bit από την ύπαρξη έντονων καιρικών φαινομένων στις περιοχές που είναι εγκατεστημένο και λειτουργεί το ασύρματο δίκτυο, καθώς η χειρότερη επίδοση εμφανίζεται για την περιοχή με τα πιο έντονα καιρικά φαινόμενα που είναι το Χονγκ Κονγκ. Το συμπέρασμα αυτό πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη κατά τον σχεδιασμό ασύρματων δικτύων κορμού σε περιοχές με έντονα καιρικά φαινόμενα.

Κλείνοντας με τα αριθμητικά αποτελέσματα αξίζει να σημειωθεί ότι οι ιδιαίτερα υψηλές τιμές της εκπεμπόμενης ισχύς, που εμφανίζονται σε αρκετά αποτελέσματα του κεφαλαίου, μπορούν να αντισταθμιστούν από ισοδύναμα κέρδη κεραιών. Μάλιστα οι τιμές αυτές οφείλονται εν μέρει στην χρήση κοινών κερδών κεραιών για την λήψη των αποτελεσμάτων, κέρδη που αντιστοιχούν πολλές φορές σε συχνότητες λειτουργίας χαμηλότερες των θεωρούμενων.



Σχήμα 5.16: Η πιθανότητα ανίχνευσης εσφαλμένου bit (*BEP*) συναρτήσει του συνολικού χρόνου διαθεσιμότητας της σύνδεσης για διαφορετικές κλιματικές περιοχές με εκπεμπόμενη ισχύς 45dBm, 42GHz συχνότητα λειτουργίας για μήκος σύνδεσης 2Km και 16 QAM διαμόρφωση.

## 5.10 Συμπεράσματα

Τα φυσικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση σημάτων σε μικροκυματικές και χιλιοστομετρικές συχνότητες προκαλούν μεγάλες εξασθενήσεις στις συνδέσεις ασύρματων δικτύων και επηρεάζουν σημαντικά την τοπολογία και την συνδεσιμότητα τους. Σε υψηλές συχνότητες, και συγκεκριμένα στην ζώνη συχνοτήτων 10-50GHz, που αναμένεται να λειτουργήσουν τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα κορμού η συνδεσιμότητα και η απόδοση τους επηρεάζεται σημαντικά από τις αποσβέσεις εξαιτίας του φαινομένου των διαλείψεων βροχής. Ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας και τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής που λειτουργεί το δίκτυο η υποβάθμιση της λειτουργίας του μπορεί να είναι πολύ έντονη κυρίως τις χρονικές στιγμές που εμφανίζονται έντονα καιρικά φαινόμενα. Τα τρία μοντέλα που

παρουσιάστηκαν και έχουν παγκόσμια εμβέλεια οδήγησαν στα εξής βασικά συμπεράσματα ότι πρώτον η συνδεσιμότητα και η απόδοση του δικτύου επηρεάζονται σε πάρα πολύ μεγάλο βαθμό από τις εξασθενήσεις βροχής και δεύτερον ότι όσο εντονότερα είναι τα καιρικά φαινόμενα και όσο υψηλότερη η συχνότητα που χρησιμοποιείται τόσο εντονότερη είναι η επίδραση των αποσβέσεων βροχής στο δίκτυο με αποτέλεσμα ακόμα και την πλήρη απώλεια της συνδεσιμότητας.

Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν και από την ανάλυση των επιδόσεων BER. Παράλληλα, κρίνεται αναγκαία η χρήση τεχνικών προσαρμοστικής διαμόρφωσης ώστε να αυξάνεται η χωρητικότητα και η ρυθμαπόδοση του δικτύου όταν είναι εφικτό με χρήση διαμορφώσεων υψηλής τάξης και να διατηρείται η συνδεσιμότητα και αξιοπιστία του δικτύου μεταπίπτοντας σε διαμορφώσεις χαμηλότερης τάξης κατά τις περιόδους έντονων καιρικών φαινομένων.

Η κρίσιμη πυκνότητα κόμβων που απαιτείται για να παραμείνει το δίκτυο συνδεδεμένο εξαρτάται αντίστοιχα από τα συμπεράσματα που προαναφέραμε ενώ ο υπολογισμός της αποτελεί μια πρακτική λύση για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ασυρμάτων δικτύων που θα διατηρούν την συνδεσιμότητα και την απόδοση τους σε υψηλά επίπεδα. Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα για την υλοποίηση των σύγχρονων ασύρματων δικτύων κορμού είναι το γεγονός ότι η χρήση διπλής πόλωσης στις συνδέσεις του δικτύου μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου (διπλασιασμός) χειροτερεύοντας ελάχιστα την συνδεσιμότητα του ακόμα και υπό συνθήκες υψηλών εξασθενήσεων βροχής.

Τέλος, το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε παγκόσμια κλίμακα καθώς περιλαμβάνει στον υπολογισμό της συνδεσιμότητας ακριβώς τις τοπικές κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής και τον αντίκτυπο των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων ενός ασύρματου δικτύου κορμού. Ενώ, ως εργαλείο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την διαστασιολόγηση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων κορμού.





## Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα και προοπτικές για μελλοντική έρευνα

### 6.1 Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μοντέλων συνδεσιμότητας και η αξιολόγηση της επίδοσης τους σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς. Τα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς θα ενσωματώνουν πρωτοποριακά χαρακτηριστικά όπως η χρήση πολλαπλών βημάτων για την μετάδοση της πληροφορίας, η δυνατότητα αυτοοργάνωσης των κόμβων τους και η αποκεντρωμένη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων τους. Για να γίνουν όλα αυτά εφικτά απαιτείται αρχικά η εμφάνιση ενός ελάχιστου βαθμού συνδεσιμότητας εντός του δικτύου. Η ύπαρξη συνδεσιμότητας στο φυσικό επίπεδο του δικτύου είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για την λειτουργία όλων των υπόλοιπων επιπέδων οργάνωσης και λειτουργίας του ασύρματου δικτύου.

Η έλλειψη κεντρικού διαχειριστή λόγω της αποκεντρωμένης δομής αυτών των δικτύων και η δυνατότητα αυτοοργάνωσης των κόμβων αποτελούν τους δύο βασικούς παράγοντες για τους οποίους το ζήτημα της συνδεσιμότητας αποκτά τόσο μεγάλο ενδιαφέρον. Στα δίκτυα που δεν βασίζονται στην πολυβηματική αρχιτεκτονική, όπως τα κυψελωτά και τοπικά ασύρματα δίκτυα, η ύπαρξη κεντρικού διαχειριστή δίνει την δυνατότητα παραμετροποίησης και οργάνωσης του δικτύου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αναγκαία συνδεσιμότητα και να βελτιστοποιείται η απόδοση του δικτύου. Στα μελλοντικά όμως ασύρματα δίκτυα, που δεν θα υπάρχει κεντρικός διαχειριστής να επεμβαίνει δυναμικά στην ρύθμιση των κόμβων του δικτύου ώστε να παραμένει συνδεδεμένο, απαιτείται η ανάπτυξη μέτρων αξιολόγησης της συνδεσιμότητας που θα ενσωματώνονται στα πρωτόκολλα επικοινωνίας ώστε κάθε ανεξάρτητος κόμβος του δικτύου να οργανώνει την λειτουργία του με στόχο την εμφάνιση πλήρους συνδεσιμότητας στο δίκτυο που το περιλαμβάνει.

Σε πρώτη φάση όταν ένας σημαντικός αριθμός κόμβων συγκεντρωθεί σε μία περιοχή, η διαδοχική ανάπτυξη συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ κάθε κόμβου και

μερικών γειτονικών του οδηγεί σε μία συνδεδεμένη οντότητα που μπορεί να αποτελέσει την βάση ενός ασύρματου δικτύου. Κατόπιν, η επίτευξη συνδεσιμότητας στο φυσικό επίπεδο του δικτύου επιτρέπει την εφαρμογή αλγορίθμων και την αξιοποίηση πρωτοκόλλων σε ανώτερα επίπεδα της διαστρωμάτωσης του δικτύου με απώτερο σκοπό την διατήρηση ή ακόμα και αύξηση της συνδεσιμότητας του δικτύου, την βελτίωση της αξιοπιστίας του και της ανοχής του δικτύου σε πιθανές απώλειες κόμβων ή συνδέσεων, την βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του και τέλος την βελτιστοποίηση της απόδοσής του.

Επομένως, η θεωρητική μελέτη της συνδεσιμότητας, η ανάπτυξη μεθοδολογιών υπολογισμού της και η αξιολόγηση της για τα διάφορα περιβάλλοντα λειτουργίας των ασύρματων δικτύων αποτελούν μια αναγκαιότητα για την σωστή σχεδίαση και υλοποίηση των σύγχρονων δικτύων νέας γενιάς. Στα πλαίσια αυτά προτάθηκαν κάποιες βελτιώσεις στην υπάρχουσα μεθοδολογία για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας, αναπτύχθηκε από την αρχή ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας και διερευνήθηκαν τα όρια της συνδεσιμότητας για κανάλια διαλείψεων εξαιτίας σκίασης και για κανάλια διαλείψεων εξαιτίας βροχής.

Πιο συγκεκριμένα, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο προτείνονται αρκετές βελτιώσεις και τροποποιήσεις στην βασική μεθοδολογία για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας και αξιολογείται το προτεινόμενο μοντέλο για κανάλια διαλείψεων εξαιτίας σκίασης. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν όπως το γεγονός ότι η συνδεσιμότητα βελτιώνεται όσο ενισχύονται τα φαινόμενα διαλείψεων ενώ ιδιαίτερα καθοριστικός παράγοντας φαίνεται ότι είναι οι μέσες απώλειες διάδοσης. Σε αντίθεση με τις διαλείψεις που αποτελούν ένα τυχαίο στοχαστικό φαινόμενο η επίδραση των υπολοίπων παραγόντων μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί και να αντισταθμιστεί. Πέρα από τον αναλυτικό υπολογισμό της συνδεσιμότητας παρουσιάζεται αναλυτική λύση και για τον προσδιορισμό μίας κρίσιμης τιμής της πυκνότητας των κόμβων που απαιτείται για να μείνει το δίκτυο συνδεδεμένο. Το μέγεθος αυτό έχει ιδιαίτερα πρακτικό χαρακτήρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύκολη υλοποίηση τέτοιων δικτύων. Η ανάλυση βασίστηκε στη γενικότερη περίπτωση που αντιστοιχεί σε δίκτυα με τυχαία τοπολογία μία θεώρηση που αποτέλεσε την βάση για όλες τις μεθοδολογίες και αναλύσεις της διατριβής. Τα τελικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν εμφανίζονται και σε άλλες δημοσιευμένες εργασίες στην διεθνή βιβλιογραφία.

Ένα ζήτημα που προκύπτει σχεδόν πάντα μετά την αξιολόγηση ενός μεγέθους είναι η δυνατότητα βελτίωσης της επίδοσής του. Το γεγονός αυτό οδήγησε στον 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο να γίνει χρήση μεθόδων διαφορισμού στις συνδέσεις του δικτύου με απώτερο στόχο την αύξηση της συνδεσιμότητας. Η μεθοδολογία που προέκυψε είναι

γενική και ενσωματώνει στον υπολογισμό της συνδεσιμότητας δύο από τις βασικότερες τεχνικές διαφορικής λήψης που είναι αυτές του συνδυασμού με επιλογή και του συνδυασμού μεγίστου λοβού, ενώ είναι δυνατή η παραμετροποίηση για οποιαδήποτε άλλη τεχνική διαφορικής λήψης. Τα αποτελέσματα για περιβάλλοντα διάδοσης με ιδιαίτερα έντονες διαλείψεις σκίασης έδειξαν ότι η χρήση μεθόδων διαφορισμού αποτελούν μια αποδοτική λύση για την αύξηση της συνδεσιμότητας των ασυρμάτων δικτύων, ιδιαίτερα όταν λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες και σε περιβάλλοντα διάδοσης εσωτερικών χώρων.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφαλαίο αναπτύχθηκε από μηδενική βάση ένα νέο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας που βασίζεται στην θεωρία γράφων και τα συνδεδεμένα δένδρα. Η νέα μεθοδολογία προτείνει ως μέτρο αξιολόγησης της συνδεσιμότητας ενός τυχαίου δικτύου την πιθανότητα εμφάνισης ενός συνδεδεμένου συνδεδετικού δένδρου στο γράφο του δικτύου. Τα βασικά πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ότι λαμβάνονται ταυτόχρονα υπόψη για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας τόσο η χωρική κατανομή του δικτύου όσο και η στοχαστική συμπεριφορά του καναλιού διάδοσης των συνδέσεων. Το μοντέλο είναι γενικό και παραμετροποιείται εύκολα για οποιοδήποτε κανάλι διάλειψης ενώ ο υπολογισμός μπορεί να προκύψει είτε από θεωρητικές εκτιμήσεις είτε από πραγματικά δεδομένα και να χρησιμοποιηθεί τόσο κατά την σχεδίαση όσο ακόμα και κατά την λειτουργία των ασυρμάτων δικτύων νέας γενιάς. Το προτεινόμενο μέτρο αξιολόγησης αποδεικνύεται ότι αποτελεί ένα άνω όριο για τον πραγματικό υπολογισμό της πιθανότητας να είναι το δίκτυο συνδεδεμένο.

Η αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε για συσχετισμένα κανάλια διαλείψεων σκίασης και ένα από τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψε είναι ότι τα φαινόμενα διαλείψεων σκίασης εν τέλει μειώνουν την συνδεσιμότητα του δικτύου και δεν την ευνοούν, όπως είχαμε συμπεράνει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η διαφορά αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι για πρώτη φορά στον αναλυτικό υπολογισμό της συνδεσιμότητας λαμβάνονται υπόψη και οι διαθεσιμότητες των συνδέσεων του δικτύου ενώ αντίστοιχα αποτελέσματα και συμπεράσματα έχουν προκύψει στην βιβλιογραφία από εκτεταμένες προσομοιώσεις. Ένα επιπλέον σημαντικό συμπέρασμα είναι η μείωση της συνδεσιμότητας καθώς αυξάνει ο αριθμός των κόμβων ενός δικτύου. Για την μοντελοποίηση αυτής της ασυμπτωτικής συμπεριφοράς έχουν χρησιμοποιηθεί στην βιβλιογραφία αρκετές μεθοδολογίες.

Κατόπιν, το νέο μοντέλο παραμετροποιήθηκε για να ενσωματώσει και την δυνατότητα χρήσης τεχνικών διαφορισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση της συνδεσιμότητας υπό το καθεστώς χρησιμοποίησης τέτοιων τεχνικών, ενώ παρουσιάστηκαν και δύο νέα μετρικά μεγέθη που είναι το κέρδος συχνότητας και το κέρδος ισχύος. Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για τον ποσοτικό προσδιορισμό της

βελτίωσης της συνδεσιμότητας και το δεύτερο για να προσδιοριστεί η μείωση που μπορεί να προκύψει στην ισχύ εκπομπής από την χρήση τέτοιων τεχνικών. Τα τελικά αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά.

Τέλος, στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύχθηκε μεθοδολογία υπολογισμού της συνδεσιμότητας για τα σύγχρονα δίκτυα κορμού κυψελωτών συστημάτων. Τα δίκτυα αυτά εγκαθίστανται σε περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου και λειτουργούν στις ζώνες των μικροκυματικών και χιλιοστομετρικών συχνοτήτων (10-50GHz). Όπως αναμένεται, το προτεινόμενο μοντέλο υπολογισμού της συνδεσιμότητας λαμβάνει υπόψη τον κυριότερο στοχαστικό παράγοντα εξασθενήσεων για αυτές τις συχνότητες που είναι οι διαλείψεις εξαιτίας βροχής. Επειδή τα δίκτυα κορμού αναμένεται να λειτουργήσουν σε περιοχές που μπορεί να εμφανίζουν τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά βροχοπτώσεων, για την αξιολόγηση της συνδεσιμότητας ελήφθησαν υπόψη τρία διαφορετικά μοντέλα κατανομών για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων εξασθενήσεων εξαιτίας διαλείψεων βροχής. Οι κατανομές αυτές είναι η λογαριθμοκανονική για τις εύκρατες περιοχές, η γάμμα κατανομή για τις υποτροπικές και τροπικές περιοχές και η Weibull κατανομή που συμπεριφέρεται εξίσου καλά για τις περισσότερες περιοχές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση του ρυθμού βροχόπτωσης της κάθε περιοχής επηρεάζει σε πάρα πολύ μεγάλο βαθμό την συνδεσιμότητα του δικτύου και είναι κάτι που πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη κατά τον σχεδιασμό τέτοιων δικτύων. Ένα δίκτυο που είναι εγκατεστημένο σε μία εύκρατη περιοχή, π.χ. στην Αθήνα, μπορεί να παραμένει συνδεδεμένο για όλη την διάρκεια ενός έτους, ενώ το ίδιο δίκτυο εγκατεστημένο σε μία τροπική περιοχή, π.χ. στην Σιγκαπούρη, να αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα μειωμένης συνδεσιμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα του έτους. Σημαντικότερος παράγοντας αυτού του φαινομένου είναι η επιλεγμένη συχνότητα λειτουργίας των συνδέσεων του δικτύου η οποία πρέπει να επιλέγεται με βάση τα παραπάνω δεδομένα.

Η χρήση διπλά πολωμένων συνδέσεων εξετάστηκε επίσης για την αύξηση της ρυθμαπόδοσης του δικτύου χωρίς να φαίνεται ότι επιδράει ιδιαίτερα στην τελική συνδεσιμότητα του δικτύου ενώ τέλος προτάθηκε η τεχνική της προσαρμοστικής διαμόρφωσης (Adaptive Modulation) για την διατήρηση, όποτε κρίνεται αναγκαίο, της συνδεσιμότητας στα απαιτούμενα επίπεδα. Η τελευταία μάλιστα λύση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι δυνατή η βελτίωση της συνδεσιμότητας, εφόσον κρίνεται αναγκαίο, εις βάρος της ρυθμαπόδοσης του δικτύου αλλάζοντας την ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται αλλά και αντίστροφα όταν λόγω καλών καιρικών συνθηκών η αύξηση της απόδοσης των συνδέσεων δεν επηρεάζει σημαντικά την συνδεσιμότητα.

## 6.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Καθώς η εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων προχωράει θα προκύπτουν συνεχώς νέα ζητήματα στο αντικείμενο της συνδεσιμότητας. Παρότι, η συνδεσιμότητα δεν αποτελεί ένα σχετικά νέο αντικείμενο μελέτης ωστόσο συνεχίζει να απασχολεί σε σοβαρό βαθμό την ερευνητική κοινότητα καθώς αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για οποιοδήποτε δίκτυο. Η περαιτέρω θεωρητική μοντελοποίηση της συνδεσιμότητας καθώς και ο χαρακτηρισμός της ασυμπτωτικής συμπεριφοράς της σε δίκτυα με πολλούς χρήστες αναμένεται ότι θα συνεχίσει να απασχολεί μία μερίδα ερευνητών. Πέρα όμως από αυτά, πιστεύουμε ότι η μελλοντική έρευνα θα εντατικοποιηθεί και θα επεκταθεί σημαντικά προς τρεις κατευθύνσεις. Η πρώτη είναι η ανάπτυξη μοντέλων συνδεσιμότητας για δίκτυα με κινητούς κόμβους, η δεύτερη είναι η ανάπτυξη μοντέλων συνδεσιμότητας σε γνωστικά δίκτυα (cognitive networks) και η τρίτη κατεύθυνση είναι αυτή της ανάπτυξης θεωρητικών μοντέλων για τυχαία δίκτυα με ανομοιογενή χωρική κατανομή.

Τα ασύρματα δίκτυα που περιέχουν κινητούς κόμβους όπως τα κινητά ad hoc δίκτυα (MANETs) και τα δίκτυα οχημάτων (VANETs) αποτελούν μία πρόκληση για το αντικείμενο της συνδεσιμότητας καθώς η τοπολογία τους αλλάζει συνεχώς και επομένως η διατήρηση της συνδεσιμότητας αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Λόγω της σημασίας τους ως προς θέματα οδικής ασφάλειας θα αποτελέσουν σίγουρα ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα μελέτης τα επόμενα χρόνια. Η αναγκαιότητα που προκύπτει είναι αυτή της ανάπτυξης μοντέλων υπολογισμού της συνδεσιμότητας λαμβάνοντας υπόψη τα μοντέλα κινητικότητας που περιγράφουν αυτά τα δίκτυα. Η συνεχής αλλαγή της τοπολογίας τους επιβάλλει, ταυτόχρονα με την ορθή αξιολόγηση της συνδεσιμότητας, την ανάπτυξη αλγορίθμων και πρωτοκόλλων για την διατήρηση των συνδέσεων τους. Τα ζητήματα που εμφανίζονται είναι αρκετά πολύπλοκα και απαιτούν τόσο την θεωρητική επίλυση όσο και την πειραματική επιβεβαίωση της επίδοσής τους.

Μια κατηγορία ασυρμάτων δικτύων που απασχολεί ένα πολύ σημαντικό μέρος της παγκόσμιας έρευνας πάνω στα ασύρματα δίκτυα είναι τα γνωστικά δίκτυα. Ο λόγος που υπάρχει τόσο μεγάλο ενδιαφέρον έγκειται στην δυνατότητά τους να χρησιμοποιούν κενά του φάσματος που χρησιμοποιείται από διάφορες αδειοδοτημένες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και να εκπέμπουν σε αυτά. Τα ανοικτά προβλήματα σε αυτά τα δίκτυα είναι αρκετά και ένα από αυτά είναι η διατήρηση της συνδεσιμότητας τους καθώς η τοπολογία τους αλλάζει συνεχώς. Η αιτία που προκαλεί αυτή την συνεχή μεταβολή στην τοπολογία αυτών των δικτύων δεν είναι τόσο η κινητικότητα κάποιων κόμβων, αλλά το γεγονός ότι οι κόμβοι αυτών των δικτύων μπορούν να σχηματίζουν συνδέσεις μεταξύ τους μόνο όταν αντιληφθούν

ελεύθερο το κανάλι μετάδοσης. Η απόφαση αυτή είναι χαρακτηριστική για κάθε κόμβο του δικτύου και εξαρτάται σημαντικά από την θέση του σε σχέση με τους βασικούς χρήστες της συγκεκριμένης ζώνης συχνότητων. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη μοντέλων συνδεσιμότητας που θα λαμβάνουν υπόψη όλα αυτά τα χαρακτηριστικά των γνωστικών δικτύων.

Τέλος, παρόλο που οι πιο πολλές αναλύσεις και μεθοδολογίες αναφέρονται σε δίκτυα με τυχαία τοπολογία αλλά με ομογενή χωρική κατανομή τίθεται και το ζήτημα διερεύνησης τοπολογιών που εμφανίζουν χωρική ανομοιογένεια. Το ζήτημα δεν είναι καθόλου απλό καθώς τα μαθηματικά εργαλεία για την μοντελοποίηση ανομοιογενών τυχαίων χωρικών κατανομών είναι ελάχιστα και η ένταξη τους σε γενικά μοντέλα δύσκολη. Η ανάπτυξη πάντως μοντέλων συνδεσιμότητας που θα αναφέρεται σε τυχαία δίκτυα και που θα λαμβάνει υπόψη της την χωρική ανομοιογένεια αυτών των δικτύων είναι ένα θέμα που αναμένεται να απασχολήσει στο μέλλον την ερευνητική κοινότητα.

## Παράρτημα Α

### Υπολογισμός ολοκληρώματος της υπό συνθήκης κατανομής

Στην ενότητα (§2.6.3) για τον υπολογισμό της υπό συνθήκης κατανομής  $f_{R|\gamma \geq \gamma_{th}}(r | \gamma(r) \geq \gamma_{th})$  αλλά και του μέσου αριθμού των γειτονικών κόμβων  $E(d)$  και την κατάληξη σε μία κλειστή τελική σχέση απαιτείται η αναλυτική λύση του ολοκληρώματος της ακόλουθης μορφής:

$$I = \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left( \ln \left( \frac{N\gamma_{th}}{P_t K} r^a \right) / \sqrt{2}\sigma \right) \cdot r^v dr \quad (\text{A.1})$$

Αρχικά, εκτελούμε την παρακάτω αντικατάσταση και αλλαγή μεταβλητής:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{P_t K}{N\gamma_{th}} \\ y &= \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \ln \left( \frac{r^a}{b} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} r &= b^{\frac{1}{a}} e^{\frac{\sqrt{2}\sigma y}{a}} \\ dr &= \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} b^{\frac{1}{a}} e^{\frac{\sqrt{2}\sigma y}{a}} dy \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Οπότε το ολοκλήρωμα  $I$  με αλλαγή και των ορίων ολοκλήρωσης παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$I = \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} b^{\frac{v+1}{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{erfc}(y) \cdot e^{\frac{(v+1)\sqrt{2}\sigma y}{a}} dy \quad (\text{A.3})$$

Το ολοκλήρωμα μπορεί να σπάσει σε δύο επιμέρους:

$$I = \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} b^{\frac{v+1}{a}} \left[ \underbrace{\int_{-\infty}^0 \operatorname{erfc}(y) \cdot e^{\frac{(v+1)\sqrt{2}\sigma y}{a}} dy}_{I_1} + \underbrace{\int_0^{\infty} \operatorname{erfc}(y) \cdot e^{\frac{(v+1)\sqrt{2}\sigma y}{a}} dy}_{I_2} \right] \quad (\text{A.4})$$

### Λύση ολοκληρώματος $I_1$

Γίνεται η αλλαγή μεταβλητής  $w = -y$  και η αντικατάσταση  $c = \frac{(\nu+1)\sqrt{2}\sigma}{a}$  οπότε:

$$I_1 = \int_{-\infty}^0 \operatorname{erfc}(y) \cdot e^{\frac{(\nu+1)\sqrt{2}\sigma y}{a}} dy = - \int_{+\infty}^0 \operatorname{erfc}(-w) e^{-cw} dw \quad (\text{A.5})$$

Από την σχέση (A.5) λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} I_1 &= - \int_{+\infty}^0 \operatorname{erfc}(-w) e^{-cw} dw = \int_0^{+\infty} (1 + \operatorname{erf}(w)) e^{-cw} dw \Rightarrow \\ I_1 &= \int_0^{+\infty} e^{-cw} dw + \int_0^{+\infty} \operatorname{erf}(w) e^{-cw} dw \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Είναι αποδεδειγμένο από [Nist10] ότι:

$$\int_0^{+\infty} e^{-at} \operatorname{erf}(bt) dt = \frac{1}{a} e^{\frac{a^2}{4b^2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{a}{2b}\right) \quad (\text{A.7})$$

Οπότε τελικά για  $a = c$  και  $b = 1$  έχουμε:

$$I_1 = - \frac{1}{c} e^{-cw} \Big|_0^{+\infty} + \frac{1}{c} e^{\frac{c^2}{4}} \operatorname{erfc}\left(\frac{c}{2}\right) = \frac{1}{c} \left( 1 + e^{\frac{c^2}{4}} \operatorname{erfc}\left(\frac{c}{2}\right) \right) \quad (\text{A.8})$$

### Λύση ολοκληρώματος $I_2$

Με παρόμοιο τρόπο με το ολοκλήρωμα  $I_1$  λύνεται και το  $I_2$  θέτοντας

$$c_1 = - \frac{(\nu+1)\sqrt{2}\sigma}{a} :$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_0^{+\infty} \operatorname{erfc}(y) \cdot e^{\frac{(\nu+1)\sqrt{2}\sigma y}{a}} dy = \int_0^{+\infty} (1 - \operatorname{erf}(y)) e^{-c_1 y} dy \Rightarrow \\ I_2 &= - \frac{1}{c_1} e^{-c_1 y} \Big|_0^{+\infty} - \frac{1}{c_1} e^{\frac{c_1^2}{4}} \operatorname{erfc}\left(\frac{c_1}{2}\right) = - \frac{1}{c_1} \left( 1 + e^{\frac{c_1^2}{4}} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{c_1}{2}\right) - 2 \right] \right) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$



Από τις σχέσεις (Α.8) και (Α.9) προκύπτει τελικά η λύση για το ζητούμενο ολοκλήρωμα που είναι:

$$I = \frac{\sqrt{2}\sigma}{a} b^{\frac{\nu+1}{a}} \left[ \frac{2}{c} e^{\frac{c^2}{4}} \right] = \frac{2}{\nu+1} \cdot b^{\frac{\nu+1}{a}} e^{\frac{((\nu+1)\sqrt{2}\sigma)^2}{4}} \quad (\text{A.10})$$



## Παράρτημα Β

### Διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή

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

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

Η παραπάνω διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή προκύπτει από τη διδιάστατη κανονική κατανομή [PP02]:

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

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \rho_n \\ \rho_n & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$D = \det[C] \quad (\text{B.4})$$

χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό:

$$u_j = (\ln A_j - \ln A_{m_j}) / S_{a_j} \quad (j=1,2) \quad (\text{B.5})$$

Οι παράμετροι  $A_{m_j}, S_{a_j}$  ( $j=1,2$ ) των τυχαίων μεταβλητών  $A_j$  ( $j=1,2$ ), καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho_n$  μεταξύ των κανονικών τυχαίων μεταβλητών  $u_j$  ( $j=1,2$ ) περιγράφονται στα αντίστοιχα κεφάλαια της διατριβής.

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 (B.1) 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 (B.5):

$$\begin{aligned} P(a_1 \leq A_1 \leq b_1, a_2 \leq A_2 \leq b_2) &= P(c_1 \leq u_1 \leq d_1, c_2 \leq u_2 \leq d_2) \\ &= \int_{c_2}^{d_2} \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1 u_2}(u_1, u_2) du_1 du_2 \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Bayes [PP02]:

$$f_{u_1 u_2}(u_1, u_2) = f_{u_2}(u_2) f_{u_1}(u_1 | u_2) = f_{u_1}(u_1) f_{u_2}(u_2 | u_1) \quad (\text{B.7})$$

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:

$$f_{u_1}(u_1 | u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_n^2)}} \exp\left[-\frac{(u_1 - \rho_n u_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right] \equiv N(\rho_n u_2, \sqrt{1-\rho_n^2}) \quad (\text{B.8})$$

$$f_{u_2}(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right) \equiv N(0,1) \quad (\text{B.9})$$

με αντίστοιχες εκφράσεις και για τις  $f_{u_2}(u_2 | u_1)$  και  $f_{u_1}(u_1)$ , η πιθανότητα της εξίσωσης (B.6) υπολογίζεται από:

$$\begin{aligned}
 P(c_1 \leq u_1 \leq d_1, c_2 \leq u_2 \leq d_2) &= \int_{c_2}^{d_2} f_{u_2}(u_2) \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1}(u_1 | u_2) du_1 du_2 = \\
 &= \int_{c_2}^{d_2} f_{u_2}(u_2) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{c_1 - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{d_1 - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right] du_2 = \\
 &= \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1}(u_1) \int_{c_2}^{d_2} f_{u_2}(u_2 | u_1) du_2 du_1 = \\
 &= \int_{c_1}^{d_1} f_{u_1}(u_1) \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{c_2 - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{d_2 - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) \right] du_1
 \end{aligned} \tag{B.10}$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (B.10) υπολογίζεται με αριθμητικές μεθόδους ολοκλήρωσης. Στην διατριβή χρησιμοποιήθηκε η αριθμητική μέθοδος Gauss-Legendre υλοποιημένη σε πρόγραμμα MATLAB.



## Παράρτημα Γ

### Υπολογισμός παραμέτρων απωλειών βροχής

Οι τιμές  $a_H, a_V, b_H, b_V$  που περιγράφονται στο κεφάλαιο 5 είναι οι τιμές των παραμέτρων  $a, b$  για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα, που επίσης μπορούν να υπολογιστούν από τη σύσταση ITU-R P.838-3 από τους τύπους:

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

και:

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

Στις παραπάνω εξισώσεις  $a, b$  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 (Γ.1) και (Γ.2) για κάθε συνιστώσα δίνονται στη σύσταση [ITU-R P.838-3] από τους ακόλουθους πίνακες:

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.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 Γ.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 Γ.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 Γ.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		



## Δημοσιεύσεις

### Διεθνή Περιοδικά με κριτές:

- [Π1] **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “A Spanning-Tree-based Connectivity Model in Finite Wireless Networks and Performance under Correlated Shadowing,” *IEEE Commun. Lett.*, vol.16, no.6, pp.842-845, June 2012.
- [Π2] **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “Connectivity Evaluation and Error Performance of Millimeter Wave Wireless Backhaul Networks,” *Annals of Telecommunications Journal*, Vol. 65, Number 11-12, 795-802, Springer 2010.
- [Π3] **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “Multi-Hop Wireless Backhaul Networks above 10GHz: Connectivity and Critical Density Evaluation,” *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 31, Number 3, 329-340, Springer 2010.

### Διεθνή Συνέδρια:

- [Σ1] **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “Improving Connectivity in Indoor Millimeter Wave Wireless Networks using Diversity Reception,” in *Proc. IEEE EUCAP*, March 2012.
- [Σ2] **G. T. Pitsiladis**, A. Krokos, A.D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “Connectivity Calculation in Mobile Ad Hoc Networks: Realistic Performance Simulation,” in *Proc. IEEE WMCNT*, October 2011.
- [Σ3] **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “A Physical Analytical Model for the Connectivity Evaluation of Dual-Polarized Millimeter-Wave Multi-Hop Backhaul Networks,” in *Proc. IEEE EUCAP*, April 2011.
- [Σ4] D. E. Papanikolaou, N. E. Papanikolaou, **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “Spectrum Sensing in mm-Wave Cognitive Radio Networks under Rain Fading,” in *Proc. IEEE EUCAP*, April 2011.

- [Σ5] **G. T. Pitsiladis**, A. D. Panagopoulos and Ph. Constantinou, “Connectivity Evaluation in Millimeter Wave Wireless Multi-Hop Networks Above 10GHz,” in *Proc. IEEE EUCAP*, March 2009.

## Βιβλιογραφία

- [802.16a] IEEE 802.16, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems,” 2001.
- [802.16b] IEEE 802.16j-06/013r3, “Multi-Hop Relay System Evaluation Methodology,” February 2007.
- [AAM08] M. Abou El Saoud, H. Al-Zubaidy, and S. H. Mahmoud, “Connectivity model for wireless mesh networks,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 2889 - 2894, May 2008.
- [Abr65] M. Abramovitz and I. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York, 1965.
- [Ala98] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp.1451 - 1458, 1998.
- [ASC<sup>+</sup>02] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, Erdal Cayirci; “A Survey on Sensor Networks,” *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-114, August 2002.
- [Bar01] A. D. Barbour, “Topics in poisson approximation,” in *Stochastic Processes: Theory and Methods, Handbook of Statistics*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 2001.
- [BBF<sup>+</sup>03] L. Booth, J. Bruck, M. Franceschetti, and R. Meester, “Continuum percolation and the geometry of wireless networks,” *Ann. Appl. Prob.*, vol. 13, no. 2, pp. 722–731, 2003.
- [BFY04] J. Boyer, D. D. Falconer, and H. Yanikomeroglu, “Multihop diversity in wireless relaying channels,” *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 10, pp. 1820–1830, 2004.
- [Bet01] C. Bettstetter, “Mobility modeling in wireless networks: Categorization, smooth movement, and border effects,” *ACM Mobile Computing and Commun.*, Rev. 5(3) (2001) 55–67.

- [Bet02] C. Bettstetter, “On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network,” *Proc. ACM Intern. Symp. on Mobile Ad Hoc Netw. and Comp. (MobiHoc)*, Lausanne, Switzerland (June 2002).
- [BH05] C. Bettstetter, C. Hartmann, “Connectivity of Wireless Multihop Networks in a Shadow Fading Environment,” *Wireless Networks*, vol.11, pp.571-579, 2005.
- [Bol01] B. Bollobás, *Random Graphs*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [Bol98] B. Bollobás, *Modern Graph Theory*, Springer, 1998.
- [BW04] R. Bischoff and R. Wattenhofer, “Analyzing connectivity-based multi-hop ad-hoc positioning,” in *PERCOM '04*, page 165, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2004.
- [CBE09] M. Cheffena, L. Braten, and T. Ekman, “On the space-time variations of rain attenuation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 6, pp. 1771-1782, 2009.
- [CGB09] S. Chia, M. Gasparroni, P. Brick, “The next challenge for cellular networks: backhaul,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 54–66, Aug. 2009.
- [Cra96] R.K. Crane, *Electromagnetic Wave Propagation Through Rain*, New York, Wiley, 1996.
- [CR89] Y. C. Cheng and T.G. Robertazzi, “Critical connectivity phenomena in multi-hop radio models,” *IEEE Transaction Commun.*, 37 (7), 770-777, 1989.
- [Dar07] D. Dardari, “On the connected nodes position distribution in ad hoc wireless networks with statistical channel models,” in *Proc. IEEE International Conference of Communications (ICC)*, pp. 4741-4745, June 2007.
- [DBT05] O. Dousse, F. Baccelli and P. Thiran, “Impact of Interferences on Connectivity in Ad Hoc Networks,” *IEEE/ACM Trans. On Networking*, 13(2):425-436, April 2005.
- [DFM<sup>+</sup>06] O. Dousse, M. Franceschetti, N. Macris, R. Meester and P. Thiran, “Percolation in signal-to-interference-ratio connectivity graphs,” *Journal of Applied Probability*, Vol. 43, Nr. 2, 2006.
- [DFT06] O. Dousse, M. Franceschetti and P. Thiran, “On the throughput scaling of wireless relay networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*

- (*Joint special issue with IEEE/ACM Transactions on Networking*),  
Vol. 52, Nr. 6, pp. 2756-2761, 2006.
- [Die05] Diestel, R., *Graph Theory*, Springer-Verlag: Heidelberg, Germany, 2005.
- [DM02] M. Desai and D. Manjunath, “On the connectivity in finite ad hoc networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol 6., pp. 437-439, Oct. 2002.
- [DPC07] A. E. Drougas, A. D. Panagopoulos, P. G. Cottis, “Data Transmission over Rain-Faded Broadband Fixed Wireless Access Channels,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 3 pp. 871-876, Aug. 2007.
- [DT04] O. Dousse and P. Thiran, “Connectivity vs Capacity in Dense Ad Hoc Networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, Hong Kong, March 2004.
- [DVJ88] D. J. Daley and D. Vere-Jones, *An Introduction to the Theory of Point Processes*, Springer, 1988.
- [DTH02] O. Dousse, P. Thiran, and M. Hasler, “Connectivity in ad hoc and hybrid networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, New York, Jun. 2002, pp. 1079–1088.
- [ER60] P. Erdős and A. Rényi, On the evolution of random graphs. *Publ. Math. Inst. Hungar. Acad. Sci.* 5 (1960) 17–61.
- [Eric08a] Ericsson White Paper, “High-speed technologies for mobile backhaul”, Available at [http://www.ericsson.com/technology/whitepapers/broadband/high-speed\\_mobile\\_backhaul.shtml](http://www.ericsson.com/technology/whitepapers/broadband/high-speed_mobile_backhaul.shtml), October 2008.
- [Eric08b] Ericsson AB. Ericsson Review, “Mobile broadband backhaul: Addressing the challenge,” No.3, 2008.
- [FBC<sup>+</sup>05] M. Franceschetti, L. Booth, M. Cook, R. Meester, and J. Bruck, “Continuum percolation with unreliable and spread out connections,” *Journal of Statistical. Physics*, Vol. 118, Nos ¾, February 2005.
- [FCB04] M. Franceschetti, M. Cook, and J. Bruck, “A geometric theorem for network design,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 53, no. 4, pp. 483–489, 2004.
- [FDT<sup>+</sup>06] M. Franceschetti, O. Dousse, D. Tse, and P. Thiran, “On the throughput capacity of random wireless networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2756–2761, Jun. 2006.

- [FDT<sup>+</sup>07] M. Franceschetti, O. Dousse, D. Tse and P. Thiran, “Closing the gap in the capacity of wireless networks via percolation theory,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 53, Nr. 3, March 2007.
- [FHF02] B. Fong, G. Y. Hong and A. C. M. Fong “A modulation scheme for broadband wireless access in high capacity networks,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Volume 48, Issue 3, pp. 457-462, Aug. 2002.
- [FM06] M. Franceschetti and R. Meester, “Critical node lifetimes in random networks via the Chen-Stein method,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2831–2837, Jun. 2006.
- [FCC] Federal Communications Commission (FCC): [www.fcc.gov](http://www.fcc.gov).
- [FCC02] FCC, *First Report and Order*, FCC 02-48, Feb. 14, 2002.
- [FCC03] Allocations and Service Rules for 71-76GHz, 81-86GHz and 92-95GHz bands Available at: [http://wireless.fcc.gov/index?job=rules\\_and\\_regulations](http://wireless.fcc.gov/index?job=rules_and_regulations).
- [Fis07] R. Fisher, “60 GHz WPAN standardization within IEEE 802.15.3c,” in Proc. Int. Symp. Signals, Systems, Electronics, pp. 103–105, 2007.
- [GE06] A. Ghasemi and S. N. Esfahani, “Exact probability of connectivity in one dimensional ad hoc wireless networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 251–253, Apr. 2006.
- [Gil61] E. N. Gilbert, “Random plane networks,” *SIAM J.*, vol. 9, pp. 533–543, 1961.
- [GK00] P. Gupta and P.R. Kumar, “The capacity of wireless networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2), pp. 388-404, March 2000.
- [GK98] P. Gupta and P.R. Kumar, “Critical power for asymptotic connectivity,” in Proc. of IEEE CDC, Tamoa, USA, 1998.
- [Gol05] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Stanford University, 2005.
- [GR83] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, Orlando: Academic Press, 1983.
- [Gri99] G. R. Grimmett, *Percolation*. New York: Springer, 1999.
- [GT01] M. Grossglauser and D. Tse, “Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks,” in Proc. IEEE INFOCOM, Anchorage, AK, Apr. 2001, pp. 1360–1369.

- [GY04] J. L. Gross and J. Yellen, *Handbook of Graph Theory*, CRC Press, 2004.
- [GZD<sup>+</sup>06] H. Gupta, Z. Zhou, S. R. Das, and Q. Gu, “Connected sensor cover: Self-organization of sensor networks for efficient query execution,” *IEEE/ACM Transaction on Networking*, vol. 14, no. 1, pp. 55-67 February 2006.
- [HAB<sup>+</sup>09] M. Haenggi, J. G. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse, and M. Franceschetti, “Stochastic geometry and random graphs for the analysis and design of wireless networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1029–1046, Sep. 2009.
- [Hal88] P. Hall, *Introduction to the Theory of Coverage Processes*, New York, J. Wiley & Sons, 1988.
- [HBF02] G. Hendratoro, 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.
- [HHB<sup>+</sup>03] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. Abdelzaher, “Range-Free Localization Schemes for Large Scale Sensor Networks,” *Proc Ninth ACM Int’l Conf. MOBICOM*, pp. 81-95, Sept. 2003.
- [HM06] R. Hekmat and P. Van Mieghem, “Connectivity in Wireless Ad-hoc Networks with a Log-normal Radio Model,” *Mobile Networks and Applications*, Vol. 11, 351-360, 2006, Springer Science.
- [HWY02] L. Hanzo, C. H. Wong, and M. S. Yee, *Adaptive Wireless Transceivers*. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [Kin93] J. F. C. Kingman, *Poisson Processes*, Oxford University Press, 1993.
- [KIT10] D. Kaltakis, M. A. Imran, and C. Tzaras, “Information theoretic capacity of cellular multiple access channel with shadow fading,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 5, pp. 1468–1476, May 2010.
- [Kra88] J.D.Kraus, *Antennas*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1988.
- [KTK09] T.-H. Kim, D. Tipper and P. Krishnamurthy, “Connectivity and Critical Point Behavior in Mobile Ad Hoc and Sensor Networks,” *Proceedings of IEEE ISCC’09, July, 2009*.
- [KX04] P. R. Kumar and L. L. Xie, “A network information theory for wireless communications: Scaling laws and optimal operation,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 5, pp. 748–767, May 2004.

- [KZ03] F. Kuhn and A. Zollinger, “Ad-hoc networks beyond unit disk graphs,” in *Proc. of the ACM Workshop on Foundations of mobile computing*, 2003.
- [Lin75] S. H. Lin, “A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths,” *Bell Syst. Tech. Jour.* 54(6), pp. 1051-1083, 1975.
- [Lit09] S. Little, “Is microwave backhaul up to the 4G task?,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 67–74, Aug. 2009.
- [LH02] Y. Li and J. Huang, “Rain attenuation at millimeter wavelengths,” *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 23, no. 7, pp. 1119–1126, July 2002.
- [LHB<sup>+</sup>05] L. Li, J. Y. Halpern, P. Bahl, Y.-M. Wang, and R. Wattenhofer, “A cone-based distributed topology-control algorithm for wireless multihop networks,” *IEEE /ACM Transaction on Networking*, vol. 13, no.1, pp. 147-159, February 2005.
- [LP09] D. Lockie, Don Peck, “High-Data-Rate Millimeter-Wave Radios,” *IEEE Microwave Magazine*, Aug. 2009.
- [LT07] Q. Ling and Z. Tian, “Minimum Node Degree and k-Connectivity of a Wireless Multihop Network in Bounded Area,” *Proceedings of IEEE Globecom*, 2007.
- [LTW04] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocol and outage behavior,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [MA05] D. Miorandi and E. Altman, “Coverage and connectivity of ad hoc networks presence of channel randomness,” in *Proc IEEE INFOCOM, 24<sup>th</sup> Annual Joint Conference*, vol. 1, pp 491-502, 13-17 May 2005.
- [MA06] D. Miorandi and E. Altman, “Connectivity in one-dimensional ad hoc networks: A queuing theoretical approach,” *Wireless Netw.*, vol. 12, no. 6, pp. 573–587, 2006.
- [MAG08] D. Miorandi, E. Altman, and G. Alfano, “The impact of Channel Randomness on Coverage and Connectivity of Ad Hoc and Sensor Networks,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.7, No.3, March 2008.
- [MAH07] S. Mukherjee, D. Avidor, and K. Hartman, “Connectivity, power, and energy in a multihop cellular–packet system,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 818-836, Mar. 2007.



- [MH76] Morita K. and Higutti I., “Prediction methods of rain attenuation distributions of micro and millimeter waves,” *Rev. of ECL*, 24 (7-8), pp. 651-668, 1976.
- [Mou09] F. Moupfouma, “Electromagnetic waves attenuation due to rain: A prediction model for terrestrial or L.O.S SHF and EHF radio communication links,” *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 30, no. 6, pp. 623–633, June 2009.
- [MR96] R. Meester and R. Roy, *Continuum percolation*, Cambridge University Press, 1996
- [Nist10] F. Olver, D. Lozier, R. Boisvert, and C. Clark, *NIST Handbook of Mathematical Functions*, Cambridge University Press, 2010
- [OB03] J. Orriss and S. K. Barton, “Probability distributions for the number of radio transceivers which can communicate with one another,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 51, no. 4, pp. 676-681, Apr. 2003.
- [P.1057-1] ITU-R Recommendation P. 1057-1, “Probability distributions relevant to radiowave propagation modeling,” 2001.
- [P.1410-4] ITU-R Recommendation P.1410-4, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60GHz,” Geneva 2007.
- [P.530-13] ITU-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-site systems,” Rec. P.530-13, Geneva, 2009.
- [P.837-5] ITU-R Recommendation P. 837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling,” *Propagation in Non-Ionized Media*, Geneva, 2007.
- [P.838-3] ITU-R Recommendation P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” 2005.
- [PAK<sup>+</sup>02] A. D. Panagopoulos, P. D. M. Arapoglou, J. D. Kanellpoulos, and P. G. Cottis, “Long term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 7, pp. 2307–2313, Jul. 2002.
- [PAK<sup>+</sup>05] A. D. Panagopoulos, P. D. Arapoglou, J. Kanellopoulos and P. Cottis, “Long-term Rain Attenuation Probability and Site Diversity Gain Prediction Formulas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 7, pp. 2307-2313, July 2005.

- [PAK<sup>+</sup>07] 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*, vol. 56, Issue 1, Page(s):3-12, Jan. 2007.
- [Pen03] M. Penrose, *Random Geometric Graphs* (Oxford Studies in Probability, 5), 2003.
- [Pen97] M. D. Penrose, “The longest edge of the random minimal spanning tree,” *The Annals of Appl. Prob.*, vol. 7, no. 2, pp. 340–361, 1997.
- [PK02b] 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.
- [PK03a] A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Statistics of differential rain attenuation on converging terrestrial propagation paths,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 9, pp. 2514–2517, September 2003.
- [PK03b] 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, March 2003.
- [PP02] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, Boston, Mass, USA, 4<sup>th</sup> edition, 2002.
- [PPT89] T. K. Philips, S. S. Panwar, and A. N. Tantawi, “Connectivity properties of a packet radio network model,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, no. 5, pp. 1044–1047, Sep. 1989.
- [Rap96] T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, (Prentice Hall, 1996).
- [SA00] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communications Over Fading Channels*, Wiley, 2000.
- [SAZ07] S. R. Saunders, A. Aragón-Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, John Willey&Sons, Ltd, 2<sup>nd</sup> edition, 2007.
- [SB03] P. Santi and D. M. Blough, “The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 25–39, Jan.–Mar. 2003.

- [SCA05] P. Stuedi, O. Chinellato, G. Alonso, "Connectivity in the presence of Shadowing in 802.11 Ad Hoc Networks," *IEEE WCNC* 2005.
- [SKM95] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic Geometry and its Applications*. New York: Wiley, 1995.
- [SPZ07] K. Stamatiou, J. G. Proakis, and J. R. Zeidler, "Evaluation of MIMO techniques in frequency hopped-multi-access ad hoc networks," in *Proc., IEEE Globecom*, Washington, D.C., Nov. 2007.
- [SSP<sup>+</sup>09a] 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, 2009.
- [SSP<sup>+</sup>09b] 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 Journal on Wireless Communications and Networking*, Volume 2009, Article ID 707839, 7 pages, 2009.
- [SSP<sup>+</sup>10a] 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*, May 2010.
- [SSP<sup>+</sup>10b] 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," *IEEE Communications Letters*, 2010.
- [Stu01] G. L. Stuber, "*Principles of Mobile Communications*", Second ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [SYT10] S. Szyszkowicz, H. Yanikomeroglu, J. S. Thomson, "On the Feasibility of Wireless Shadowing Correlation Models," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no.9, Nov. 2010.
- [TV05] David Tse and Pramod Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.
- [Ver97] R. Verdone, "Outage Probability Analysis for Short Range Communication Systems at 60 GHz in ATT Urban Environments," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, Nov. 1997.
- [Verd97] R. Verdone, "Multi-Hop R-ALOHA for Inter-Vehicle Communications at Millimeter Waves," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, Nov. 1997.

- [XK04] F. Xue and P. R. Kumar, “The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks,” *Wireless Networks*, vol. 10, no. 2, pp. 169–181, Mar. 2004.
- [YAE<sup>+</sup>08] S. Yousefi, E. Altman, R. El-Azouzi and M. Fathy "Analytical model for connectivity in vehicular ad hoc networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 6, pp.3341 -3356 2008.
- [ZH08] H. Zhang and J. C. Hou, “On the critical total power for asymptotic k-connectivity in wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, April, 2008.
- [ZHK<sup>+</sup>04] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, and J. A. Stankovic, "Impact of radio irregularity on wireless sensor networks", *Proc. ACM Int. Conf. Mobile Systems, Applications, Services (MOBISYS)*, pp.125-138, 2004.
- [ZP94] M. Zorzi and S. Pupolin, “Outage probability in multiple access packet radio networks in the presence of fading,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 604–610, Aug. 1994.
- [ZSF<sup>+</sup>09] A. Zanella, M. Stramazzoti, F. Fabri, E. Salbaroli, D. Dardari and R. Verdone, “Comments on “Probability Distributions for the Number of Radio Transceivers which can communicate with One Another,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 57, no. 5, pp. 1287-1289, May 2009.

## Βιογραφικό σημείωμα

Ο Γεώργιος Τ. Πιτσιλαδής γεννήθηκε στις 04 Δεκεμβρίου 1982. Αποφοίτησε από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το 2006. Από τον Νοέμβριο του 2007 υπήρξε Υποψήφιος Διδάκτορας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και υποστήριξε τη Διδακτορική Διατριβή του τον Δεκέμβριο του 2012.

Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα αφορούν τα πεδία της ανάπτυξης μοντέλων συνδεσιμότητας και αξιολόγησης της επίδοσης τους σε ασύρματα δίκτυα, της σχεδίασης και αξιολόγησης σύγχρονων ασυρμάτων δικτύων, της μοντελοποίησης και του χαρακτηρισμού καναλιών διάδοσης και τέλος της σχεδίασης ασύρματων ζεύξεων σε κανάλια με διαλείψεις για την ανάλυση ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας έχει δημοσιεύσει 8 επιστημονικά άρθρα σε Διεθνή Περιοδικά με κριτές και Πρακτικά Διεθνών Συνεδρίων ενώ έχει αναλάβει κριτής σε Περιοδικά με κριτές και Πρακτικά Διεθνών Συνεδρίων. Είναι φοιτητικό μέλος της ΙΕΕΕ και μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής ασχολήθηκε παράλληλα με την πραγματοποίηση μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και την ανάπτυξη ενός πιλοτικού δικτύου 24ωρης παρακολούθησης των επιπέδων ακτινοβολίας σε επιλεγμένα σημεία σε όλη την Ελλάδα.

