



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ»**

**Επίδραση των καιρικών φαινομένων στις
μικροκυματικές ζεύξεις**

Χρυσοβαλάντου Χ. Χριστοπούλου

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Υπεύθυνος
Χαρίλαος Σανδαλίδης**

Λαμία, 2017



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ»
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΛΟΓΙΑ»**

**Επίδραση των καιρικών φαινομένων στις
μικροκυματικές ζεύξεις**

Χρυσοβαλάντου Χ. Χριστοπούλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επιβλέπων
Χαρίλαος Σανδαλίδης**

Λαμία, 2017

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο «Επίδραση των καιρικών φαινομένων στις μικροκυματικές ζεύξεις» αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η ΔΗΛΟΥΣΑ

Ημερομηνία

Υπογραφή

**Επίδραση των καιρικών φαινομένων
στις μικροκυματικές ζεύξεις**

Χρυσοβαλάντου Χ. Χριστοπούλου

Τριμελής Επιτροπή:

Χαρίλαος Σανδαλίδης, Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Ιωάννης Αναγνωστόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής

Αθανάσιος Κακαρούντας, Επίκουρος Καθηγητής

Επιστημονικός Σύμβουλος:

Χαρίλαος Σανδαλίδης, Επίκουρος Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Τεχνολογίες ασύρματων δικτύων	14
1.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μικροκύματα	14
1.3 Πολυαλματικά δίκτυα και καιρικά φαινόμενα	15
1.4 Διάρθρωση εργασίας	16
2. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	17
2.1 Τυπική δομή ασύρματου συστήματος	17
2.2 Απώλειες διαδρομής.....	18
2.2.1 Επίδραση σκίασης.....	20
2.2.2 Επίδραση πολυδιόδευσης	20
2.3 Σχήματα διαμόρφωσης και πιθανότητα σφάλματος.....	21
2.3.1 Σχήμα διαμόρφωσης ΟΟΚ.....	21
2.3.2 Σχήμα διαμόρφωσης <i>M</i> -PPM	22
2.4 Πολυαλματικά δίκτυα	23
3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ	25
3.1 Εισαγωγή	25
3.2 Επίδραση ομίχλης.....	26
3.3 Επίδραση βροχής	28
3.4 Επίδραση χιονιού.....	29
3.5 Υπολογισμός εξασθένισης	30
3.6 Προσδιορισμός ελάχιστης εμβέλειας	31
4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	33
4.1 Εισαγωγή	33
4.2 Σημειακές διεργασίες	33
4.2.1 Ομογενής διεργασία Poisson.....	34
4.2.2 Διωνυμική διεργασία σημείων.....	34
4.3 Περιγραφή δικτύου και πιθανότητα απομονωμένου κόμβου.....	35
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	38
5.1 Επίδραση του ρυθμού εκπομπής δεδομένων για διαμόρφωση ΟΟΚ.....	38
5.2 Επίδραση του ρυθμού εκπομπής δεδομένων για διαμόρφωση PPM.....	41

5.2.1 Διαμόρφωση 4-PPM.....	41
5.2.2 Διαμόρφωση 8-PPM.....	44
5.3 Επίδραση της ισχύος εκπομπής και της συχνότητας λειτουργίας	47
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ειδική εξασθένιση ομίχλης συναρτήσει της συχνότητας για διάφορες τιμές της ορατότητας	28
Σχήμα 2: Ειδική εξασθένιση χιονιού συναρτήσει της συχνότητας για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης	30
Σχήμα 3: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση ΟΟΚ, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης S.....	39
Σχήμα 4: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση ΟΟΚ, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης R.	40
Σχήμα 5: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση ΟΟΚ, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές της ορατότητας V.....	41
Σχήμα 6: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 4-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης S.....	42
Σχήμα 7: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 4-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης R.	43
Σχήμα 8: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 4-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές της ορατότητας V.....	44
Σχήμα 9: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 8-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης S.....	45
Σχήμα 10: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 8-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης R.	46
Σχήμα 11: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 8-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές της ορατότητας V.....	47
Σχήμα 12: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση ΟΟΚ, ρυθμό 100Mbps, για διάφορες τιμές (α) της ισχύος εκπομπής και (β) της συχνότητας λειτουργίας υπό την επίδραση χιονιού με $S=10\text{mm/hr}$	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μικροκύματα	15
Εικόνα 2: Δομή τυπικού ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος.....	17
Εικόνα 3: Ανάκλαση, σκέδαση και περίθλαση η/μ κυμάτων.	19
Εικόνα 4: Απώλειες μονοπατιού, σκίαση και πολυδιάσπαση συναρτήσει της απόστασης [1].	20
Εικόνα 5: Κυματομορφές εκπομπής OOK για (α) NRZ και (β) RZ ($\gamma=0.5$).....	22
Εικόνα 6: Κυματομορφές εκπομπής για (α) OOK και (β) 16-PPM	23
Εικόνα 7: Πολυαλματικό δίκτυο	24
Εικόνα 8: Εξασθένιση ανά μονάδα μήκους συναρτήσει της συχνότητας για τα βασικά συστατικά της ατμόσφαιρας [3].....	26
Εικόνα 9: Πρότυπα σημείων: τυχαίο (αριστερά), κανονικό (κέντρο), ομαδοποιημένο (δεξιά).....	33
Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική μικροκυματικού δικτύου.....	35

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων μοντέλου εξασθένισης της βροχής	29
Πίνακας 2: Παράμετροι μοντέλου συστήματος.....	38

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τεχνολογίες ασύρματων δικτύων

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία σε αντίθεση με την ενσύρματη δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιο καλώδιο αλλά το κανάλι επικοινωνίας πομπού – δέκτη είναι ο ελεύθερος χώρος ή το νερό.

Υπάρχει μια πληθώρα τεχνολογιών ασύρματων δικτύων όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ($3^{\text{ης}}/4^{\text{ης}}/5^{\text{ης}}$ γενιάς (3G/4G/5G)), τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN) και οι δορυφορικές επικοινωνίες. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν ένα ευρύ τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, είτε με αρχιτεκτονική σημείο προς σημείο (point-to-point) είτε με αρχιτεκτονική σημείο προς πολλά σημεία (point-to-multipoint).

Η αύξηση των ευρυζωνικών εφαρμογών, η υποστήριξη ολοένα και περισσότερων χρηστών και η επερχόμενη υποστήριξη συσκευών με δυνατότητες συνδεσιμότητας (Internet of Things – IoT) οδήγησε αναγκαστικά στην αύξηση της φέρουσας συχνότητας προκειμένου να αυξηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης επιφέροντας ωστόσο τη μείωση της εμβέλειας κάθε πομπού. Επομένως, απαιτείται η ανάπτυξη ζεύξεων πολύ υψηλής χωρητικότητας και μικρής εμβέλειας και τα μικροκύματα (microwaves) αποτελούν μια ιδανική ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για το σκοπό αυτό.

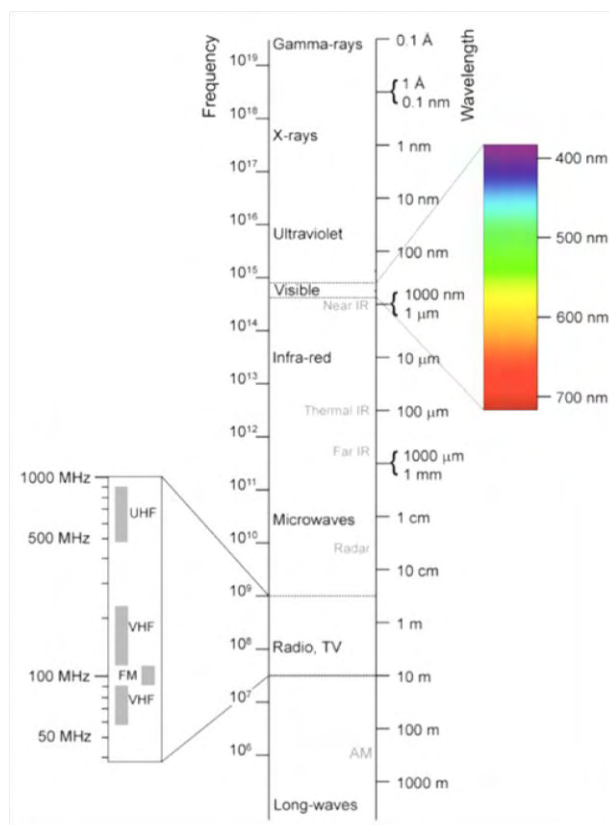
1.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μικροκύματα

Τα μικροκύματα είναι ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Εικόνα 1) και έχουν πλήθος εφαρμογών στις τηλεπικοινωνίες καθώς παράγονται από κεραίες. Τα μικροκύματα καλύπτουν την περιοχή συχνοτήτων από (0.3 – 300)GHz και χωρίζονται σε τρεις επιμέρους ζώνες:

- (α) στα δεκατομετρικά (Ultra High Frequency – UHF) που περιλαμβάνουν τη ζώνη 0.3 – 3GHz,
- (β) στα εκατοστομετρικά (Super High Frequency – SHF) που περιλαμβάνουν τη ζώνη 3 – 30GHz και
- (γ) στα χιλιοστομετρικά (Extremely High Frequency – EHF) που περιλαμβάνουν τη ζώνη 30 – 300GHz.

Σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων οι κεραίες έχουν σχετικά μικρές φυσικές διαστάσεις και μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγάλο ύψος από το έδαφος διευκολύνοντας έτσι την διάδοσή τους. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι σημαντικό και επιτρέπει τη υψίρρυθμη μετάδοση δεδομένων. Ωστόσο, η διάδοσή τους παρουσιάζει σημαντική εξασθένηση είτε από τις ανακλάσεις από το έδαφος και τα άλλα φυσικά ή τεχνητά αντικείμενα που παρεμβάλλονται, είτε από την περίθλαση από λόφους ή κτίρια είτε από την παρουσία

διάφορων καιρικών φαινομένων (ομίχλη, βροχή, χιόνι). Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστεί η ζώνη [1 – 100]GHz.



Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και μικροκύματα

1.3 Πολυαλματικά δίκτυα και καιρικά φαινόμενα

Η απευθείας ζεύξη δύο σημείων (ή διαφορετικά επικοινωνία με ζεύξη απλού άλματος) έχει το πλεονέκτημα της χαμηλής πολυπλοκότητας και της μικρής καθυστέρησης στη μεταφορά των δεδομένων ωστόσο παρουσιάζει και μια σειρά από σημαντικά μειονεκτήματα. Το πιο σημαντικό είναι η περιορισμένη εμβέλεια της ζεύξης λόγω της εξασθένησης που εισάγει το κανάλι διάδοσης. Η εξασθένηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω των διάφορων καιρικών φαινομένων καθώς στη ζώνη των μικροκυμάτων υπάρχουν διάφορες συχνότητες συντονισμών μορίων της ατμόσφαιρας όπως του νερού και του οξυγόνου.

Για το λόγο αυτό υιοθετείται η χρήση των πολυαλματικών ζεύξεων, δηλαδή η επικοινωνία δύο σημείων όχι απευθείας αλλά με χρήση ενδιάμεσων πομποδεκτών (ή αλλιώς κόμβων) που λειτουργούν ως αναμεταδότες που προωθούν την κίνηση.

Στην εργασία αυτή θα μελετηθεί η επίδραση των καιρικών φαινομένων και η εξασθένηση που εισάγουν σε ένα σειριακό πολυαλματικό δίκτυο που λειτουργεί στην περιοχή των μικροκυμάτων. Βασικό σημείο για τη μελέτη αυτή είναι η εύρεση κατάλληλων διεργασιών που να περιγράφουν την τοποθέτηση των κόμβων τους στο χώρο. Η στατιστική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στις διεργασίες αυτές επιτρέπει την εξαγωγή κατάλληλων μετρικών που θα χαρακτηρίσουν τη συνδεσιμότητα του δικτύου και θα συσχετίσουν τα χαρακτηριστικά της ζεύξης με την επίδραση των καιρικών φαινομένων.

1.4 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει την εξής διάρθρωση:

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η τυπική δομή ενός ασύρματου δικτύου και περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά δομικά του μέρη. Παρουσιάζονται οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης καθώς και οι απώλειες που επιφέρουν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα δυο βασικά σχήματα διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια και τέλος επισημαίνεται η λύση των πολυαλματικών ζεύξεων προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της εμβέλειας που εισάγονται από τις διάφορες αλλοιώσεις στο κανάλι διάδοσης.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα μοντέλα απωλειών λόγω της βροχής, της ομίχλης και του χιονιού καθώς και οι βασικές παράμετροί τους. Στη συνέχεια, αναλύεται ο υπολογισμός της εξασθένισης καθώς και ο υπολογισμός της ελάχιστης εμβέλειας μιας ζεύξης για τα δυο βασικά σχήματα διαμόρφωσης.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι δυο βασικές σημειακές διεργασίες που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία (Point Poisson Process – PPP και Binomial Point Process – BPP) ενώ διατυπώνεται ο ορισμός της πιθανότητας απομονωμένου κόμβου και υπολογίζεται η κλειστή μορφή της για την περίπτωση της διεργασίας BPP. Τέλος, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του υπό εξέταση ασύρματου μικροκυματικού πολυαλματικού δικτύου.

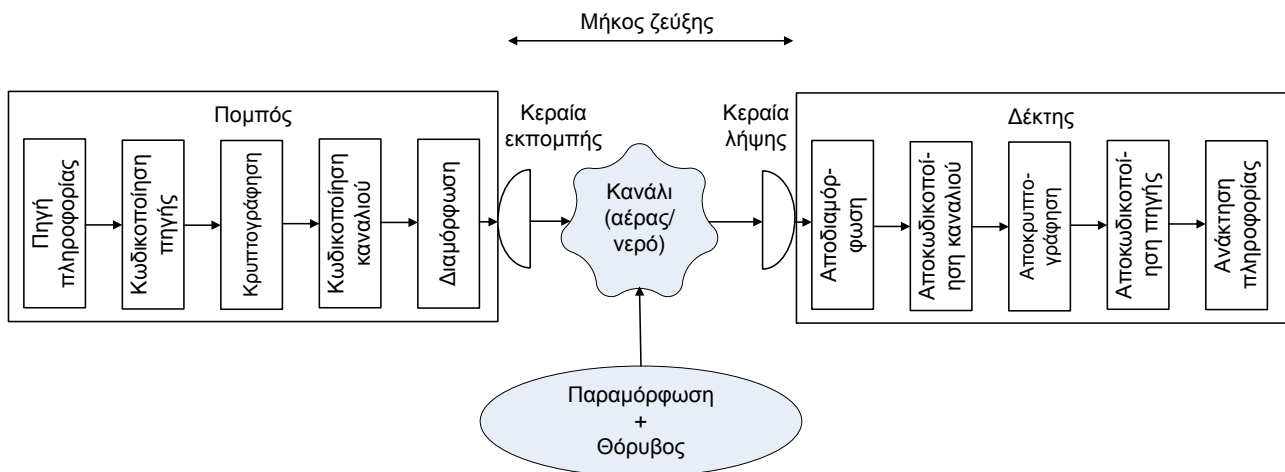
Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της πιθανότητας απομονωμένου κόμβου και η επίδραση των παραμέτρων των μετεωρολογικών συνθηκών, των δυο βασικών σχημάτων διαμόρφωσης (OOK και PPM) καθώς και διαφόρων παραμέτρων του δικτύου (όπως ο ρυθμός δεδομένων, η πιθανότητα σφάλματος κ.ά.)

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Τυπική δομή ασύρματου συστήματος

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η δομή ενός τυπικού ασύρματου οπτικού δικτύου. Οι βασικές δομικές μονάδες του είναι ο πομπός, το κανάλι και ο δέκτης, οι λειτουργίες των οποίων περιγράφονται συνοπτικά εν συνεχεία.



Εικόνα 2: Δομή τυπικού ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Πομπός (transmitter ή Tx): Αποτελείται από δύο βαθμίδες τον επεξεργαστή σήματος και τον διαμορφωτή. Το σήμα πληροφορίας που προέρχεται απευθείας από την πηγή μπορεί να είναι σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή και μπορεί να αντιπροσωπεύει ήχο, εικόνα ή φωνή.

Το φάσμα συχνοτήτων είναι συγκεντρωμένο γύρω από μια μηδενική συχνότητα και ονομάζεται σήμα βασικής ζώνης.

(α) Επεξεργαστής (processor) : ο επεξεργαστής σήματος προετοιμάζει καλύτερα το σήμα πληροφορίας ώστε να μπορέσει να μεταδοθεί μέσα από το εκάστοτε κανάλι έχοντας υποστεί τις μικρότερες δυνατές αλλοιώσεις. Ο επεξεργαστής σήματος είναι υπεύθυνος για την κωδικοποίηση του σήματος πηγής και την κρυπτογράφηση. Αν η πληροφορία είναι σε ψηφιακή μορφή η κωδικοποίηση είναι τεχνική συμπίεσης δεδομένων ενώ αν είναι σε αναλογική μορφή, μετατρέπεται σε ψηφιακή με τη μέθοδο της δειγματοληψίας. Και στις δυο περιπτώσεις η έξοδος είναι μια ακολουθία από δυαδικά ψηφία (bits). Με την κρυπτογράφηση γίνεται μια κωδικοποίηση των bits πληροφορίας ώστε να αποφεύγονται τα φαινόμενα υποκλοπής κατά την μετάδοση.

(β) Βαθμίδα διαμόρφωσης (modulator): Βασικός ρόλος της βαθμίδας διαμόρφωσης είναι η μετατροπή του αρχικού σήματος βασικής ζώνης σε ζωνοπερατό, έτσι ώστε να προσαρμοστεί κατάλληλα το σήμα στα συχνοτικά χαρακτηριστικά του καναλιού. Αυτό τις περισσότερες φορές γίνεται όταν το αρχικό σήμα (βασικής ζώνης) πολλαπλασιάζεται με ένα δεύτερο υψίσυχο ημιτονοειδές σήμα, χωρίς

ενσωματωμένη πληροφορία (το φέρον). Το προκύπτων σήμα μεταφέρει τα δεδομένα.

Κανάλι (channel): Το κανάλι είναι το βασικό μέσο που παρεμβάλλεται μεταξύ πομπού και δέκτη και είναι διαφορετικό ανάλογα με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούμε. Στις ασύρματες τεχνολογίες το φυσικό μέσο είναι τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα, στρατόσφαιρα ή εξώσφαιρα) ή το νερό. Γενικά το κανάλι προκαλεί εξασθένηση και εισάγει θόρυβο, με αποτέλεσμα ο δέκτης να λαμβάνει ένα αλλοιωμένο σήμα. Η εξασθένηση αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του καναλιού και το φασματικό περιεχόμενο του σήματος. Η φθορά την οποία θα υποστεί το σήμα εισόδου από το κανάλι μπορεί να προέρχεται από τις παρακάτω περιπτώσεις:

(α) Θόρυβος (noise): Υπάρχουν διαφορετικές πηγές θορύβου όπως ο θερμικός θόρυβος που οφείλεται συνήθως στην λειτουργία των ηλεκτρονικών διατάξεων, ο ατμοσφαιρικός θόρυβος καθώς και αυτός που προέρχεται από την ανθρώπινη παρουσία.

(β) Παραμόρφωση (distortion): Είναι η παραμόρφωση που υπόκεινται το σήμα λόγω των περιορισμών στο εύρος ζώνης του. Τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης είναι αλλαγές στο πλάτος ή τη φάση του σήματος που εκπέμπεται.

Δέκτης (receiver ή Rx): Σκοπός του δέκτη είναι να ανακτήσει με όσο το δυνατό μεγαλύτερη αξιοπιστία το σήμα πληροφορίας που εκπέμπει ο πομπός. Η δομή του αποτελείται από λειτουργικές μονάδες που υλοποιούν τις αντίστροφες διαδικασίες από αυτές του πομπού.

(α) Αποδιαμορφωτής (demodulator): Ο αποδιαμορφωτής αρχικά λαμβάνει το σήμα και το ενισχύει, μετατρέπει την συχνότητα του σήματος αν είναι απαραίτητο, ανιχνεύει την κυματομορφή του σήματος και την μετατρέπει σε ακολουθία bits.

(β) Αποκωδικοποιητής καναλιού (channel decoder): Υλοποιεί την αντίστροφη διαδικασία από αυτή του κωδικοποιητή. Ανιχνεύει και διορθώνει τυχόν λάθη που πραγματοποιήθηκαν στο στάδιο της αποδιαμόρφωσης και τα οποία οφείλονται στο κανάλι και απομακρύνει την ακολουθία των επιπλέον bits που εισήχθησαν για την ανίχνευση ή διόρθωση λαθών ή για τη διαμόρφωση του φάσματος του εκπεμπόμενου σήματος.

(γ) Αποκρυπτογράφηση (decryption): Πραγματοποιεί την αντίστροφη διαδικασία από αυτή της κρυπτογράφησης προκειμένου να μεταβιβαστεί μόνο η χρήσιμη πληροφορία.

(δ) Αποκωδικοποίηση πηγής (source decoder): Εκτελεί την αντίστροφες διαδικασίες από αυτές της κωδικοποίησης. Αποσυμπιέζει τα δεδομένα και ανάλογα τον προορισμό της μετατρέπει ή όχι τα bits σε σήμα.

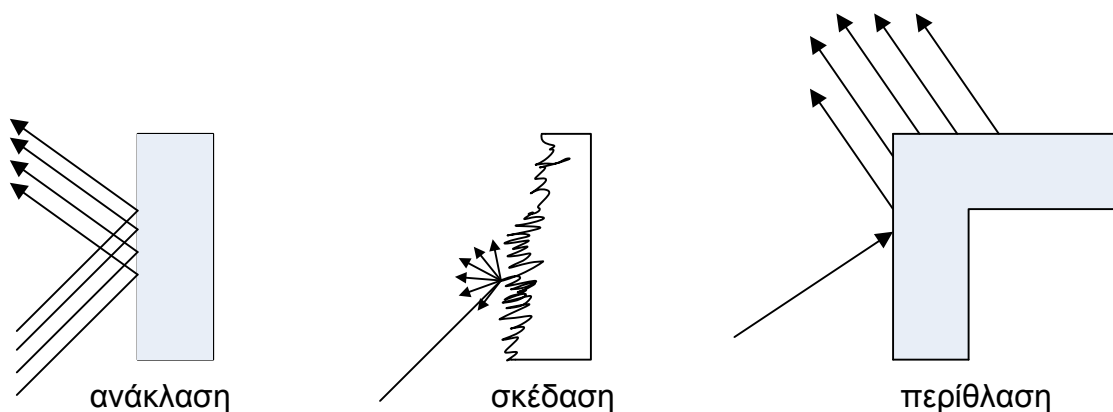
2.2 Απώλειες διαδρομής

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που προκύπτουν κατά τη σχεδίαση ενός ασύρματου συστήματος είναι η μοντελοποίηση της επίδρασης του ασύρματου καναλιού στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Οι φυσικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση (Εικόνα 3).

(α) Η ανάκλαση (reflection) εμφανίζεται όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε κάποιο σώμα με χαρακτηριστικό μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος λ του κύματος. Κατά την ανάκλαση ένα μέρος της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μεταφέρεται στο σώμα και ένα δεύτερο ανακλάται στο αρχικό μέσο διάδοσης. Συνήθως η ανάκλαση παρατηρείται όταν μεταξύ πομπού και δέκτη παρεμβάλλονται κτήρια, τοίχοι καθώς και όταν το κύμα προσκρούει στην επιφάνεια της γης.

(β) Η περίθλαση (diffraction) παρατηρείται όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα συναντήσει στην πορεία του αντικείμενα με απότομες ακμές και γωνίες με διαστάσεις μικρότερες του μήκους κύματος. Τότε οι ακμές αυτές γίνονται πηγή δευτερευόντων κυμάτων με αποτέλεσμα το κύμα να διαδίδεται και σε περιοχές που δεν έχουν οπτική επαφή πομπός και δέκτης.

(γ) Η σκέδαση (scattering) εμφανίζεται όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε επιφάνειες η τάξη μεγέθους των οποίων είναι πολύ κοντά στο μήκος κύματος λ . Με την σκέδαση έχουμε πάλι πηγή δευτερευόντων κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Στις ασύρματες επικοινωνίες αυτό συμβαίνει όταν το σήμα προσκρούει σε σήματα κυκλοφορίας, δέντρα, κτίρια κ.λπ.



Εικόνα 3: Ανάκλαση, σκέδαση και περίθλαση η/μ κυμάτων.

Προκειμένου να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση αυτών των μηχανισμών χρησιμοποιούμε θεωρητικά μοντέλα διάδοσης τα οποία έρχονται σε συμφωνία με μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις. Το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου το χρησιμοποιούμε για να εκτιμήσουμε την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος όταν ο πομπός και ο δέκτης έχουν καθαρή οπτική επαφή (line of sight – LOS). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η λαμβανόμενη ισχύς φθίνει καθώς αυξάνει η απόσταση πομπού – δέκτη (Tx – Rx) σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.1.)$$

όπου P_r (σε W) η λαμβανόμενη ισχύς, P_t (σε W) η εκπεμπόμενη ισχύς, G_t , G_r οι απολαβές των κεραιών εκπομπής και λήψης, λ (σε m) το μήκος κύματος της φέρουσας και d (σε m) το μήκος της ζεύξης. Οι απολαβές των κεραιών εκπομπής και λήψης εν γένει είναι συναρτήσεις γωνιών που ορίζονται από το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Χωρίς βλάβη της γενικότητας στη συνέχεια θεωρείται ότι έχουμε ισοτροπική πηγή (κεραία),

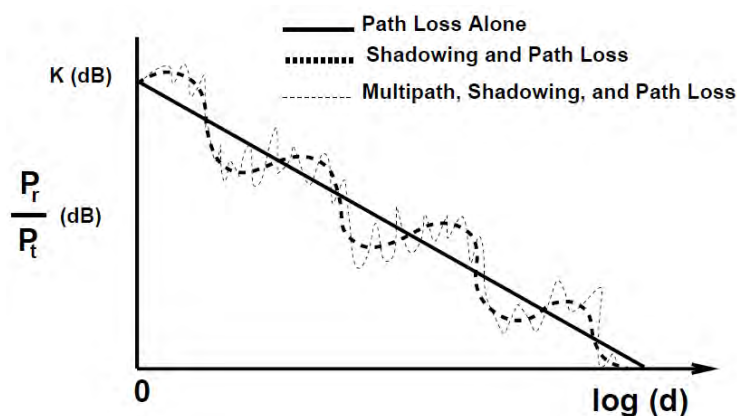
δηλαδή μια ιδεατή κεραία που ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Για το λόγο αυτό θεωρούμε ότι $G_t=G_r=1$.

Με βάση τον παραπάνω τύπο παρατηρούμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης του πομπού και του δέκτη. Γενικά όμως, οι μέσες απώλειες διαδρομής που εμφανίζονται στα ασύρματα κανάλια είναι αντιστρόφως ανάλογες με την απόσταση πομπού και δέκτη υψωμένη σε μια δύναμη n , όπου $2 \leq n \leq 4$. Είναι δηλαδή πιο μεγάλες σε σχέση με τις απώλειες ελεύθερου χώρου (όπου $n=2$). Επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες διαδρομής είναι τα ύψη των κεραιών, οι συνθήκες της ατμόσφαιρας και η παρουσία κτιρίων και δέντρων.

2.2.1 Επίδραση σκίασης

Τα περισσότερα ασύρματα συστήματα λειτουργούν σε αστικές περιοχές όπου η παρουσία κτηρίων, το ανάγλυφο της περιοχής καθώς και η βλάστηση δεν καθιστούν δυνατή την άμεση οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι πολλαπλές ανακλάσεις σε ό,τι παρεμβάλλεται μεταξύ πομπού και δέκτη έχει ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να φτάνουν στο δέκτη έχοντας διανύσει διαφορετικά μήκη διαδρομής. Αυτά τα κύματα καθώς αλληλεπιδρούν οδηγούν σε μείωση της ισχύος του σήματος καθώς αυξάνει η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.

Με βάση τα παραπάνω έχουν δημιουργηθεί μοντέλα διάδοσης προκειμένου να προβλέψουν τη μέση ισχύ λαμβανόμενου σήματος σε μια δεδομένη απόσταση από τον πομπό. Τα μοντέλα αυτά χαρακτηρίζουν την ισχύ του σήματος για μεγάλες αποστάσεις διαχωρισμού πομπού – δέκτη και βοηθούν στο να προσδιοριστεί η περιοχή ραδιοκάλυψης ενός πομπού και ονομάζονται μοντέλα διάλειψης μεγάλης κλίμακας (large scale fading ή shadowing).



Εικόνα 4: Απώλειες μονοπατιού, σκίαση και πολυδιάδοση συναρτήσει της απόστασης [1].

2.2.2 Επίδραση πολυδιάδοσης

Ένας δεύτερος λόγος αλλοίωσης του λαμβανόμενου σήματος είναι οι διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading). Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφουν γρήγορες διακυμάνσεις πλάτους, φάσης ή καθυστερήσεις πολλαπλής διαδρομής (πολυδιάδοσης ή multipath) ενός σήματος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συνήθως σε αστικές περιοχές στις οποίες λόγω μεγάλης οικοδομικής κάλυψης δεν υπάρχει διαδρομή οπτικής επαφής

μεταξύ πομπού και δέκτη. Ακόμα όμως και όταν υπάρχει οπτική επαφή, εξαιτίας των ανακλάσεων και σκεδάσεων του αρχικού σήματος από το έδαφος ή από γειτονικά κτήρια και αντικείμενα, το σήμα υφίσταται διάλεια μικρής κλίμακας.

Η πολυδιόδυση οφείλεται στην παρουσία ανακλαστικών και σκεδαστικών αντικειμένων οι οποίες αποτελούν πηγή δευτερευόντων κυμάτων πανομοιότυπων με το αρχικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταλήγουν στο δέκτη πολλαπλές συνιστώσες με διαφορετικά πλάτη και φάση. Το διανυσματικό άθροισμα όλων αυτών των συνιστωσών οδηγεί σε διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος, οδηγώντας σε διαλείψεις μικρής κλίμακας, παραμόρφωση σήματος ή και τα δύο.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί μια σειρά από μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο αυτό. Πιο συνηθισμένα είναι η κατανομή Rayleigh (που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση διαλείψεων πολλαπλής διαδρομής χωρίς διαδρομή με απευθείας οπτική επαφή), η κατανομή Rice (που χρησιμοποιείται όταν υπάρχει μια συνιστώσα με οπτική επαφή), η κατανομή Nakagami-m και η κατανομή Weibull.

2.3 Σχήματα διαμόρφωσης και πιθανότητα σφάλματος

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες στο κανάλι διάδοσης εξασθενούν σημαντικά την ένταση του διαδιδόμενου σήματος. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον υψηλό θόρυβο έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR). Η αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος θα ήταν μια λύση για τη βελτίωση του δείκτη αυτού, ωστόσο μια τέτοια επιλογή αφενός θα προκαλούσε παρεμβολή σε άλλα δίκτυα και αφετέρου εισάγει θέματα ασφάλειας της δημόσιας υγείας τα οποία θέτουν ένα άνω όριο στην επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια για βελτίωση του SNR και άρα και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων με την επιλογή ενός κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά τα δύο σημαντικότερα σχήματα διαμόρφωσης της βιβλιογραφίας, η on-off μεταλλαγή (On-Off Keying – OOK) και η διαμόρφωση θέσης παλμού (M-ary Pulse Position Modulation – M-PPM).

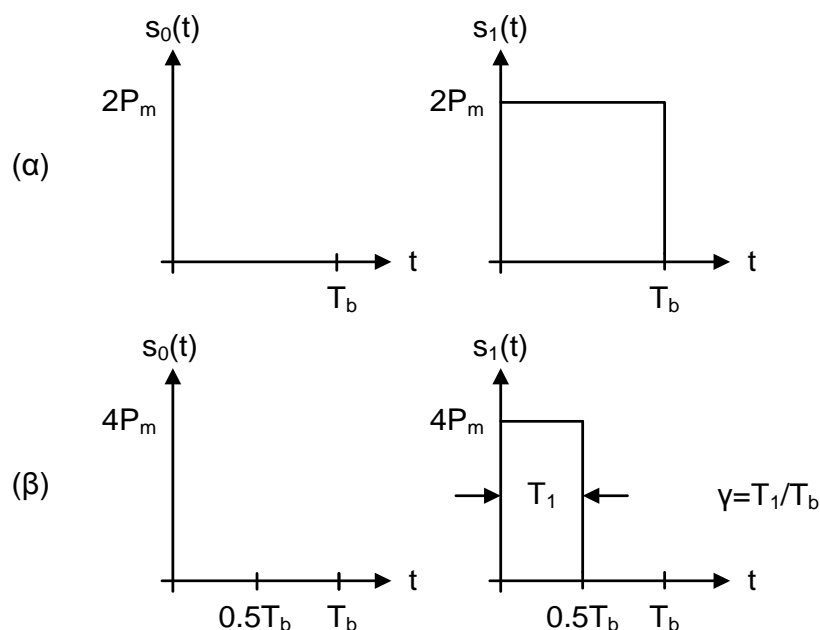
2.3.1 Σχήμα διαμόρφωσης OOK

Το σχήμα αυτό είναι το πιο συχνά υιοθετούμενο στις ασύρματες επικοινωνίες, λόγω της απλότητάς του. Το σχήμα χρησιμοποιεί δυαδική σηματοδότηση δηλαδή μετάδοση κάθε φορά ενός μόνο bit [2]. Η μετάδοση του ψηφιακού δεδομένου «1» γίνεται με έναν ηλεκτρικό παλμό που καταλαμβάνει όλη τη διάρκεια του bit ενώ η μετάδοση του ψηφιακού «0» γίνεται με την απουσία παλμού. Δηλαδή, ανοιγοκλείνει η πηγή με ρυθμό ίσο με το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Μπορούν να εφαρμοστούν σχήματα επιστροφής στο μηδέν (Return to Zero – RZ) ή μη επιστροφής στο μηδέν (Non Return to Zero – NRZ).

Στα σχήματα NRZ ο παλμός που αναπαριστά το δυαδικό «1» διαρκεί για όλη τη διάρκεια του bit ενώ στο σχήμα RZ διαρκεί για ένα τμήμα της διάρκειας του bit (βλέπε Εικόνα 5).

Μια κυματομορφή OOK περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$x_{OOK}(t) = 2P_m \sum_k b_k p(t - kT_b) \quad (2.2.)$$



Εικόνα 5: Κυματομορφές εκπομπής OOK για (α) NRZ και (β) RZ ($\gamma=0.5$)

όπου b_k είναι τα bit πληροφορίας και $p(t)$ είναι ένας τετραγωνικός παλμός χρονικής διάρκειας T_b που έχει τις εξής μορφές για NRZ και RZ αντίστοιχα:

$$p_{NRZ}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_b \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.3.)$$

$$p_{RZ}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \gamma T_b \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.4.)$$

όπου $\gamma = T_1/T_b$ ο κύκλος εργασίας (duty cycle).

Η πιθανότητα σφάλματος δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = Q\left(\frac{P_r}{\sqrt{N_0 R_b}}\right) \quad (2.5.)$$

όπου $Q(\cdot)$ είναι συνάρτηση Gauss Q η οποία ορίζεται εξής:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (2.6.)$$

Η $Q(x)$ συνδέεται με τη συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος $\text{erfc}(\cdot)$ με τη σχέση:

$$\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{x}) \quad (2.7.)$$

2.3.2 Σχήμα διαμόρφωσης M-PPM

Το σχήμα αυτό είναι επίσης δημοφιλές στις ασύρματες επικοινωνίες καθώς παρουσιάζει υψηλή απόδοση ισχύος (power efficiency) [2]. Όπως και το σχήμα OOK χρησιμοποιεί δύο στάθμες για το πλάτος των εκπεμπόμενων παλμών. Η μετάδοση του ψηφιακού δεδομένου «1» γίνεται με έναν παλμό που έχει πλάτος $M P_m$ ενώ η μετάδοση του ψηφιακού «0» γίνεται με την απουσία παλμού. Ανάλογα με την τιμή του M μπορούμε να έχουμε τη μεταδιδόμενη πληροφορία είτε σε δυαδικά ψηφία bits ($M = 2$) είτε σε σύμβολα ($M > 2$). Το κάθε σύμβολο, στη δεύτερη περίπτωση, προκύπτει από ένα συνδυασμό $\log_2 M$ και έχει διάρκεια $T_f = \log_2 M / R_b$. Η διάρκεια του κάθε συμβόλου υποδιαιρείται περαιτέρω σε M διακριτά

χρονικά διαστήματα, τα οποία λέγονται χρονοθυρίδες (timeslots). Όταν η πηγή βρίσκεται σε λειτουργία εκπέμπεται ένας τετραγωνικός παλμός διάρκειας T_f/M και ισχύος MP_m έτσι ώστε η μέση ισχύς εκπομπής να διατηρείται σταθερή και ίση με P_m . Κάθε ένα από τα σύμβολα του σχήματος αυτού αναπαρίσταται εκπέμποντας έναν παλμό σε κάθε ένα από τις M διαφορετικές χρονοθυρίδες, δηλαδή το κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη θέση του παλμού στη διάρκεια T_f (βλέπε Εικόνα 6).

Μια κυματομορφή M-PPM περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

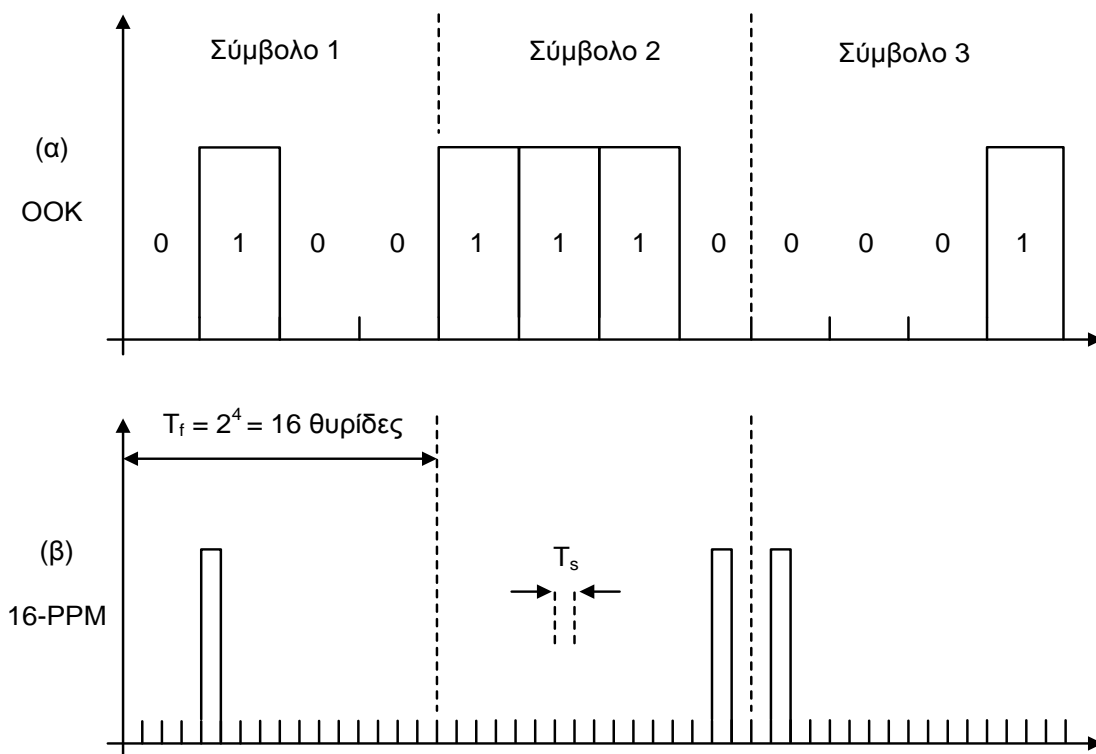
$$x_{M-PPM}(t) = MP_m \sum_k b_k p_{i[k]}(t - kT_f) \quad (2.8.)$$

όπου b_k είναι τα bit πληροφορίας και $p_{i[k]}(t)$ είναι ένας τετραγωνικός παλμός χρονικής διάρκειας T_f/M και πλάτους 1 και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$p_{i[k]}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [\frac{(i-1)T_f}{M}, \frac{iT_f}{M}] \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.1.)$$

Η πιθανότητα σφάλματος δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = Q\left(\frac{P_r}{\sqrt{N_0 R_b}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}}\right) \quad (2.2.)$$



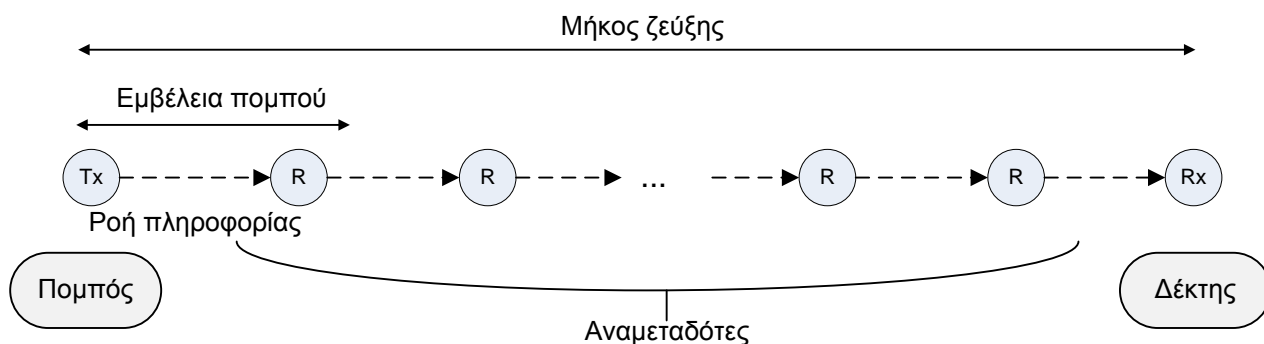
Εικόνα 6: Κυματομορφές εκπομπής για (α) OOK και (β) 16-PPM

2.4 Πολυαλματικά δίκτυα

Η εμβέλεια μιας απλής ζεύξης μεταξύ δυο σημείων μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τις αλλοιώσεις που εισάγονται από το κανάλι και μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της φέρουσας συχνότητας στην περιοχή των μικροκυμάτων. Η αύξηση της ισχύος εκπομπής

προκειμένου να αντιμετωπιστεί ο περιορισμός της εμβέλειας δεν είναι πάντοτε η καλύτερη επιλογή καθώς αφενός περιορίζεται η αυτονομία του πομπού (στην περίπτωση που δεν λειτουργεί με αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής τάσης) και αφετέρου ενδεχομένως να επιφέρει προβλήματα παρεμβολής σε άλλα τερματικά του δικτύου.

Μια συνήθης λύση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση των πολυαλματικών ζεύξεων, δηλαδή η επικοινωνία δύο σημείων όχι απευθείας αλλά με χρήση ενδιάμεσων πομποδεκτών που λειτουργούν ως αναμεταδότες (relays) και οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την προώθηση της πληροφορίας (βλέπε Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Πολυαλματικό δίκτυο

Στα δίκτυα με ζεύξεις πολλαπλών αλμάτων η υποδομή δεν είναι σταθερή όπως στα κλασσικά κυψελωτά δίκτυα της κινητής τηλεφωνίας, όπου υπάρχουν σταθμοί βάσης οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά της κίνησης προς τα τερματικά – δέκτες. Στα δίκτυα αυτά κάθε τερματικό λειτουργεί ταυτόχρονα και ως πομπός και ως δέκτης. Κάθε ενδιάμεσος πομποδέκτης έχει την ίδια εμβέλεια που είναι ικανή προκειμένου να προωθήσει την πληροφορία στον πλησιέστερο γείτονά του.

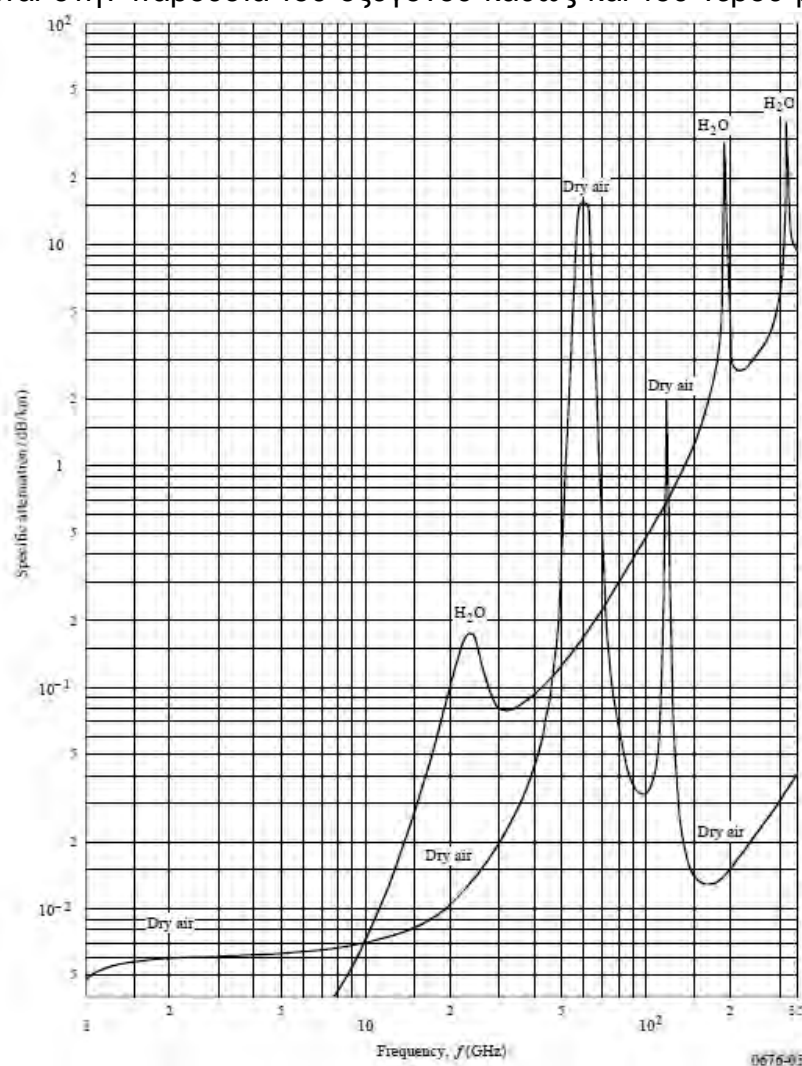
Έτσι, η διερεύνηση και η εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων που θα διασφαλίσουν την πλήρη συνδεσιμότητα του δικτύου είναι καθοριστική για τη βιωσιμότητά του. Με τον όρο αυτό, θεωρείται η δυνατότητα κάθε τερματικού του δικτύου να επικοινωνεί με τουλάχιστον ένα γειτονικό του. Βασικό σημείο για τη μοντελοποίηση και ανάλυση τέτοιων δικτύων είναι η εύρεση κατάλληλων διεργασιών που να περιγράφουν την τοποθέτηση των τερματικών τους στο χώρο. Οι σημειακές διεργασίες και οι ιδιότητές τους αποτελούν σημαντικό εργαλείο προς την κατεύθυνση αυτή.

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΚΑΙΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ

3.1 Εισαγωγή

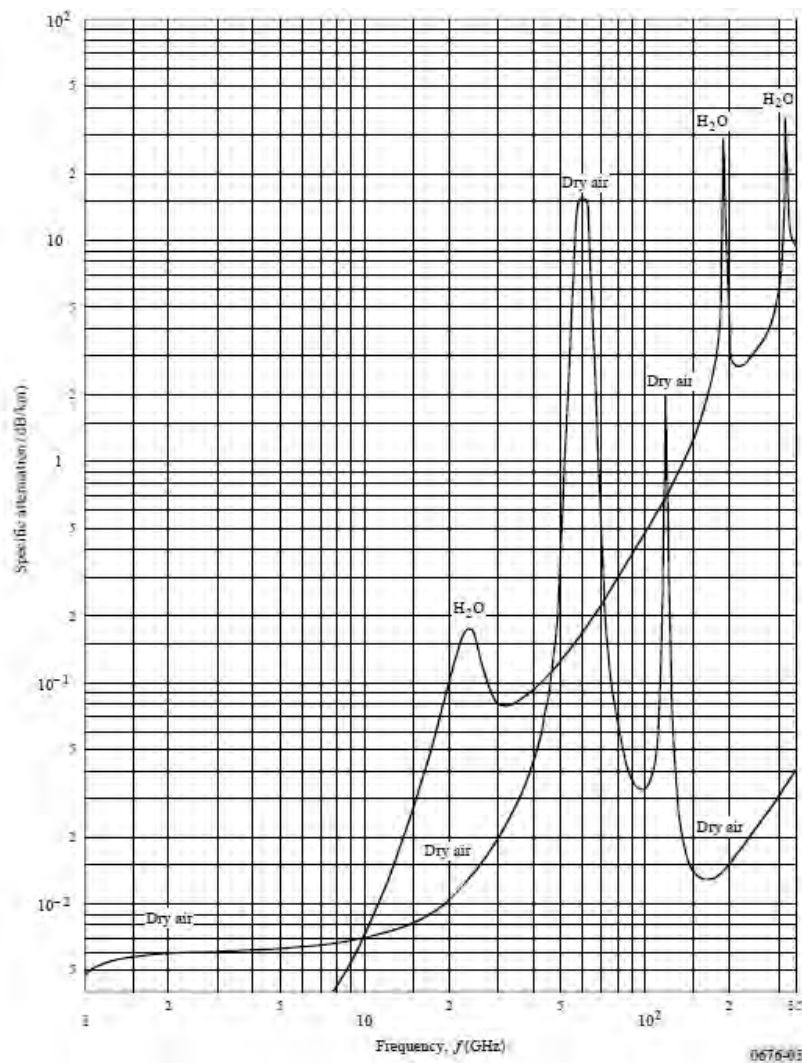
Η τροπόσφαιρα είναι το πιο σημαντικό τμήμα της ατμόσφαιρας καθώς αποτελεί το μέσο στο οποίο λαμβάνει χώρα η ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά και το φυσικό μέσο για τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Ξεκινάει από την επιφάνεια της γης αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει αυστηρά καθορισμένο όριο για το τέλος της. Τα όρια της είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους και την εποχή του έτους. Αυτό σημαίνει ότι η τροπόσφαιρα πάνω από τον ισημερινό φτάνει σε ύψος περίπου τα 15km ενώ πάνω από τους πόλους το ύψος της φτάνει περίπου στα 10km. Η τροπόσφαιρα έχει σχεδόν ομοιόμορφη σύσταση ενώ περιέχει το 85% της μάζας της ατμόσφαιρας και το 90% της υγρασίας και της σκόνης της ατμόσφαιρας.

Η εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους στην τροπόσφαιρα οφείλεται στην παρουσία του οξυγόνου καθώς και του νερού με τις διάφορες μορφές του.



Στην

Εικόνα 8 παρουσιάζεται η ειδική εξασθένιση (εξασθένιση ανά μονάδα μήκους) για τον ξηρό αέρα και τους υδρατμούς, που είναι τα βασικά συστατικά της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 8: Εξασθένιση ανά μονάδα μήκους συναρτήσει της συχνότητας για τα βασικά συστατικά της ατμόσφαιρας [3]

Όπως φαίνεται, η εξασθένιση για συχνότητες κάτω από 10GHz είναι αμελητέα. Εξαιτίας των διαφορετικών μοριακών συντονισμών υπάρχουν πολλές επιμέρους κορυφές στο σχήμα και έτσι η εξασθένιση παρουσιάζει αρκετά τοπικά μέγιστα. Είναι φανερό ότι οι συχνότητες των 60GHz και 120GHz είναι απαγορευτικές για τη διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις στην ατμόσφαιρα λόγω του οξυγόνου που είναι ένα βασικό συστατικό του ξηρού αέρα. Επίσης, οι συχνότητες των 23GHz και 180GHz παρουσιάζουν σημαντική εξασθένιση λόγω των υδρατμών. Είναι φανερό, ότι η παρουσία ομίχλης, βροχής ή χιονιού μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την εξασθένιση και να περιορίσουν την εμβέλεια μιας ζεύξης. Έτσι, οι ζώνες συχνοτήτων άνω των 20GHz χρησιμοποιούνται για ζεύξεις μικρής εμβέλειας και η υιοθέτηση πολυαλματικών δικτύων είναι απαραίτητη για την διασύνδεση δυο σημείων που απέχουν αρκετά χιλιόμετρα. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί από την ITU προκειμένου να περιγράψουν την εξασθένιση που εισάγουν τα βασικά καιρικά φαινόμενα (ομίχλη, βροχή, χιόνι).

3.2 Επίδραση ομίχλης

Η ομίχλη προέρχεται από τη συμπύκνωση υδρατμών στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός πολύ μεγάλου αριθμού υδροσταγονιδίων.

Τα μικρά αυτά σταγονίδια προκαλούν σκέδαση και εξασθένιση για τις ραδιοσυχνότητες άνω των 10GHz ενώ σε χαμηλότερες συχνότητες η επίδρασή τους είναι αμελητέα. Η ειδική εξασθένιση δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\gamma_{fog} = K_l M \quad (3.1.)$$

όπου K_l ο συντελεστής ειδικής εξασθένισης σε μονάδες $(\text{dB/km})(\text{g/m}^3)^{-1}$ και M η πυκνότητα του νερού στην ομίχλη ή το νέφος σε μονάδες (g/m^3) .

Ο συντελεστής ειδικής εξασθένισης μπορεί να υπολογιστεί από μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται στη σκέδαση Rayleigh. Η μαθηματική έκφρασή του είναι:

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon'(1 + \eta^2)} \quad (3.2.)$$

όπου f η συχνότητα σε GHz, $\varepsilon(f) = \varepsilon' + j\varepsilon''$ η διηλεκτρική επιτρεπτότητα και ο παράγοντας η δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (3.3.)$$

Η μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα του νερού δίνεται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p(1 + (\frac{f}{f_p})^2)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s(1 + (\frac{f}{f_s})^2)} \quad (3.4.)$$

$$\varepsilon(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{(1 + (\frac{f}{f_p})^2)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(1 + (\frac{f}{f_s})^2)} + \varepsilon_2 \quad (3.5.)$$

Στις παραπάνω εκφράσεις f_p και f_s είναι η κύρια και η δευτερεύουσα συχνότητα χαλάρωσης αντίστοιχα σε GHz και υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$f_p = 20.09 - 142 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) + 294 \left(\frac{300}{T} - 1 \right)^2 \quad (3.6.)$$

$$f_s = 590 - 1500 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) \quad (3.7.)$$

όπου T η θερμοκρασία σε Kelvin και

$$\varepsilon_0 = 77.6 - 103.3 \left(\frac{300}{T} - 1 \right) \quad (3.8.)$$

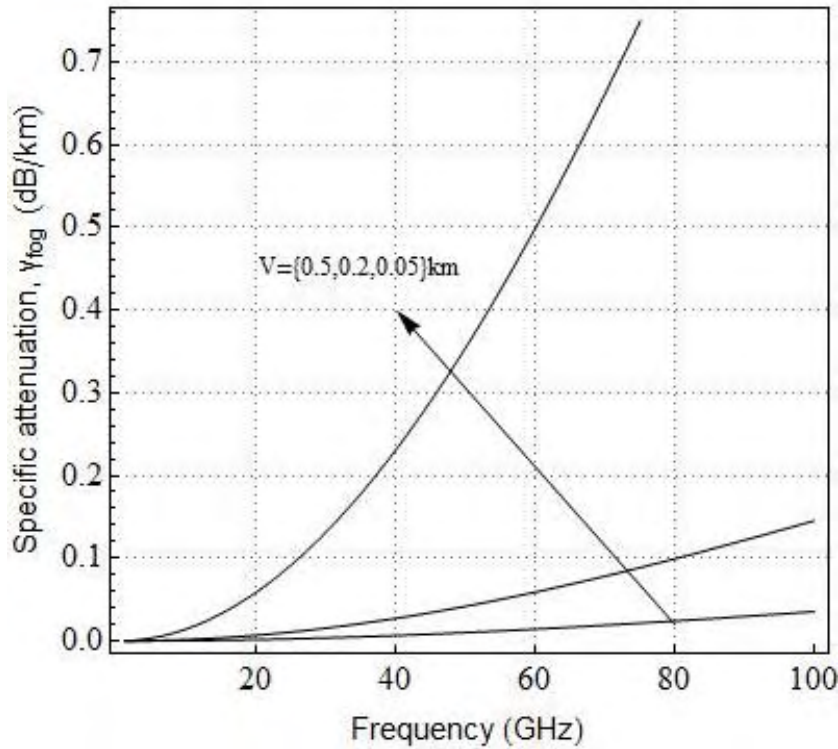
$$\varepsilon_1 = 5.48 \quad (3.9.)$$

$$\varepsilon_2 = 3.1 \quad (3.10.)$$

Η εμβέλεια της ορατότητας V εκφράζεται μέσω της συγκέντρωσης του νερού M ως εξής:

$$V = 0.024M^{-0.65} \quad (3.11.)$$

Η εξάρτηση της ειδικής εξασθένισης από τη συχνότητα δίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Ειδική εξασθένιση ομίχλης συναρτήσει της συχνότητας για διάφορες τιμές της ορατότητας

Όπως φαίνεται και από το σχήμα η εξασθένιση που εισάγει η ομίχλη είναι σχετικά μικρή για ορατότητα μεγαλύτερη των 200m (δηλαδή αραιή ομίχλη). Ακόμα όμως και για μικρές ορατότητες (δηλαδή πυκνή ομίχλη) η εξασθένιση γίνεται σημαντική για συχνότητα άνω των 80GHz.

3.3 Επίδραση βροχής

Η βροχή προκαλεί και αυτή με τη σειρά της σκέδαση και σημαντική εξασθένιση για τις ραδιοσυχνότητες άνω των 10GHz. Η ειδική εξασθένιση στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση [5]:

$$\gamma_{rain} = kR^a \quad (3.12.)$$

όπου k και a είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη συχνότητα και την δομή των σταγόνων της βροχής και R είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης (σε mm/hr). Υπάρχουν δυο δημοφιλή μοντέλα για την εκτίμηση της εξασθένισης της βροχής. Το επίγειο μοντέλο της ITU-R [5] και το μοντέλο του Crane [6]. Οι τιμές των σταθερών στην εξίσωση (3.12) αναφέρονται στο μοντέλο του Crane ενώ στην περίπτωση του μοντέλου της ITU-R δίνονται από τις σχέσεις:

$$k = \frac{(k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau)}{2} \quad (3.13.)$$

$$\alpha = \frac{(k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau)}{2k} \quad (3.14.)$$

όπου θ η γωνία ανύψωσης μονοπατιού και τ η κλίση της πόλωσης ως προς τον οριζόντιο άξονα ($\tau=45^\circ$ για κυκλική πόλωση). Οι τιμές των k_H , k_V , α_H , α_V δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1 [4].

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων μοντέλου εξασθένισης της βροχής

f(GHz)	k_H	k_V	a_H	a_V
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
150	1.31	1.27	0.710	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.690
300	1.36	1.35	0.688	0.689
400	1.32	1.31	0.683	0.684

Σημειώνεται ότι οι τιμές των παραμέτρων είναι για συγκεκριμένες συχνότητες και επομένως δεν είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση της ειδικής εξασθένισης της βροχής συναρτήσει της συχνότητας.

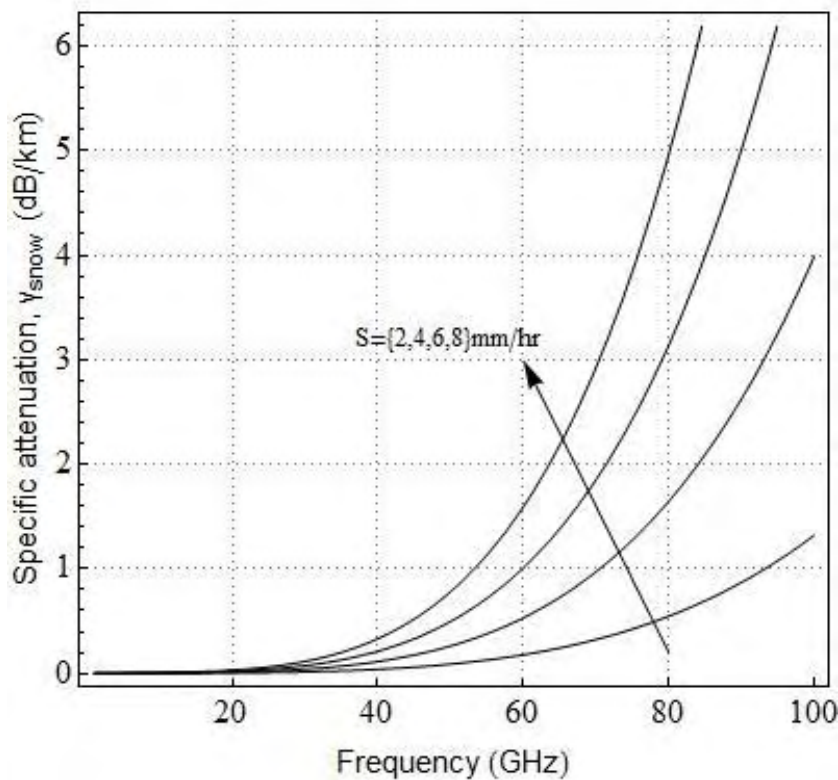
3.4 Επίδραση χιονιού

Η εκτίμηση της εξασθένισης των ραδιοκυμάτων από το χιόνι είναι μια δύσκολη και σύνθετη διαδικασία που λαμβάνει υπόψη το σχήμα, την κατανομή του μεγέθους και τη διηλεκτρική

σταθερά των νιφάδων του χιονιού. Η ειδική εξασθένιση στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση [7]:

$$\gamma_{snow} = \frac{0.00349S^{1.6}}{\lambda^4} + \frac{0.00224S}{\lambda} \quad (3.15.)$$

όπου S ο ρυθμός χιονόπτωσης (σε mm/hr) και λ το μήκος κύματος της φέρουσας συχνότητας (σε cm). Η εξάρτηση της ειδικής εξασθένισης από τη συχνότητα δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Ειδική εξασθένιση χιονιού συναρτήσει της συχνότητας για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης

Όπως φαίνεται και από το σχήμα η εξασθένιση που εισάγει το χιόνι είναι σημαντική για συχνότητες άνω των 40GHz και αυξάνει σημαντικά καθώς αυξάνεται ο ρυθμός χιονόπτωσης.

3.5 Υπολογισμός εξασθένισης

Η ειδική εξασθένιση (σε dB/km) υπολογίζει την εξασθένιση ανά μονάδα μήκους, η οποία μετράται σε km. Επομένως, ο υπολογισμός της εξασθένισης σε καθαρό αριθμό θα προκύψει αφού πρώτα υπολογίσουμε την εξασθένιση σε dB και στη συνέχεια απολογαριθμίσουμε. Δηλαδή:

$$\gamma_i = 10^{-\frac{\gamma_i(\frac{dB}{km}) \cdot d}{10}} \quad (3.16.)$$

όπου $i=\text{rain, fog, snow}$ στις σχέσεις (3.1), (3.12) και (3.16) αντίστοιχα και d το μήκος της ζεύξης (σε km). Οι σχέσεις αυτές σε συνδυασμό με το μοντέλο απωλειών μονοπατιού (σχέση (2.1)) μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύς στο δέκτη υπό την παρουσία των προαναφερθέντων καιρικών φαινομένων. Δηλαδή:

$$P_{r,rain} = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2} 10^{-\frac{\gamma_{rain} \left(\frac{dB}{km}\right) \cdot d(km)}{10}} \quad (3.17.)$$

$$P_{r,fog} = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2} 10^{-\frac{\gamma_{fog} \left(\frac{dB}{km}\right) \cdot d(km)}{10}} \quad (3.18.)$$

$$P_{r,snow} = \frac{P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2} 10^{-\frac{\gamma_{snow} \left(\frac{dB}{km}\right) \cdot d(km)}{10}} \quad (3.19.)$$

Από τις σχέσεις αυτές μπορεί να υπολογιστεί η εμβέλεια κάθε ζεύξης συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων των καιρικών φαινομένων.

3.6 Προσδιορισμός ελάχιστης εμβέλειας

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης εμβέλειας κάθε πομπού είναι συνάρτηση και του σχήματος διαμόρφωσης ή/και κωδικοποίησης που έχει υιοθετηθεί. Όπως προαναφέρθηκε στη βιβλιογραφία, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σχήματα διαμόρφωσης είναι οι διαμορφώσεις ΟΟΚ και Μ-ΡΡΜ που παρουσιάστηκαν συνοπτικά στο κεφάλαιο 2. Από τις σχέσεις (2.5) και (2.10) μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς λήψης για συγκεκριμένη πιθανότητα σφάλματος για τα δυο σχήματα διαμόρφωσης. Αυτό γίνεται επιλύοντας τις αντίστοιχες σχέσεις ως προς P_r ως εξής:

$$P_{r,OOK} = Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b} \quad (3.20.)$$

$$P_{r,MPPM} = Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b} \sqrt{\frac{2}{M \log_2 M}} \quad (3.21.)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τα καιρικά φαινόμενα και την εξασθένηση που αυτά εισάγουν στις μικροκυματικές ζεύξεις μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε την ελάχιστη εμβέλειά τους. Αυτό γίνεται αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.20) και (3.21) στις σχέσεις (3.17), (3.18) ή (3.19) και επιλύοντας ως προς d . Σημειώνεται ότι η εμβέλεια που θα υπολογιστεί θα είναι σε km και για το λόγο αυτό το μήκος κύματος θα πρέπει επίσης να είναι εκφρασμένο σε km. Έτσι προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για την διαμόρφωση ΟΟΚ:

$$d_{rain,OOK} = \frac{20}{\gamma_{rain} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{rain} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \right) \quad (3.22.)$$

$$d_{fog,OOK} = \frac{20}{\gamma_{fog} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{fog} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \right) \quad (3.23.)$$

$$d_{snow,OOK} = \frac{20}{\gamma_{snow} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{snow} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \right) \quad (3.24.)$$

και οι ακόλουθες σχέσεις για την διαμόρφωση Μ-ΡΡΜ:

$$d_{rain,MPPM} = \frac{20}{\gamma_{rain} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{rain} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}} \right) \quad (3.25.)$$

$$d_{fog,MPPM} = \frac{20}{\gamma_{fog} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{fog} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}} \right) \quad (3.26.)$$

$$d_{snow,MPPM} = \frac{20}{\gamma_{snow} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{snow} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}} \right) \quad (3.27.)$$

Σημειώνεται ότι στις σχέσεις (3.22) – (3.27) με W_0 δηλώνεται ο πρωταρχικός πραγματικός κλάδος της συνάρτησης Lambert W^1 .

¹ Η συνάρτηση Lambert W ορίζεται ως η λύση της εξίσωσης $ye^y = x$ και η οποία είναι $W(x) = y$. Σημειώνεται ότι η συνάρτηση αυτή είναι ενσωματωμένη σε αρκετά λογισμικά μαθηματικών λειτουργιών. Βλέπε, για παράδειγμα, τη συνάρτηση ProductLog στο λογισμικό Mathematica.

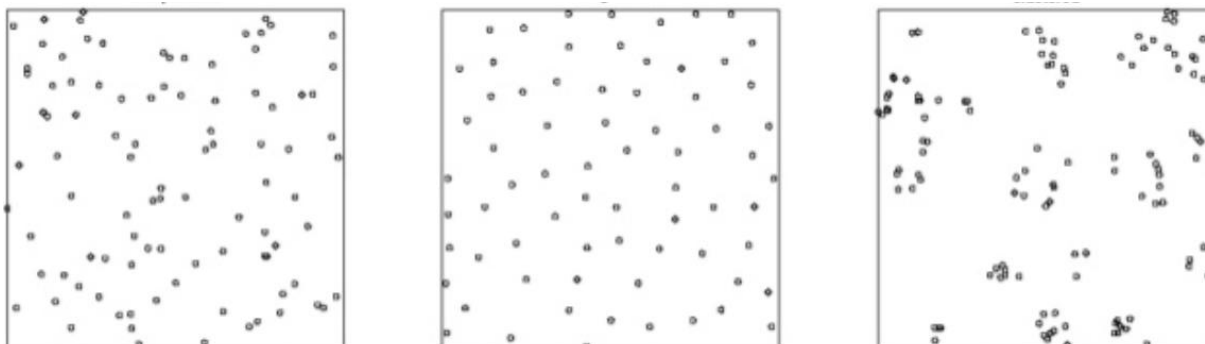
4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Η υιοθέτηση των πολυαλματικών ζεύξεων είναι μια ιδιαίτερα αποδοτική λύση για την αντιμετώπιση του περιορισμού της εμβέλειας που προκύπτει από την επίδραση των αλλοιώσεων στο κανάλι διάδοσης. Η δυνατότητα κάθε κόμβος ενός τέτοιου δικτύου να μπορεί να επικοινωνεί τουλάχιστον με έναν γειτονικό του είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς σε διαφορετική περίπτωση ο κόμβος αυτός καθίσταται απομονωμένος και το δίκτυο διακόπτει την ροή πληροφορίας. Η ποσοτικοποίηση αυτής της διαισθητικής περιγραφής απαιτεί εν πρώτοις ένα μαθηματικό μοντέλο κατανομής των κόμβων. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει μια εισαγωγή στις σημειακές διεργασίες και παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρειες δυο βασικές σημειακές διεργασίες.

4.2 Σημειακές διεργασίες

Οι σημειακές διεργασίες (point processes) χρησιμοποιούνται για την περιγραφή γεωμετρικών δομών προτύπων οι οποίες σχηματίζονται από αντικείμενα που είναι τυχαία κατανεμημένα σε έναν χώρο μιας, δύο ή τριών διαστάσεων. Τέτοιες διεργασίες μπορούν να βρεθούν σε μια πληθώρα περιπτώσεων όπως είναι οι θέσεις των δέντρων σε ένα δάσος ή οι θέσεις των σταθμών βάσης σε ένα ασύρματο δίκτυο χωρίς κεντρικό συντονισμό (ad-hoc). Τα αντικείμενα αυτά αναπαρίστανται από σημεία (points), τα οποία περιγράφουν τη θέση του αντικειμένου και σημάδια (marks), τα οποία δίνουν πρόσθετες πληροφορίες όπως το μέγεθος ή τη μορφή του. Η γραφική αναπαράσταση δίνει μια πρώτη εικόνα των ιδιοτήτων των προτύπων των σημείων προκειμένου να εξαχθούν κάποια βασικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 9 δίνονται μερικά πρότυπα σημείων.



Εικόνα 9: Πρότυπα σημείων: τυχαίο (αριστερά), κανονικό (κέντρο), ομαδοποιημένο (δεξιά)

Επιπλέον, η γραφική αναπαράσταση μπορεί να υποδείξει ενδεχόμενες συσχετίσεις μεταξύ των σημείων ή μεταξύ της πυκνότητάς τους και άλλων χωρικών μεταβλητών. Πιο ακριβής περιγραφή ωστόσο απαιτεί την χρήση στατιστικής μεθοδολογίας. Το πιο συνηθισμένο στατιστικό μέγεθος που χαρακτηρίζει μια τέτοια διεργασία είναι η πυκνότητα σημείων, δηλαδή ο μέσος αριθμός αντικειμένων ανά μονάδα διαστήματος, επιφάνειας ή όγκου. Επιπλέον στατιστικά μεγέθη που περιγράφουν τις συσχετίσεις μεταξύ των σημείων ως προς τις αποστάσεις είναι η απόσταση ενός σημείου από τον πρώτο κοντινότερο γείτονα ή τους επόμενους κοντινούς γείτονες.

Στην περίπτωση των πολυαλματικών ασύρματων δικτύων, τα σημεία της σημειακής διεργασίας αναπαριστούν τις θέσεις των πομποδεκτών (κόμβων) του δικτύου. Με βάση τα παραπάνω, η μοντελοποίηση και περαιτέρω ανάλυσή τους απαιτεί τη διερεύνηση εκτός της γεωγραφικής κατανομής των σημείων (κόμβων) και τη μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού μεταξύ των κόμβων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δυο βασικές σημειακές διεργασίες.

4.2.1 Ομογενής διεργασία Poisson

Η ομογενής διεργασία σημείων Poisson (PPP) χαρακτηρίζεται από δυο βασικές ιδιότητες:

- α. ο αριθμός των κόμβων της διεργασίας σε ένα φραγμένο σύνολο A ακολουθεί την κατανομή Poisson με μέση τιμή $\rho\mu(A)$, όπου ρ η πυκνότητα κόμβων.
- β. ο αριθμός των κόμβων της διεργασίας σε k ξένα σύνολα σχηματίζουν k ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, για τυχαίο k .

Γενικά, σε μια ομογενή m -διάστατη PPP, με πυκνότητα ρ , η πιθανότητα εύρεσης k κόμβων σε ένα φραγμένο σύνολο Borel $A \subset \mathbb{R}^m$ δίνεται από τη σχέση [8]:

$$P[k \text{ κόμβοι στο } A] = \frac{e^{-\rho\mu(A)}(\rho\mu(A))^k}{k!} \quad (4.1.)$$

όπου $\mu(A)$ είναι το κανονικό μέτρο Lebesgue του συνόλου A . Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της απόστασης ενός σημείου από τον n -οστό γείτονά του.

Σε μια ομογενή PPP στον χώρο \square^m με πυκνότητα ρ η απόσταση R_n μεταξύ ενός σημείου και του n -οστού γείτονά του κατανέμεται σύμφωνα με μια γενικευμένη κατανομή γάμμα [8]:

$$f_{R_n}(r) = \frac{(\rho c_m r^m)^n}{r \Gamma(n)} e^{-\rho c_m r^m} \quad (4.2.)$$

όπου $c_m r^m$ είναι ο όγκος μιας m -διάστατης σφαίρας ακτίνας r . Ο συντελεστής c_m δίνεται από τη σχέση:

$$c_m = \begin{cases} \frac{\pi^{\frac{m}{2}}}{\left(\frac{m}{2}\right)!} & \text{για άρτιο } m \\ \frac{\pi^{\frac{m-1}{2}} 2^m \left(\frac{m-1}{2}\right)!}{m!} & \text{για περιττό } m \end{cases} \quad (4.3.)$$

Η ομογενής PPP είναι η πιο συχνά υιοθετούμενη διεργασία στη βιβλιογραφία [9] και μπορεί να θεωρηθεί χωρίς βλάβη της γενικότητας ως σημείο αναφοράς για την μελέτη πιο πολύπλοκων σεναρίων.

4.2.2 Διωνυμική διεργασία σημείων

Η διωνυμική διεργασία σημείων (BPP) σχηματίζεται από την ομοιόμορφη και ανεξάρτητη κατανομή n σημείων σε ένα συμπαγές σύνολο W . Η πυκνότητα της BPP σε μια θέση x ορίζεται ως [10]:

$$\rho(x) = \frac{n}{|W|} 1(x) \quad (4.4.)$$

Θεωρώντας ότι $W \subset \mathbb{R}^m$ τότε για κάθε σύνολο $V \subset \mathbb{R}^m$ ο αριθμός των σημείων στο V , ο οποίος συμβολίζεται με $\Phi(V)$, ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή (z, p) με παραμέτρους $z = n$ και $p = \frac{|V \cap W|}{|W|}$.

Σε μια BPP στον χώρο \mathbb{R}^m η κατανομή της απόστασης R_1 μεταξύ ενός σημείου και του πρώτου γείτονά του δίνεται από τη σχέση [8]:

$$f_{R_1}(r) = \frac{mn}{r} \left(1 - \left(\frac{r}{\ell}\right)^m\right)^{n-1} \left(\frac{r}{\ell}\right)^m \quad (4.5.)$$

ενώ η κατανομή της απόστασης R_n μεταξύ ενός σημείου και του n -οστού γείτονά του δίνεται από τη σχέση [8]:

$$f_{R_n}(r) = \frac{mn}{r} \left(\frac{r}{\ell}\right)^{nm} \quad (4.6.)$$

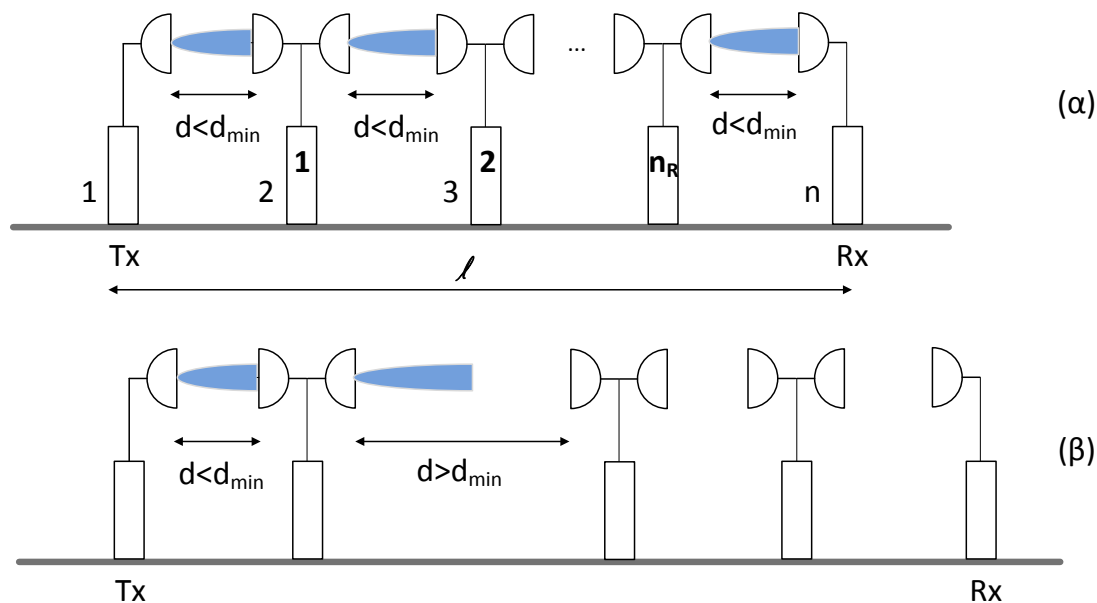
όπου $0 \leq r \leq \ell$.

Η BPP μπορεί να εφαρμοστεί αντί της PPP σε περιπτώσεις όπου είναι μικρό το πλήθος των κόμβων.

4.3 Περιγραφή δικτύου και πιθανότητα απομονωμένου κόμβου

Η δυναμική τοπολογία ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου απαιτεί την υιοθέτηση ενός κατάλληλου μοντέλου χωρικής κατανομή κόμβων. Σε αρκετά ασύρματα συστήματα το μοντέλο PPP είναι το πιο συνηθισμένο. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή δεν είναι ακριβής για δίκτυα που χρησιμοποιούνται στην πράξη και τα οποία αποτελούνται συχνά από ένα ορισμένο αριθμό κόμβων. Για το σκοπό αυτό, το πιο ρεαλιστικό μοντέλο BPP, το οποίο θεωρεί ένα γνωστό και σταθερό αριθμό κόμβων ανεξάρτητα τοποθετημένων σε μια δοθείσα περιοχή μπορεί να βρει εφαρμογή σε ένα σειριακό μικροκυματικό σύστημα, στο οποίο οι κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν εκατοντάδες μέτρα μακριά.

Το υπό εξέταση σειριακό δίκτυο θεωρείται ότι αποτελείται από n_R αναμεταδότες, δηλαδή η πομποδέκτες ομοιόμορφα κατανεμημένους σε ένα μήκος ℓ σύμφωνα με μια BPP (βλέπε Εικόνα 10(α)).



Εικόνα 10: (α) Αρχιτεκτονική μικροκυματικού δικτύου, (β) απομονωμένος κόμβος

Η ύπαρξη απομονωμένων κόμβων σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι ανεπιθύμητη καθώς ένας τέτοιος κόμβος δεν μπορεί να μεταφέρει πληροφορία σε γειτονικούς του και καθίσταται μη χρήσιμος για την λειτουργία του δικτύου (Εικόνα 10(β)). Ένα πρόβλημα που τίθεται συχνά αφορά τη συσχέτιση της ελάχιστης εμβέλειας d με την πιθανότητα p μη ύπαρξης απομονωμένων κόμβων. Η ελάχιστη εμβέλεια είναι μια συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων σύμφωνα με το σχήμα διαμόρφωσης ή/και κωδικοποίησης που έχει υιοθετηθεί. Τυπικές τέτοιες παράμετροι είναι η ισχύς εκπομπής, ο υποστηριζόμενος ρυθμός δεδομένων και η πιθανότητα σφάλματος.

Σε μια BPP η απόσταση μεταξύ ενός κόμβου και του k -οστού γείτονά του ακολουθεί μια γενικευμένη κατανομή βήτα που δίνεται από την ακόλουθη σχέση [11]:

$$f_{R_k}(r) = \frac{1}{\ell} \beta\left(\frac{r}{\ell}; k, n - k + 1\right) \quad (4.7.)$$

όπου $\beta(x; a, b)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας βήτα που ορίζεται ως

$$\beta(x; a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1 - x)^{b-1} \quad (4.8.)$$

και $B(a, b)$ είναι η συνάρτηση βήτα που ορίζεται ως:

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1 - t)^{y-1} dt \quad (4.9.)$$

Ένας κόμβος απομονώνεται όταν ο πρώτος του γείτονας είναι εκτός της εμβέλειάς του d . Επομένως, η πιθανότητα απομονωμένου κόμβου, P_{iso} , δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{iso} = Pr(r \geq d) &= 1 - Pr(0 \leq r \leq d) = 1 - \int_0^d \frac{r}{\ell} \left(1 - \frac{r}{\ell}\right)^{n-1} dr \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow P_{iso} = \left(1 - \frac{d}{\ell}\right)^n \end{aligned} \quad (4.10.)$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μια ικανοποιητική πιθανότητα απομονωμένου κόμβου για δεδομένο μήκος l εξαρτάται από την ελάχιστη εμβέλεια εκπομπής, d , και τον αριθμό των κόμβων, n . Η εμβέλεια εκπομπής συνδέεται άμεσα με την εξασθένηση που προκαλεί η παρουσία της ομίχλης, της βροχής ή του χιονιού τα οποία προκαλούν απορρόφηση ή/και εξασθένηση στο σήμα που μεταδίδεται. Από την (4.10) και τις (3.22) – (3.27) μπορούν να εξαχθούν κλειστές μορφές της πιθανότητας απομονωμένου κόμβου για τις δυο διαμορφώσεις και για κάθε ένα από τα υπό εξέταση καιρικά φαινόμενα. Έτσι, για την ΟΟΚ διαμόρφωση προκύπτουν οι σχέσεις:

$$P_{iso, rain, OOK} = \left(1 - \frac{\frac{20}{\gamma_{rain} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{rain} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \right)}{\ell} \right)^n \quad (4.11.)$$

$$P_{iso,fog,OOK} = \left(1 - \frac{\frac{20}{\gamma_{fog} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{fog} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \right)}{\ell} \right)^n \quad (4.12.)$$

$$P_{iso,fog,OOK} = \left(1 - \frac{\frac{20}{\gamma_{snow} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{snow} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \right)}{\ell} \right)^n \quad (4.13.)$$

ενώ για την διαμόρφωση PPM προκύπτουν οι σχέσεις:

$$P_{iso,rain,MPPM} = \left(1 - \frac{\frac{20}{\gamma_{rain} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{rain} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}} \right)}{\ell} \right)^n \quad (4.14.)$$

$$P_{iso,fog,MPPM} = \left(1 - \frac{\frac{20}{\gamma_{fog} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{fog} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}} \right)}{\ell} \right)^n \quad (4.15.)$$

$$P_{iso,fog,MPPM} = \left(1 - \frac{\frac{20}{\gamma_{snow} \ln(10)} W_0 \left(\frac{\gamma_{snow} \ln(10)}{20} \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t}{Q^{-1}(P_e) \sqrt{N_0 R_b}}} \sqrt{\frac{M \log_2 M}{2}} \right)}{\ell} \right)^n \quad (4.16.)$$

5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν τη σχεδίαση ενός εύρωστου ασύρματου δικτύου στην περιοχή των μικροκυμάτων υπό διάφορες καιρικές συνθήκες. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις τυπικές αριθμητικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που διατηρούνται σταθερές εκτός των περιπτώσεων που θα ορίζονται διαφορετικά.

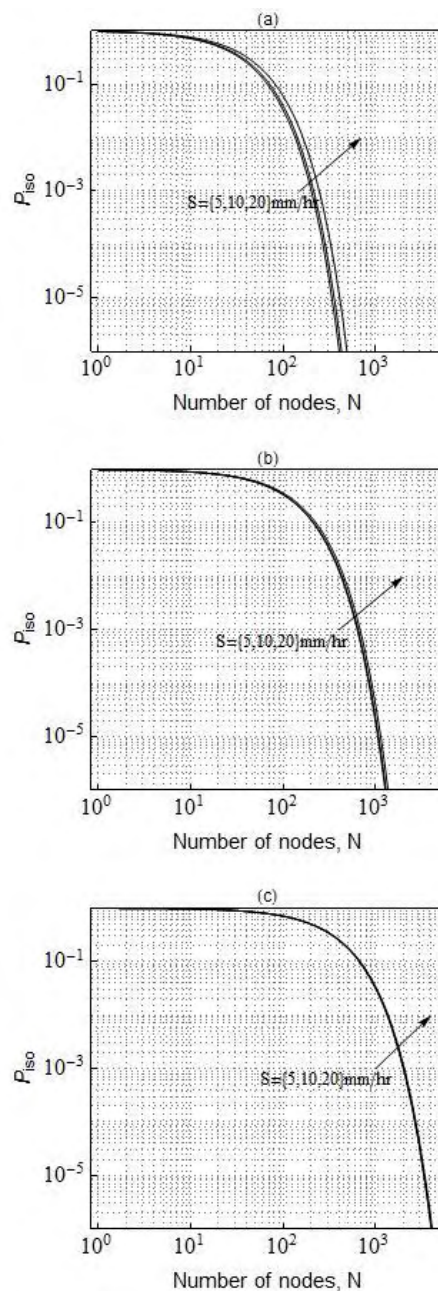
Πίνακας 2: Παράμετροι μοντέλου συστήματος

Παράμετρος	Τιμή
Συχνότητα φέρουσας f	40GHz
Ισχύς εκπομπής P_t	40W
Πιθανότητα σφάλματος P_e	10^{-6}
Φασματική πυκνότητα ισχύος λευκού θορύβου N_0	10^{-30} W/Hz
Μήκος PPM συμβόλου M	4/8
Μήκος δικτύου ℓ	50km
Παράμετρος ε_1	5.48
Παράμετρος ε_2	3.51
Παράμετρος k_H	0.35
Παράμετρος k_V	0.31
Παράμετρος a_H	0.939
Παράμετρος a_V	0.929
Κλίση της πόλωσης τ	45°
Γωνία ανύψωσης μονοπατιού θ	45°

5.1 Επίδραση του ρυθμού εκπομπής δεδομένων για διαμόρφωση ΟΟΚ

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η επίδραση του χιονιού στην πιθανότητα απομονωμένου κόμβου για τυπικές τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης θεωρώντας $\ell=50$ km και τρεις ρυθμούς δεδομένων (1Mbps, 100Mbps και 10Gbps). Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνει ο ρυθμός χιονόπτωσης αυξάνει και ο αριθμός των απαιτούμενων πομποδεκτών εφόσον αυξάνει η αντίστοιχη εξασθένιση. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας $R_b=1$ Mbps μια αύξηση του ρυθμού χιονόπτωσης κατά ένα παράγοντα ίσο με 2 (από 5mm/hr σε 10mm/hr) αυξάνει κατά περίπου 5% τον απαιτούμενο αριθμό πομποδεκτών προκειμένου να επιτευχθεί $P_{iso}=10^{-3}$ ενώ περαιτέρω διπλασιασμός οδηγεί σε αύξηση 15%. Τα ποσοστά αυτά στην περίπτωση που θεωρήσουμε δεκαπλάσιο ρυθμό δεδομένων μειώνονται σε 3,5% και 5% περίπου αντίστοιχα ενώ στην περίπτωση που ο επιθυμητός ρυθμός δεδομένων είναι 10Gbps ο

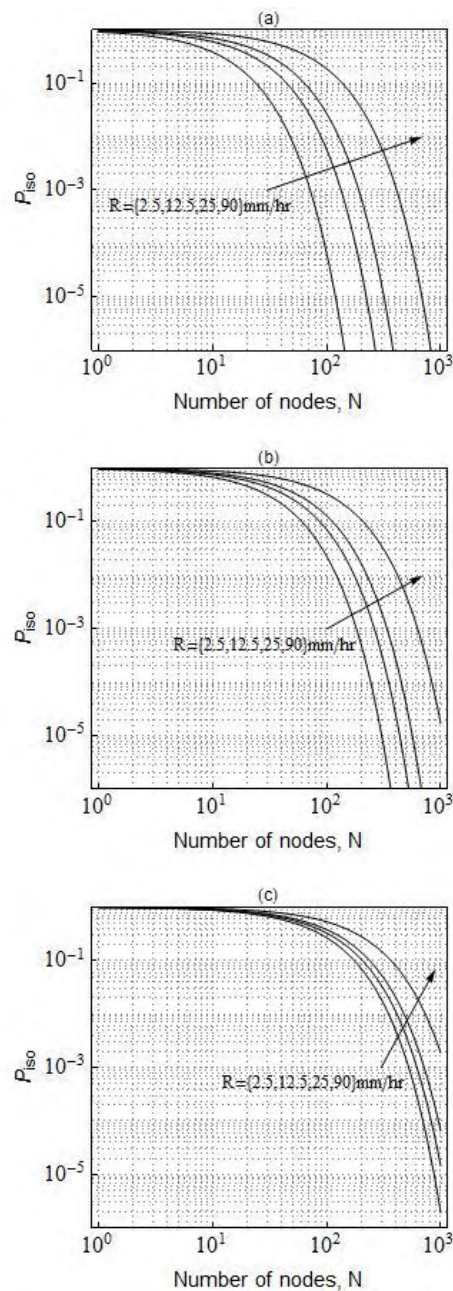
απαιτούμενος ρυθμός είναι τόσο μεγάλος που η επίδραση του ρυθμού χιονόπτωσης είναι σχετικά μικρή. Αντίθετα, αν θεωρήσουμε συγκεκριμένο ρυθμό χιονόπτωσης, ο απαιτούμενος αριθμός πομποδεκτών προκειμένου να επιτευχθεί $P_{iso}=10^{-3}$ τριπλασιάζεται κατά τη μετάβαση από τον έναν ρυθμό δεδομένων στον άλλο.



Σχήμα 3: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση ΟΟΚ, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης S .

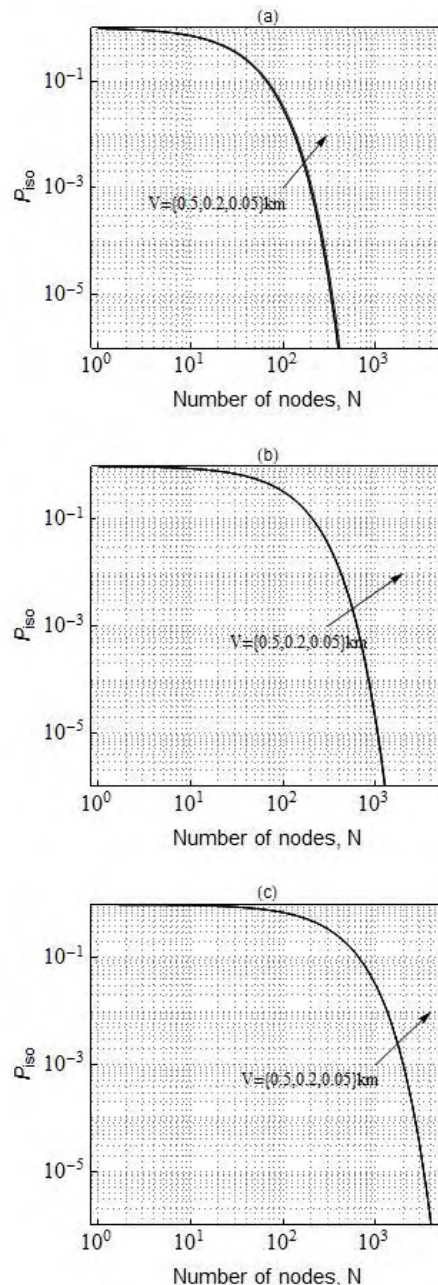
Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται η επίδραση της βροχής για ένα εύρος τιμών του ρυθμού βροχόπτωσης που περιλαμβάνει την ασθενή βροχή μέχρι την καταιγίδα (2.5mm/hr έως 90mm/hr). Θεωρώντας τα πιο χαμηλά επίπεδα βροχόπτωσης μια αύξηση του ρυθμού από 1Mbps σε 100Mbps οδηγεί σε υπερδιπλασιασμό του απαιτούμενου αριθμού πομποδεκτών προκειμένου να επιτευχθεί $P_{iso}=10^{-3}$ ενώ περαιτέρω αύξηση σε 10Gbps οδηγεί σε

περαιτέρω τριπλασιασμό. Στην άλλη ακραία περίπτωση του ρυθμού βροχόπτωσης τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης είναι 150% για τη μετάβαση από 1Mbps σε 100Mbps και 170% για τη μετάβαση από 100Mbps σε 10Gbps.



Σχήμα 4: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση ΟΟΚ, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης R .

Τέλος, στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η επίδραση της ομίχλης για διάφορες τιμές της ορατότητας V . Για κάθε ρυθμό δεδομένων η επίδραση της εξασθένησης της ομίχλης είναι σχεδόν σταθερή καθώς επιδείνωση της ορατότητας οδηγεί σε μικρή αύξηση του απαιτούμενου αριθμού των κόμβων (~1-2%). Το γεγονός αυτό οφείλεται προφανώς στη μικρή διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νερό των σταγονιδίων της ομίχλης σε κάθε περίπτωση.



Σχήμα 5: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση OOK, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές της ορατότητας V .

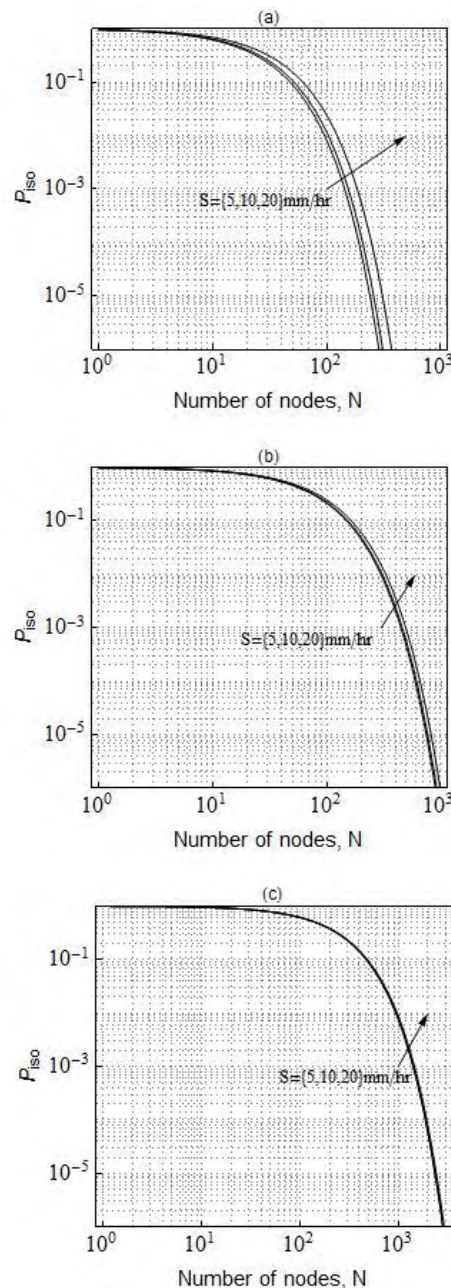
5.2 Επίδραση του ρυθμού εκπομπής δεδομένων για διαμόρφωση PPM

Οι επόμενες δύο υποενότητες παρουσιάζουν την επίδραση των καιρικών φαινομένων στην πιθανότητα απομονωμένου κόμβου για τρεις ρυθμούς δεδομένων (1Mbps, 100Mbps και 10Gbps) θεωρώντας δυο εκδοχές της διαμόρφωση PPM (4-PPM και 8-PPM).

5.2.1 Διαμόρφωση 4-PPM

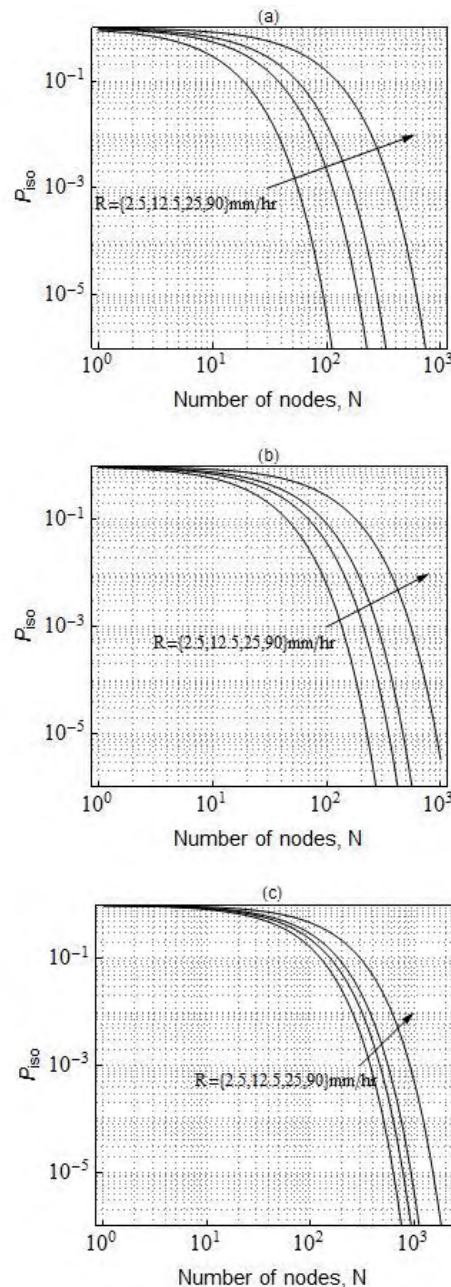
Στην περίπτωση της διαμόρφωσης 4-PPM παρατηρούνται τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά υπό την επίδραση της εξασθένιση που επιφέρει κάθε καιρικό φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα, από το Σχήμα 6 παρατηρούμε για ρυθμό δεδομένων 1Mbps μια αύξηση του

ρυθμού χιονόπτωσης από 5mm/hr σε 10mm/hr αυξάνει κατά περίπου 8% τον απαιτούμενο αριθμό πομποδεκτών προκειμένου να επιτευχθεί $P_{iso}=10^{-3}$ ενώ περαιτέρω διπλασιασμός οδηγεί σε αύξηση 20%. Τα ποσοστά αυτά στην περίπτωση που θεωρήσουμε δεκαπλάσιο ρυθμό δεδομένων μειώνονται σε 2% και 11% περίπου αντίστοιχα ενώ στην περίπτωση που ο επιθυμητός ρυθμός δεδομένων είναι 10Gbps η αντίστοιχη αύξηση είναι κάτω από 3%. Σε σχέση με τη διαμόρφωση OOK ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων είναι μειωμένος κατά 30% περίπου τόσο ανά ρυθμό δεδομένων όσο και ανά ρυθμό χιονόπτωσης.



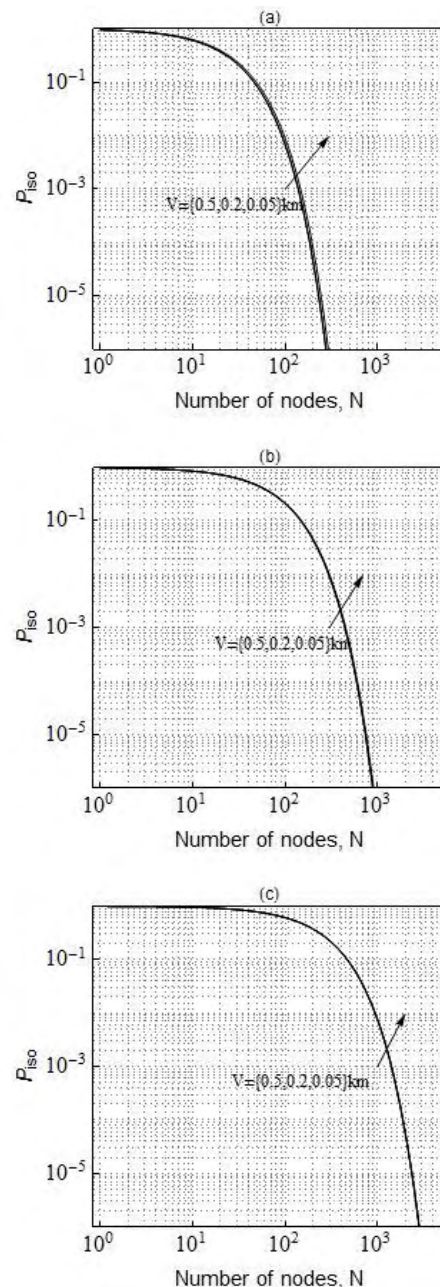
Σχήμα 6: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 4-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)10Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης S .

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η επίδραση της βροχής για το ίδιο εύρος τιμών του ρυθμού βροχόπτωσης. Όπως και στην περίπτωση της διαμόρφωσης OOK στα πιο χαμηλά επίπεδα βροχόπτωσης μια αύξηση του ρυθμού από 1Mbps σε 100Mbps οδηγεί σε υπερδιπλασιασμό του απαιτούμενου αριθμού πομποδεκτών ενώ περαιτέρω αύξηση σε 10Gbps οδηγεί σε περαιτέρω τριπλασιασμό προκειμένου να επιτευχθεί $P_{iso}=10^{-3}$. Αντίστοιχα ποσοστά αύξησης με την υιοθέτηση της διαμόρφωσης OOK παρατηρούνται στην άλλη ακραία περίπτωση του ρυθμού βροχόπτωσης. Σε σχέση με τη διαμόρφωση OOK ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων είναι μειωμένος κατά 20% για $R=2.5\text{mm/hr}$ και 13% για $R=90\text{mm/hr}$ για κάθε έναν από τους υιοθετούμενους ρυθμούς δεδομένων.



Σχήμα 7: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 4-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης R .

Τέλος, στο σχήμα 8 παρουσιάζεται η επίδραση της ομίχλης για διάφορες τιμές της ορατότητας V . Όπως στη διαμόρφωση ΟΟΚ η επίδραση της εξασθένισης της ομίχλης για κάθε ρυθμό δεδομένων είναι σχετικά μικρή καθώς επιδείνωση της ορατότητας οδηγεί σε μικρή αύξηση του απαιτούμενου αριθμού των κόμβων (~1-2%). Σε σχέση με τη διαμόρφωση ΟΟΚ ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων είναι μειωμένος κατά 30% περίπου τόσο ανά ρυθμό δεδομένων όσο και ανά επίπεδο ορατότητας.

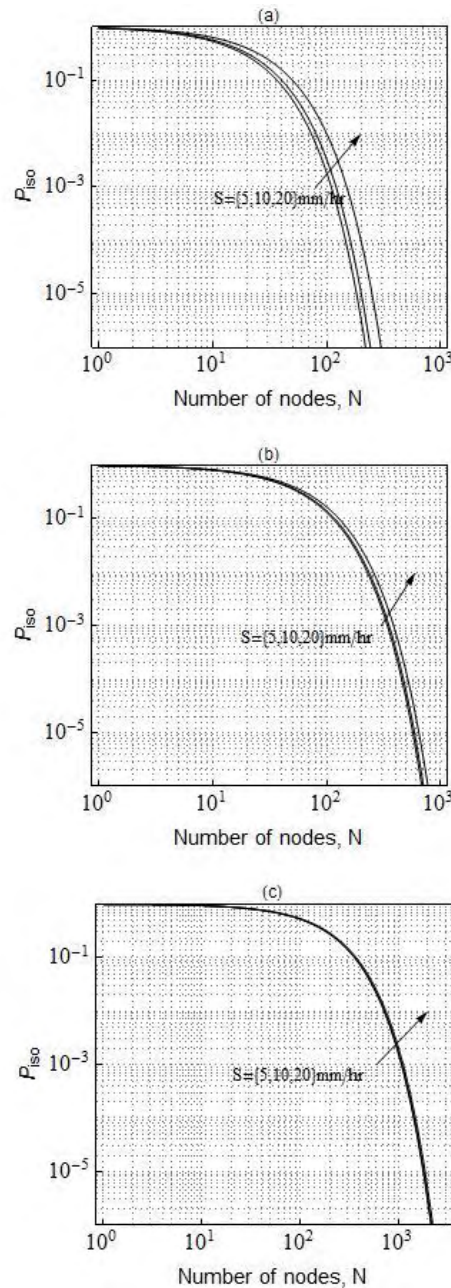


Σχήμα 8: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 4-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές της ορατότητας V .

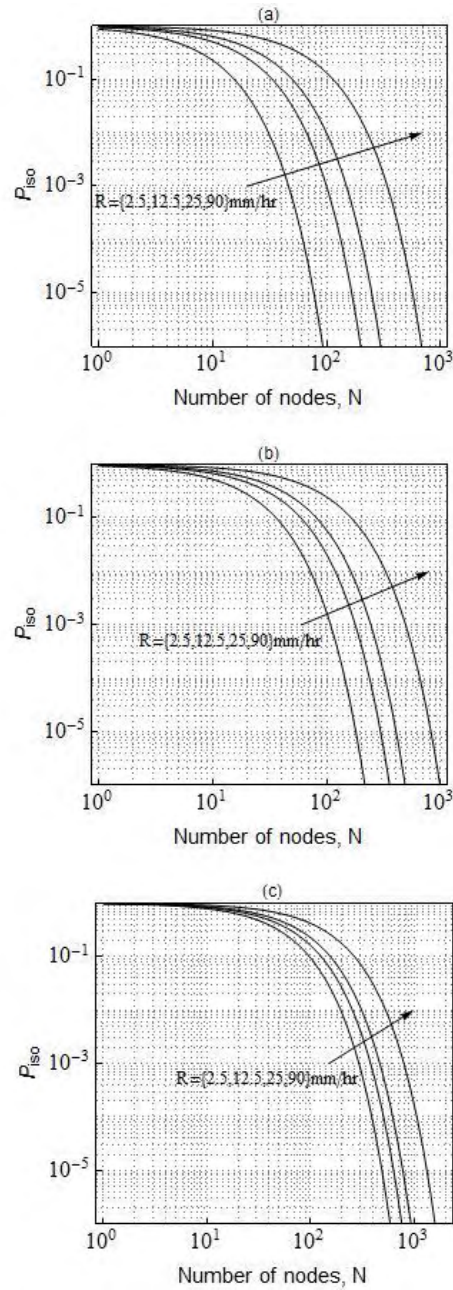
5.2.2 Διαμόρφωση 8-PPM

Στα Σχήματα 9, 10 και 11 παρουσιάζεται η επίδραση της διαμόρφωσης 8-PPM. Σε κάθε ένα από τα καιρικά φαινόμενα η επιμέρους εικόνα είναι παρόμοια με αυτή της

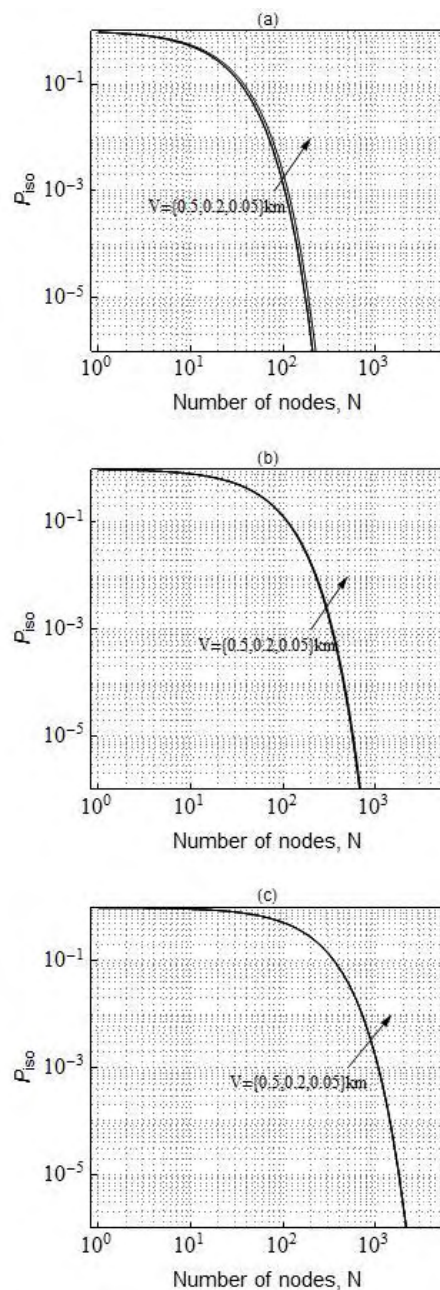
προηγούμενης παραγράφου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του 8-PPM μειώνει τον απαιτούμενο αριθμό πομποδεκτών προκειμένου να επιτευχθεί $P_{iso}=10^{-3}$ κατά 20% περίπου στην περίπτωση του χιονιού κατά 30% περίπου στην περίπτωση της βροχής και κατά 45% στην περίπτωση της ομίχλης.



Σχήμα 9: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 8-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού χιονόπτωσης S .



Σχήμα 10: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 8-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης R .

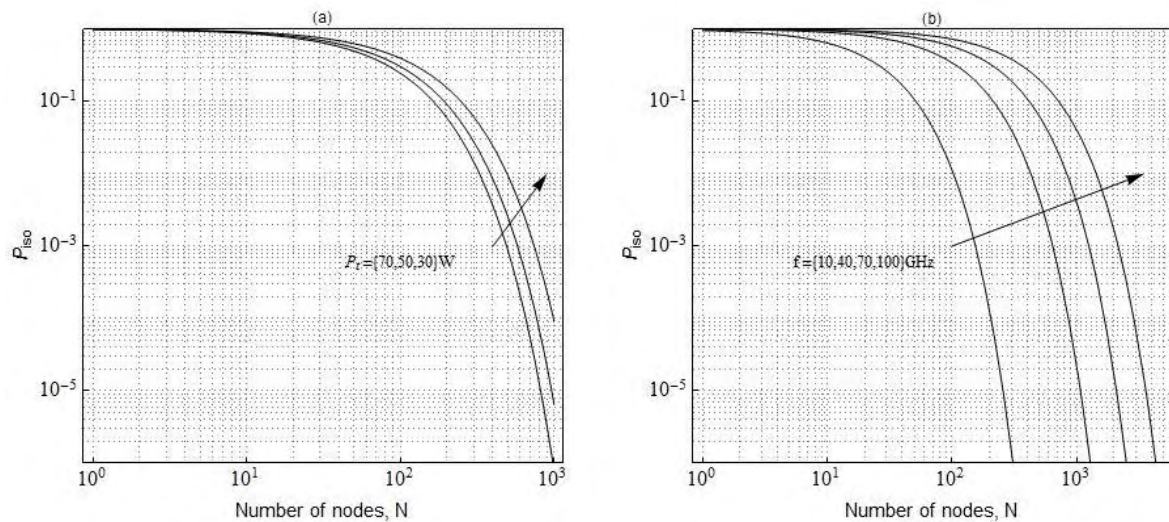


Σχήμα 11: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση 8-PPM, ρυθμούς (a)1Mbps, (b)100Mbps, (c)10Gbps και για διάφορες τιμές της ορατότητας V .

5.3 Επίδραση της ισχύος εκπομπής και της συχνότητας λειτουργίας

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση της ισχύος εκπομπής και της συχνότητας λειτουργίας του υπό εξέταση σειριακού πολυαλματικού δικτύου. Ως ενδεικτική περίπτωση εξετάζεται η επίδραση των δυο αυτών παραγόντων για διαμόρφωση OOK, ρυθμό 100Mbps υπό την επίδραση χιονιού με $S=10\text{mm/hr}$.

Στο σχήμα 12(α) έχει θεωρηθεί συχνότητα λειτουργίας τα 40GHz και η ισχύς εκπομπής μεταβάλλεται από 30W σε 70W. Η αύξηση της ισχύος από 30W σε 50W μειώνει κατά 21% περίπου τον απαιτούμενο αριθμό κόμβων ενώ περαιτέρω αύξηση από 50W σε 70W οδηγεί σε ακόμα επιπλέον μείωση κατά 16%.



Σχήμα 12: Πιθανότητα απομονωμένου κόμβου συναρτήσει του αριθμού των κόμβων για διαμόρφωση OOK, ρυθμό 100Mbps, για διάφορες τιμές (α) της ισχύος εκπομπής και (β) της συχνότητας λειτουργίας υπό την επίδραση χιονιού με $S=10\text{mm/hr}$.

Στο σχήμα 12(β) έχει θεωρηθεί ισχύς εκπομπής 40W και η συχνότητα λειτουργίας λαμβάνει τις τιμές $\{10, 40, 70, 100\} \text{ GHz}$. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 8 η εξασθένιση αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας και αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα αυτό. Η λειτουργία στα 100GHz απαιτεί 14 φορές περισσότερους κόμβους από ότι η λειτουργία στα 10GHz. Είναι μια ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος που σχετίζεται με τη σχεδίαση αλλά και τις επιδόσεις του πολυαλματικού δικτύου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του υπό εξέταση πολυαλματικού δικτύου και προτείνονται μελλοντικές προεκτάσεις.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η τυπική δομή και τα βασικά δομικά του μέρη ενός ασύρματου δικτύου. Περιγράφηκαν συνοπτικά οι μηχανισμοί διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς και δύο από τα πιο δημοφιλή σχήματα διαμόρφωσης. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα εμπειρικά μοντέλα απωλειών λόγω της βροχής, της ομίχλης και του χιονιού καθώς και οι βασικές παράμετροί τους ενώ υπολογίστηκε η εξασθένιση καθώς και η ελάχιστη εμβέλεια μιας ζεύξης για τα δυο βασικά σχήματα διαμόρφωσης. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε το υιοθετούμενο μοντέλο κατανομής των θέσεων των κόμβων το οποίο θεωρεί ότι το πλήθος τους είναι πεπερασμένο (μοντέλο BPP), διατυπώθηκε ο ορισμός της πιθανότητας απομονωμένου κόμβου και υπολογίστηκε η κλειστή μορφή της. Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα της πιθανότητας απομονωμένου κόμβου συναρτήσει τόσο των παραμέτρων των μετεωρολογικών συνθηκών όσο και παραμέτρων λειτουργίας του δικτύου (σχήματα διαμόρφωσης, υποστηριζόμενος ρυθμός δεδομένων, ισχύς εκπομπής, συχνότητα λειτουργίας).

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Σε χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων η επίδραση της βροχής και του χιονιού είναι πιο σημαντική από την επίδραση της ομίχλης. Όσο μεγαλώνει ο υποστηριζόμενος ρυθμός δεδομένων (και επομένως μικραίνει η αντίστοιχη εμβέλεια) η επίδραση όλων των καιρικών φαινομένων γίνεται σχεδόν ίδια.
- Η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης είναι ένας ακόμα πολύ κρίσιμος παράγοντας. Η μετάβαση από το απλό σχήμα ΟΟΚ στο πιο εύρωστο 8-PPM μπορεί να μειώσει ακόμα και 50% τον απαιτούμενο αριθμό των κόμβων. Επομένως ακόμα πιο σύνθετα σχήματα διαμόρφωσης σε συνδυασμό ιδιαίτερα με σχήματα κωδικοποίησης θα δώσουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.
- Η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας παίζει καθοριστικό ρόλο. Όσο μικρότερη είναι τόσο μικρότερη είναι και η εξασθένιση άρα τόσο λιγότεροι κόμβοι χρειάζονται για να καλυφθεί μια δεδομένη απόσταση. Επομένως κατά τη φάση σχεδίασης ενός τέτοιου δικτύου η επιλογή αυτής της παραμέτρου είναι πολύ σημαντική.
- Η ισχύς εκπομπής δεν είναι τόσο καθοριστική καθώς ακόμα και διπλασιασμός της επιφέρει μικρή σχετικά μείωση του απαιτούμενου αριθμού των κόμβων. Λαμβάνοντας υπόψη και άλλες δυσκολίες που επιφέρει μια μεταβολή της ισχύος εκπομπής συμπεραίνουμε ότι η παράμετρος αυτή μάλλον θα παραμένει σταθερή κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου δικτύου.

Στη συνέχεια συνοψίζονται πιθανές επεκτάσεις της μελέτης αυτής. Η υιοθέτηση πιο αποδοτικών σχημάτων διαμόρφωσης ή/και κωδικοποίησης που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία μπορεί να αυξήσει σημαντικά την εμβέλεια κάθε κόμβου και να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα. Επιπλέον, η μελέτη της από κοινού επίδρασης των καιρικών φαινομένων και της σκίασης/πολυδιόδευσης θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη για τη συνολική επίδραση του καναλιού στη συνδεσιμότητα ενός τέτοιου δικτύου. Τέλος, η μελέτη ενός

υβριδικού μικροκυματικού/οπτικού σειριακού πολυαλματικού δικτύου θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη αφού τέτοια δίκτυα υιοθετούνται όλο και πιο συχνά τα τελευταία χρόνια προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που αντιμετωπίζει κάθε τεχνολογία ξεχωριστά από τα μετεωρολογικά φαινόμενα.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] A. Goldsmith, Wireless communications, Cambridge University Press, 2005.
- [2] Γ. Καραγιαννίδης και Κ. Πάππη, Τηλεπικοινωνιακά συστήματα, Τζιόλας, 2016.
- [3] Recommendation P.676-3, «Attenuation by atmospheric gases,» ITU, 1997.
- [4] Recommendation P.840-3, «Attenuation due to clouds and fog,» ITU, 1999.
- [5] Recommendation P.838-1, «Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,» ITU, 1999.
- [6] R. K. Crane, «Prediction of attenuation by rain,» *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1717-1733, Sep. 1980.
- [7] T. Oguchi, «Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors,» σε *Proc. of IEEE* , 1983.
- [8] M. Haenggi, «On distances in uniformly random networks,» *IEEE Trans. Inf. Theory*, pp. 3584-3586, October 2005.
- [9] C. Bettstetter, «On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network,» σε *Proc. ACM MobiHoc*, Lausanne, Switzerland, 2002.
- [10] S. Srinivasa and M. Haenggi, «Distance distributions in finite uniformly random networks: theory and applications,» *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pp. 940-949, Feb. 2010.
- [11] P. Kruse, L. McGlauchlin και R. McQuistan, Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection, Wiley, 1962.