



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης Ηλεκτρονικής και Ραδιοηλεκτρολογίας

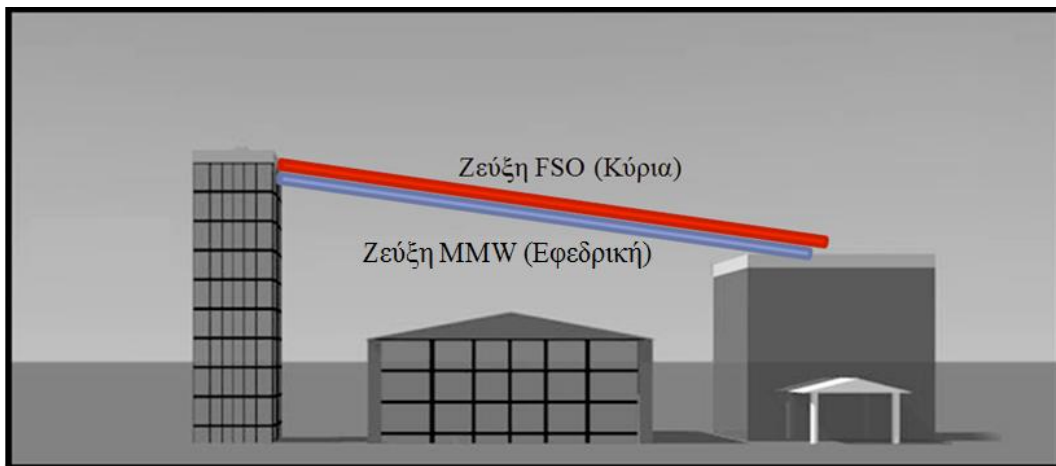
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Απόδοση Υβριδικών Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων

FSO/MMW Και Παράγοντες Που Την Επηρεάζουν

Κόκκορης Παναγιώτης

A.M. : 2009106



Επιβλέποντες : Ε.Ε. Νισταζάκης, Επικ. Καθηγητής
Γ.Σ. Τόμπρας, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2011

Η Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Απόδοση Υβριδικών Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων FSO/MMW Και Παράγοντες Που Την Επηρεάζουν» εκπονήθηκε, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011, στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην Ηλεκτρονική και τη Ραδιοηλεκτρολογία (P/H). Η συγγραφή της Εργασίας έγινε σε συνεργασία με τον μεταπτυχιακό φοιτητή Λάμπρη Γεώργιο και υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Νισταζάκη Ε.Ε. και του Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, Τόμπρα Γ.Σ..

Abstract

In the recent years, the continuously growing demand of the consumers, for higher data rates has guided the interest of the scientific community towards new technologies that would satisfy these demands. Although optic fiber has been proven to be the best solution for covering long distances, there has been debate for the best last mile solution. The two most promising solutions are the use of optic fiber as far as the client premises and the use of a free space optics (FSO) system to cover the same distance.

Although the optic fiber is very promising due to the stable low-loss guided propagation path, most of the times it turns out to be really expensive, time wasting and therefore impractical to lay down fibers. On the other hand, a FSO system is cheaper and much easier to deploy. Unfortunately, the channel used by these systems is rapidly changing due to the weather conditions and the turbulence fading. These parameters have great influence on the reliability and the efficiency of the link. In some cases, such as in the presence of dense fog, the communication is completely impossible by using an FSO link.

The solution to this drawback is the deployment of a Millimeter Wave link which will work in cooperation with the FSO one. The MMW link is immune to dense fog but appears to have severe problems in the presence of heavy rain. This Hybrid FSO/MMW system uses the FSO link as the main communication system for most of the running time and has the MMW as a backup. The fact that these two links present problems in different atmospheric conditions, results in an increased availability of the hybrid system. Nevertheless, the performance is hindered due to the lower data rates that can be achieved by the use of the MMW link.

In this Thesis we consider the parameters that affect the performance of a Hybrid FSO/MMW communication system, emphasizing on the properties of the MMW link.

Especially, we consider the absorption of the millimeter wave by the oxygen molecules in the atmosphere and the presence of rain. Moreover, we present a statistical representation of fading channels due to multipathing and atmospheric turbulence, focusing and analyzing the Nakagami-q and Nakagami-m models. Also, by using the Weibull model we estimate the average capacity of the MMW link and we present the overall capacity of the Hybrid FSO/MMW system.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση από τους καταναλωτές, για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων οδήγησε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας προς νέες τεχνολογίες οι οποίες θα ικανοποιούσαν αυτές τις απαιτήσεις. Μολονότι η οπτική ίνα αποδείχθηκε πως είναι η καλύτερη λύση για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων, υπάρχει μια συζήτηση για την καλύτερη λύση όσον αφορά το τελευταίο μίλι. Οι δύο πιο υποσχόμενες λύσεις είναι η χρήση οπτικής ίνας μέχρι την ιδιοκτησία του καταναλωτή και η χρήση ενός συστήματος οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου (Free Space Optics – FSO) για την κάλυψη αυτής της απόστασης.

Αν και η οπτική ίνα είναι πολλά υποσχόμενη λόγω του σταθερού και με χαμηλές απώλειες μονοπατιού διάδοσης, τις περισσότερες φορές αποδεικνύεται πως η χρήση της είναι πολύ ακριβή, χρονοβόρα και τελική μη πρακτική. Από την άλλη, το σύστημα FSO είναι φθηνότερο και πολύ πιο εύκολο στην εγκατάσταση. Δυστυχώς, το κανάλι που χρησιμοποιείται από αυτά τα συστήματα, μεταβάλλεται συνεχώς λόγω των καιρικών συνθηκών και της τυρβώδους ροής. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα της ζεύξης. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κατά την παρουσία πυκνής ομίχλης, επικοινωνία είναι εντελώς αδύνατη χρησιμοποιώντας μια ζεύξη FSO.

Η λύση για αυτό το μειονέκτημα είναι η χρήση μιας ζεύξης χιλιοστομετρικού κύματος (Millimeter Wave – MMW), η οποία θα λειτουργεί σε συνεργασία με την ζεύξη FSO. Η ζεύξη MMW δεν επηρεάζεται καθόλου από την ομίχλη, αλλά εμφανίζει σημαντικά προβλήματα κατά την παρουσία δυνατής βροχής. Αυτό το Υβριδικό σύστημα FSO/MMW χρησιμοποιεί τη ζεύξη FSO ως το κύριο σύστημα επικοινωνίας για τα μεγαλύτερα χρονικά

διαστήματα και έχει τη ζεύξη MMW ως βοηθητική. Το γεγονός πως αυτές οι ζεύξεις παρουσιάζουν προβλήματα κάτω από διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαθεσιμότητας του υβριδικού συστήματος. Ωστόσο, η απόδοση του συστήματος υποβιβάζεται λόγω των χαμηλότερων ρυθμών δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν κάνοντας χρήση της ζεύξης MMW.

Σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία, παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός Υβριδικού FSO/MMW συστήματος επικοινωνιών, δίνοντας έμφαση στις ιδιότητες της ζεύξης MMW. Ειδικότερα, εξετάζεται η απορρόφηση που υφίσταται το χιλιοστομετρικό κύμα λόγω των μορίων οξυγόνου στην ατμόσφαιρα και λόγω της παρουσίας βροχής. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια στατιστική αναπαράσταση των καναλιών με διαλείψεις λόγω πολυδιάθρυσης και τυρβώδους ροής, εστιάζοντας και αναλύοντας τα μοντέλα Nakagami-q και Nakagami-m. Επίσης, κάνοντας χρήση του μοντέλου Weibull γίνεται μια πρόβλεψη της μέσης χωρητικότητας της ζεύξης MMW και παρουσιάζεται η ολική χωρητικότητα του υβριδικού συστήματος FSO/MMW.

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Σχημάτων	iii
Κατάλογος Πινάκων.....	v
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Ιστορική Αναδρομή	1
1.2. Παρούσα Κατάσταση.....	4
2. ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ... 7	7
2.1. Εισαγωγή.....	7
2.2. Υβριδικά Συστήματα FSO/RF: Μια νέα προσέγγιση του προβλήματος.....	9
2.2.1. Ισολογισμός Ισχύος συστήματος FSO.....	9
2.2.2. 60 GHz Χιλιοστομετρικά Κύματα και Εξασθένηση Βροχής	12
2.3. Πέντε εννιάρια (“five nines”)	16
2.4. Εφεδρικός ελεγκτής Ζεύξης Link και Συστημάτων HFR.....	17
2.5. Αποτελέσματα HFR για Μαζική Εκδήλωση Ομίχλης 300 dB/km.....	20
2.6. Βέλτιστη επιλογή εφεδρικού συστήματος FSO.....	22
3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	25
3.1. Σκέδαση	27
3.2. Απορρόφηση	30
3.3. Φαινόμενα Τυρβώδους Ροής.....	33
4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΟΥ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	39
4.1. Απορρόφηση του μορίου του Οξυγόνου (O ₂).....	41
4.2. Απορρόφηση που οφείλεται στα υπόλοιπα αέρια.....	44
4.3. Εξασθένηση λόγω βροχής.....	45
4.4. Επηρεασμός της ζεύξης MMW από την ομίχλη.....	51
4.5. Λόγοι χρήσης των συχνοτήτων 60 και 90 GHz για τη λειτουργία του MMW υποσυστήματος	52

5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕ ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ.....	53
5.1. Μοντέλο Rayleigh.....	55
5.2. Μοντέλο Nakagami-q (Hoyt).....	55
5.3. Μοντέλο Nakagami-n (Rice) [30].....	55
5.4. Μοντέλο Weibull και εκτίμηση χωρητικότητας.....	56
5.4.1. Το μοντέλο του καναλιού	62
5.5. Μοντέλο Nakagami-m	66
5.5.1. Ολοκληρωτικά χαρακτηριστικά της κατανομής.....	67
5.5.2. Ολοκληρωτικά χαρακτηριστικά της Nakagami- m κατανομής.....	69
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Υβριδικό σύστημα FSO/RF που χρησιμοποιεί ραδιοσυχνότητες σε περίπτωση πυκνής ομίχλης	5
Σχήμα 2.1 Ρυθμός βροχής και εξασθένιση σε χιλιοστομετρικές συχνότητες.....	14
Σχήμα 2.2 Εύρος Επιδόσεων για ένα Σύστημα των 60GHz σε μία περιοχή με ισχυρή βροχή.	15
Σχήμα 2.3 Εμβέλεια συστήματος MMW και υβριδικού συστήματος FSO/MMW για διάφορες περιοχές βροχής	16
Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργικότητας του RLC [9].....	18
Σχήμα 2.5 Εφεδρικές διαδρομές και δυνατότητα ανακατεύθυνσης χρησιμοποιώντας τον RLC	19
Σχήμα 2.6 Πρωτότυπο Σύστημα HFR. Το παραβολικό πιάτο έχει 13 ίντσες διάμετρο.....	21
Σχήμα 2.7 Μια βαριά εξασθενημένη ομίχλη στην Poway, CA στο AirFiber, Inc 760-μέτρα εμβέλεια σε εξωτερικό χώρο της πειραματικής μονάδας.....	21
Σχήμα 2.8 Μερικά στατιστικά στοιχεία BER για το πρωτότυπο HFR σύστημα	22
Σχήμα 2.9 Υβριδικό σύστημα FSO/MMW, όπου η ζεύξη FSO είναι η κύρια και η ζεύξη MMW είναι η εφεδρική.....	23
Σχήμα 3.1 Σκέδαση φωτός από προκληθείσα διπολική ροπή λόγω προσπίπτοντος H/M κύματος.....	27
Σχήμα 3.2 Βαθμός απόδοσης απόσβεσης ως συνάρτηση της παραμέτρου μεγέθους.....	31
Σχήμα 3.3 Βαθμός απόδοσης απορρόφησης ως συνάρτηση της παραμέτρου μεγέθους	32
Σχήμα 3.4 Τυπικές τιμές της σταθεράς δομής του δείκτη διάθλασης C_n^2 το καλοκαίρι.....	37
Σχήμα 4.1 Ατμοσφαιρική εξασθένιση (dB/Km) συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας (GHz).....	41

Σχήμα 4.2 Εξασθένηση λόγω οξυγόνου (dB/Km) συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας (GHz).....	43
Σχήμα 4.3 Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης συναρτήσει της συχνότητας.....	47
Σχήμα 4.4 Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης.....	50
Σχήμα 5.1 Γραφική παράσταση πιθανότητας Weibull συναρτήσει του ρυθμού δεδομένων..	58
Σχήμα 5.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.....	60
Σχήμα 5.3 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής	60
Σχήμα 5.4 Συμπληρωματική Αθροιστική Συνάρτησης Κατανομής πειραματικών μετρήσεων και κατανομής Weibull για κανάλια εξωτερικού χώρου.....	62
Σχήμα 5.5 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ) της Nakagami-m	70
Σχήμα 5.6 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής (ΑΣΚ) της Nakagami-m	70
Σχήμα 5.7 Η ΣΠΠ της κατανομής Nakagami-m σε συνάρτηση με το z , σε λογαριθμική κλίμακα, για την περίπτωση που $m=2$, με το Ω να παίρνει τιμές από το 1 έως το 15	71
Σχήμα 5.8 Η ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με το Ω , σε λογαριθμική κλίμακα, για $m=2$, και το z να παίρνει τιμές από 0.5 έως 2.....	73
Σχήμα 5.9 Η ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με το z , σε λογαριθμική κλίμακα, για $m=0.7$, με το Ω να παίρνει τιμές από 0.5 έως 2.....	75
Σχήμα 5.10 Η ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με το z , σε λογαριθμική κλίμακα, για $m=2$, με το Ω να παίρνει τιμές από 0.5 έως 2.....	75
Σχήμα 5.11 Τα μέγιστα των ΣΠΠ Nakagami-m ως προς z , σε λογαριθμική κλίμακα, για διάφορες τιμές της παραμέτρου απωλειών m	76
Σχήμα 5.12 Τα μέγιστα των ΣΠΠ Nakagami-m ως προς Ω , σε λογαριθμική κλίμακα, για διάφορες τιμές της παραμέτρου απωλειών m	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Απλός προϋπολογισμός ζεύξης για σύστημα 60GHz χιλιοστομετρικού μήκους κύματος	13
Πίνακας 2.2 Διαθεσιμότητα, Ρυθμός Βροχής (mm/ώρα), Μέγιστη εμβέλεια για BER = 1×10^{-7}	15
Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές της εξασθένησης με τις αντίστοιχες ορατότητες	26
Πίνακας 4.1 Ποσοστά κατάληψης των αερίων O ₂ , O ₃ , N ₂ O, NO ₂ , NH ₃ , SO ₂ στη σύνθεση του ξηρού αέρα.....	44
Πίνακας 4.2 Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών N ₀ , λ από τους Joss, Thams και Waldvogel	46
Πίνακας 4.3 Τιμές των συντελεστών για τον υπολογισμό της εξασθένησης λόγω βροχής από σχέση (24)	49

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ιστορική Αναδρομή

Οι επικοινωνία μεταξύ δύο ατόμων που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, ήταν ανέκαθεν μια από τις σημαντικότερες ανάγκες και επιδιώξεις του ανθρώπου. Η μετάδοση ενός μηνύματος ή μιας πληροφορίας σε μακρινές αποστάσεις θεωρήθηκε ιδιαίτερος χρήσιμη. Αυτό αποδεικνύεται και από τις διάφορες μυθολογικές αναφορές, με πιο σημαντική αυτή στον θεό Ερμή, αγγελιοφόρο και πληροφοριοδότη των θεών.

Ο Enea il Tattico αναφέρεται, κατά τον τέταρτο αιώνα προ Χριστού, στην ύπαρξη του υδραυλικού τηλεγράφου, ο οποίος πιθανότατα ήταν μια εφεύρεση των Καρχηδονίων [1]. Ο Αισχύλος αναφέρει στην Ορεστιάδα ότι οι Αργοναύτες πληροφορήθηκαν σχετικά άμεσα την επικράτηση των Ελλήνων στον Τρωικό πόλεμο. Τα νέα κάλυψαν μια απόσταση 900 km, διερχόμενα από τις Κυκλάδες. Αυτό ήταν δυνατό να επιτευχθεί μέσω διαφόρων τρόπων, όπως κάνοντας χρήση της φωτιάς. Αργότερα η φωτιά αντικαταστάθηκε από μηχανικά ή άλλα συστήματα, ανάλογα με τη χρονική περίοδο και την γεωγραφική τοποθεσία [4].

Κατά τη διάρκεια του 16 και 17 αιώνα μ.Χ., στη Νότια Ιταλία, χρησιμοποιούνταν σήματα καπνού κατά τη διάρκεια της ημέρας και σήματα φωτιάς κατά τη διάρκεια της νύχτας, για την επικοινωνία απομακρυσμένων πύργων ή λόφων. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ένα σήμα καπνού σήμαινε παρουσία ενός εχθρικού πλοίου, ενώ τις νυχτερινές ώρες γινόταν χρήση μιας δέσμης ξηρών ξύλων, η οποία κινούταν πάνω κάτω για να ενημερώσει σχετικά με το αριθμό των εχθρικών πλοίων. [4]

Το 1792, ο Claude Chappe είναι ο πρώτος που παρουσιάζει τη χρήση μηχανικών συστημάτων για την δημιουργία οπτικών ασύρματων συστημάτων [2]. Το προτεινόμενο σύστημα βασιζόταν σε ένα ρυθμιστή, μήκους 4.5 μέτρων και πλάτους 0.35 μέτρων, με τον

οποίο συνδέθηκαν δύο δείκτες, ενώ η τοποθέτηση του έγινε στην κορυφή σταθμών οι οποίοι βρίσκονταν σε απόσταση 9 km μεταξύ τους και είχαν οπτική επαφή. Πλεονέκτημα του συστήματος ήταν πως πλέον ήταν εφικτή η ανταλλαγή πληροφοριών μέσα σε μερικά μόνο λεπτά, ενώ προηγουμένως απαιτούνταν ολόκληρες ημέρες. Μειονεκτήματα του συστήματος ήταν η απαίτηση για τηλεσκόπια και ανθρώπους, οι οποίοι θα αναλάμβαναν τη μετακίνηση του ρυθμιστή και των δεικτών. Η χρονική περίοδος χρήσης του οργάνου ήταν μικρή, επειδή το σύστημα ήταν σε θέση να λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και με καλές καιρικές συνθήκες. Η εφεύρεση του ηλεκτρικού τηλεγράφου από τον Morse το 1838 [3], επέφερε τον παραγκωνισμό του συστήματος του Chappe περίπου 1850.

Στη συνέχεια, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ο Alexander Graham Bell εφεύρε το Φωτόφωνο [4]. Ο Bell κατόρθωσε να διαμορφώσει τα ηχητικά σήματα της φωνής του, κάνοντας χρήση ενός οπτικοακουστικού μετασχηματιστή και ενός φακού ηλιακής δέσμης. Ο Bell χαρακτήρισε το Φωτόφωνο ως τη σημαντικότερη εφεύρεσή του και αν και δεν έγινε ποτέ εμπορική εκμετάλλευσή του, αποτέλεσε τη βάση των Οπτικών Επικοινωνιών.

Πλέον οι Οπτικές Επικοινωνίες γίνονται ένα πού σημαντικό πεδίο έρευνας για την επιστημονική κοινότητα παγκοσμίως. Η έρευνα αυτή επικεντρωνόταν σε διαφορετικούς τομείς με τη πάροδο των ετών. Οι τρεις βασικοί τομείς με βάση τη χρονική περίοδο είναι οι εξής:

- Στη δεκαετία του 1960 γίνεται η εμφάνιση της ιδέας της χρησιμοποίησης του λέιζερ για την επίτευξη ασύρματης επικοινωνίας
- Στη δεκαετία του 1990 γίνεται η εμφάνιση της ιδέας της χρησιμοποίησης του λέιζερ για την επίτευξη ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων, καθώς και αντίστροφα

- Μετά το 2000, τα συστήματα Οπτικών Επικοινωνιών ελευθέρου χώρου (Free Space Optics – FSO) αρχίζουν να χρησιμοποιούνται τόσο για πολιτικές όσο και για στρατιωτικές εφαρμογές, κάνοντας χρήση δίφορων μηκών κύματος από 1 έως 10 μm .

Επομένως, τα μέρη που συνιστούν ένα σύστημα FSO είναι εμφανές πως μελετούνται και χρησιμοποιούνται ήδη για τουλάχιστον σαράντα χρόνια, πρώτα για στρατιωτικές εφαρμογές και στη συνέχεια για εμπορικές.

Η υλοποίηση του πρώτου λέιζερ από τον Maiman το 1960 [5], έδωσε τη δυνατότητα να γίνουν εφικτές ασύρματες επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων στην ατμόσφαιρα. Τη δεκαετία του 1970, η δημιουργία οπτικών ινών μικρών απωλειών (κάτω από $20 \frac{\text{dB}}{\text{Km}}$) θα κάνουν εφικτές τις ενσύρματες οπτικές επικοινωνίες. Το 1968, ο Kube έκανε μια δημοσίευση που αποδείκνυε τη βιωσιμότητα των FSO επικοινωνιών λαμβάνοντας υπόψη πηγές λέιζερ στα 0.6 μm και στα 0.8 μm [4]. Το 1970, η δημιουργία, από τον Alferon, πηγών φωτός που στηρίζονται σε ημιαγωγούς και οι οποίες λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, έδωσαν την δυνατότητα ανάπτυξης συστημάτων FSO χαμηλού κόστους. Σε ερευνητικό επίπεδο, ο Capasso έκανε το 1994 το πρώτο πείραμα με χρήση κβαντικού λέιζερ καταρράκτη. Σήμερα αυτό μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα σημαντικό όταν γίνεται αναφορά σε μήκη κύματος μετάδοσης έως και 10 μm [4].

Πλέον, γίνεται έρευνα για χρήση συστημάτων οπτικών επικοινωνιών ελευθέρου χώρου για διαφορετικές εφαρμογές και σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Έτσι καλύπτεται πλέον ένα πολύ ευρύ φάσμα που εκτείνεται από υποθαλάσσιες επικοινωνίες έως την επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων και το διάστημα. Είναι ενδιαφέρον το εγχείρημα του προγράμματος Mars Laser Communication Demonstration (MLCD). Κατά την χρονική περίοδο μεταξύ των ετών 2003 και 2005, επιχειρήθηκε η κάλυψη της απόστασης μεταξύ της Γης και του πλανήτη Άρη

χρησιμοποιώντας ένα οπτικό παραμετρικό ενισχυτή με μέση απόδοση 5 Watts και ανιχνευτές καταμέτρησης φωτονίων που δούλευαν στα 1.06 μm [4].

1.2. Παρούσα Κατάσταση

Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών ελεύθερου χώρου (FSO) κάνουν χρήση του φως που διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο για τη μετάδοση δεδομένων σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα ή σε δίκτυα υπολογιστών. Ως ελεύθερος χώρος θεωρείται το κενό, το διάστημα, η ατμόσφαιρα ή οτιδήποτε παρόμοιο. Επομένως, τα συστήματα FSO δεν κάνουν χρήση στερεών μέσων όπως καλώδιο χαλκού ή οπτικής ίνας, για τη μετάδοση των δεδομένων. Η χρησιμότητα της τεχνολογίας αυτής έγκειται στο γεγονός πως φυσικές ζεύξεις ίσως να μην είναι εφικτές λόγω του υψηλού κόστους τους ή άλλων σκοπιμοτήτων.

Το μικρό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των συστημάτων FSO, τα έχουν καταστήσει ιδιαίτερα ελκυστικά τόσο στους ερευνητές όσο και στο καταναλωτικό κοινό. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη αποστολή και λήψη δεδομένων με πολύ μεγάλες ταχύτητες και με μεγάλη ασφάλεια. Σημαντικό πλεονέκτημα τους είναι επίσης πως δεν απαιτείται οποιαδήποτε αδειοδότηση για τη χρήση του απαιτούμενου εύρους συχνοτήτων, όπως συμβαίνει στα υπόλοιπα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Ωστόσο, η λειτουργία τους επηρεάζεται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες οι οποίες επικρατούν στο κανάλι επικοινωνίας μεταξύ πομπού δέκτη [6]. Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έγκειται στην εξέταση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των συστημάτων αυτών, κάτω από πραγματικές συνθήκες. Η τεχνολογία εφαρμόζεται στις επικοινωνίες πολύ υψηλών ταχυτήτων μεταξύ ακίνητων σημείων που βρίσκονται σε οπτική επαφή, μεταξύ κινητών σημείων με οπτική επαφή, σε επικοινωνίες εσωτερικού χώρου ανεξαρτήτως ύπαρξης ή μη οπτικής επαφής, καθώς και σε επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων [1], [2], [3], [4].

Μεγάλο μειονέκτημα των συστημάτων FSO είναι η αδυναμία λειτουργίας τους κάτω από συνθήκες πυκνής ομίχλης. Η λύση δόθηκε μέσω της χρήσης μιας βοηθητικής (backup) ζεύξης η οποία λειτουργεί στις μικροκυματικές συχνότητες. Η ζεύξη αυτή μπορεί να λειτουργεί απροβλημάτιστα υπό συνθήκες ομίχλης. Αυτό το υβριδικό σύστημα κάνει χρήση της συμπληρωματικής φύσης της ζεύξης FSO και της μικροκυματικής ζεύξης για να επιτύχει την βελτίωση των επιδόσεων του συνολικού συστήματος.



Σχήμα 1.1 Υβριδικό σύστημα FSO/RF που χρησιμοποιεί ραδιοσυχνότητες σε περίπτωση πυκνής ομίχλης [7]

Ο ρυθμός σφάλματος bit (Bit Error Rate, BER) είναι ένα πού σημαντικό χαρακτηριστικό του υβριδικού FSO/RF καναλιού αφού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις επιδόσεις του συστήματος. Οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάζουν στην εξαγωγή της επίδοσης Ρυθμού Σφάλματος Bit για τα υβριδικά συστήματα FSO / RF χρησιμοποιώντας το λόγο σήματος προς θόρυβο SNR. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται παρουσίαση αυτών των υβριδικών συστημάτων όσον αφορά τον τρόπο λειτουργίας τους και τις

δυνατότητες που παρέχουν. Επίσης, γίνεται μια αναλυτική μελέτη της απόδοσης και της αξιοπιστίας τους και την υποβάθμισή τους λόγω των διαλείψεων σήματος που οφείλονται στις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Τέλος, παρουσιάζονται οι παράγοντες που συντελούν στην εξασθένηση του διαδιδόμενου σήματος και δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην απορρόφηση που υφίσταται λόγω των μορίων οξυγόνου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα και την εξασθένηση λόγω της βροχής.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται παρουσίαση προβλήματος επιλογής του κατάλληλου συστήματος επικοινωνιών για την επίτευξη του τελευταίου τμήματος της σύνδεσης μεταξύ του παρόχου και της ιδιοκτησίας του καταναλωτή. Η απόσταση αυτή αν και ονομάζεται τελευταίο μίλι, μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες μέτρα ως και λίγα χιλιόμετρα, ειδικά στις αγροτικές περιοχές. Πέραν της εγκατάστασης δικτύου αποτελούμενου εξολοκλήρου από οπτικές ίνες, μοναδική υπαρκτή αυτή τη στιγμή λύση είναι η χρήση ενός υβριδικού συστήματος FSO/RF. Ένα τέτοιο σύστημα είναι μη αδειοδοτημένο, κάτι το οποίο σημαίνει πως η χρήση του απαιτούμενου φάσματος και κατ' επέκταση η ανάπτυξη του συστήματος μπορεί να γίνει ελεύθερα χωρίς να χρειάζεται να προπληρώσουν τα δικαιώματα του ραδιοφάσματος.

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας της ζεύξης, η οποία στην περίπτωση των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που καθορίζει την αξιοπιστία του συστήματος. Επίσης γίνεται εξαγωγή της αντίστοιχης κλειστής μαθηματικής έκφρασης για τον υπολογισμό της. Τέλος, γίνεται μια αναλυτική εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος όσον αφορά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία που μπορεί να προσφέρει, ενώ ακολουθούν κάποια σημαντικά εξαχθέντα συμπεράσματα.

2. ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΗ

2.1. Εισαγωγή

Η τεχνολογία του «τελευταίου μιλίου» (last mile) [8] είναι οποιαδήποτε τεχνολογία τηλεπικοινωνιών που μεταφέρει σήματα από τη γενική ραχοκοκαλιά των τηλεπικοινωνιών κατά μήκος της σχετικά μικρής απόστασης (για αυτό το λόγο ονομάζεται «τελευταίο μίλι») προς και από το σπίτι ή την επιχείρηση. Είναι κατά κάποιον τρόπο η υποδομή σε επίπεδο γειτονιάς.

Σε πολλές κοινότητες, η τεχνολογία του τελευταίου μιλίου αποτελεί μια σημαντική πρόκληση. Το κόστος της παροχής υψηλής ταχύτητας και υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης σε μεμονωμένους συνδρομητές σε απομακρυσμένες περιοχές, μπορεί να είναι υψηλότερο από αυτό που θα ήθελε ο πάροχος υπηρεσιών. Η τοποθέτηση καλωδίων και οπτικών ινών είναι μια δαπανηρή επένδυση που μπορεί να είναι περιβαλλοντικά απαιτητική και να απαιτεί υψηλή συντήρηση. Οι ειδικοί ευελπιστούν ότι η ευρυζωνική τεχνολογία ασύρματων δικτύων σε συνδυασμό με την οπτική ελεύθερου χώρου θα δώσει τελικά τη λύση και θα ικανοποιήσει τις ανάγκες του καθενός.

Σήμερα, το "τελευταίο μίλι" παραμένει ένα άλυτο δίλημμα για όλους τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς του κόσμου, παρά τις πολλές προσπάθειες στην αντιμετώπιση του προβλήματος [9].

Το DSL και οι καλωδιακοί αποδιαμορφωτές-μόντεμς ("modems") μπορούν, σε κάποιο βαθμό, να επωφεληθούν από τα υφιστάμενα ενσύρματα δίκτυα. Ωστόσο, δεν μπορούν να παρέχουν πραγματικές ευρυζωνικές υπηρεσίες με ένα ντετερμινιστικό τρόπο. Η τεχνολογία DSL μαστίζεται από την τοπολογία του χαλκού στην οποία στηρίζεται, και

περιορίζεται σε απόσταση (από το κεντρικό γραφείο) και χωρητικότητα (αρκετά Mbps). Τα καλωδιακά μόντεμ έχουν στη διάθεσή τους μεγαλύτερη χωρητικότητα, όμως το κανάλι είναι κοινόχρηστο και το ποσό του εύρους ζώνης σε κάθε δεδομένη στιγμή δεν είναι εγγυημένο.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι μη αδειοδοτημένες ασύρματες τεχνολογίες RF είναι περιορισμένης χωρητικότητας, και οι φορείς είναι απρόθυμοι να εγκαταστήσουν συστήματα που πιθανότατα να είχαν προβλήματα παρεμβολών. Οι αδειοδοτημένες ασύρματες τεχνολογίες RF μπορεί να προσφέρουν μεγάλη χωρητικότητα, αλλά η μη επαναλαμβανόμενη αρχική δαπάνη κεφαλαίου για τις άδειες φάσματος κάνει συνήθως το επιχειρηματικό μοντέλο να είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί. Επιπλέον, σε μία πόλη οι άδειες επιτρέπουν μόνο δύο φορείς να συμμετάσχουν.

Οι τεχνολογίες Οπτικής Ελεύθερου χώρου (FSO) προσφέρουν οπτική χωρητικότητα, αλλά συνήθως τοποθετούνται σε αποστάσεις κάτω του ενός χιλιομέτρου για λογική διαθεσιμότητα. Τα συστήματα αυτά έχουν ένα σημαντικό χρονικό – αγοραστικό πλεονέκτημα έναντι των οπτικών ινών. Η κατασκευή των ινών συνήθως διαρκεί από έξη έως εννέα μήνες, ενώ μία FSO ζεύξη μπορεί να λειτουργήσει μέσα σε λίγες μέρες.

Επίσης, η τεχνολογία χιλιοστομετρικού μήκους κύματος στα 60 GHz, είναι μη αδειοδοτημένη λόγω της απορρόφησης του οξυγόνου και μπορεί να έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από ότι συχνότητες σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Ωστόσο, είναι ευπαθής σε διακοπές σε περιοχές με «βαριά» βροχή και έτσι περιορίζεται σε εύρος (περίπου 400 μέτρα).

Θα πρέπει να αναφερθεί πως οι τεχνολογίες W-ζώνης μόλις τώρα αρχίζουν να βγαίνουν από το εργαστήριο και να είναι αδειοδοτημένες σε μία ζεύξη προς ζεύξη βάση. Ωστόσο, είναι πιθανό να αδειοδοτηθούν στο μέλλον λόγω των σχετικά καλών χαρακτηριστικών διάδοσής τους.

2.2. Υβριδικά Συστήματα FSO/RF: Μια νέα προσέγγιση του προβλήματος

Μια νέα λύση για το πρόβλημα του τελευταίου μιλίου χρησιμοποιεί τα πλεονεκτήματα των δύο αναφερόμενων τεχνολογιών για τον περιορισμό αμοιβαίως των αδυναμιών του άλλου. Τα Υβριδικά Συστήματα Οπτικής Ελεύθερου Χώρου / Ραδιοσυχνοτήτων (Hybrid FSO Radio (HFR)) συνδυάζουν την οπτική ελεύθερου χώρου και την τεχνολογία των 60GHz χιλιοστομετρικού κύματος (Millimeter Wave (MMW)) για την παροχή, για πρώτη φορά, ενός πραγματικού ρυθμού απόδοσης της τάξης 99.999% ασύρματων και χωρίς αδειοδότηση συστημάτων, τα οποία μπορεί να εκτείνονται σε αποστάσεις άνω του 1 χιλιομέτρου σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Η συνδυαστική τεχνολογία HFR είναι έτοιμη να βοηθήσει τους φορείς να εκμεταλλευτούν εύρος ζώνης έναντι του παρόντος δικτύου οπτικών ινών.

2.2.1. Ισολογισμός Ισχύος συστήματος FSO

Η εξίσωση ζεύξης για ένα οπτικό σύστημα ελεύθερου χώρου είναι πραγματικά πολύ απλή σε υψηλό επίπεδο (χωρίς να ληφθεί υπόψη προς το παρόν η οπτική απόδοση, οι θόρυβοι ανιχνευτή καθώς και διάφοροι άλλοι παράμετροι).

$$P_{\text{δέκτη}} = P_{\text{μετάδοσης}} \cdot \frac{A_{\text{δέκτη}}}{(Απόκλιση \cdot Εύρος)^2} \cdot \exp(-a \cdot Εύρος) \quad (1)$$

όπου:

$P_{\text{δέκτη}}$: η ληφθείσα ισχύς

$P_{\text{μετάδοσης}}$: η ισχύς μετάδοσης

$A_{\text{δέκτη}}$: η περιοχή δέκτη

a : ο συντελεστής εξασθένησης (1/ km)

$Εύρος$: μήκος ζεύξης σε km

Η εξίσωση (1) δείχνει ότι το ποσό της ληφθείσας ισχύος $P_{δέκτη}$ είναι ανάλογο του διαβιβασθέντος ποσού της ισχύος $P_{μετάδοσης}$ και της περιοχής συλλογής. Είναι αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της απόκλισης δέσμης και του τετραγώνου του εύρους της ζεύξης. Επίσης, είναι αντιστρόφως ανάλογο με το εκθετικό του συντελεστή ατμοσφαιρικής εξασθένησης (σε μονάδες 1/απόσταση) και του εύρους ζεύξης.

Όπως φαίνεται σε αυτήν την εξίσωση, οι μεταβλητές που μπορεί να ελεγχθούν είναι η ισχύ μετάδοσης, το λαμβανόμενο μέγεθος ανοίγματος, η απόκλιση της δέσμης και το εύρος της ζεύξης. Η τιμή του συντελεστή ατμοσφαιρικής εξασθένησης είναι μη ελεγχόμενη σε ένα εξωτερικό περιβάλλον και είναι σχεδόν ανεξάρτητη από το μήκος κύματος σε βαριές συνθήκες εξασθένησης. Δυστυχώς, η λαμβανόμενη ισχύς είναι εκθετικά εξαρτημένη από το γινόμενο του συντελεστή ατμοσφαιρικής εξασθένησης και του εύρους. Σε πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και για αποτελέσματα που ικανοποιούν αρκετά τις ανάγκες του φορέα (δηλαδή, διαθεσιμότητες 99.9% ή και καλύτερα), ο όρος αυτός υπερισχύει στην εξίσωση. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιαστής του συστήματος μπορεί να επιλέξει να χρησιμοποιήσει μετάδοση τεράστιας ισχύος λέιζερ, σχεδιασμό μεγάλων ανοιγμάτων, και να εφαρμόσει πολύ μικρές αποκλίσεις δέσμης, αλλά το ποσό της ληφθείσας ισχύος θα παραμείνει ουσιαστικά αμετάβλητο.

Σε συνθήκες ομίχλης, το κομμάτι της ατμοσφαιρικής απώλειας στην εξίσωση ζεύξης δεσπόζει σε διάφορες τάξεις μεγέθους, ουσιαστικά ξεπερνώντας οποιαδήποτε σχεδιαστική επιλογή του συστήματος που θα μπορούσε να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα. Για τις ζεύξεις, που προορίζονται να φέρουν επιθυμητά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου, το γεγονός αυτό πρέπει να αποδεχθεί και πρέπει να ληφθεί υπόψη για το σχεδιασμό του δικτύου. Η μόνη άλλη μεταβλητή, υπό την επίβλεψη του σχεδιαστή, είναι το εύρος ζεύξης, το οποίο πρέπει να διατηρηθεί αρκετά μικρό ώστε η ατμοσφαιρική εξασθένηση

να μην είναι ο κυρίαρχος όρος στην εξίσωση ζεύξης. Όπως θα συζητηθεί σε επόμενη ενότητα, αυτό υποδηλώνει ότι το εύρος ζεύξης πρέπει να είναι μικρότερο από 500 m ώστε τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα να είναι κατανοητά. Στο πλαίσιο αυτού του περιορισμού, μπορούν να παραχθούν αποτελεσματικά σχέδια τα οποία να παρέχουν οικονομική και αξιόπιστη λειτουργία.

Το βασικό κομμάτι για τους φορείς ανάπτυξης οπτικών συστημάτων ελεύθερου χώρου είναι η διαθεσιμότητα του συστήματος. Η διαθεσιμότητα του συστήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η αξιοπιστία του εξοπλισμού και του δικτύου σχεδιασμού, αλλά αυτά είναι αρκετά γνωστά και επαρκή. Το μεγαλύτερο άγνωστο στοιχείο είναι η στατιστική φύση της ατμοσφαιρικής εξασθένησης. Όλα, σχεδόν, τα μεγάλα αεροδρόμια σε όλο τον κόσμο διατηρούν στατιστικά στοιχεία ορατότητας (τα οποία μπορεί να μετατραπούν σε συντελεστές εξασθένησης). Η χωρική κλίμακα μετρήσεων ορατότητας κυμαίνεται συνήθως ανά 100 μέτρα περίπου και η χρονική κλίμακα είναι σπάνια (ανά μία ώρα, στις περισσότερες περιπτώσεις). Με αυτές τις χωρικές και χρονικές κλίμακες, οι εκτιμήσεις της διαθεσιμότητας για αξιόπιστα αποτελέσματα (99.9% ή καλύτερα) περιορίζονται στο 99,9% ή χειρότερα. Αυτές οι τεράστιες βάσεις δεδομένων δεν είναι επομένως χρήσιμες για εκτιμήσεις, εκτός από το κατώτατο αποδεκτό βαθμού απόδοσης παροχής υπηρεσιών. Προκειμένου να καταστούν δυνατές λογικές συμφωνίες για τους φορείς σε επίπεδο υπηρεσιών, είναι απαραίτητη η βελτίωση των δεδομένων. Η AirFiber έχει αναπτύξει μέσα ικανά να αποκτήσουν αυτά τα δεδομένα και να λειτουργούν συνεχώς για αρκετά χρόνια. Τα μέσα αυτά, τα οποία περιλαμβάνουν ένα νεφελόμετρο και ένα σύστημα αναφοράς για τον καιρό, παρέχουν δεδομένα στη σωστή χωρική και χρονική ανάλυση για ακριβείς εκτιμήσεις της διαθεσιμότητας και του εύρους ζεύξης που πρέπει να γίνουν.

Σε αυτό το σημείο μπορεί να ειπωθεί με σαφήνεια, και από στοιχεία που συλλέγονται από διάφορους κατασκευαστές και ειδικούς, όπως η AirFiber [9], πως για την

πλειονότητα των πόλεων σε όλο τον κόσμο, η αξιόπιστη (carrier-class) απόσταση (όπως ορίζεται από τη διαθεσιμότητα κατά 99.9% ή καλύτερα) για τα συστήματα FSO είναι μικρότερη από 500 μέτρα. Επιπλέον, παρά τις πολυάριθμες αξιώσεις, όλοι οι προμηθευτές των οπτικών συστημάτων ελεύθερου χώρου, έχουν περίπου την ίδια απόδοση σε εύρος σε αξιόπιστες συνθήκες (99.9% ή καλύτερα) λόγω της πλήρους κυριαρχίας της εξίσωσης του προϋπολογισμού ζεύξης από τον παράγοντα της ατμοσφαιρικής εξασθένησης σε καταστάσεις υψηλής εξασθένησης. Τέλος, το μήκος κύματος δεν έχει ουσιαστικά καμία επίδραση στο εύρος διάδοσης υπό ιδανικές προϋποθέσεις για μήκη κύματος από το ορατό μέχρι τη χιλιοστομετρική κλίμακα μήκους κύματος (RF).

2.2.2. 60 GHz Χιλιοστομετρικά Κύματα και Εξασθένηση Βροχής

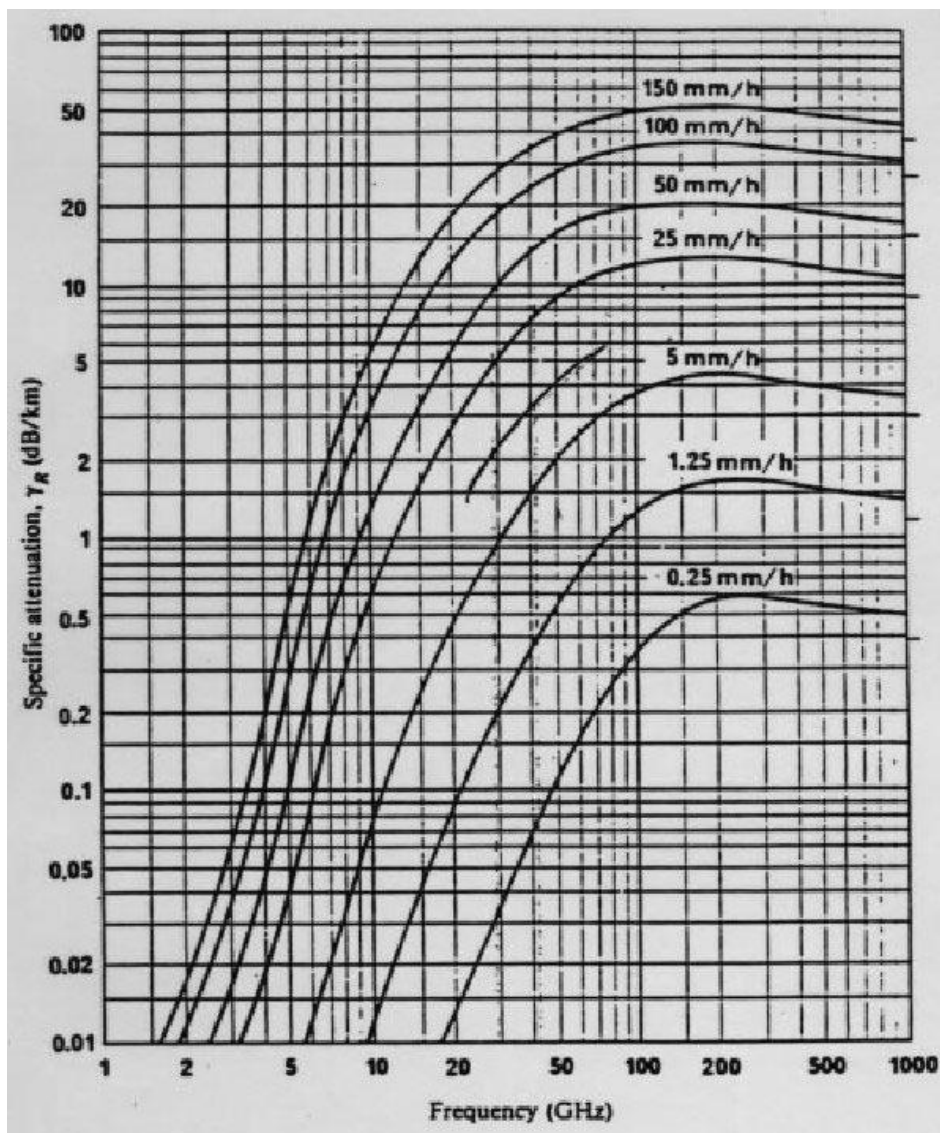
Η εξίσωση ζεύξης για ένα χιλιοστομετρικό σύστημα μπορεί να γραφτεί με τον ίδιο τρόπο όπως σε ένα FSO σύστημα. Υπάρχουν τρεις συνιστώσες απωλειών: απώλεια ελεύθερου χώρου, απώλεια από αέρια, και απώλεια λόγω σκέδασης σωματιδίων, κατά κύριο λόγο από την βροχόπτωση. Ακριβώς όπως στα οπτικά συστήματα ελεύθερου χώρου, οι απώλειες ελεύθερου χώρου καθοδηγούνται από την ισχύ μετάδοσης, το μέγεθος του λαμβανόμενου ανοίγματος, και την απόκλιση δέσμης. Τα χιλιοστομετρικά συστήματα στα 60 GHz, περιορίζονται σε ισχύ εξόδου περίπου στα 500 mW (συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς) για μη αδειοδοτημένη λειτουργία. Οι σχεδιαστές του συστήματος είναι ελεύθεροι να επιλέξουν το μέγεθος της κεραίας, η οποία γενικά υπαγορεύει το κέρδος της. Το μέγεθος της κεραίας καθορίζει το ποσό των παρακολουθούμενων χιλιοστομετρικών μήκων κύματος ενέργειας και καθορίζει την απόκλιση πορείας, δεδομένου ότι το σύστημα είναι περιορισμένο από περίθλαση.

Το μόνο αέριο μοριακής απορρόφησης στα 60 GHz, είναι το οξυγόνο, το οποίο είναι σημαντικό. Απορρόφηση οξυγόνου στα 60 GHz, είναι περίπου 16 dB/km (κοντά στο επίπεδο της θάλασσας), η οποία φυσικά εξασθενεί το σήμα ανά πάσα στιγμή, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Αν και περιορισμένο στο εύρος, επιλέγεται αυτό το μήκος κύματος λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και της αδειοδότησης. Δεδομένου ότι η χιλιοστομετρικού μήκους κύματος ενέργεια απορροφάται τόσο εύκολα, υπάρχει μικρή πιθανότητα να υπάρχει αλληλοπαρεμβολή στα κανάλια-συστήματα. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην απόφαση να επιτρέψουν τη ζώνη συχνοτήτων στα 60 GHz να είναι μη αδειοδοτημένη. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη να μοιραστεί το φάσμα λόγω της φύσης της ατμόσφαιρας. Για τα περισσότερα λογικού μεγέθους συστήματα με μια κεραία διαμέτρου περίπου 13 ίντσες, χρειάζονται περίπου 1500 μέτρα καθαρού ουρανού (ο Πίνακας 2.1 δείχνει τις παραμέτρους ζεύξης προϋπολογισμού για το συγκεκριμένο σύστημα).

Ισχύς Μετάδοσης	P_t	10	dBm
Μεταδιδόμενο κέρδος	G_t	43	dB
Λαμβανόμενο Κέρδος	G_r	43	dB
Μήκος Κύματος	Lambda	0.005	m
Εύρος-Περιοχή	Εύρος	1500	m
Απορρόφηση Οξυγόνου	Απώλειες Καθαρού Αέρα	0.016	dB/m
	Άλλες Απώλειες (βροχή)	0	dB/m
Ισχύς Λήψης	P_r	-59.52662237	dBm
Ισοδύναμη Ισχύς Θορύβου Εισόδου	Nein	-78.20381423	dBm
Σήμα/Θόρυβος	S/N	18.67719185	dB
	Min S/N	18	dB
	Περιθώριο	0.67719185	dB
Παράγων Θορύβου	NF	11	dB
Εύρος Ζώνης	BW	300000000	Hz
	θερμοκρασία	290	K
Boltzmann	k	1.3807E-23	J/K
	Nein	-78.20381423	dBm

Πίνακας 2.1 Απλός προϋπολογισμός ζεύξης για σύστημα 60GHz χιλιοστομετρικού μήκους κύματος [9]

Δυστυχώς, η βροχή επηρεάζει τις επιδόσεις των 60GHz συστημάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές με αρκετή βροχή. Το Σχήμα 2.1 δείχνει τα ποσοστά βροχής και εξασθένησης ως συνάρτηση της συχνότητας σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος. Το Σχήμα 2.2 δείχνει την απόδοση της εμβέλειας ενός τυπικού 60GHz συστήματος για διάφορες περιοχές βροχής. Σε περιοχές έντονης βροχόπτωσης, η εμβέλεια-εύρος περιορίζεται σε λιγότερο από 500 μέτρα, παρόμοια σε τιμή με την επιβολή περιορισμών ομίχλης της FSO.

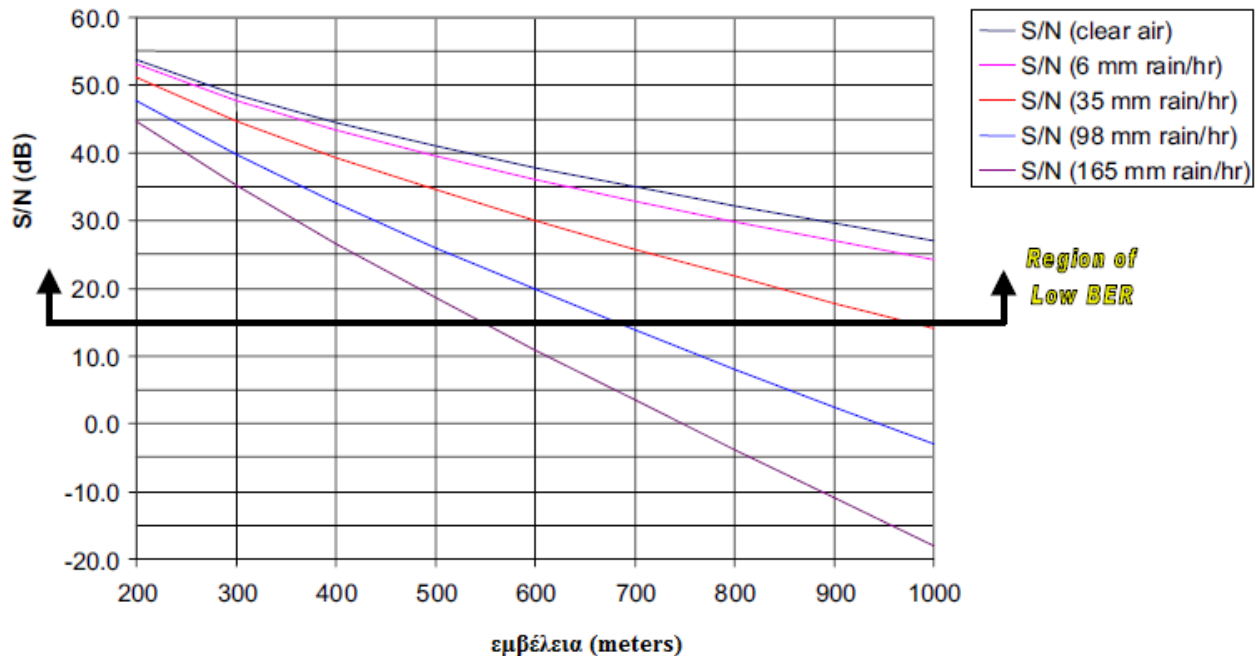


Από FCC Bulletin Number 70, July 1997.

Σχήμα 2.1 Ρυθμός βροχής και εξασθένηση σε χιλιοστομετρικές συχνότητες. [9]

S/N συναρτήσει των ποσοστών βροχής για ένα τυπικό σύστημα 60 GHz

FLORIDA



Σχήμα 2.2 Εύρος Επιδόσεων για ένα Σύστημα των 60GHz σε μία περιοχή με ισχυρή βροχή.[9]

Radio “up” Time % της Χρονιάς	Ρυθμός Βροχής mm/ώρα	Μέγιστη εμβέλεια για BER = 1×10^{-7}
99	6	1.345 μέτρα
99.9	35	973 μέτρα
99.99	98	681 μέτρα
99.999	165	545 μέτρα

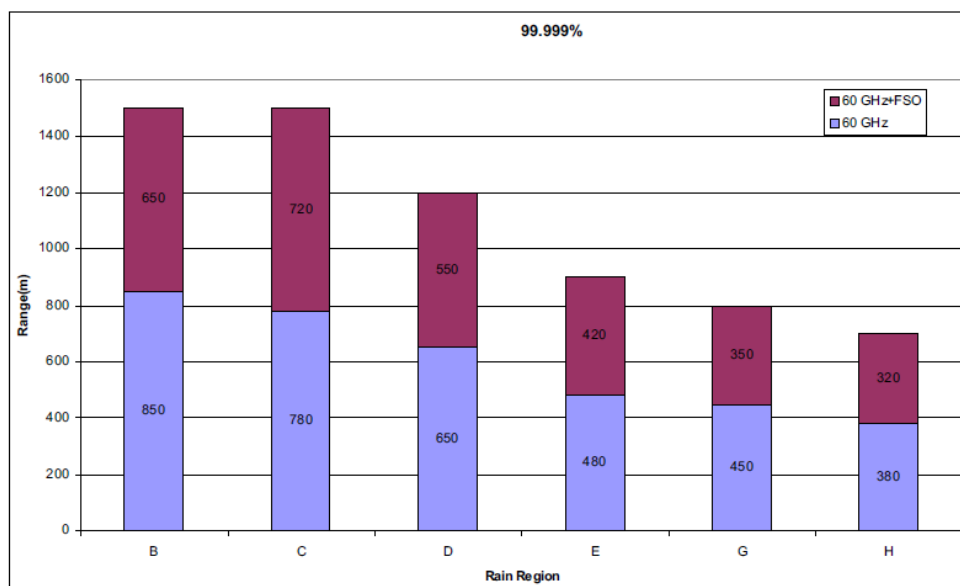
Πίνακας 2.2 Διαθεσιμότητα, Ρυθμός Βροχής mm/ώρα, Μέγιστη εμβέλεια για BER = 1×10^{-7}

Σε πολύ δυνατή βροχή, η μέγιστη εμβέλεια της ασύρματης ζεύξης των 60 GHz είναι περίπου 500 μέτρα.

2.3. Πέντε εννιάρια (“five nines”)

Όπως αναλύεται διεξοδικά στην [52], η χρήση ενός υβριδικού συστήματος FSO/RF βοηθάει στην επίτευξη καλύτερων επιδόσεων από ότι καθένα από τα δύο αυτά συστήματα ξεχωριστά. Αποδεικνύεται ότι η ομίχλη έχει μηδενική σχεδόν επίπτωση στη διάδοση ραδιοσυχνοτήτων και ότι αντίστοιχα η βροχή δεν αποτελεί πρόβλημα για τα FSO συστήματα.

Η διαθεσιμότητα που επιτυγχάνεται χάρις τη χρήση του υβριδικού συστήματος παρουσιάζει εκτεταμένη αυτονομία για ποσοστό διαθεσιμότητας της τάξεως του 99.999%. Ακριβείς προβλέψεις διαθεσιμότητας για ένα υβριδικό σύστημα είναι δυνατές. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα εμβέλειας για διαθεσιμότητα 99.999%. Το σύστημα των 60GHz εμφανίζεται με μπλε χρώμα και το HFR σύστημα εμφανίζεται με μωβ χρώμα.



Σχήμα 2.3 Εμβέλεια συστήματος MMW και υβριδικού συστήματος FSO/MMW για διάφορες περιοχές βροχής [9]

Ποιοτικά, το HFR έχει περίπου διπλάσιο εύρος από αυτό που έχει το υποσύστημα των 60GHz από μόνο του. Όσο μειώνεται το απαιτούμενο ποσοστό διαθεσιμότητας τόσο αυξάνεται η εμβέλεια του υβριδικού συστήματος. Το σύστημα HFR προσφέρει τον καλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, επιδόσεις σε εμβέλεια και στατιστική διαθεσιμότητα

από οποιοδήποτε μη αδειοδοτημένο ασύρματο σύστημα που έχει δημιουργηθεί μέχρι σήμερα [52].

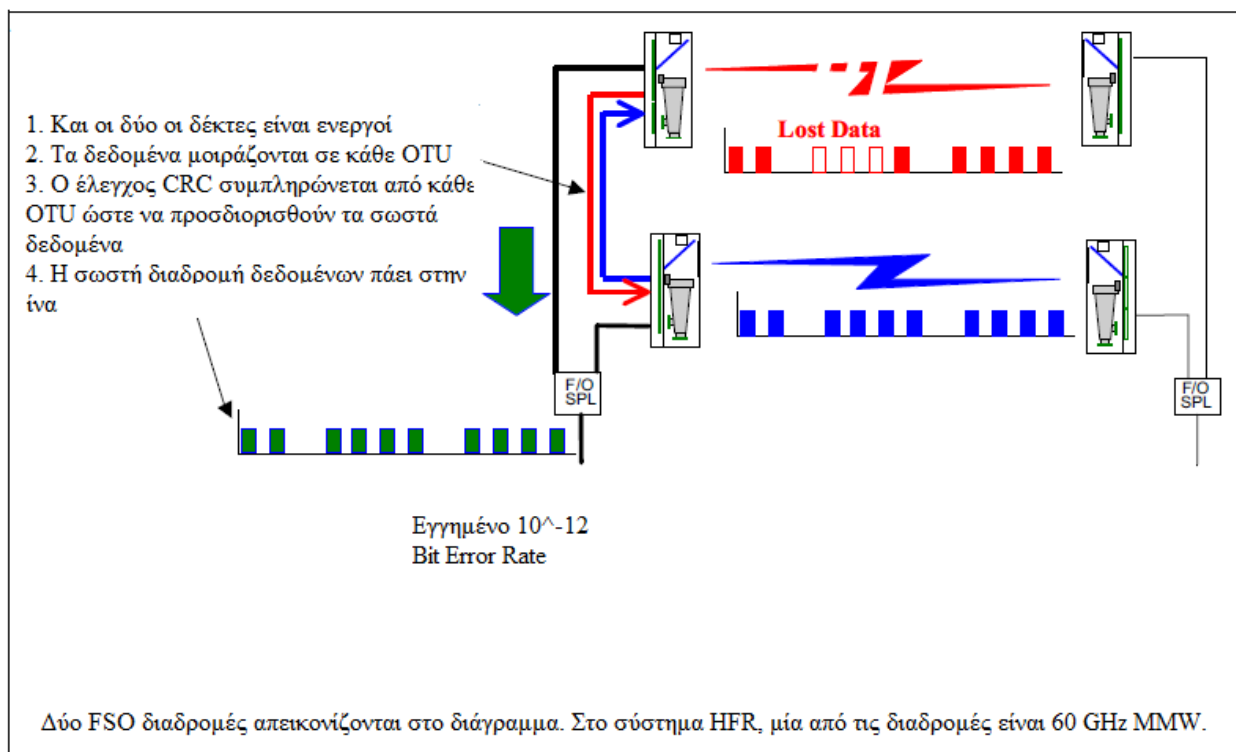
2.4. Εφεδρικός ελεγκτής Ζεύξης Link και Συστημάτων HFR

Η βέλτιστη τεχνική για την εφαρμογή ενός συστήματος HFR είναι η χρησιμοποίηση του εφεδρικού ελεγκτή ζεύξης Redundant Link Controller (RLC), μια καινοτόμα ευρεσιτεχνία της AirFiber. Το RLC εξυπηρετεί δύο λειτουργίες. Πρώτον, παρέχει στο σύστημα HFR μια δυνατότητα, που όταν οι συνθήκες διαδρομής είναι τέτοιες που η μία τεχνολογία αρχίζει να φθίνει και η άλλη αρχίζει να ανακάμπτει, τότε δεν χάνεται κανένα bit, ακόμα κι αν η διαδρομή εναλλάσσεται προς τα πίσω ραγδαία ή προς τα εμπρός εξαιτίας των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών ή άλλων εμποδίων σε κάθε διαδρομή.

Ένα σύνηθες παράδειγμα εμποδίου είναι η περιοδική διακοπή της πορείας από πέταγμα πουλιού. Αυτό φαίνεται μάλλον μικρό εμπόδιο, αλλά ο ρυθμός σφαλμάτων σε μια υψηλής ταχύτητας ζεύξη μπορεί να είναι σημαντικός και απαράδεκτος για επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο, όπως είναι η φωνή. Διακοπές από πουλιά συμβαίνουν σε όλα τα FSO συστήματα, ανεξάρτητα από το μέγεθος του ανοίγματος ή τον αριθμό των δεσμών που χρησιμοποιούνται. Η RLC λειτουργία εξαλείφει αυτό το πρόβλημα διορθώνοντας τα προσωρινά μπλοκαρίσματα. Αυτό δεν συμβαίνει με ένα τυπικό δρομολογητή “router” ή κύκλωμα εφεδρικής λειτουργίας ADM (Add Drop Multiplexer), όπου υπάρχει σημαντική καθυστέρηση και ως εκ τούτου απώλεια δεδομένων κατά τη διάρκεια της διαβίβασης.

Το Σχήμα 2.4 δείχνει τον τρόπο που ο RLC διατηρεί την ακεραιότητα των δεδομένων σε μία βάση πλαίσιο προς πλαίσιο. Χρησιμοποιώντας δύο μονοπάτια, ένα MMW και ένα FSO, το RLC συγκρίνει, σε μία βάση πλαίσιο προς πλαίσιο, ένα κυκλικού ελέγχου πλεονασμού CRC (Cyclic Redundancy Check) bit που εισέρχεται στο πλαίσιο. Αν το πλαίσιο

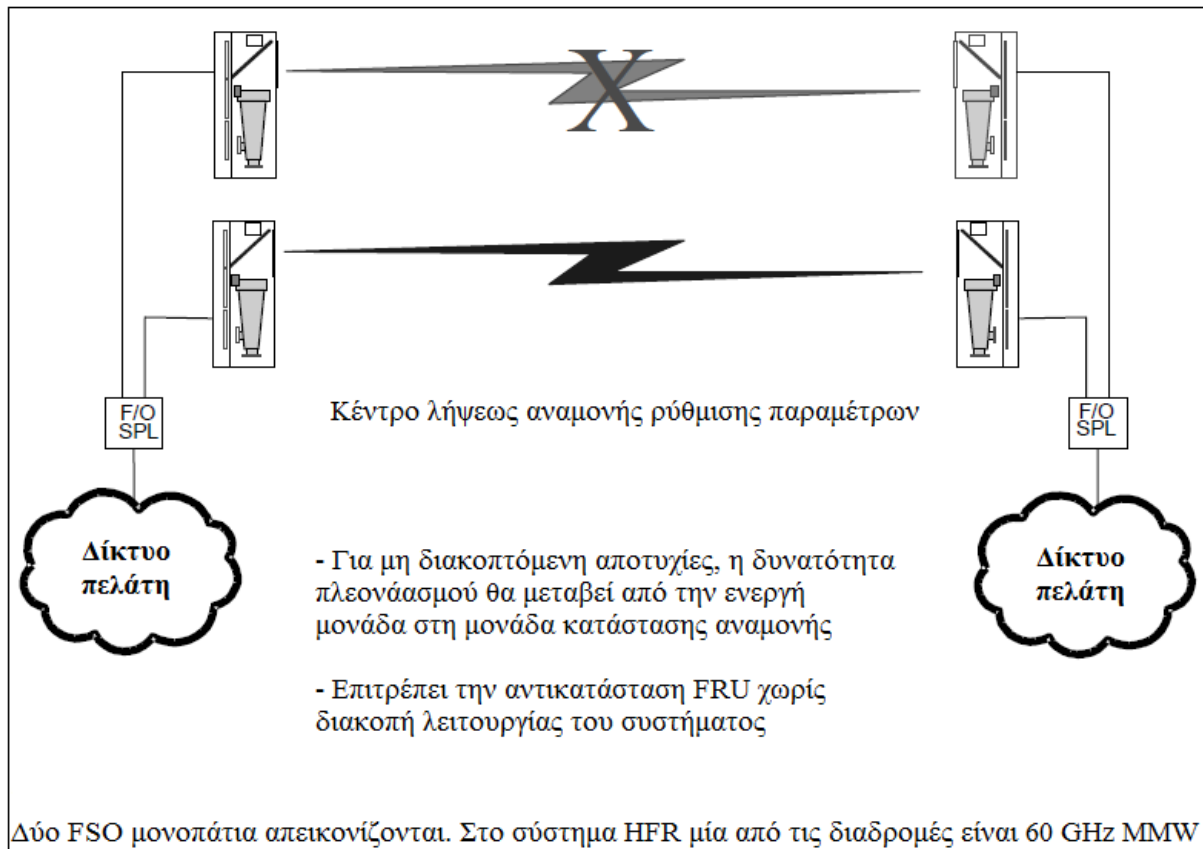
είναι κατεστραμμένο, ο RLC αναλαμβάνει το αντίστοιχο πλαίσιο από την άλλη διαδρομή και το μεταδίδει στο χρήστη. Δεδομένου ότι τα πλαίσια διοχετεύονται συνεχώς, δεν υπάρχει απολύτως καμία απώλεια bit ή εισαγωγή καθυστέρησης στο σύστημα. Όλη η πλαισίωση και η εισαγωγή των bits, αφαιρείται προτού η ροή δεδομένων φθάσει στο χρήστη. Όσο ο χρήστης λαμβάνεται υπόψη, το σύστημα θα είναι ένα κομμάτι του πρωτοκόλλου-ανεξάρτητων ινών [9].



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργικότητας του RLC [9]

Το άλλο όφελος που ο RLC παρέχει είναι ο πραγματικός εξοπλισμός και ο πλεονασμός διαδρομής. Εάν ένα κομμάτι του συστήματος HFR αποτύχει ή απαιτηθεί συντήρηση, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις θα μπορούσε να αφαιρεθεί από το σύστημα χωρίς καμία απώλεια bit για τον πελάτη. (Στη σπάνια περίπτωση που τα ηλεκτρονικά του RLC αποτύχουν, αναλαμβάνει ο δεύτερος RLC, με πιθανό αποτέλεσμα αυτό της διακοπής 50 ms.). Το Σχήμα 2.5 δείχνει το σενάριο σε περίπτωση αποκατάστασης βλάβης χρησιμοποιώντας

έναν RLC. Ένας παθητικός 3dB συνδυαστής / διαχωριστής συνδυάζει τις εξόδους του σήματος από κάθε RLC ώστε να παρέχει πραγματικό πλεονασμό, ακόμη και σε περίπτωση αποτυχίας ενός RLC.



Σχήμα 2.5 Εφεδρικές διαδρομές και δυνατότητα ανακατεύθυνσης χρησιμοποιώντας τον RLC [9]

Αυτή η μοναδική λύση χρησιμοποιεί ζεύξεις λειτουργώντας με την ίδια χωρητικότητα για παροχή ενός συνεπούς και εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ανά πάσα στιγμή κατά τη διάρκεια όλων των καιρικών συνθηκών. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά διαφορετική από τις προηγούμενες προσπάθειες συνδυασμού των FSO με μικροκυματικά συστήματα, και δεν θεωρείται «εφεδρικό» σύστημα. Τα εφεδρικά μικροκυματικά συστήματα χρησιμοποιούν χαμηλότερα μικροκύματα ώστε να μπορούν να διαχειριστούν τις επικοινωνίες κατά τη διάρκεια της ομίχλης. Συνήθως, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια δεδομένων κατά τη

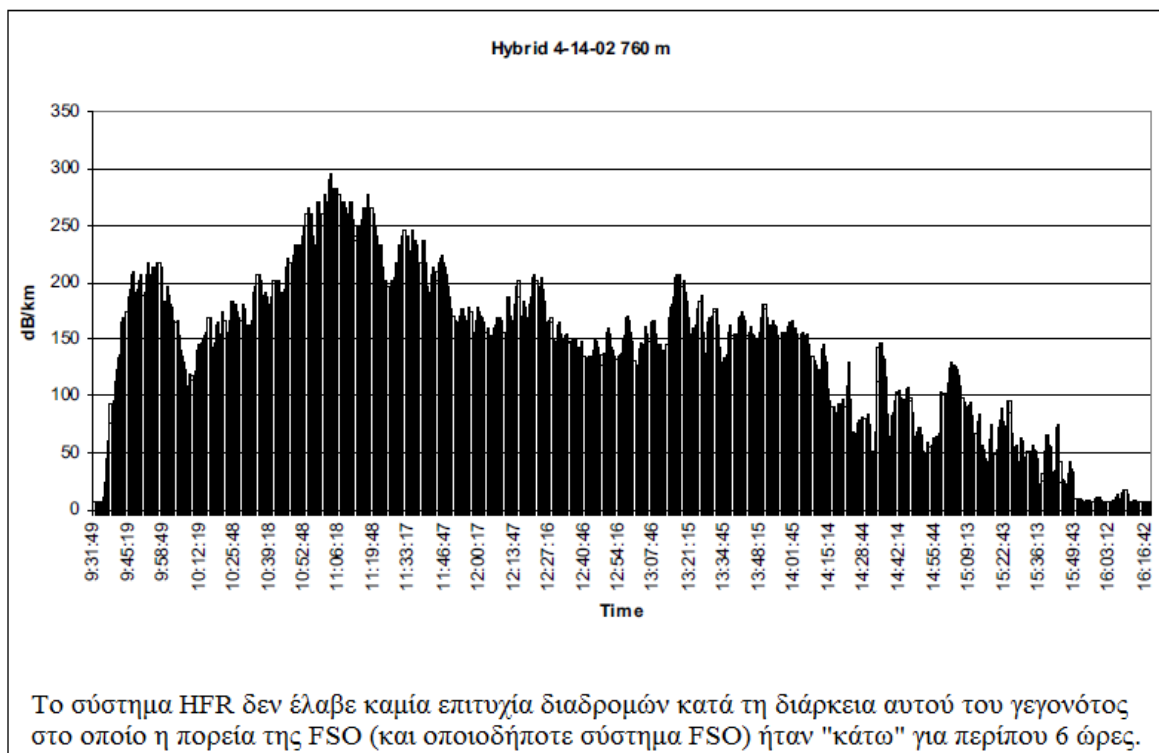
διάρκεια της μετάβασης και δραματικά μικρότερη χωρητικότητα κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων ομίχλης.

2.5. Αποτελέσματα HFR για Μαζική Εκδήλωση Ομίχλης 300 dB/km

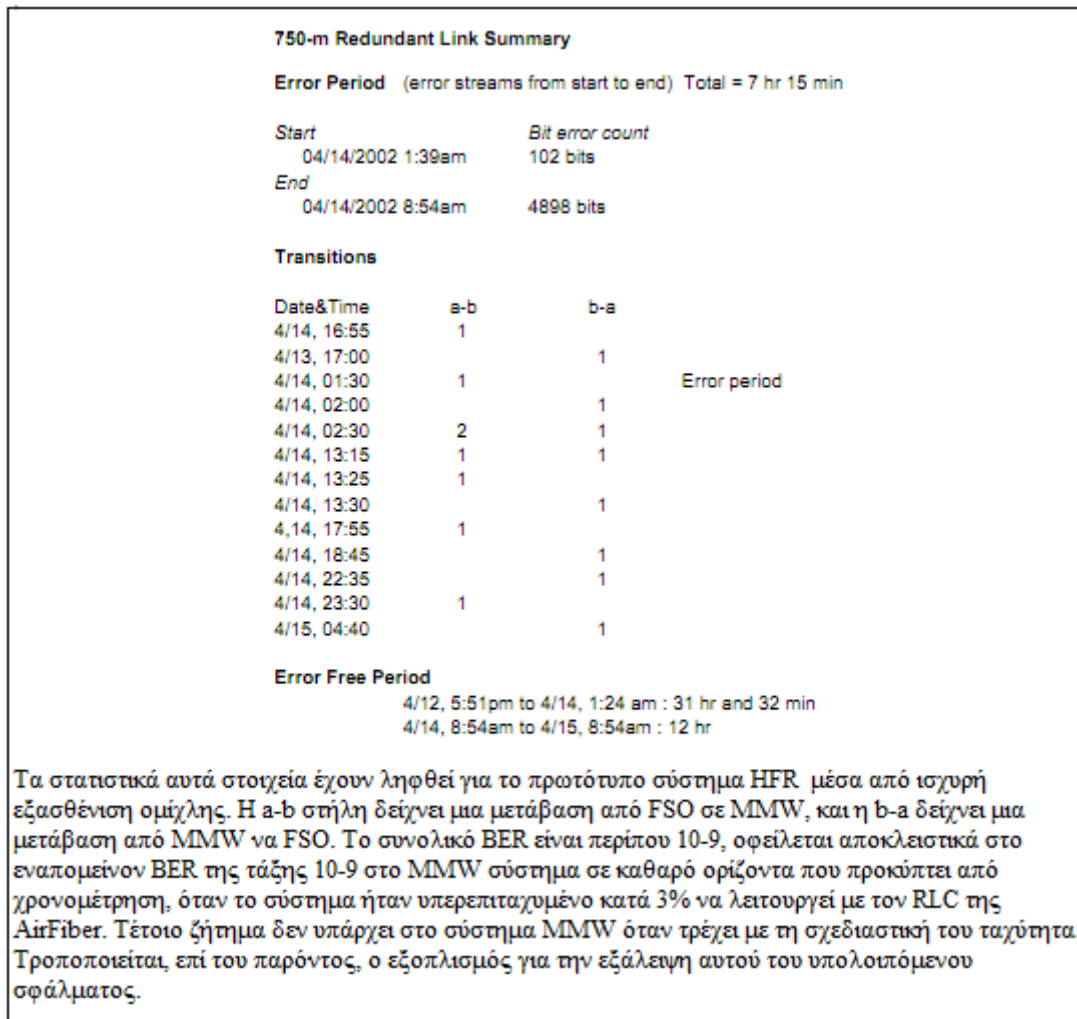
Το Σχήμα 2.6 είναι μια φωτογραφία του συστήματος HFR που αναπτύχθηκε από την AirFiber [9]. Το Σχήμα 2.7 δείχνει μια χρονοσειρά από δεδομένα που καταγράφηκαν από ένα νεφελόμετρο που είχε τοποθετηθεί στην ταράτσα δίπλα σε ένα σύστημα HFR. Το νεφελόμετρο μετρά τις απώλειες της ατμόσφαιρας ως συνάρτηση του χρόνου. Στην περίπτωση αυτή, απεικονίζεται μία ισχυρή ομίχλη που κράτησε πάνω από 6 ώρες και έφτασε στο αποκορύφωμα της εξασθένησης των 300 dB/km. Υπήρχαν αρκετά συστήματα FSO που λειτουργούσαν στο χρόνο, με εύρος ζεύξης μεταξύ 300 και 800 μέτρων. Όλα τα συστήματα FSO ήταν σε εξωτερικό χώρο για σχεδόν όλη τη διάρκεια της εκδήλωσης ομίχλης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ένα σύστημα HFR με εύρος 800 μέτρων εκτελείται άψογα και η μετάβαση, όπου χρειάζεται, μεταξύ του FSO και των 60GHz γίνεται ομαλά, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ο χρήστης είδε να μην χάνεται κανένα bit κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης της ομίχλης λόγω εξασθένησης διαδρομής. Ομοίως, αν το ίδιο το σύστημα λειτουργούσε στη βροχή, το σύστημα θα στρεφόταν προς το FSO αμέσως μόλις η εξασθένηση βροχής προκαλέσει λάθη στη ζεύξη των 60 GHz, και πάλι χωρίς σφάλματα και απώλειες bit για τον χρήστη. Το Σχήμα 2.8 αποτυπώνει περιληπτικά τα στατιστικά σφάλματα που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της εκδήλωσης ομίχλης. Τα μικρά υπολειμματικά σφάλματα bits οφείλονται σε ποσοστό σφάλματος χαμηλής στάθμης για τον εξοπλισμό των 60GHz, που προκαλούνται από ένα προσωρινό θέμα υπερβολικής ταχύτητας της μονάδας MMW πέρα από το σχεδιαστικό της εύρος. Δεν οφείλονται σε απώλειες κατά τη διάρκεια της μεταγωγής RLC.



Σχήμα 2.6 Πρωτότυπο Σύστημα HFR. Το παραβολικό πιάτο έχει 13 ίντσες διάμετρο. [9]



Σχήμα 2.7 Μια βαριά εξασθενημένη ομίχλη στην Poway, CA στο AirFiber, Inc 760-μέτρα εμβέλεια σε εξωτερικό χώρο της πειραματικής μονάδας [9]



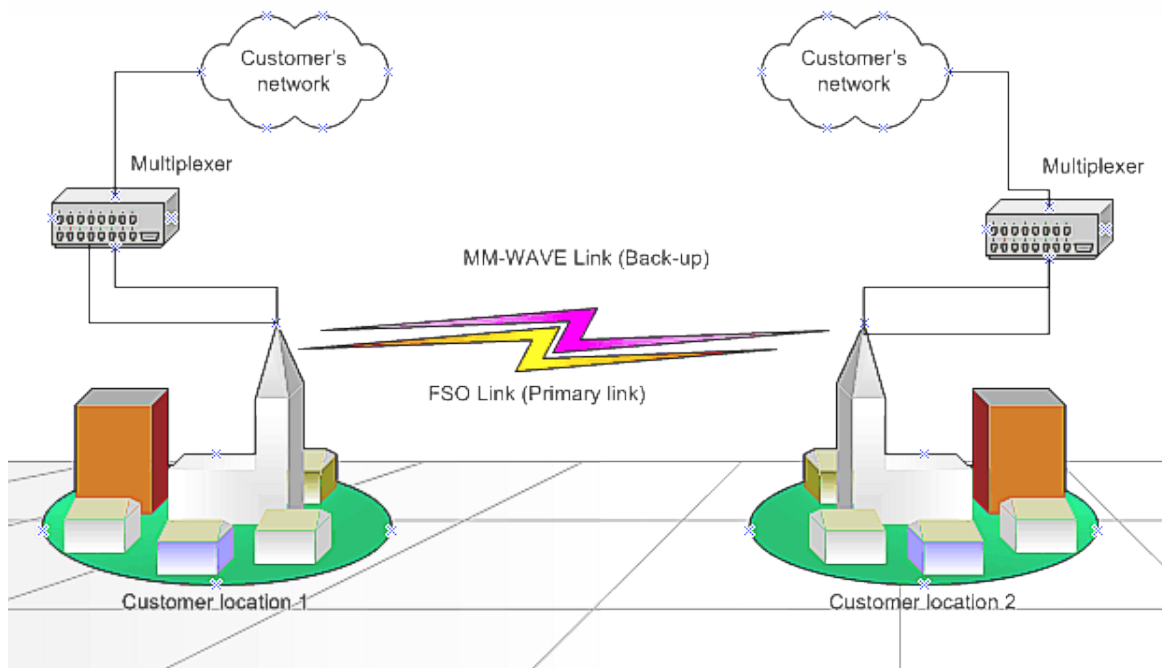
Σχήμα 2.8 Μερικά στατιστικά στοιχεία BER για το πρωτότυπο HFR σύστημα [9]

2.6. Βέλτιστη επιλογή εφεδρικού συστήματος FSO

Η καλύτερη λύση για να επιτευχθεί ο βέλτιστος λόγος μεταξύ κόστους και αποτελεσματικότητας για το εφεδρικό σύστημα FSO, θα ήταν η ενσωμάτωση μιας εφεδρικής ζεύξης που κάνει χρήση χιλιοστομετρικών κυμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί η διάδοση του χιλιοστομετρικού κύματος επηρεάζεται περισσότερο από τη βροχή και το οπτικό κύμα επηρεάζεται περισσότερο από την ομίχλη. Ο μόνος καιρός που θα μπορούσε να επηρεάσει τη διάδοση ενός υβριδικού FSO /RF είναι οι συνθήκες της ταυτόχρονης δυνατής βροχής και πυκνής ομίχλης. Ευτυχώς, αυτές οι συνθήκες δεν επικρατούν ταυτόχρονα, γιατί

καθώς πέφτει η βροχή, τα σταγονίδια της απορροφούν τα ανασταλμένα υγρά σταγονίδια ομίχλης, με αποτέλεσμα τη μείωση της ομίχλης. Οι σταγόνες βροχής μπορεί να ποικίλουν σε μέγεθος από 0.1 έως 10 χιλιοστά, ενώ το μέγεθος των σωματιδίων της ομίχλης κυμαίνεται τυπικά από 1 έως 20 μm [52].

Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές των FSO συστημάτων και τα στατιστικά στοιχεία της εγκατάστασης, οι περισσότερες από τις ζεύξεις FSO είναι εγκατεστημένες σε αποστάσεις όχι μεγαλύτερες από 1 km, ενώ οι MMW ζεύξεις έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε αποστάσεις μέχρις 20 km. Αυτό σημαίνει ότι οι MMW ζεύξεις έχουν πολύ σημαντικό περιθώριο κέρδους το οποίο επιτρέπει τη διεύθυνση σε απόσταση 1 km, ακόμη και σε πολύ δυνατή βροχή [52].



Σχήμα 2.9 Υβριδικό σύστημα FSO/MMW, όπου η ζεύξη FSO είναι η κύρια και η ζεύξη MMW είναι η εφεδρική [10]

3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Η διαθεσιμότητα (availability) μιας ασύρματης ζεύξης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ενδεικτικός της ποιότητας της. Για επιχειρησιακές εφαρμογές, οι απαιτήσεις διαθεσιμότητας αγγίζουν το 99%. Αντίθετα για εφαρμογές υψηλών προδιαγραφών τύπου carrier-class, οι απαιτήσεις αυτές φθάνουν ή και ξεπερνούν το 99.999% (“5 nines”). Αυτό αντιστοιχεί σε μόλις 5 λεπτά διακοπής της ζεύξης στη διάρκεια ενός ολόκληρου χρόνου [11].

Η επιλογή μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων για ένα σύστημα επικοινωνιών εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι [12]:

- Η διαθεσιμότητα κατάλληλης τεχνολογίας
- Οι ζώνες συχνοτήτων που είναι διαθέσιμες για μια συγκεκριμένη υπηρεσία
- Το περιβάλλον διάδοσης

Οι ζώνες συχνοτήτων είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων αδειοδοτημένες, δηλαδή διατίθενται για ένα συγκεκριμένο σύστημα-υπηρεσία και απαιτείται να ληφθεί άδεια για τη χρησιμοποίησή καθεμίας από αυτές. Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένες ζώνες συχνοτήτων οι οποίες είναι ελεύθερες προς χρήση, όπως τα 60 MHz και τα 90MHz.

Το περιβάλλον διάδοσης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ώστε το σύστημα επικοινωνιών να εκπληρώνει τις απαιτήσεις διαθεσιμότητας της ασύρματης ζεύξης. Ανασταλτικός παράγοντας στην επίτευξη αυτού του στόχου είναι οι καιρικές συνθήκες και οι μεταβολές που παρουσιάζουν. Η ύπαρξη ή μη βροχής, ομίχλης ή οποιουδήποτε άλλου καιρικού φαινομένου μπορεί να οδηγήσει σε υποβιβασμό της ποιότητας της ασύρματης ζεύξης ή ακόμα και στη διακοπή της, λόγω της αύξησης της εξασθένησης που προκαλείται στην ηλεκτρομαγνητική δέσμη. Η διάδοση του φωτός είναι πολύ ευαίσθητη στις

ατμοσφαιρικές συνθήκες και τα μετεωρολογικά φαινόμενα όπως η αχλή (haze), η ομίχλη (fog), ψιλόβροχο (drizzle), η βροχή (rain), η τυρβώδης ροή (turbulence), η θερμική διαστολή των δομών, καθώς και η σκόνη και ο καπνός. Όλα αυτά συμβάλουν στη ύπαρξη ατμόσφαιρας με μικρή ορατότητα (visibility), προκαλώντας διαλείψεις (fading) στο λαμβανόμενο σήμα σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι στα ραδιοκύματα [2]. Κάποιες τυπικές τιμές εξασθένησης της δέσμης οπτικών συχνοτήτων (κοντά στο έδαφος) με τις αντίστοιχες ορατότητες δίνονται στον

Πίνακας 3.1 [11],[13].

	Απόσβεση	Ορατότητα
Πολύ καθαρός	0.19 dB/km	50 km
Αχλή	4.6 dB/km	2.8 km
Αραιή Ομίχλη	6.9 dB/km	1.9 km
Μέτρια Ομίχλη	28.9 dB/km	0.5 km
Πυκνή Ομίχλη	340 dB/km	0.05 km

Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές της εξασθένησης με τις αντίστοιχες ορατότητες

Επομένως, μειώνεται η ορατότητα καθώς και ο χρόνος που μια ασύρματη ζεύξη (δεδομένης απόστασης πομπού-δέκτη) θα είναι διαθέσιμη για μετάδοση δεδομένων.

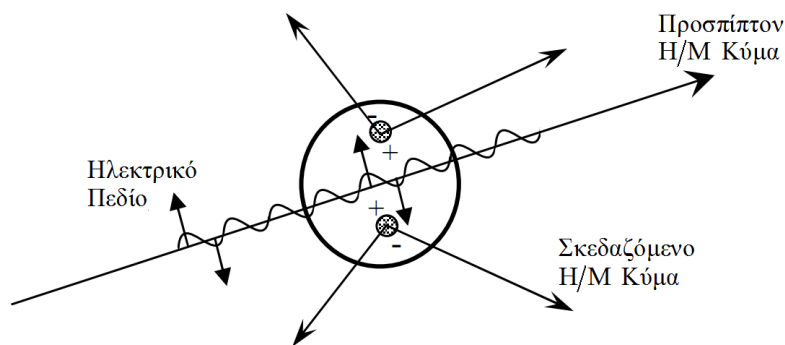
Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα, λόγω της σύστασης της τελευταίας. Οι μεταβολές που παρουσιάζει η σύσταση της, κάνουν την οποιαδήποτε πρόβλεψη της συμπεριφοράς της ιδιαίτερα δύσκολη και πολύπλοκη. Τα σωματίδια που αποτελούν την ατμόσφαιρα είναι διαφορετικών ειδών και μεγεθών, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη αλλαγή της συμπεριφοράς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ανάλογα με το μήκος κύματός της. Οι κύριοι φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν αυτές τις

μεταβολές στη συμπεριφορά είναι η σκέδαση Rayleigh για πολύ μικρά σωματίδια, καθώς και η σκέδαση Mie και η μη επιλεκτική σκέδαση για σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ενδεχόμενη απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από αυτά τα σωματίδια.

3.1. Σκέδαση

Η σκέδαση από σωματίδια στην ατμόσφαιρα, ειδικά συμπυκνωμένα σωματίδια υδρατμών, έχει σημαντική επίδραση στη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πρέπει δε να ληφθεί υπόψη όταν εξετάζεται η διάδοση χιλιοστομετρικών κυμάτων, αφού τα σωματίδια υετού είναι συγκρίσιμα στο μέγεθος με το μήκος κύματος. Επομένως, η σκέδαση συμβαίνει και οδηγεί σε εξασθένηση της ακτινοβολίας [14].

Όπως αναλύεται διεξοδικά στην [52], η σκέδαση του φωτός μπορεί να θεωρηθεί ως η ανακατεύθυνση του φωτός που συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συναντήσει ένα εμπόδιο ή μια ανομοιογένεια. Ως ανομοιογένεια θεωρείται η ύπαρξη σωματιδίων μέσα σε ένα μέσο, το οποίο έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Το μεγαλύτερο μέρος του σκεδαζόμενου φωτός εκπέμπεται στην ίδια συχνότητα (ν_0) του προσπίπτοντος φωτός, μια διαδικασία που αναφέρεται ως ελαστική σκέδαση. [14].



Σχήμα 3.1 Σκέδαση φωτός από προκληθείσα διπολική ροπή λόγω προσπίπτοντος Η/Μ κύματος [14]

Η σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και του μεγέθους του σωματιδίου είναι πολύ σημαντική όταν απαιτείται ο υπολογισμός των οπτικών ιδιοτήτων του σωματιδίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η αδιάστατη παράμετρος μεγέθους x , η οποία δίνεται από τη σχέση (2) :

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (2)$$

όπου a είναι η ακτίνα του σφαιρικού σωματιδίου και λ είναι το σχετικό μήκος κύματος σκέδασης το οποίο ορίζεται ως:

$$\lambda = \frac{\lambda_o}{m_o} \quad (3)$$

όπου λ_o είναι το προσπίπτον μήκος κύματος και m_o ο δείκτης διάθλασης του μέσου που τα περιβάλλει.

Η σκέδαση μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε ως ένα κλασσικό είτε ως ένα κβαντικό φαινόμενο. Ωστόσο, για την ελαστική σκέδαση το κλασσικό και το κβαντικό μοντέλο συμφωνούν. Επομένως τα φαινόμενα σκέδασης μπορούν να αντιμετωπιστούν κλασσικά χωρίς απώλεια της γενικότητας. [16]

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία Mie, ο βαθμός απόδοσης σκέδασης (scattering efficiency) δίνεται από τη σχέση (4):

$$Q_{sc} = \frac{2}{x^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2n+1) \left[\left| a_{j(m,x)} \right|^2 + \left| b_{j(m,x)} \right|^2 \right] \quad (4)$$

όπου τα a_j , b_j ονομάζονται συντελεστές σκέδασης Mie, ενώ το m είναι ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης ($m = n - ik$). Το n συμβολίζει το δείκτη διάθλασης του φωτός, ενώ ο φανταστικός όρος σχετίζεται με την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [52].

Αν συμβολιστεί η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με I_o , τότε η σκεδαζόμενη ενέργεια E_{sc} θα ισούται με:

$$E_{sc} = I_o \cdot \pi a^2 \cdot Q_{sc} \quad (5)$$

Όταν απαιτούνται υπολογισμοί για μεγάλα σωματίδια, τότε η χρήση της θεωρίας Mie καθίσταται ασύμφορη και είναι προτιμότερη η χρήση μεθόδων γεωμετρικής οπτικής. Αν ωστόσο το μέγεθος των σωματιδίων είναι αρκούντως μικρό, τότε αντί για θεωρία Mie, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία Rayleigh. Η σκέδαση Rayleigh είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα σκεδάζεται από σωματίδια μικρού μεγέθους, τυχαίου προσανατολισμού και μεταβαλλόμενου δείκτη διάθλασης. Το κριτήριο που χρησιμοποιείται για την επιλογή θεωρίας Rayleigh, έναντι της θεωρίας Mie, είναι να ικανοποιούνται οι ανισότητες $a \ll \lambda$ και $|m|a \ll \lambda$ [52].

Ο βαθμός απόδοσης σκέδασης (scattering efficiency) δίνεται από τη σχέση (6):

$$Q_{sc} = \frac{1}{\pi a^2} \frac{2\lambda^2}{3\pi} x^6 \left| \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right|^2 \Rightarrow Q_{sc} = \frac{2^7 \pi^4 a^4}{3} \frac{1}{\lambda^4} \left| \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right|^2 \quad (6)$$

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη σχέση, ο βαθμός απόδοσης σκέδασης δίνεται σε κλειστή μορφή για την περίπτωση της σκέδασης Rayleigh. Αν συμβολιστεί η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με I_o , τότε η σκεδαζόμενη ενέργεια E_{sc} θα ισούται με:

$$E_{sc} = I_o \cdot \pi a^2 \cdot Q_{sc} \Rightarrow E_{sc} = I_o \cdot \frac{2^7 \pi^5 a^6}{3} \frac{1}{\lambda^4} \left| \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right|^2 \quad (7)$$

3.2. Απορρόφηση

Ως Απορρόφηση ορίζεται η πρόσληψη και αποθήκευση (είτε στην ίδια μορφή είτε σε άλλη) της ενέργειας του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα ατμοσφαιρικά αέρια προκαλούν εξασθένηση του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε κάποιες χαρακτηριστικές ζώνες συχνοτήτων. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι το οξυγόνο (O_2), το όζον (O_3), το νερό (H_2O) και το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 .

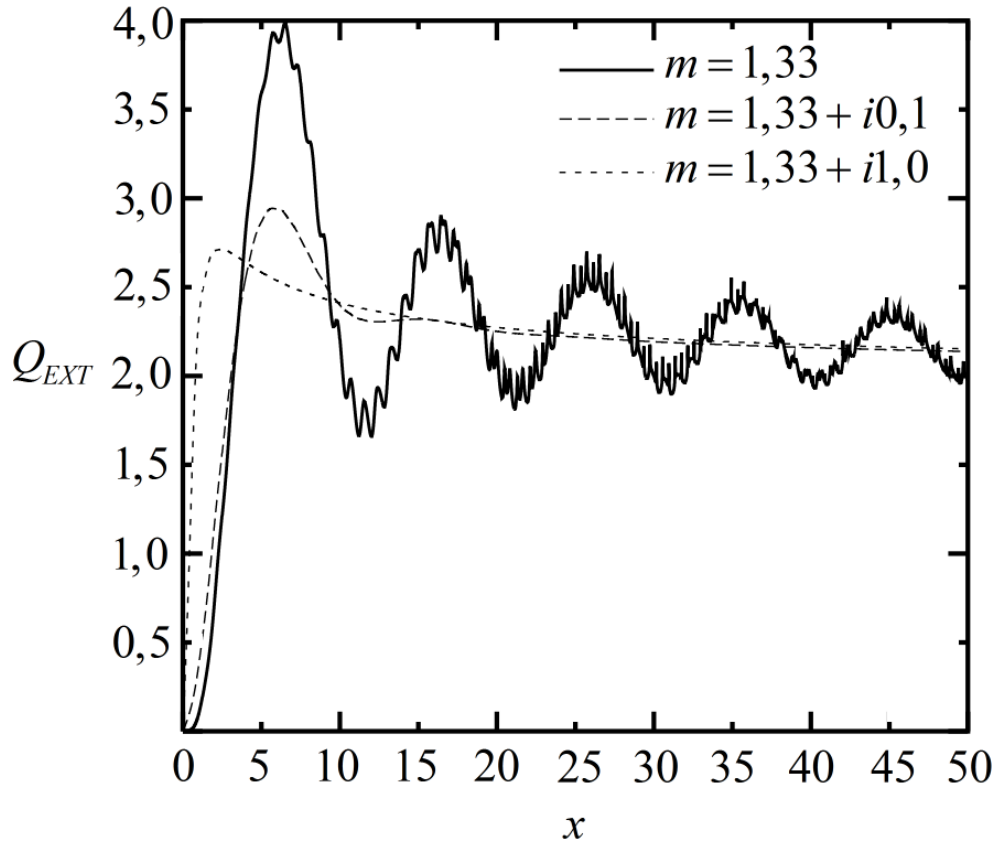
Στη γενική περίπτωση, ο δείκτης διάθλασης του μορίου στο οποίο προσπίπτει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, είναι μιγαδικός. Ενώ το πραγματικό μέρος n είναι ο δείκτης διάθλασης του φωτός, το φανταστικό μέρος k σχετίζεται με την απορρόφηση. Ο ευρέως χρησιμοποιούμενος συντελεστής απορρόφησης b σχετίζεται με το φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης μέσω της σχέσης (8). [14]

$$b = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (8)$$

Κάνοντας χρήση της θεωρίας Mie για σφαιρικά σωματίδια, μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια που αποσβήνεται λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού κύματος με σφαιρικά σωματίδια. Ο βαθμός απόδοσης απόσβεσης (extinction efficiency) δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{EXT} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re} \left[a_{n(m,x)} + b_{n(m,x)} \right] \quad (9)$$

όπου τα a_j , b_j ονομάζονται συντελεστές σκέδασης Mie, ενώ το m είναι ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης ($m = n - ik$). Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται ο Q_{EXT} συναρτήσει της παραμέτρου μεγέθους x διάφορες τιμές του φανταστικού μέρους του δείκτη διάθλασης m [15].



Σχήμα 3.2 Βαθμός απόδοσης απόσβεσης ως συνάρτηση της παραμέτρου μεγέθους [15]

Ανεξαρτήτως της τιμής του m παρατηρείται πως η τιμή του Q_{EXT} συγκλίνει οριακά στην τιμή 2 για μεγάλες τιμές του x . Επίσης παρατηρείται πως όσο αυξάνει η τιμή του φανταστικού μέρους του m , δηλαδή όσο αυξάνεται η απορρόφηση από το υλικό του σωματιδίου, τόσο μειώνεται η κυμάτωση της καμπύλης του Q_{EXT} .

Αν συμβολιστεί η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με I_o , τότε η συνολική ενέργεια που αποσβήνεται E_{EXT} θα ισούται με:

$$E_{EXT} = I_o \cdot \pi a^2 \cdot Q_{EXT} \quad (10)$$

Έχοντας υπολογίσει τους βαθμούς απόδοσης σκέδασης και απόσβεσης, είναι πολύ εύκολο να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης απορρόφησης Q_A .

$$Q_A = Q_{EXT} - Q_{SC} \quad (11)$$

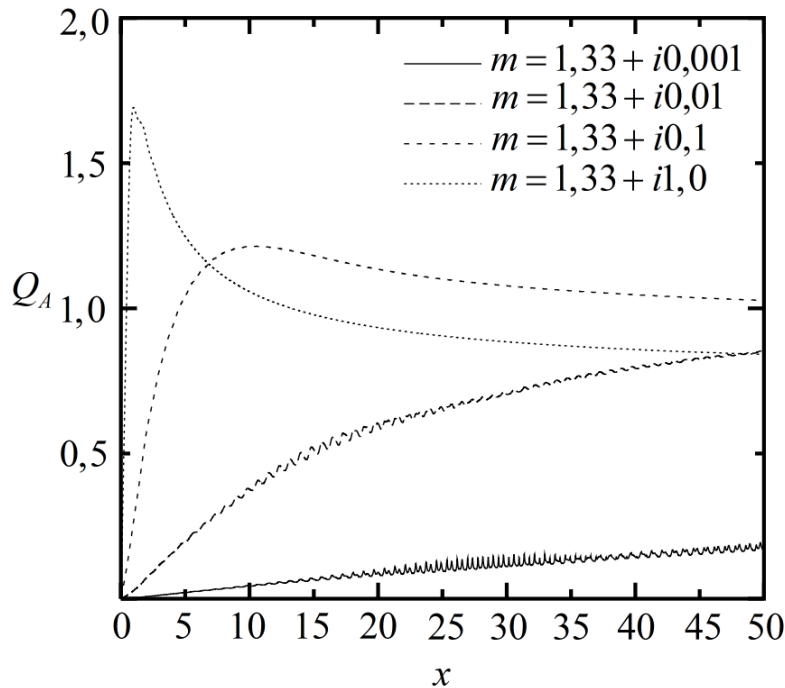
Στη περίπτωση που ισχύουν οι συνθήκες $a \ll 1$, $|m|a \ll 1$ και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία Rayleigh, τότε ο Q_A δίνεται από μια εξίσωση κλειστής μορφής.

$$Q_A = \frac{1}{\pi a^2} \frac{-\lambda^2}{\pi} x^3 \operatorname{Im} \left\{ \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right\} \Rightarrow Q_{SC} = -8\pi a \frac{1}{\lambda} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right\} \quad (12)$$

Αν συμβολιστεί η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με I_o , τότε η απορροφούμενη ενέργεια E_A θα ισούται με:

$$E_A = I_o \cdot \pi a^2 \cdot Q_A \Rightarrow E_{SC} = -8I_o \pi^2 a^2 \frac{1}{\lambda} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right\} \quad (13)$$

Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται ο Q_A συναρτήσει της παραμέτρου μεγέθους x διάφορες τιμές του φανταστικού μέρους του δείκτη διάθλασης m [15].



Σχήμα 3.3 Βαθμός απόδοσης απορρόφησης ως συνάρτηση της παραμέτρου μεγέθους [15]

3.3. Φαινόμενα Τυρβώδους Ροής

Τα φαινόμενα τυρβώδους ροής (turbulence) οφείλονται σε μεγάλης κλίμακας, μικρού πλάτους χωρικές και χρονικές μεταβολές των οπτικών ιδιοτήτων μέσα στο μέσο διάδοσης [16]. Δηλαδή, μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης του μέσου. Τέτοιες μεταβολές μπορεί να οφείλονται στις διαφορετικές θερμοκρασίες και επίπεδα υγρασίας που είναι δυνατό να εμφανίζονται στο μέσο. Οι άνεμοι η κάλυψη από σύννεφα, ακόμα και η στιγμή μέσα στη μέρα, επίσης επηρεάζουν το μέγεθος του φαινομένου.

Η εκπεμπόμενη δέσμη ακολουθεί μια διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα, στην οποία παρατηρούνται θερμοκρασιακές διαφορές και μεταβολές στην υγρασία. Συνέπεια αυτού είναι να εμφανίζονται μεταβολές στο πλάτος, τη φάση και τη γωνία άφιξης της δέσμης κάθε χρονική στιγμή. Αυτές οι διακυμάνσεις έχουν ως αποτέλεσμα να φθάνουν στο δέκτη αναλαμπές (scintillation) φωτός και όχι μια συνεχής ροή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [6],[12]. Αυτές οι αναλαμπές μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο σε ορισμένα συστήματα επικοινωνιών.

Υπάρχουν δύο κύριες περιοχές στην ατμόσφαιρα όπου τα φαινόμενα αναλαμπών είναι πιθανό να είναι ισχυρά [12]:

- Οι κατώτερες περιοχές της τροπόσφαιρας όπου τα φαινόμενα τυρβώδους ροής παράγουν ανάμιξη του αέρα και είναι υπεύθυνα για κατακόρυφες διαδικασίες μεταφοράς κοντά στην επιφάνεια της γης
- Τα σύννεφα, όπου η τυρβώδης ροή οφείλεται στις μεταβολές της ροής του αέρα

Η τυρβώδης ροή έχει επίσης ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της περιπλάνησης δέσμης (beam wander). Παρατηρείται, δηλαδή, χωρική μετατόπιση της

προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ένα άλλο φαινόμενο που επίσης οφείλεται στην τυρβώδη ροή είναι η διασπορά της ακτινοβολίας (beam spreading).

Αναλυτικότερα, η τυρβώδης ροή στην ατμόσφαιρα προκαλεί χωρικές και χρονικές μεταβολές στο δείκτη διάθλασης. Ο τελευταίος παρουσιάζει, επίσης, εξάρτηση και από το μήκος κύματος της διαδιδόμενης ακτινοβολίας. Ένας βολικός τρόπος για να εκφραστούν αυτές οι εξαρτήσεις είναι στη μορφή της εξίσωσης (14).

$$n(\vec{r}, t, \lambda) = n_0(\vec{r}, t, \lambda) + n_1(\vec{r}, t, \lambda) \quad (14)$$

όπου n_0 είναι το αιτιοκρατικό (μη τυχαίο) μέρος του n , ενώ το n_1 αναπαριστά τυχαίες διακυμάνσεις του n γύρω από τη μέση τιμή του, για την οποία ισχύει ότι $\bar{n} = n_0 \cong 1$. Οι αιτιοκρατικές αλλαγές στο n είναι γενικά πολύ αργά μεταβαλλόμενες και μακροσκοπικές στη χωρική διάσταση. Για παράδειγμα, το n_0 περιλαμβάνει την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το ύψος πάνω από το έδαφος. Η χρονική εξάρτηση του n_0 μπορεί να αγνοηθεί, αφού είναι συγκριτικά πάρα πού αργές.

Οι τυχαίες διακυμάνσεις του n_1 εμφανίζονται παρουσία τυρβώδους ροής στην ατμόσφαιρα. Οι δίνες στον αέρα έχουν μεγάλο εύρος μεγέθους, το οποίο ποικίλλει από δεκάδες μέτρα ως και μερικά χιλιοστά του μέτρου. Η εξάρτηση από το μήκος κύματος για αυτές τις τυχαίες διακυμάνσεις μπορεί να αγνοηθεί γενικά. Οπότε η εξίσωση (14) μπορεί να ξαναγραφτεί στη μορφή της εξίσωσης (15).

$$n(\vec{r}, t, \lambda) = n_0(\vec{r}, \lambda) + n_1(\vec{r}, t) \quad (15)$$

Τυπικές τιμές του n_1 είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερες της μονάδας.

Ο χρόνος που απαιτείται ώστε το φως να διαδοθεί μέσα στην ατμόσφαιρα είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό του “χρόνου διακύμανσης” του τυχαίου κομματιού n_1 του δείκτη διάθλασης. Γι’ αυτό το λόγο, η χρονική εξάρτηση του n_1 συνήθως περιορίζεται και η προσοχή εστιάζεται στις χωρικές ιδιότητες. Εάν σε κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα ενδιαφέρουν οι χρονικές ιδιότητες, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η υπόθεση “παγωμένης τυρβώδους ροής” (επίσης γνωστή και ως υπόθεση Taylor), η οποία θεωρεί πως κάθε υλοποίηση του τυχαίου n_1 κινείται κατά πλάτος του ανοίγματος μέτρησης με σταθερή ταχύτητα (η οποία υπολογίζεται από τις συνθήκες του τοπικού ανέμου), αλλά χωρίς καμία άλλη αλλαγή [17].

Πλήθος στατιστικών μοντέλων έχουν αναπτυχθεί για να περιγράψουν την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη πίεση, την υγρασία, καθώς και από το μήκος κύματος της διαδιδόμενης ακτινοβολίας. Η βασική στατιστική παράμετρος που συνήθως χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μετάδοσης ισχύος είναι η χωρική συσχέτιση (spatial cross-correlation) του τυχαίος μεταβαλλόμενου δείκτη διάθλασης. Η φασματική πυκνότητα ισχύος των διακυμάνσεων του δείκτη, που ορίζονται για χωρική συχνότητα είναι ο τρισδιάστατος μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης χωρικής συσχέτισης. Για να μοντελοποιηθεί η τυρβώδης ροή, έχουν διακριθεί διαφορετικοί μηχανισμοί ανταλλαγής ενέργειας, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά εύρη χωρικών συχνοτήτων. Συνήθως η ισχύς της τυρβώδους ροής περιγράφεται χρησιμοποιώντας τον βοηθητικό όρο C_n^2 , που ονομάζεται σταθερά δομής του δείκτη διάθλασης [18].

Στις περιπτώσεις που οι δυνάμεις αδράνειας υπερισχύουν, οι διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης περιγράφονται καλύτερα από τη συνάρτηση δομής. Η συνάρτηση αυτή ορίζεται ως:

$$D_n(r_1, r_2) = \left\langle \left[n(r_1) - n(r_2) \right]^2 \right\rangle \quad (16)$$

όπου $n(r_i)$ είναι ο δείκτης διάθλασης στο σημείο r_i και τα $\langle \rangle$ δηλώνουν ένα συνολικό μέσο όρο. Για ομογενή και ισοτροπική τυρβώδη ροή, εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων r και δίνεται από τη σχέση:

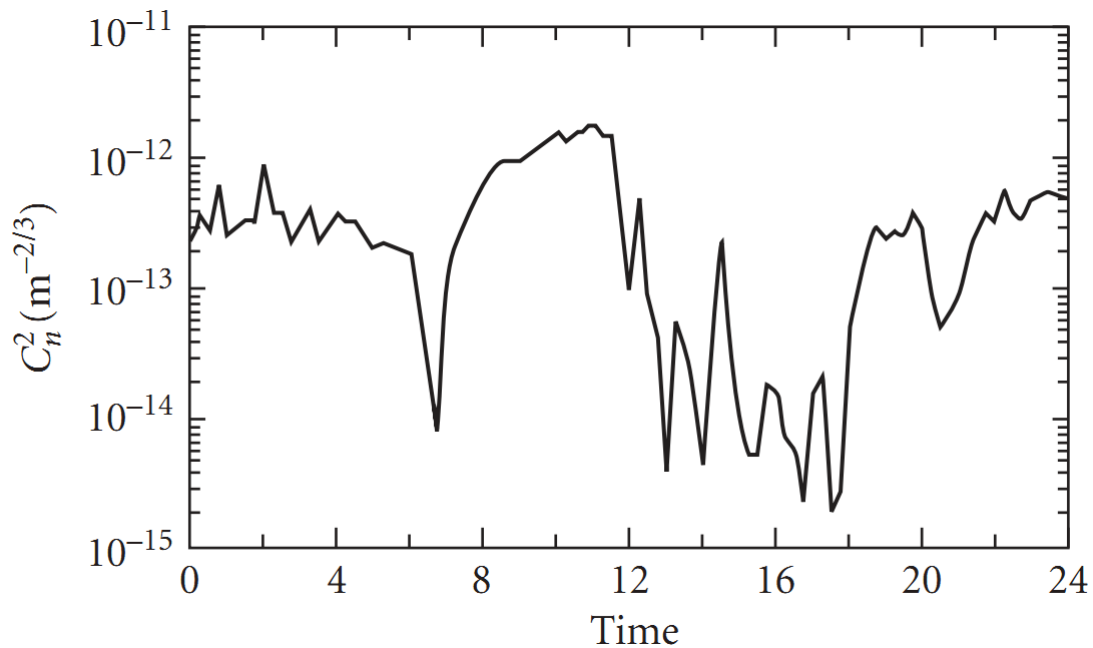
$$D_n(r) = C_n^2 r^{2/3} \quad (17)$$

Η σταθερά δομής του δείκτη διάθλασης C_n^2 , ορίζεται από τη σχέση (17).

Στις χαμηλότερες εκατοντάδες μέτρα της ατμόσφαιρας, η τυρβώδης ροή δημιουργείται από την εκπεμπόμενη θερμότητα και ψύξη του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θέρμανση του εδάφους από τον ήλιο δημιουργεί θερμές ροές αέρα. Η τυρβώδης ροή δημιουργείται από την ανάμειξη αυτών των θερμών ροών με το ψυχρότερο αέρα που τις περιβάλλει. Τη νύχτα το έδαφος γίνεται ψυχρότερο και ο ψυχρός αέρας κοντά στο έδαφος αναμειγνύεται με θερμότερο αέρα που βρίσκεται ψηλότερα, μέσω ανέμων. Μια περίοδος πού μικρής τυρβώδους ροής εμφανίζεται την αυγή και το σούρουπο όταν δεν θερμοβαθμίδα στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Τα επίπεδα τυρβώδους ροής είναι επίσης πολύ χαμηλά όταν ο ουρανός είναι νεφελώδης, που οδηγεί σε μικρή ηλιακή θέρμανση και ψύξη λόγω εκπεμπόμενης ενέργειας.

Στο Σχήμα 3.4 φαίνονται τυπικές τιμές της σταθεράς δομής του δείκτη διάθλασης C_n^2 , κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τη νύχτα, ο ουρανός ήταν καθαρός. Τα ελάχιστα της αυγής φαίνεται ως μια πού μικρή περίοδος χαμηλής τυρβώδους ροής λίγο μετά τις 6 πμ. Μετά την ανατολή η τιμή της σταθεράς C_n^2 αυξάνει πού γρήγορα. Λίγο πριν το μεσημέρι δημιουργήθηκαν σύννεφα και η σταθερά C_n^2 γίνεται μικρότερη με μεγάλες διακυμάνσεις. Περίπου στις 6 μμ, τα σύννεφα διαλύθηκαν και τα επίπεδα τυρβώδους ροής αυξήθηκαν. Το

ελάχιστο σούρουπου γίνεται εμφανές μόλις μετά τις 8 μμ και στη συνέχεια η ισχύς της τυρβώδους ροής επιστρέφει στα τυπικά νυκτερινά επίπεδα [19].



Σχήμα 3.4 Τυπικές τιμές της σταθεράς δομής του δείκτη διάθλασης C_n^2 το καλοκαίρι [19]

Το καλύτερο διαθέσιμο μοντέλο υπολογισμού της σταθεράς δομής του δείκτη διάθλασης C_n^2 κοντά στο έδαφος είναι το μοντέλο Hufnagel-Valley. Αυτό δίνεται από τη σχέση (18).

$$C_n^2 = 0,00594 \left(\frac{W}{27} \right)^2 (H \times 10^{-5}) \exp\left(-\frac{H}{1000}\right) + 2,7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{H}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{H}{100}\right) \quad (18)$$

όπου H είναι το ύψος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας σε μέτρα και το W είναι η κατακόρυφη μέση τιμή του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου. Συνήθως στο W δίνεται η τιμή 21 ενώ στο A η τιμή $1,7 \times 10^{-14}$ [19].

4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΔΙΑΔΙΔΟΜΕΝΟΥ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Οι κινητές επικοινωνίες είναι μια από τις πιο επιτυχημένες τεχνολογικές καινοτομίες στη σύγχρονη ιστορία. Τα συστήματα αυτά κάνουν χρήση του φάσματος συχνοτήτων μεταξύ των 300 MHz και των 3 GHz. Καθώς η ζήτηση συνεχώς αυξάνεται, παρατηρείται ένας αυξανόμενος «συνωστισμός» σε αυτό το εύρος ζώνης. Αντίθετα το εύρος ζώνης από τα 3 GHz ως τα 300 GHz παραμένει σχετικά αχρησιμοποίητο. Το εύρος ζώνης 3-30 GHz αναφέρεται γενικά ως ζώνη SHF (Super High Frequency band), ενώ το εύρος ζώνης 30-300 GHz αναφέρεται ως ζώνη EHF (Extremely High Frequency band) ή αλλιώς ως ζώνη χιλιοστομετρικών κυμάτων (Millimeter-wave band). Λόγω των παρόμοιων χαρακτηριστικών διάδοσης που παρουσιάζουν οι ζώνες SHF και EHF, το φάσμα από 3 έως 300 GHz αναφέρεται συνολικά ως ζώνη χιλιοστομετρικών κυμάτων. Τα αντίστοιχα μήκη κύματος κυμαίνονται μεταξύ του 1 mm και των 100 mm. [20]

Η διάδοση των ραδιοκυμάτων μέσα στην ατμόσφαιρα για αυτές τις συχνότητες περιλαμβάνει όχι μόνο τις απώλειες ελευθέρου χώρου (free-space loss) αλλά μερικούς ακόμα πολύ σημαντικούς παράγοντες. Αυτοί είναι οι εξής [21] :

1. Η συμβολή των αερίων της ομογενούς ατμόσφαιρας λόγω των μηχανισμών πόλωσης είτε υπάρχει συντονισμός είτε όχι.
2. Η συμβολή των ανομοιογενειών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα
3. Η σωματιδιακή συμβολή λόγω της βροχής, της ομίχλης, της νέφωσης και της αχλής (συμπεριλαμβάνει σκόνη, καπνό και σωματίδια αλατιού στον αέρα)

Τα μεγαλύτερα προβλήματα για μια ασύρματη επικοινωνία σε αυτές τις συχνότητες, εμφανίζονται λόγω των 2 και 3. Ειδικότερα δε η βροχόπτωση μπορεί να προκαλέσει ακόμα και διακοπή της ζεύξης.

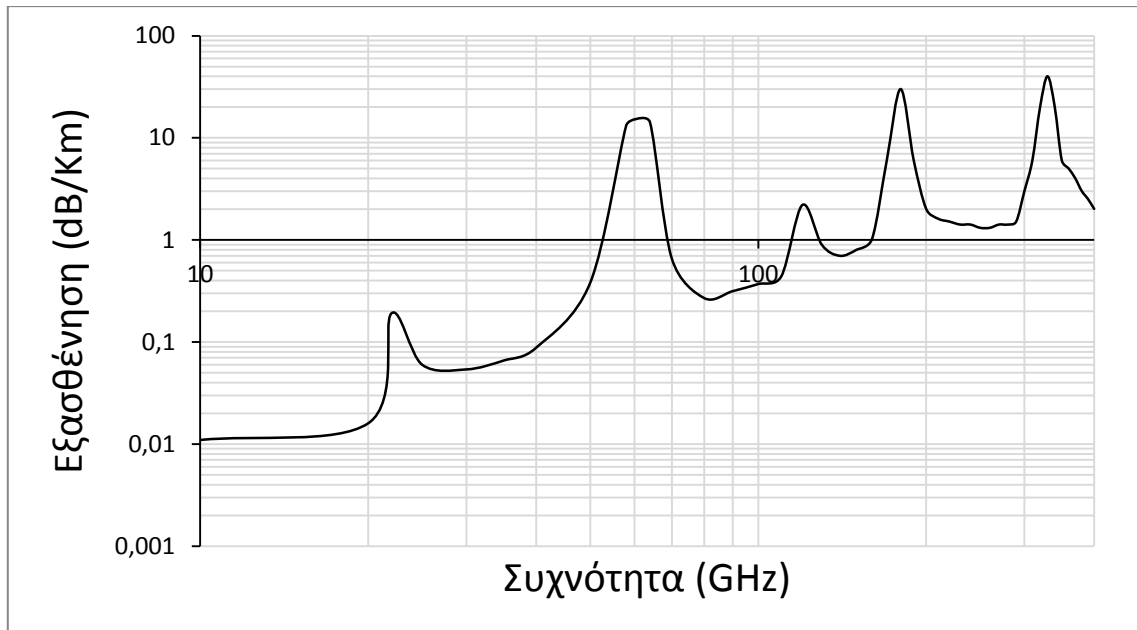
Μπορεί να εξαχθεί η σχέση (19), η οποία λαμβάνει υπόψη τους παραπάνω παράγοντες και υπολογίζει την συνολική εξασθένηση μετάδοσης για μια δεδομένη ζεύξη. [21]

$$L(dB) = 92.45 + 20 \log F_{GHz} + 20 \log D_{km} + a + b + c + d + e \quad (19)$$

- όπου:
- F = η συχνότητα λειτουργίας σε GHz
 - D = το μήκος της ζεύξης σε km
 - a = επιπλέον εξασθένηση λόγω του H₂O σε dB
 - b = επιπλέον εξασθένηση λόγω ομίχλη και αχλής σε dB
 - c = επιπλέον εξασθένηση λόγω του O₂ σε dB
 - d = αθροιστικές απώλειες λόγω απορρόφησης από άλλα αέρια
 - e = επιπλέον εξασθένηση λόγω βροχής σε dB

Η χρήση της λέξης επιπλέον εννοεί τις απώλειες επιπλέον των απωλειών ελευθέρου χώρου. Η παράμετρος a μεταβάλλεται με τη σχετική υγρασία, θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση και υψόμετρο, ενώ η ατμόσφαιρα θεωρείται ομογενής. Οι παράμετροι c και d θεωρούνται ότι μεταβάλλονται γραμμικά με την ατμοσφαιρική πυκνότητα και επομένως με την ατμοσφαιρική πίεση, ενώ θεωρούνται ότι είναι συνάρτηση του ύψους. Οι παράμετροι b και e μεταβάλλονται ανάλογα με την πυκνότητα της βροχόπτωσης και το μέγεθος των σταγόνων βροχής ή των σωματιδίων νερού όπως της ομίχλης ή της αχλής. Εδώ η ατμόσφαιρα θεωρείται πως είναι ανομοιογενής. [21]

Στην εξίσωση (19) οι παράμετροι b και d μπορούν συχνά να παραληφθούν. Οι παράμετροι a και c συνήθως ενώνονται και καλούνται απλά ατμοσφαιρική εξασθένηση. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η ατμοσφαιρική εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας για συχνότητες από 10 έως 400 GHz.



Σχήμα 4.1 Ατμοσφαιρική εξασθένιση (dB/Km) συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας (GHz)

4.1. Απορρόφηση του μορίου του Οξυγόνου (O_2)

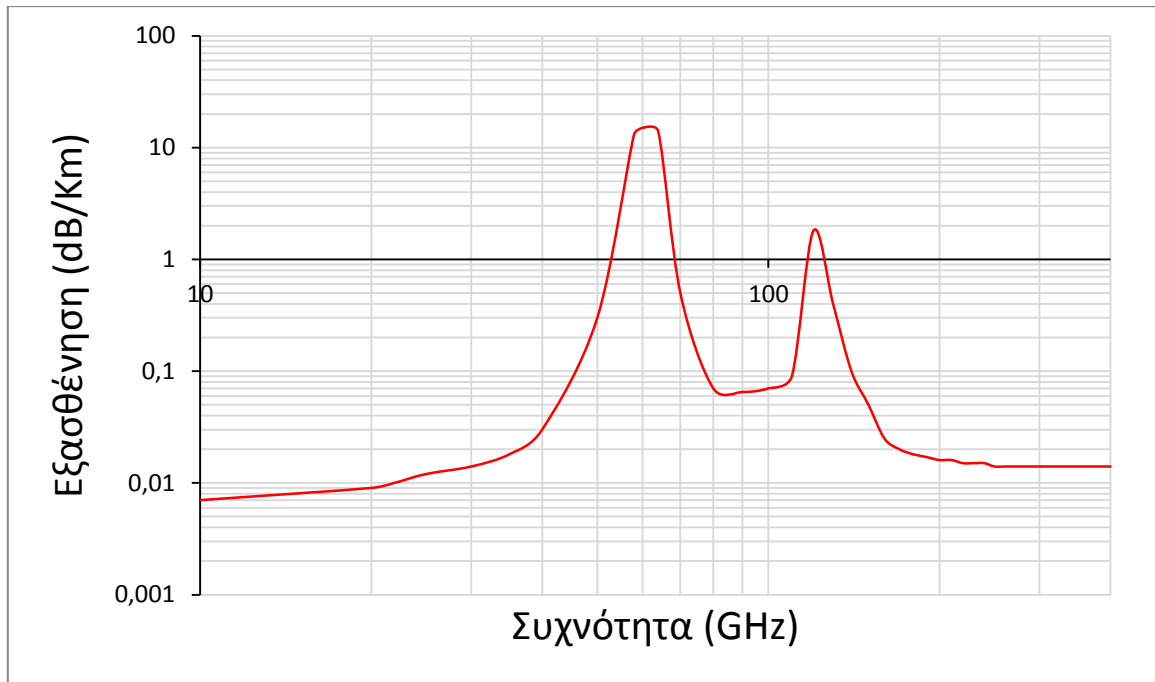
Τα διατομικά μόρια, τα οποία αποτελούνται από δύο πανομοιότυπα άτομα δεν εμφανίζουν μια σταθερή ηλεκτρική διπολική ροπή και σύμφωνα με τις κλασικές θεωρήσεις, δεν θα έπρεπε να αλληλεπιδρούν με το πεδίο της ακτινοβολίας. Στη πραγματικότητα, η αλληλεπίδραση αυτή είναι επίσης δυνατή εάν τα μόρια περιέχουν μια σταθερή μαγνητική διπολική ροπή. Ωστόσο η ένταση της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με αυτά τα μόρια είναι σημαντικά μικρότερη (κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον 10^5) σε σχέση με την περίπτωση της ηλεκτρικής διπολικής ροπής. Οι μεταβάσεις, που ορίζονται από τέτοιου τύπου αλληλεπιδράσεις, αναφέρονται ως απαγορευμένες μεταβάσεις. Αντιστοιχούν δε στις πραγματικές γραμμές και ζώνες απορρόφησης των διάφορων μορίων. Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων η ένταση αυτών των γραμμών είναι πολύ χαμηλή, μεγιστοποιούνται στην ατμόσφαιρα, όταν τα μόρια αυτά εμφανίζονται σε πολύ μεγάλες ποσότητες. [22]

Το μόριο του οξυγόνου είναι παραμαγνητικό υλικό και για αυτό το λόγο εμφανίζει μαγνητική διπολική ροπή. Όταν αλληλεπιδρά με ραδιοκύματα συγκεκριμένων συχνοτήτων, η ροπή αυτή προκαλεί εξαναγκασμένη περιστροφή του μορίου. Η περιστροφή αυτή με τη σειρά της προκαλεί διάχυση της ενέργειας του διαδιδόμενου πεδίου. Η απορρόφηση αποδεικνύεται ότι μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα του διαδιδόμενου κύματος είναι η ίδια με τη συχνότητα συντονισμού του μορίου του οξυγόνου. Σε χαμηλό υψόμετρο, όπου η πυκνότητα του αερίου είναι αυξημένη, η εξασθένηση που υφίσταται το διαδιδόμενο ραδιοκύμα μεγαλώνει λόγω του αυξημένου αριθμού συγκρούσεων που υφίσταται.

Το μοριακό οξυγόνο εμφανίζει 45 διακριτές κορυφές συντονισμού (resonance) μεταξύ των 48 και 72 GHz, οι οποίες συγχωνεύονται σε μια ομαλή καμπύλη εξασθένησης σε χαμηλό υψόμετρο (υψηλή ατμοσφαιρική πίεση) λόγω μοριακών συγκρούσεων. Μια μέγιστη τυπική τιμή απορρόφησης που παρατηρείται στη ζώνη αυτή είναι τα 15 dB/Km . Επιπλέον, το οξυγόνο παρουσιάζει μια μοναδική γραμμή απορρόφησης στα 119 GHz της οποίας μια μέγιστη τυπική τιμή είναι τα 1.8 dB/Km [23]. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η εξασθένηση του εκπεμπόμενου σήματος σε dB/Km συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας σε GHz.

Με βάση αυτά τα δεδομένα μπορεί να ειπωθεί πως κατά την διάδοση χιλιοστομετρικών κυμάτων, το μόριο του οξυγόνου προκαλεί τη μεγαλύτερη εξασθένηση για δυο μήκη κύματος τα οποία αντιστοιχούν σε συχνότητες γύρω από τις κύριες συχνότητες συντονισμού που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτά τα μήκη κύματος είναι τα εξής :

- $\lambda = 5 \text{ mm}$
- $\lambda = 2.52 \text{ mm}$



Σχήμα 4.2 Εξασθένηση λόγω οξυγόνου (dB/Km) συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας (GHz)

Η (20) είναι μια απλή σχέση που δίνει την εξασθένηση a_{oxy} που οφείλεται στο οξυγόνο. Είναι δε βασισμένη σε πειραματικές μετρήσεις.

$$a_{oxy} = \frac{0.2422 \cdot f}{1 + \left(\frac{60 - f}{3.92}\right)^2} \frac{p_{am}}{1013.25} \left(\frac{300}{T}\right)^2 \quad (20)$$

όπου η εξασθένηση a_{oxy} εκφράζεται σε $\frac{dB}{Km}$, η συχνότητα f εκφράζεται σε GHz, η ατμοσφαιρική πίεση p_{am} εκφράζεται σε mbar και η θερμοκρασία T εκφράζεται σε Kelvin. Από τη σχέση (20) είναι φανερό πως για σταθερή συχνότητα λειτουργίας f , η τιμή της εξασθένησης a_{oxy} είναι συνάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας. [23]

4.2. Απορρόφηση που οφείλεται στα υπόλοιπα αέρια

Εκτός από το οξυγόνο η ατμόσφαιρα αποτελείται και από άλλα αέρια, όπως οι υδρατμοί, το όζον (O_3), το οξειδίο του αζώτου (N_2O), το διοξειδίο του αζώτου (NO_2), η αμμωνία (NH_3) και το διοξειδίο του θείου (SO_2). Στον Πίνακα 4.1 Ποσοστά κατάληψης των αερίων O_2 , O_3 , N_2O , NO_2 , NH_3 , SO_2 στη σύνθεση του ξηρού αέρα [24] παρουσιάζονται τα ποσοστά που καταλαμβάνουν τα αέρια αυτά (μαζί με το οξυγόνο) στη σύνθεση του ξηρού αέρα. Το ποσοστό των υδρατμών είναι μεταβλητό και κυμαίνεται γύρω από το 1%.

Συστατικό	% κατ' όγκο	% κατά βάρος
O_2	20.949	23.143
N_2O	$5 \cdot 10^{-5}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$
NO_2	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
O_3	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$
SO_2	$2 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$
NH_3	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$

Πίνακας 4.1 Ποσοστά κατάληψης των αερίων O_2 , O_3 , N_2O , NO_2 , NH_3 , SO_2 στη σύνθεση του ξηρού αέρα [24]

Η πυκνότητα το αερίων αυτών στην σύσταση του ξηρού αέρα, είναι πάρα πολύ μικρή, ειδικά συγκρινόμενη με την πυκνότητα του οξυγόνου και επομένως μπορεί να θεωρηθεί πως η συμβολή τους στην εξασθένηση του διαδιδόμενου κύματος είναι αμελητέα και είναι δυνατό να παραληφθεί [52].

Όπως αναλύεται διεξοδικά στην [52], όταν το μόριο του ύδατος αλληλεπιδρά με ραδιοκύματα συγκεκριμένων συχνοτήτων, η διπολική ροπή που σχηματίζεται μεταξύ του ατόμου του οξυγόνου και των ατόμων του υδρογόνου, προκαλεί εξαναγκασμένη περιστροφή του μορίου που με τη σειρά της προκαλεί διάχυση της ενέργειας του διαδιδόμενου πεδίου. Η απορρόφηση αποδεικνύεται ότι μεγιστοποιείται όταν η συχνότητα του διαδιδόμενου κύματος είναι η ίδια με τη συχνότητα συντονισμού του μορίου του νερού.

Οι υδρατμοί στην ατμόσφαιρα παρουσιάζουν τρεις κορυφές απορρόφησης λόγω φαινομένων μοριακού συντονισμού. Οι κορυφές αυτές εμφανίζονται στα 22, 183 και 323 GHz. Αντίθετα με ότι συμβαίνει με την απορρόφηση από το μόριο του οξυγόνου, η χρήση συχνοτήτων που αντιστοιχούν στις κορυφές απορρόφησης του ύδατος πρέπει να αποφεύγονται. Σε αυτές τις συχνότητες, η εξασθένηση παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες [23].

4.3. Εξασθένηση λόγω βροχής

Η εξασθένηση λόγω βροχής αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα τις ασύρματες επικοινωνίες που κάνουν χρήση χιλιοστομετρικών κυμάτων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των σταγόνων της βροχής και των ραδιοκυμάτων προκαλούν εξασθένηση η οποία, για δεδομένο ρυθμό βροχής, εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των σταγόνων. Διάφορες στατιστικές κατανομές του μεγέθους της σταγόνας βροχής (rain drop size distributions) έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, οι οποίες έχουν εξαχθεί μέσω προσαρμογής σε πειραματικά δεδομένα.

Οι Marshall και Palmer πρότειναν την εμπειρική έκφραση (21), όπου $N(D)$ είναι ο αριθμός των σταγόνων ανά μοναδιαία ένταση ανά μοναδιαίο διάστημα για σταγόνα διαμέτρου D .

$$N(D) = N_0 e^{-\lambda D} \quad (21)$$

Οι τιμές των παραμέτρων προτάθηκε να είναι $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ και $\lambda = 4.1 \cdot R^{0.21} \text{ mm}^{-1}$, όπου το R είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης και μετριέται σε mm/hr [25],[26]. Η προσαρμογή αυτής της κατανομής δεν είναι πολύ καλή για σταγόνες διαμέτρου μικρότερης του 1mm [26].

Ο Best πρότεινε το μοντέλο κατανομής μεγέθους σταγόνας (22), κάνοντας ανάλυση ενός πολύ μεγάλου αριθμού πειραματικών δεδομένων.

$$N(D) = \frac{13.5w}{\pi a^4} \left(\frac{D}{a}\right)^{-1.75} e^{-\left(\frac{D}{a}\right)^{2.25}} \quad (22)$$

όπου $w = 67 \cdot R^{0.846} \text{ mm}^3 \text{ m}^{-3}$ και $a = 1.3 \cdot R^{0.232} \text{ mm}^{-1}$, με το R να μετριέται σε mm/hr [26].

Οι Joss, Thams και Waldvogel, ύστερα από πειραματικές μετρήσεις, κατέληξαν σε μια εξίσωση της μορφής (21) την οποία πρότειναν και οι Marshall, Palmer. Ωστόσο πρότειναν διαφορετικές τιμές για τους συντελεστές N_o και λ , ανάλογα με τον τύπο της βροχής. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Τύπος Βροχής	$N_o \text{ (m}^{-3} \text{ mm}^{-1}\text{)}$	$\lambda \text{ (mm}^{-1}\text{)}$
Ψιλόβροχο	30000	$5.7 \cdot R^{-0.21}$
Εκτεταμένη	7000	$4.1 \cdot R^{-0.21}$
Καταιγίδα	1400	$3.0 \cdot R^{-0.21}$

Πίνακας 4.2 Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών N_o , λ από τους Joss, Thams και Waldvogel [26]

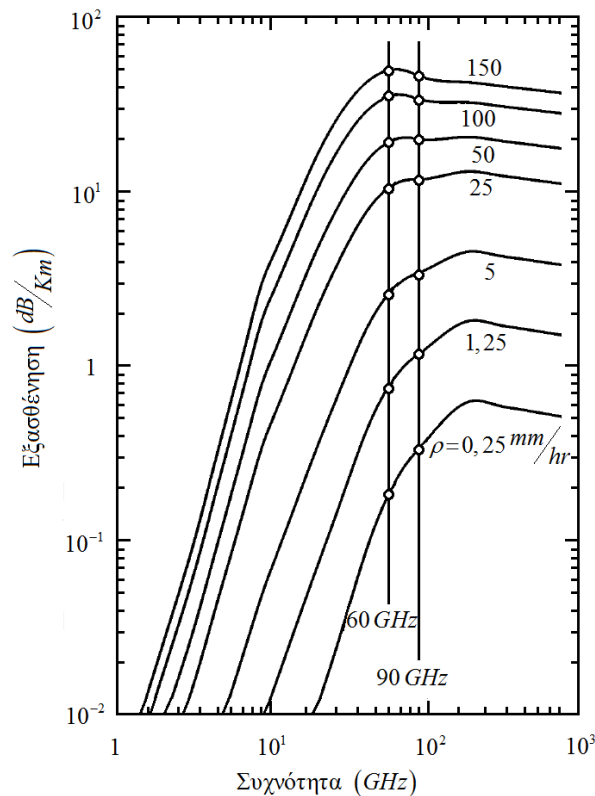
όπου το R είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης και μετριέται σε mm/hr .

Ωστόσο το μοντέλο που ύστερα από διάφορες πειραματικές μετρήσεις φάνηκε πως προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα, σε σχέση με τα μοντέλα που ήδη αναφέρθηκαν, είναι η κατανομή Weibull. Σύμφωνα με το μοντέλο της εξίσωσης (23) που προτάθηκε από τους Sekine και Lind, το οποίο βασίζεται στην κατανομή Weibull, παρουσιάζεται καλύτερη προσαρμογή για διάφορα μεγέθη σταγόνας.

$$N(D) = N_o \frac{c}{b} \left(\frac{D}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{D}{b}\right)^c} \quad (23)$$

όπου D είναι η διάμετρος σε mm, $N_o = 1000m^{-3}mm^{-1}$, $c = 0.95 \cdot R^{0.14}$ και $b = 0.26 \cdot R^{0.44}$, με το ρυθμό R σε mm/hr [26].

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες εξασθένησης του ραδιοκύματος λόγω της βροχής, για διάφορους ρυθμούς βροχόπτωσης και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 20 \text{ }^\circ C$. Οι τιμές του ρυθμού αυτού έχουν εύρος από $0.25 \text{ } mm/hr$ που αντιστοιχεί σε πολύ ασθενές ψιλόβροχο, ως $150 \text{ } mm/hr$ που αντιστοιχεί σε πολύ ισχυρή νεροποντή. Με τις δύο κατακόρυφες γραμμές είναι σημειωμένες οι τιμές της εξασθένησης για δύο διαφορετικές της συχνότητας: 60 GHz και 90 GHz . Παρατηρείται πως η εξασθένηση παίρνει μια σχεδόν σταθερή τιμή για συχνότητες μεγαλύτερες από 100 GHz .



Σχήμα 4.3 Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης συναρτήσει της συχνότητας [23]

Αν τώρα σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της εξασθένησης συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης ρ , κάνοντας χρήση λογαριθμικών αξόνων, είναι εμφανές πως οι διάφορες καμπύλες ακολουθούν την πολύ γνωστή σχέση (24).

$$a_{rain} = a \cdot \rho^b \quad (24)$$

Το a_{rain} μετριέται σε dB/Km και το ρ σε mm/hr . Οι συντελεστές a και b είναι συναρτήσεις της συχνότητας f , της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T , της κατανομής μεγέθους σταγόνας και σε μικρότερο βαθμό από την πόλωση του κύματος (οριζόντια ή κατακόρυφη) [3]. Στον

Πίνακας 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών a_h, a_v και b_h, b_v για διάφορες τιμές συχνότητας από 10 έως 400 GHz.

Συχνότητα (GHz)	a_h	a_v	b_h	b_v
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
20	0.0751	0.06910	1.099	1.065
30	0.1870	0.16700	1.021	1.000
40	0.3500	0.31000	0.939	0.929
50	0.5360	0.47900	0.873	0.868
60	0.7070	0.64200	0.826	0.824
70	0.8510	0.78400	0.793	0.793
80	0.9750	0.90600	0.769	0.769
90	1.0600	0.99900	0.753	0.754
100	1.1200	1.06000	0.743	0.744
150	1.3100	1.27000	0.710	0.711
200	1.4500	1.42000	0.689	0.690
300	1.3600	1.35000	0.688	0.689
400	1.3200	1.31000	0.683	0.684

Πίνακας 4.3 Τιμές των συντελεστών για τον υπολογισμό της εξασθένησης λόγω βροχής από σχέση (24) [27]

Για γραμμική και κυκλική πόλωση, καθώς και όλες τις γεωμετρίες μονοπατιού, οι συντελεστές a και b της εξίσωσης (24) μπορούν να υπολογιστούν κάνοντας χρήση του

Πίνακας 4.3 και των εξισώσεων (25) και (26).

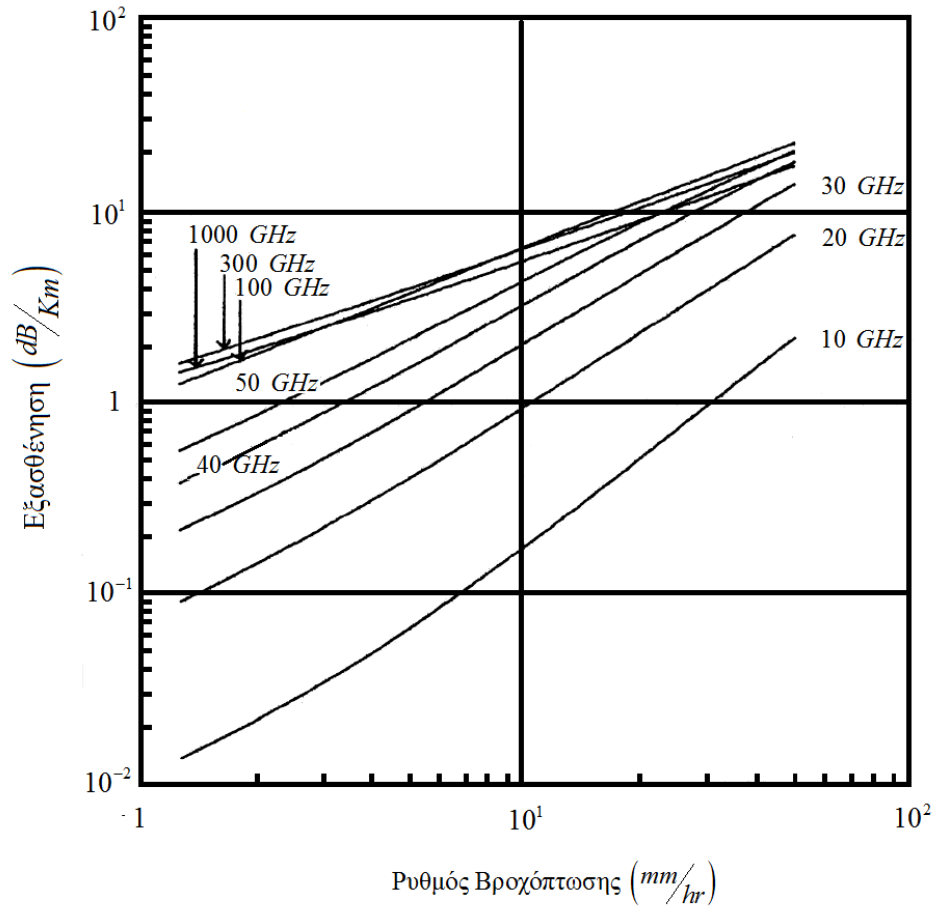
$$a = \frac{a_h + a_v + (a_h - a_v) \cos^2(\theta) \cos(2\tau)}{2} \quad (25)$$

$$b = \frac{a_h b_h + a_v b_v + (a_h b_h - a_v b_v) \cos^2(\theta) \cos(2\tau)}{2a} \quad (26)$$

όπου θ είναι η γωνία ανύψωσης μονοπατιού (path elevation angle) και τ η γωνία κλίσης πόλωσης (polarization tilt angle) ως προς τον οριζόντιο άξονα ($\tau = 45^\circ$ για κυκλική πόλωση) [27].

Παρατηρείται πως οριζόντια πολωμένα κύματα υποφέρουν από μεγαλύτερη εξασθένηση σε σχέση με τα κατακόρυφα πολωμένα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι μεγάλες σταγόνες βροχής είναι γενικά σχηματισμένες ως πεπλατυσμένα σφαιροειδή και είναι ευθυγραμμισμένες με τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής [21].

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της εξασθένησης του κύματος συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης για διάφορες τιμές της συχνότητας από 10 έως 1000 GHz και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 20^\circ C$. Πρέπει επίσης να επισημανθεί πως, σύμφωνα με την πηγή [6], για συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz η εξασθένηση είναι σχεδόν η ίδια για θερμοκρασίες περιβάλλοντος $0^\circ C$, $10^\circ C$ και $20^\circ C$.



Σχήμα 4.4 Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης [23]

Έστω ότι $p(\rho)$ είναι το ποσοστό του χρόνου κατά τη διάρκεια του οποίου ο ρυθμός βροχόπτωσης ξεπερνάει μια δεδομένη τιμή ρ . Επίσης θεωρείται πως ρ_o είναι ρυθμός βροχόπτωσης τέτοιος ώστε $p(\rho_o) = 0,01\%$ και η αντίστοιχη εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης είναι ίση με α_o , προκύπτοντας από τη σχέση (24) ως εξής:

$$\alpha_o = a \cdot \rho_o^b \quad (27)$$

Τότε για οποιοδήποτε ρυθμό βροχόπτωσης ρ , η εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης του κύματος, μπορεί να γραφτεί όπως φαίνεται στη σχέση (28) [23].

$$\alpha_{rain}(\rho) = \alpha_o \left[\frac{p(\rho)}{0,01} \right]^{-u} \quad (28)$$

όπου το εκθετικό u παίρνει τις τιμές που φαίνονται στη σχέση (29). [23]

$$u = \begin{cases} 0.33 & \text{εάν } 0.001\% < p(\rho) < 0.01\% \\ 0.41 & \text{εάν } 0.01\% < p(\rho) < 0.1\% \end{cases} \quad (29)$$

4.4. Επηρεασμός της ζεύξης MMW από την ομίχλη

Όπως αναλύεται διεξοδικά στην [52], η εξασθένηση a_{fog} είναι ανεξάρτητη της κατανομής μεγέθους σταγόνας, σε αντίθεση με την περίπτωση της βροχής. Αντίθετα, είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό p_1 και μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη σχέση (30). [21]

$$a_{fog} = K_c \cdot p_1 \quad (30)$$

όπου το a_{fog} εκφράζεται σε dB/Km ενώ το p_1 συνήθως εκφράζεται σε gr/m^3 . Το K_c ορίζεται ως σταθερά εξασθένησης, είναι συνάρτηση της συχνότητας και της θερμοκρασίας και εκφράζεται σε $\frac{dB}{km} \left(\frac{g}{m^3} \right)^{-1}$.

Τυπικές τιμές του περιεχομένου της ομίχλης σε νερό βρίσκονται μεταξύ 0.1 και 0.2 gr/m^3 . Θεωρώντας θερμοκρασία 10°C, η απόσβεση μπορεί να υπολογιστεί πως είναι περίπου 0.08–0.16 dB/km στα 35 GHz και 0.45–0.9 dB/km στα 95 GHz. Είναι φανερό πως οι τιμές αυτές της εξασθένησης είναι πολύ μικρές, ειδικά σε σχέση με την απόσβεση που υφίσταται το χιλιοστομετρικό κύμα λόγω του οξυγόνου και της βροχής. Επομένως στις περισσότερες από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα [52].

4.5. Λόγοι χρήσης των συχνοτήτων 60 και 90 GHz για τη λειτουργία του MMW υποσυστήματος

Όπως αναλύεται διεξοδικά στην [52], απαιτείται η εύρεση μιας μη αδειοδοτημένης περιοχής συχνοτήτων, η οποία να είναι ανεπηρέαστη από την ομίχλη. Επιπλέον, η χρήση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος για επικοινωνίες από σημείο σε σημείο (point to point) και για μικρές αποστάσεις οδηγεί στην επιλογή συχνότητας μεγαλύτερης των 60 GHz. Οι απαιτήσεις αυτές οδηγούν την αναζήτηση της περιοχής αυτής, μεταξύ των 60 και 300 GHz, δηλαδή στα χιλιοστομετρικά κύματα.

Η περιοχή από 59 έως 64 GHz είναι μη αδειοδοτημένη στις περισσότερες περιοχές παγκοσμίως. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως αυτή είναι η περιοχή που το οξυγόνο εμφανίζει μέγιστη απορρόφηση και επομένως είναι ασύμφορη η χρήση της για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων λόγω των απωλειών. Ωστόσο για τα υβριδικά συστήματα FSO/MMW είναι μια πολύ καλή επιλογή, αφού απαιτείται η κάλυψη μικρών αποστάσεων [52].

Μια δεύτερη επιλογή για τη συχνότητα λειτουργίας είναι η περιοχή από 92 έως 94 GHz, η οποία δεν απαιτεί αδειοδότηση. Εκεί, οι επιπλέον απώλειες λόγω απορρόφησης από τα μόρια του οξυγόνου και του νερού είναι αντίστοιχες με αυτές στα 60 GHz. Ωστόσο η αυξημένη συχνότητα επιτρέπει την επίτευξη ακόμα υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων [52].

5. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕ ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ

Τρεις σημαντικές στατιστικές [30] χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της κατανομής των διαλείψεων: η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας ΣΠΠ (*probability density function-PDF*), η Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής ΑΣΚ (*cumulative distribution function-CDF*) και η Ροπογεννήτρια Συνάρτηση (*moment generating function-MGF*). Πιο κάτω έπεται η μαθηματική τους έκφραση.

Η ΣΠΠ μίας τυχαίας μεταβλητής X ορίζεται ως η παράγωγος της $F_X(x)$, δηλαδή:

$$p_x(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (31)$$

Η ΑΣΚ μίας τυχαίας μεταβλητής X ορίζεται ως εξής:

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (32)$$

Η ροπογεννήτρια συνάρτηση της ΑΣΚ μίας τυχαίας μεταβλητής X δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$M_X(s) = \int_0^{\infty} e^{-sx} p_X(x) dx \quad (33)$$

Η σηματοθορυβική σχέση ανά σύμβολο (SNR) του καναλιού, γ , δίνεται από τον τύπο $\gamma = \frac{\alpha^2 E_s}{N_0}$ και η μέση σηματοθορυβική σχέση ανά σύμβολο δίνεται από τον τύπο $\bar{\gamma} = \frac{\Omega E_s}{N_0}$, όπου E_s είναι η ενέργεια ανά σύμβολο και N_0 η φασματική πυκνότητα θορύβου. Όταν οι απώλειες επηρεάζουν ένα σύστημα στενού εύρους (narrowband), το λαμβανόμενο πλάτος

φέροντος διαμορφώνεται με ένα πλάτος απωλειών a , όπου a είναι μία τυχαία μεταβλητή με μέση τετραγωνική τιμή $\Omega = \overline{a^2}$. Επιπλέον, η ΣΠΠ του γ λαμβάνεται εισάγοντας μία αλλαγή μεταβλητών στην έκφραση για τις απώλειες $p_a(a)$ του a , παίρνοντας:

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{P_a\left(\sqrt{\frac{\Omega\gamma}{\gamma}}\right)}{2\sqrt{\frac{\gamma\gamma}{\Omega}}} \quad (34)$$

Επίσης, το ποσό εξασθένισης m (“Amount of Fading (AF)”) ή σχήμα απωλειών που συνδέεται με την ΣΠΠ απωλειών, ορίζεται ως:

$$m = AF = \frac{\text{var}[a^2]}{(E[a^2])^2} = \frac{E[(a^2 - \Omega^2)]}{\Omega^2} = \frac{E[\gamma^2] - (E[\gamma])^2}{(E[\gamma])^2} \quad (35)$$

Στη στατιστική θεωρία των τηλεπικοινωνιών, τα μοντέλα πιθανοτήτων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού των πολύπλοκων συστημάτων για τη μετάδοση των σημάτων από διάφορα μέσα διάδοσης με μεταβλητές παραμέτρους, αναλύονται και βελτιώνονται συνεχώς. Με την ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών, κυρίως στην αρχή αυτού του αιώνα, η πιθανολογική προσέγγιση καθίσταται αναπόφευκτη ώστε να γίνει αποτελεσματική η μετάδοση, επειδή τόσο το χρήσιμο μήνυμα όσο και ο θόρυβος είναι στοχαστικές διαδικασίες [31], [30].

Για τις ασύρματες επικοινωνίες γενικά, υπάρχουν διάφορα μοντέλα για την στατιστική κατανομή της λήψης σήματος. Οι ταχείες διακυμάνσεις για τη στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύ, λόγω των επιδράσεων των πολλαπλών διαδρομών, περιγράφονται συνήθως από τα μοντέλα Rayleigh, Rician, Nakagami- m ή Weibull [32].

5.1. Μοντέλο Rayleigh

Όπως αναλύεται διεξοδικά και στην [52], το μοντέλο αυτό ακολουθεί την κατανομή Rayleigh η οποία είναι συνεχής. Προσπαθεί δε να προσομοιώσει την επίδραση του καναλιού σε ένα σήμα που μεταδίδεται σε περιβάλλον με πολλαπλές ανακλαστικές επιφάνειες. Πρέπει να τονιστεί πως το μοντέλο Rayleigh αφορά συστήματα όπου οπτική επαφή δεν υπάρχει (Non Line of Sight- NLOS). Φαινόμενα όπως ανάκλαση, περίθλαση, διάθλαση και εξασθένιση του σήματος μπορούν να προκληθούν από διάφορα εμπόδια όπως μπορεί να είναι τα κτίρια.

5.2. Μοντέλο Nakagami-q (Hoyt)

Το μοντέλο Nakagami-q (Hoyt) χρησιμοποιείται κυρίως για δορυφορικές ζεύξεις - δεν θα αναλυθεί περαιτέρω σε αυτήν την εργασία - που χαρακτηρίζονται από ισχυρούς ιονοσφαιρικούς σπινθηρισμούς (scintillations).

5.3. Μοντέλο Nakagami-n (Rice) [30]

Η κατανομή Nakagami-n ή Rice χρησιμοποιείται συνήθως για διάδοση διαδρομών (“propagation paths”) που έχουν ισχυρή συνιστώσα οπτικής επαφής LOS μεταξύ πομπού και δέκτη και κάποιες ασθενέστερες δευτερεύουσες τυχαίες συνιστώσες που προέρχονται από τις υπόλοιπες διαδρομές που ακολουθεί το σήμα.

Το πλάτος της κρουστικής απόκρισης του καναλιού ακολουθεί κατανομή Rician. Έτσι, η ΣΠΠ του μέτρου της τυχαίας μεταβλητής a δίνεται από τον τύπο:

$$p_a(a) = \frac{2(1+n^2)e^{-n^2}a}{\Omega} \exp\left(-\frac{(1+n^2)a^2}{\Omega}\right) I_0\left(2na\sqrt{\frac{1+n^2}{\Omega}}\right), \quad a \geq 0 \quad (36)$$

όπου n είναι η παράμετρος διαλείψεων Nakagami, παίρνει τιμές από 0 έως ∞ και σχετίζεται με την παράμετρο Rice (Ricean factor- K) με τη σχέση: $K = n^2$, όπου η παράμετρος K αποτελεί το λόγο της ισχύος μεταξύ της συνιστώσας οπτικής επαφής και των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών. Το I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους [35] και μηδενικής τάξης. Η σηματοθορυβική σχέση ανά σύμβολο (SNR) του καναλιού, γ , όπου $\gamma = \frac{\alpha^2 E_s}{N_0}$ και η μέση σηματοθορυβική σχέση ανά σύμβολο είναι $\bar{\gamma} = \frac{\Omega E_s}{N_0}$ και σύμφωνα με τη σχέση (36) κατανέμεται σύμφωνα με μία μη κεντρική (“chi-square”) χι-τετράγωνο κατανομή που δίνεται από τον τύπο:

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+n^2)e^{-n^2}}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) I_0\left(2n\sqrt{\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right), \gamma \geq 0 \quad (37)$$

Το μοντέλο Nakagami- n εκφυλίζεται στην οριακή κατάσταση για $n=0$ στο μοντέλο Rayleigh, αφού η παράμετρος K είναι τότε επίσης μηδενική και άρα, σύμφωνα με τον ορισμό της, δεν υπάρχει πλέον συνιστώσα οπτικής επαφής. Επίσης, όταν $n=\infty$, το πλάτος παραμένει σταθερό αφού δεν υπάρχουν διαλείψεις, και πλέον το μοντέλο είναι ένα απλό κανάλι Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN).

5.4. Μοντέλο Weibull και εκτίμηση χωρητικότητας

Η εκτίμηση των επιδόσεων του κάθε υβριδικού συστήματος FSO θα μπορούσε να γίνει με την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου κατανομής για συνθήκες ατμοσφαιρικής διαταραχής (δηλαδή για το σκέλος του FSO) και το αποτέλεσμα πολλαπλών διαδρομών (για παράδειγμα για το RF ή το κομμάτι του MMW). Η συνολική μέση χωρητικότητα του καναλιού εκτιμάται για ένα μοντελοποιημένο FSO κανάλι με την κατανομή γάμμα-γάμμα

(gamma- gamma) διαταραχών [36], καθώς και με ένα κανάλι πολυδιόδευσης MMW διαμορφωμένο σύμφωνα με την κατανομή Weibull [36], [37].

Για την εκτίμηση της συνολικής μέσης χωρητικότητας του υβριδικού συστήματος FSO, πρέπει να εκτιμάται η μέση χωρητικότητα του κάθε επιμέρους στοιχείου. Τόσο για ισχυρές όσο και για ισχνές ατμοσφαιρικές συνθήκες αναταραχών, η κατανομή γάμμα-γάμμα [36] είναι κατάλληλη για την περιγραφή των διακυμάνσεων της έντασης της ακτινοβολίας στο δέκτη.

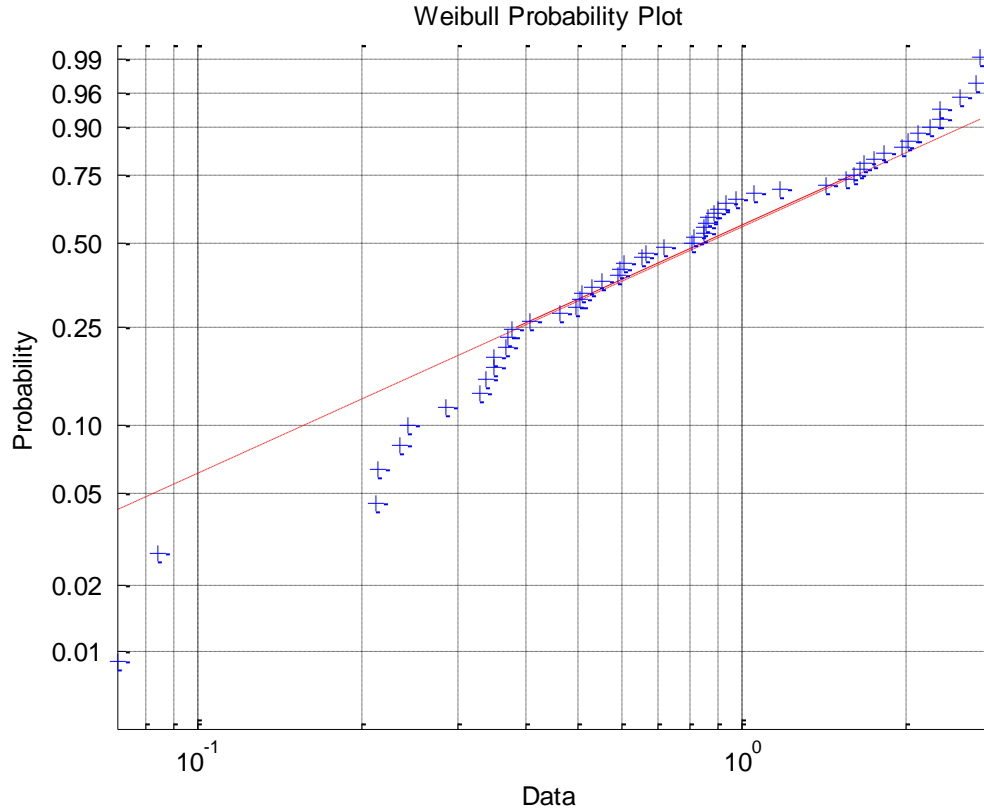
Στη διπλωματική εργασία αυτή, γίνεται εστίαση στο κομμάτι του χιλιοστομετρικού μήκους κύματος. Για την εκτίμηση της μέσης χωρητικότητας του μέρους MMW του υβριδικού συστήματος της FSO, γίνεται η υπόθεση ότι η κατανομή Weibull [37] είναι κατάλληλη για την περιγραφή των φαινομένων πολυδιοδεύσεων.

Στη θεωρία πιθανοτήτων και τη Στατιστική, η κατανομή Weibull είναι μια συνεχής κατανομή πιθανοτήτων η οποία πήρε το όνομα του Waloddi Weibull και ο οποίος την πρότεινε το 1937. Ευρέως γνωστή έγινε το 1951 [38], [39], όπου και περιγράφηκε λεπτομερώς, και χρησιμοποιήθηκε τότε για την εκτίμηση του χρόνου ζωής διαφόρων μηχανών. Σήμερα, η κατανομή Weibull είναι η πιο δημοφιλής στις επιστήμες της αξιοπιστίας και της ανάλυσης στοιχείων αποτυχίας.

Χρησιμοποιώντας την έκδοση 2009.b του Matlab και πληκτρολογώντας τις παρακάτω δύο σειρές κώδικα, παίρνουμε τη γραφική παράσταση της πιθανότητας Weibull.

```
r = wblrnd(1.1,1.4,55,1);
```

```
wblplot(r)
```



Σχήμα 5.1 Γραφική παράσταση πιθανότητας Weibull συναρτήσεως του ρυθμού δεδομένων

Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας ΣΠΠ (“PDF”) της κατανομής Weibull για το γ , έχει την ακόλουθη μορφή [36]:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{\beta \Gamma(1 + 2\beta^{-1})}{2\mu} \left(\frac{\gamma \Gamma(1 + 2\beta^{-1})}{\mu} \right)^{\beta-2} \exp \left[-\frac{\gamma \Gamma(1 + 2\beta^{-1})^{\frac{\beta}{2}}}{\mu} \right] \quad (38)$$

όπου το μ είναι η μέση τιμή της σηματοθορυβικής σχέσης SNR του σήματος στο δέκτη, β ο παράγοντας απόσβεσης και $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα.

Πιο συνοπτικά, η ΣΠΠ γράφεται ως εξής για μία Weibull τυχαία μεταβλητή x [39]:

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (39)$$

όπου τέθηκε ως $x = \gamma$, $\lambda = \frac{\mu}{\Gamma(1+2\beta^{-1})}$, $k = \beta/2$

Το $k > 0$ είναι η παράμετρος σχήματος (“shape parameter”) και το $\lambda > 0$ είναι η παράμετρος κλίμακας (“scale parameter”) της κατανομής. Η Συμπληρωματική Αθροιστική Συνάρτηση της Κατανομής είναι μια απλωμένη εκθετική συνάρτηση. Η κατανομή Weibull σχετίζεται με μια σειρά άλλων κατανομών. Ειδικότερα, είναι η εκθετική κατανομή ($k=1$) αλλά και η κατανομή Rayleigh ($k=2$). Εάν η ποσότητα x είναι μία μεταβλητή «χρόνου προς αποτυχία» “time-to-failure”, η Weibull απεικονίζει μια κατανομή για την οποία το ποσοστό αποτυχίας είναι ανάλογο με το χρόνο. Η παράμετρος k μπορεί να ερμηνευθεί απευθείας ως εξής:

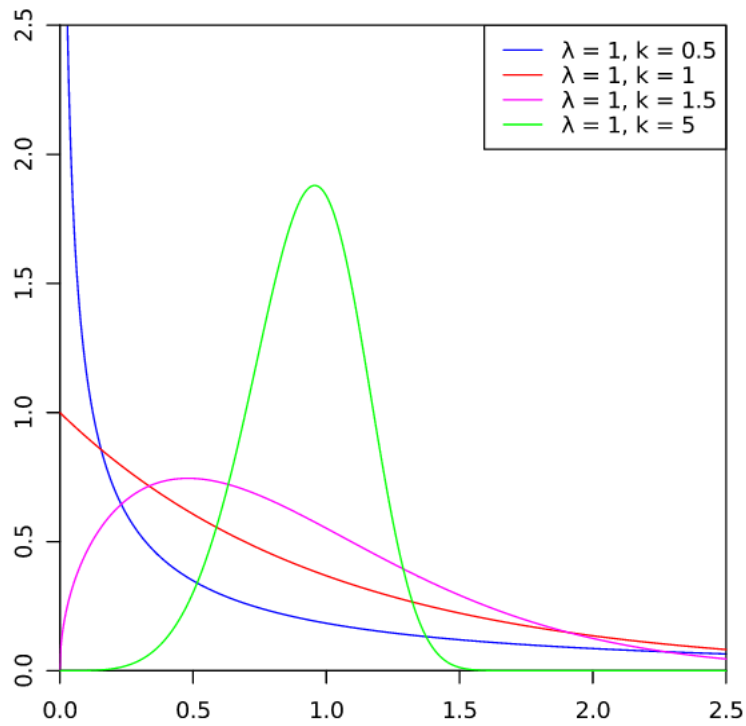
- Μία τιμή για $k < 1$ δείχνει ότι το ποσοστό αποτυχίας μειώνεται με το χρόνο. Αυτό συμβαίνει όταν υπάρχουν ελαττωματικά στοιχεία που αποτυγχάνουν νωρίς και το ποσοστό αποτυχίας μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς τα ελαττωματικά στοιχεία αποσύρονται από τον πληθυσμό.
- Για $k=1$, το ποσοστό αποτυχίας είναι σταθερό με την πάροδο του χρόνου. Αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει τυχαία εξωτερικά γεγονότα που προκαλούν αποτυχία.
- Για $k > 1$, το ποσοστό αποτυχίας αυξάνει με το χρόνο. Αυτό συμβαίνει αν υπάρχουν κομμάτια ή τμήματα που είναι πιο πιθανόν να αποτύχουν όσο περνάει ο καιρός.

Η Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής για την Weibull κατανομή είναι:

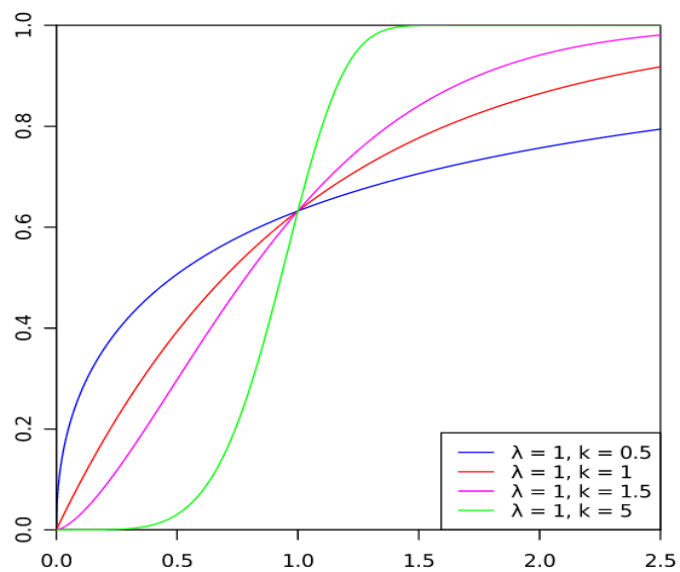
$$F(x; \lambda, k) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (40)$$

Ο ρυθμός αποτυχίας h (“hazard rate”) δίνεται από τον τύπο:

$$h(x; k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^k \quad (41)$$



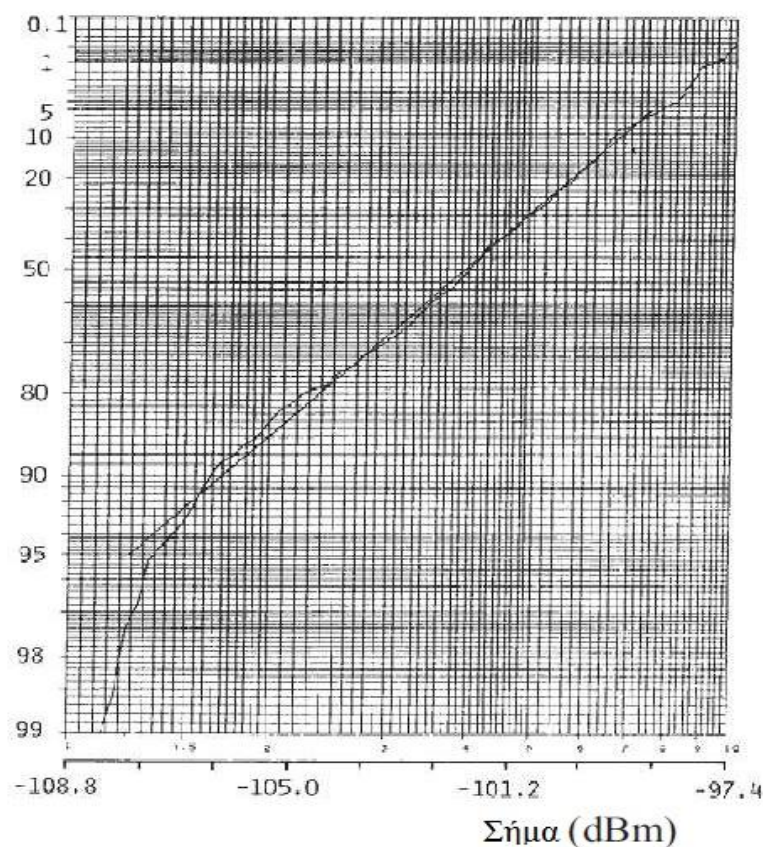
Σχήμα 5.2 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας



Σχήμα 5.3 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής

Εκτός από τις επιστήμες της αξιοπιστίας και της ανάλυσης στοιχείων αποτυχίας, η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται επίσης σε διάφορες άλλες εφαρμογές, όπως στον κλάδο της μετεωρολογίας για την πρόβλεψη καιρικών φαινομένων και στην προσαρμογή δεδομένων οποιουδήποτε τύπου. Μετά το 1970 περίπου, η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται επιτυχώς σε συστήματα ραντάρ για την μοντελοποίηση της διασποράς του λαμβανόμενου σήματος το οποίο ανακλάται σε ορισμένους τύπους στόχων [40].

Στη βιβλιογραφία διατίθεται ένας μεγάλος αριθμός στατιστικών μοντέλων με τα οποία γίνεται περιγραφή καναλιών διαλείψεων, όπως τα Rice, Rayleigh, Nakagami-m και Hoyt, μερικά από τα οποία παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες [30]. Η κατανομή Weibull μπορεί να θεωρηθεί ως μία προσέγγιση της γενικευμένης κατανομής Nakagami της ίδιας τάξης με την κατανομή Nakagami-m [30] και διαπιστώθηκε πως μπορεί να εφαρμοστεί και στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και, γενικότερα των τηλεπικοινωνιών. Αυτό προέκυψε από το γεγονός της άριστης προσαρμογής σε πειραματικές μετρήσεις του πλάτους, και επομένως της ισχύος, των διαλείψεων μικρής κλίμακας σε κανάλια εσωτερικού [40] αλλά και σε εξωτερικού χώρου. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με μετρήσεις σε κανάλια εξωτερικού χώρου, από όπου φαίνεται χαρακτηριστικά πως η κατανομή Weibull είναι κατάλληλη για την μοντελοποίηση καναλιών διαλείψεων μικρής κλίμακας. Το σχήμα απεικονίζει σε λογαριθμικούς άξονες τη συμπληρωματική Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής της ισχύος του σήματος που μετρήθηκε καθώς και την αντίστοιχη της κατανομής Weibull (πρωτίστως, έχει γίνει προσαρμογή των παραμέτρων της κάνοντας χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων). Όπως φαίνεται, η κατανομή Weibull έχει άριστη προσαρμογή με τις πειραματικές μετρήσεις διαλείψεων μικρής κλίμακας κυρίως σε χαμηλές τιμές της ισχύος [40].



Σχήμα 5.4 Συμπληρωματική Αθροιστική Συνάρτησης Κατανομής πειραματικών μετρήσεων και κατανομής Weibull για κανάλια εξωτερικού χώρου [40].

5.4.1. Το μοντέλο του καναλιού

Μία ζεύξη από σημείο σε σημείο (“point-to-point”) για ένα υβριδικό FSO/MMW σύστημα περιλαμβάνει τόσο πομπούς FSO και MMW όσο και δέκτες. Έτσι, προκειμένου να εκτιμηθεί η συνολική μέση χωρητικότητα του συστήματος, θα πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί η μέση χωρητικότητα του κάθε ενός από τα κανάλια απωλειών του συστήματος. Θα εξετασθεί ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση της έντασης / άμεση ανίχνευση. Για την περίπτωση των FSO συστημάτων, η ακτίνα λέιζερ διαδίδεται κατά μήκος μιας οριζόντιας διαδρομής μέσα από μια αναταραχή στο κανάλι απωλειών, με πρόσθετο λευκό Gaussian θόρυβο (Additive White Gaussian Noise) (AWGN) [36], ενώ το MMW ασύρματο σύστημα εξασθενεί λόγω των παρεμβολών των πολλαπλών διαδρομών ενώ και ο

AWGN έχει παρουσία. Και στις δύο περιπτώσεις τα κανάλια υποτίθεται ότι είναι χωρίς μνήμη, σταθερά και εργοδικά, με στατιστικές γρήγορων απωλειών. Και στις δύο περιπτώσεις, υποθέτουμε ότι ο AWGN είναι μηδενικής μέσης τιμής και διασποράς $N_0/2$, δηλαδή $N \sim \left(\frac{N_0}{2}, 0\right)$ [36].

Ένα FSO κανάλι είναι ένα τυχαίου χρόνου κυμαινόμενο κανάλι και, ως εκ τούτου, η στιγμιαία τιμή του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) στο δέκτη μπορεί να θεωρηθεί ως μια τυχαία μεταβλητή $\gamma = s^2 / N_0$ [41], με $s = \eta I$ να είναι η στιγμιαία αύξηση της έντασης, η είναι ο πραγματικός λόγος μετατροπής στο δέκτη και I θα είναι η κανονικοποιημένη ακτινοβολία [41], [42]. Λόγω της διάδοσης της ακτίνας μέσω του ταραχώδους καναλιού η ένταση του λαμβανόμενου σήματος διασκορπίζει και εξασθενίζει. Υπάρχουν πολλά στατιστικά μοντέλα για να περιγραφούν αυτές οι απώλειες καναλιού [41]. Για τις περιπτώσεις ασθενών έως ισχυρών αναταράξεων, το πιο ακριβές είναι το γάμμα-γάμμα μοντέλο κατανομής [41], [43].

Στο ασύρματο κανάλι MMW η παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών οδηγεί σε αυξομειώσεις της έντασης του σήματος. Το σύστημα που μελετάμε είναι μία ζεύξη από σημείο σε σημείο, με οπτική επαφή και υπάρχουν πολλές κατανομές που μπορούν να περιγράψουν αυτό το μοντέλο [44]. Στις παρακάτω γραμμές μελετάται το μοντέλο απωλειών κατά Weibull [41], [44].

Όπως έχει προαναφερθεί, οι επιδόσεις των FSO και MMW συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας εξαρτώνται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, οι δυνατότητες και η χωρητικότητα των συστημάτων μικρού μήκους κύματος (δηλαδή των FSO) ελαχιστοποιούνται σε περιπτώσεις ομίχλης, ενώ για τα συστήματα με πιο μεγάλο μήκος κύματος (δηλαδή MMW ζεύξεις) αυτό συμβαίνει για τις περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων

[45]. Έτσι, είναι σχεδόν βέβαιο ότι κάτω από κάθε μία από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τουλάχιστον, το ένα από τα δύο μέρη του υβριδικού συστήματος θα λειτουργήσει. Έτσι, η ελάχιστη δυνατή διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού για ολόκληρο το υβριδικό σύστημα FSO / MMW, όταν το σύστημα είναι διαθέσιμο, είναι τουλάχιστον η μικρότερη χωρητικότητα από τις δύο ασύρματες ζεύξεις, δηλαδή την FSO ή την MMW ζεύξη. Η χωρητικότητα, C , ενός περιορισμένου εύρους ζώνης AWGN δίνεται από τη γνωστή μορφή και σύμφωνα με το νόμο του Shannon [36]:

$$C = B \log_2(1 + \gamma) \text{ bits / sec} \quad (42)$$

όπου B είναι το εύρος ζώνης καναλιού, και γ είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) στο δέκτη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ένταση του σήματος στο δέκτη κυμαίνεται ανάλογα με τυχαία χαρακτηριστικά του χρόνου, με αποτέλεσμα το SNR να γίνει τυχαία μεταβλητή και, τέλος, η χωρητικότητα καναλιού να γίνει επίσης τυχαία μεταβλητή και το αποτέλεσμα από την (42) τελικά να δίνει μόνο μια στιγμιαία τιμή της C . Έτσι, ένα χρήσιμο μέγεθος για την εκτίμηση της απόδοσης του καναλιού είναι η μέση τιμή της C , που είναι γνωστή ως μέση χωρητικότητα, $\langle C \rangle$. Αυτό δείχνει το μέγεθος το μέσο καλύτερο ποσοστό μετάδοσης, σχεδόν χωρίς κανένα σχεδόν λάθος [36], [41]. Εκπροσωπώντας τη ΣΠΠ του γ ως $p_\gamma(\gamma)$, η μέση χωρητικότητα καναλιού δίνεται από την [41]:

$$\langle C \rangle = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + \gamma) p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (43)$$

Η εξίσωση (43), είναι ένας γενικευμένος τύπος για τον υπολογισμό της μέσης χωρητικότητας του κάθε συστήματος επικοινωνίας, διότι λαμβάνει υπόψη τα στατιστικά στοιχεία του καναλιού για κάθε μοντέλο καναλιού. Στην περίπτωση μας, για το σύστημα FSO, θα χρησιμοποιηθεί η ΣΠΠ της κατανομής γάμμα-γάμμα [36], [41], ενώ για τη ζεύξη

MMW θα θεωρηθεί το στατιστικό μοντέλο Weibull [36], [41], λόγω της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών.

Από την (43) προκύπτει η μέση χωρητικότητα ενός Weibull μοντελοποιημένου MMW καναλιού, μέσω του μετασχηματισμού της συνάρτησης Meijer-G [46]. Δίνεται δε από την ακόλουθη κλειστή μαθηματική έκφραση [36], [37]:

$$\langle C \rangle_{MMW} = \frac{B_{MMW} \beta \left(\mu / \Gamma(1+2\beta^{-1}) \right)^{-\beta/2} \sqrt{k} l^{-1}}{2 \ln(2) (2\pi)^{(k+2l-3/2)}} G_{2l, k+2l}^{k+2l, l} \left(\left(\frac{\Gamma}{\Gamma(1+2\beta^{-1})} \right)^{\frac{-\beta k}{2}} k^{-k} \left| \begin{array}{c} I(l, -\frac{\beta}{2}), I(l, -\frac{\beta}{2}) \\ I(k, 0), I(l, -\frac{\beta}{2}), I(l, -\frac{\beta}{2}) \end{array} \right. \right) \quad (44)$$

όπου B_{MMW} είναι το εύρος ζώνης του MMW κομματιού του καναλιού, $I(\nu, \mu) = \mu / \nu, (\mu+1) / \nu, \dots, (\mu+\nu-1) / \nu$, με μ μια αυθαίρετη πραγματική τιμή, ν ένας θετικός ακέραιος και $\frac{1}{k} = \frac{\beta}{2}$ με k, l θετικοί ακέραιοι [36].

Σύμφωνα με την [52] όπου υπάρχει εκτενέστερη αναφορά στο θέμα, η συνολική μέση χωρητικότητα μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες της κάθε γεωγραφικής περιοχής καθώς και τις συγκεκριμένες παραμέτρους ζεύξης. Έστω ότι η πιθανότητα του μέρους της ζεύξης του FSO που είναι διαθέσιμη συμβολίζεται με $g(L)$ και αντίστοιχα για το MMW με $1-g(L)$, όπου L είναι το μήκος ζεύξης. Τότε, η συνολική μέση χωρητικότητα για το υβριδικό FSO τηλεπικοινωνιακό κανάλι θα δοθεί ως εξής [32],

$$\begin{aligned} \langle C \rangle_{ολικό} &= g(L) \langle C \rangle_{FSO} + [1-g(L)] \langle C \rangle_{MMW} = \\ & \frac{g(L) B_{FSO} (ab / \sqrt{\Gamma})^{\frac{y_1}{2}}}{4\pi \Gamma(\alpha) \Gamma(b) \ln(2)} G_{2,6}^{6,1} \left(\frac{(ab)^2}{16\Gamma} \left| \begin{array}{c} -\frac{y_1}{4}, -\frac{y_1+1}{4} \\ \frac{y_2}{4}, \frac{y_2+2}{4}, \frac{y_2}{4}, -\frac{y_2+2}{4}, -\frac{y_1}{4}, -\frac{y_1}{4} \end{array} \right. \right) + \\ & + \frac{[1-g(L)] B_{MMW} \beta (\alpha \Gamma)^{-\beta/2} \sqrt{k} l^{-1}}{2 \ln(2) (2\pi)^{(k+2l-3/2)}} \times G_{2l, k+2l}^{k+2l, l} \left(\frac{(a\Gamma)^2}{k^k} \left| \begin{array}{c} I(l, -\beta/2), I(l, 1-\beta/2) \\ I(k, 0), I(l, -\beta/2), I(l, 1-\beta/2) \end{array} \right. \right) \end{aligned} \quad (45)$$

5.5. Μοντέλο Nakagami-m

Παρακάτω, θα γίνει μια προσπάθεια για συζήτηση της υπόθεσης της κατανομής Nakagami-m για την περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος, το οποίο μοντελοποιεί τη ραδιομετάδοση σε αστικές περιοχές [31], όπου οι τυχαίες διακυμάνσεις της ληφθέντος στιγμιαίας ισχύος του σήματος είναι πολύ συχνές και γρήγορες. Μία Nakagami-m κατανομή μπορεί να μοντελοποιήσει διάφορες συνθήκες διάδοσης, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια στο ταίριασμα ορισμένων πειραματικών δεδομένων σε σύγκριση με τις κοινώς αποδεκτές κατανομές [47].

Στη στατιστική θεωρία των τηλεπικοινωνιών, οι Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας ΣΠΠ του ληφθέντος σήματος της περιβάλλουσας είναι συναρτήσεις πολλών μεταβλητών [48], [49]. Κατά τη διαδικασία προσδιορισμού και ανάλυσης των αναπόσπαστων χαρακτηριστικών, μία από τις μεταβλητές αντιμετωπίζεται ως παράμετρος, ενώ οι άλλες θεωρούνται ως σταθερές τιμές πρακτικά. Με αυτόν τον τρόπο, κάποιος αποκτά μια οικογένεια περιβαλλουσών της ΣΠΠ σήματος. Η ανάλυση της θέσης του μεγίστου των καμπυλών μπορεί να γίνει αναλυτικά, χρησιμοποιώντας την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης, αλλά και αριθμητικά. Σε μια τέτοια περίπτωση, η ίδια η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την κατάσταση κατά την οποία η δεύτερη μεταβλητή αντιμετωπίζεται ως παράμετρος, και οι άλλες ως σταθερές τιμές. Αυτή η διαδικασία δίνει μια νέα οικογένεια καμπυλών, ενώ η μέγιστη θέση στο χώρο προσδιορίζεται από μία νέα περιβάλλουσα. Σε αυτή την εργασία, καθορίζεται η θέση των μέγιστων και η αναλυτική έκφραση για το αναπόσπαστο χαρακτηριστικό της Nakagami-m κατανομής για το λαμβανόμενο σήμα περιβάλλουσας.

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας, χρησιμοποιούνται τεχνικές διαφορικής λήψης, οι οποίες εξασφαλίζουν ότι ο δέκτης παίρνει

πολλαπλά αντίγραφα του ραδιοσήματος που διαβιβάζεται από ανεξάρτητα κανάλια απωλειών [48]. Αυξάνοντας σημαντικά ο αριθμός των ανεξάρτητων διαδρομών για τη μετάδοση του σήματος, μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα ενός αποσβένοντος σήματος που συμβαίνει ταυτόχρονα σε όλα τα ανεξάρτητα κανάλια. Το κύριο πρόβλημα στο σχεδιασμό των συστημάτων διαφορικότητας είναι η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου για τον προσδιορισμό του τελικού σήματος από τα λαμβανόμενα αντίγραφα του εκπεμπόμενου σήματος [48]. Για το σκοπό αυτό, τα διαφορετικά συστήματα χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές για να συνδυάσουν τα σήματα: Επιλογή Συνδυασμού (SC), Μέγιστος Λόγος Συνδυασμού (MRC), Ίσο Κέρδος Συνδυασμού (EGC), Αλλαγή και Παραμονή Συνδυασμού (SSC), Αλλαγή και Εξέταση Συνδυασμού (SEC). Ο προσδιορισμός των επιδόσεων συστημάτων σε περιπτώσεις εφαρμογής των τεχνικών αυτών, είναι ευρέως αναπτυγμένες στην αντίστοιχη βιβλιογραφία [48].

Για τις περισσότερες από αυτές τις τεχνικές, η επιλογή της διαδρομής-κλάδου με τον καλύτερο λόγο σήματος-θορύβου είναι πολύ σημαντική, γιατί έχει άμεση σχέση με την τιμή της περιβάλλουσας του σήματος στον κλάδο. Δεδομένου ότι πιο κάτω αναλύεται λεπτομερώς η συμπεριφορά του Μέγιστου Σήματος περιβάλλουσας της ΣΠΠ, θα μπορούσε να εφαρμοστεί για τη βελτιστοποίηση του υπολογισμού της περιβάλλουσας του σήματος στην έξοδο του συνδυαστή.

5.5.1. Ολοκληρωτικά χαρακτηριστικά της κατανομής

Η προηγούμενη ανάλυση των μοντέλων πιθανοτήτων για την περιγραφή του ληφθέντος σήματος περιβάλλουσας, που εξαρτώνται από τις ανεξάρτητες σχετικές παραμέτρους της μετάδοσης καναλιού, είχε ως αποτέλεσμα να επικεντρωθεί η έρευνα [48] στην αναζήτηση περιγραφής των φαινομένων που επηρεάζουν τη ραδιομετάδοση σήματος. Στόχος είναι ο

καθορισμός αναλυτικών εκφράσεων για την περιγραφή των λαμβανόμενων οριακών συνθηκών που θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες για το σχεδιασμό των ραδιοσυστημάτων.

Για το υπό εξέταση μοντέλο Nakagami-m, για μια σταθερή τιμή του βάθους απόσβεσης-απώλειας της παραμέτρου m , η ΣΠΠ της περιβάλλουσας του σήματος, ανάλογα με το λαμβανόμενο επίπεδο σήματος, αναλύεται για διάφορες τιμές της μέσης ισχύος σήματος [48]. Στη συνέχεια, η μέση ισχύς του σήματος θεωρείται ως μία σταθερή παράμετρος, ενώ οι τιμές του λαμβανόμενου επιπέδου σήματος ποικίλουν. Με αυτόν τον τρόπο, παράγονται δύο σειρές οικογενειών καμπυλών και, για καθεμία από αυτές, κατασκευάζεται μια εξίσωση καμπύλης μέγιστων του περιβάλλουσας. Και στις δύο περιπτώσεις, αυτές οι περιβάλλουσες είναι ευθείες γραμμές στη λογαριθμική κλίμακα, των οποίων οι συντελεστές διεύθυνσης και οι τιμές στους άξονες καθορίζονται αναλυτικά και αριθμητικά. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου απωλειών, διαπιστώνεται πως οι παραγόμενες σειρές περιβαλλουσών έχουν τον ίδιο συντελεστή διεύθυνσης [48].

Τα λαμβανόμενα αριθμητικά, γραφικά και αναλυτικά αποτελέσματα δείχνουν την ύπαρξη διαφορικής εξίσωσης της οποίας η συγκεκριμένη λύση δεν είναι παρά η ΣΠΠ της παρατηρούμενης κατανομής. Η περιβάλλουσα των μεγίστων της οικογένειας των καμπυλών των ΣΠΠ αποτελεί τη μοναδική λύση σε μια διαφορική εξίσωση [48], που περιγράφει τη δυναμικότητα της διαδικασίας της μετάδοσης του σήματος στο κανάλι απωλειών.

5.5.2. Ολοκληρωτικά χαρακτηριστικά της Nakagami- m κατανομής

Η Nakagami-m κατανομή είναι κατάλληλη για την περιγραφή της στατιστικής φύσης των ασυρμάτων ζεύξεων σε πολύπλοκα συστήματα, όπως είναι το αστικό περιβάλλον [48]. Στην πράξη, έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη λόγω του εύκολου χειρισμού και του ευρέος φάσματος εφαρμογής των διαφόρων προσεγγίσεων. Δεδομένου ότι η τυχαία διαδικασία Nakagami-m ορίζεται ως μία περιβάλλουσα από το άθροισμα $2m$ ανεξάρτητων Γκαουσιανών τυχαίων διαδικασιών, η Nakagami-m κατανομή περιγράφεται από την ΣΠΠ [48], [50].

$$p_z(z, \Omega) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m z^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} z^2\right), \quad z > 0, m \geq \frac{1}{2} \quad (46)$$

Ενώ η Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής είναι η:

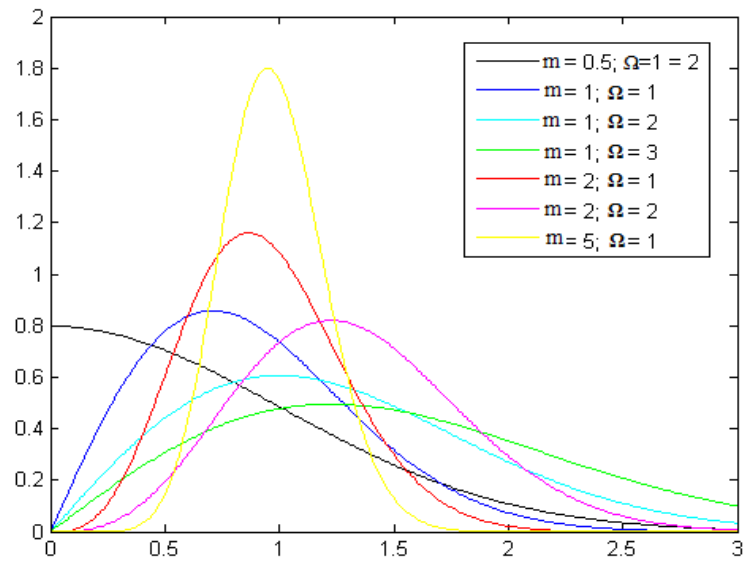
$$P(z; m, \Omega) = P\left(m, \frac{m}{\Omega} x^2\right) \quad (47)$$

όπου P είναι η Ατελής Γάμμα Συνάρτηση¹ (“incomplete gamma function”).

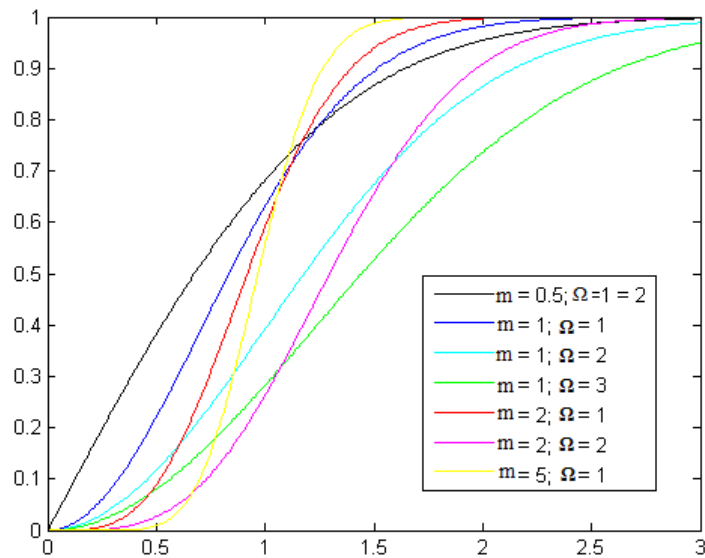
¹ Στα μαθηματικά, η γάμμα κατανομή ορίζεται από ένα ορισμένο ολοκλήρωμα. Η ατελής γάμμα ορίζεται ως συνάρτηση του ίδιου ολοκλήρωματος. Υπάρχουν δύο είδη της ατελούς συνάρτησης γάμμα: η άνω ατελής είναι για την περίπτωση που το κατώτατο όριο της ολοκλήρωσης είναι μεταβλητό, και η κάτω ατελής γάμμα της οποίας το ανώτατο όριο της ολοκλήρωσης είναι μεταβλητό. Η άνω ατελής γάμμα ορίζεται ως: $\Gamma(s, x) = \int_x^\infty t^{s-1} e^{-t} dt$. Η κάτω ατελής γάμμα ορίζεται ως:

$$\gamma(s, x) = \int_0^x t^{s-1} e^{-t} dt.$$

Με τη βοήθεια του Matlab, προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



Σχήμα 5.5 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ) της Nakagami-m



Σχήμα 5.6 Αθροιστική Συνάρτηση Κατανομής (ΑΣΚ) της Nakagami-m

όπου το z είναι η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος, το $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση γάμμα, το m είναι η παράμετρος βάθους απωλειών (σχήμα απωλειών), που ορίζεται ως εξής:

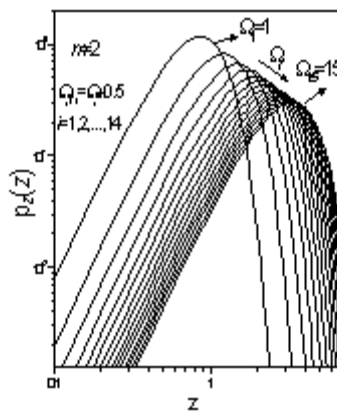
$$m = \frac{E^2[z]}{Var[z^2]} \quad (48)$$

ενώ το Ω είναι η μέση ισχύς σήματος:

$$\Omega = E[z^2] \quad (49)$$

Σε περίπτωση που η παράμετρος $m=1$, η Nakagami-m κατανομή πλησιάζει την οικεία κατανομή Rayleigh [48], ενώ στην περίπτωση όπου $m=0,5$, αντιστοιχεί στην κατανομή Gauss. Η υπόθεση $m \rightarrow \infty$ περιγράφει το κανάλι χωρίς να απώλειες. Με ορισμένους περιορισμούς, η Nakagami-m κατανομή μπορεί να προσεγγίσει την κατανομή Rice [50]. Πιο αναλυτικά, το μοντέλο καναλιού κατά Nakagami-m είναι πιο απλό από αυτό της Rice, στο οποίο χρησιμοποιείται η συνάρτηση Bessel, έτσι ώστε χρησιμοποιώντας την παραπάνω προσέγγιση υπολογισμού των στατιστικών χαρακτηριστικών, απλοποιείται σημαντικά. Επιλέγεται να αναλυθεί το μοντέλο καναλιού Nakagami-m για λόγους γενικότητας, και επειδή τα υπόλοιπα μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από την κατανομή Nakagami-m με την κατάλληλη επιλογή των σχετικών παραμέτρων.

Η γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της ΣΠΠ της Nakagami-m σε συνάρτηση με τη λαμβανόμενη στάθμη σήματος, για σταθερή τιμή της παραμέτρου του βάθους απωλειών και διαφορετικές τιμές της μέσης ισχύος του σήματος, σε λογαριθμική κλίμακα, φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Η ΣΠΠ της κατανομής Nakagami-m σε συνάρτηση με το z , σε λογαριθμική κλίμακα, για την περίπτωση που $m=2$, με το Ω να παίρνει τιμές από το 1 έως το 15 [48]

Η ανάλυση αυτή της εξάρτησης δείχνει ότι, η αύξηση της μέσης ισχύος του σήματος των μεγίστων των ΣΠΠ έχει ως αποτέλεσμα σε μικρότερες τιμές να φτάνουν υψηλότερες για τη λαμβανόμενη στάθμη του σήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα. Επίσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως όλα τα μέγιστα μπορούν να βρίσκονται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, και η περιβάλλουσα των μεγίστων να είναι ομοίως μια ευθεία γραμμή σε λογαριθμική κλίμακα. Για τον καθορισμό των τιμών της λαμβανόμενης στάθμης του σήματος όταν επιτυγχάνονται τα μέγιστα, καθώς και οι τιμές των μεγίστων και ο συντελεστής διεύθυνσης της περιβάλλουσας, προσδιορίζεται η πρώτη παράγωγος της (46) σε σχέση με τη λαμβανόμενη στάθμη σήματος. Εξισώνοντας με μηδέν την εξίσωση:

$$z_{p \max} = \sqrt{\frac{\Omega(-1+2m)}{2m}} \quad (50)$$

Αντικαθιστώντας την (50) στην (46) προκύπτει:

$$p_z^{z \max} = \frac{2^{1+\frac{1-2m}{2}}}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \left(\frac{\Omega(2m-1)}{m}\right)^{\frac{2m-1}{2}} \cdot \exp\left(\frac{1-2m}{2}\right) \quad (51)$$

Από την (51) παίρνουμε:

$$\log(\max p_z(\Omega)) = k_1 \log \Omega + n_1 \quad (52)$$

όπου ο συντελεστής διεύθυνσης και η τιμή στον κάθετο άξονα είναι:

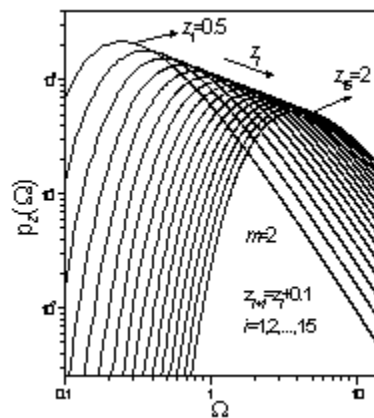
$$\begin{aligned} k_1 &= -0.5, \\ n_1 &= -m + 0.5 + \log \frac{2m^m}{\Gamma(m)} + (m-0.5) \log \frac{2m-1}{2m} \end{aligned} \quad (53)$$

Ο συντελεστής διεύθυνσης της περιβάλλουσας έχει τιμή -0,5, ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου βάθους απωλειών, ενώ η τιμή του άξονα της τεταγμένης εξαρτάται από

αυτήν την παράμετρο. Η περιβάλλουσα καθορίζει μία μοναδική λύση διαφορικών εξισώσεων που μπορούν να περιγράψουν τη δυναμική αυτής της διαδικασίας, ενώ η ΣΠΠ είναι μια ειδική λύση:

$$p'_z(z) + p_z(z) \left(\frac{2mz}{\Omega} - \frac{2m-1}{z} \right) = 0 \quad (54)$$

Η γραφική απεικόνιση της εξάρτησης της ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με τη μέση ισχύ του σήματος, για σταθερή τιμή της παραμέτρου m και διαφορετικές τιμές της λαμβανόμενης στάθμης σήματος, σε λογαριθμική κλίμακα, φαίνεται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Η ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με το Ω , σε λογαριθμική κλίμακα, για $m=2$, και το z να παίρνει τιμές από 0.5 έως 2 [48]

Η ανάλυση αυτή της εξάρτησης δείχνει ότι με την αύξηση της λαμβανόμενης στάθμης σήματος, τα μέγιστα των ΣΠΠ πετυχαίνουν χαμηλότερες τιμές για τις υψηλότερες τιμές της μέσης ισχύος του σήματος, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Επίσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όλα τα μέγιστα βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή, και ότι η περιβάλλουσα των μέγιστων είναι επίσης μια ευθεία γραμμή, σε μια λογαριθμική κλίμακα. Για τον καθορισμό των τιμών της μέσης ισχύος του σήματος, όπου επιτυγχάνονται τα μέγιστα, και τις τιμές των μέγιστων και του συντελεστή διεύθυνσης της περιβάλλουσας, προσδιορίζεται η πρώτη παράγωγος της (46). Εξισώνοντας με το μηδέν έχουμε:

$$\Omega_{p \max} = z^2 \quad (55)$$

Αντικαθιστώντας την (55) στην (46)

$$p_z^{\Omega \max} = \frac{2m^m}{z \cdot \Gamma(m)} \cdot \exp(-m) \quad (56)$$

Από την (56) παίρνουμε:

$$\log(\max p_z(z)) = k_2 \log z + n_2 \quad (57)$$

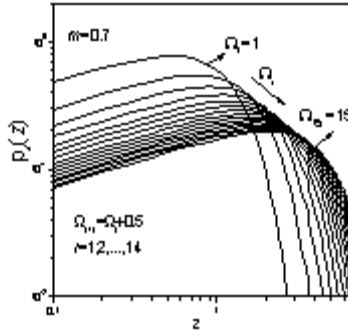
όπου ο συντελεστής διεύθυνσης και η τιμή του στον κάθετο άξονα είναι:

$$k_2 = -1, n_2 = \log \frac{2m^m}{\Gamma(m)} - m \quad (58)$$

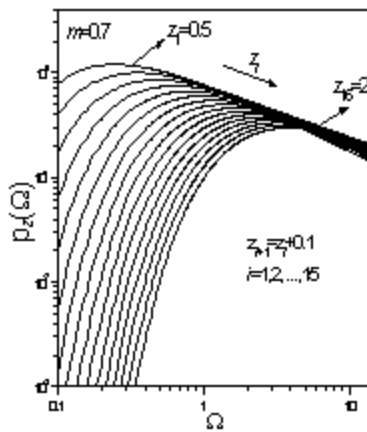
Ο συντελεστής διεύθυνσης της περιβάλλουσας έχει την τιμή -1, ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου απώλειας, ενώ η τιμή του άξονα τεταγμένης εξαρτάται από αυτήν την παράμετρο. Η περιβάλλουσα καθορίζει μία συγκεκριμένη λύση μιας διαφορικής εξίσωσης που μπορεί να περιγράψει τη δυναμική αυτής της διαδικασίας, ενώ η ΣΠΠ είναι μια ειδική λύση:

$$p'_z(\Omega) + p_z(\Omega) \left(1 - \frac{z^2}{\Omega} \right) \cdot \frac{m}{\Omega} = 0 \quad (59)$$

Η ανάλυση που περιγράφηκε προηγουμένως επαναλήφθηκε για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου απώλειας, για να συζητηθεί πώς αυτή η παράμετρος επηρεάζει το σχήμα της περιβάλλουσας των μεγίστων των καμπυλών των ΣΠΠ. Στην περίπτωση που $m=0,7$, το παραγόμενο αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 5.9 και Σχήμα 5.10, αντίστοιχα.



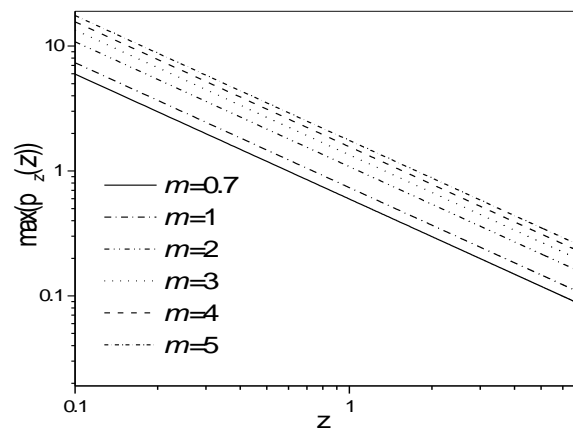
Σχήμα 5.9 Η ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με το z , σε λογαριθμική κλίμακα, για $m=0.7$, με το Ω να παίρνει τιμές από 0.5 έως 2 [48]



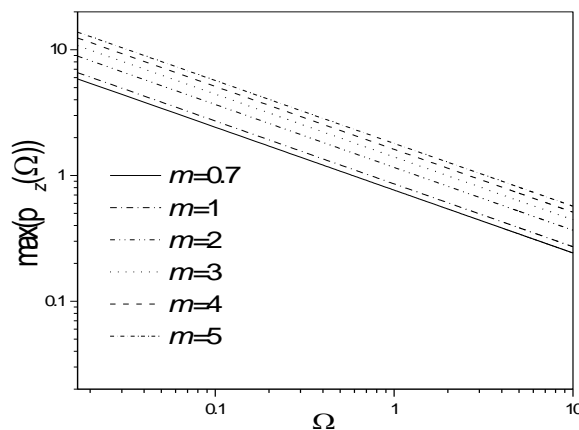
Σχήμα 5.10 Η ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με το z , σε λογαριθμική κλίμακα, για $m=2$, με το Ω να παίρνει τιμές από 0.5 έως 2 [48]

Μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι περιβάλλουσες των μεγίστων των ΣΠΠ και στις δύο περιπτώσεις είναι ευθείες γραμμές σε λογαριθμική κλίμακα. Οι συντελεστές διεύθυνσης των περιβαλλουσών που προκύπτουν είναι οι ίδιοι όπως και στην περίπτωση όπου $m=2$. Μόνο η τιμή στον άξονα της τεταγμένης αλλάζει. Στην ανάλυση της εξάρτησης των ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με τη μέση ισχύ του σήματος, όπως και στην ανάλυση των ΣΠΠ Nakagami-m σε συνάρτηση με τη λαμβανόμενη στάθμη σήματος, οι τιμές στον άξονα τεταγμένης είναι χαμηλότερες.

Οι περιβάλλουσες των μεγίστων των ΣΠΠ, για διάφορες τιμές των παραμέτρων απωλειών, όταν το λαμβανόμενο επίπεδο σήματος θεωρηθεί ως σταθερή παράμετρος, καθώς και στην περίπτωση όπου η μέση ισχύς του σήματος θεωρηθεί ως σταθερή παράμετρος, παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήμα 5.11 και Σχήμα 5.12 αντίστοιχα, σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 5.11 Τα μέγιστα των ΣΠΠ Nakagami- m ως προς z , σε λογαριθμική κλίμακα, για διάφορες τιμές της παραμέτρου απωλειών m [48]



Σχήμα 5.12 Τα μέγιστα των ΣΠΠ Nakagami- m ως προς Ω , σε λογαριθμική κλίμακα, για διάφορες τιμές της παραμέτρου απωλειών m [48]

Αναλύοντας την εξάρτηση των περιβαλλουσών των ΣΠΠ Nakagami-m σε σχέση με τη λαμβανόμενη στάθμη σήματος, για διάφορες τιμές της παραμέτρου απωλειών, συμπεραίνεται ότι όλες οι περιβάλλουσες έχουν τον ίδιο συντελεστή διεύθυνσης, ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου m , καθώς οι τιμές τους στον κατακόρυφο άξονα αυξάνονται με την αύξηση του m , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11 [48].

Με όμοια ανάλυση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12, ως προς την εξάρτηση των περιβαλλουσών των ΣΠΠ Nakagami-m από τη μέση ισχύ του σήματος, για διάφορες τιμές της παραμέτρου m , μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όλες οι περιβάλλουσες έχουν τον ίδιο συντελεστή διεύθυνσης, ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου m , καθώς οι τιμές τους στον κατακόρυφο άξονα αυξάνονται με την αύξηση του m [48].

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη Διπλωματική εργασία έγινε παρουσίαση των υβριδικών FSO/MMW συστημάτων με χρήση δύο ζεύξεων, μιας FSO και μιας MMW . Το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιεί ως βασική τη ζεύξη FSO και όταν δεν είναι διαθέσιμη, τότε χρησιμοποιεί την εφεδρική ζεύξη MMW. Η τεχνολογία MMW εμφανίζει ευαισθησία σε περιπτώσεις ισχυρών βροχών, ενώ η τεχνολογία FSO σε περιπτώσεις πυκνής ομίχλης. Η πιθανότητα για ταυτόχρονη ύπαρξη πυκνής ομίχλης και ισχυρής βροχής, ώστε να διακοπούν και οι δύο ζεύξεις είναι πάρα πολύ μικρή και πάντως πολύ μικρότερη από εκείνη που απαιτείται για να θεωρηθεί ένα οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αξιόπιστο.

Η τεχνολογία των υβριδικών αυτών συστημάτων παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια πολύ μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω της υψηλής ποιότητας, πιστότητας και ευελιξίας που προσφέρει με αρκετά χαμηλό κόστος. Όμως, επειδή τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ως κανάλι την ατμόσφαιρα, επηρεάζονται πολύ από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της ζεύξης και προκαλούν “διαλείψεις” στο διαδιδόμενο σήμα [6].

Μέσω διαφόρων πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, αποδεικνύεται η μεγάλη επίδραση των καιρικών συνθηκών στην απόδοση και την αξιοπιστία των συγκεκριμένων συστημάτων, ενώ από την άλλη μπορούν να βοηθήσουν στη σχεδίαση αυτών, όταν γνωρίζουμε εκ των προτέρων κάποια από τα στοιχεία της ζεύξης [6].

Εφόσον η απόδοση των υβριδικών συστημάτων FSO/MMW επηρεάζεται αρκετά από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της ζεύξης, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις οι οποίες προκαλούν τυχαίες αλλαγές στον δείκτη διάθλασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη. Επομένως, για την εκτίμηση του λαμβανόμενου σήματος είναι απαραίτητο να

χρησιμοποιήσουμε τη σωστή στατιστική κατανομή και τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτής που προσεγγίζει ακριβέστερα τις στατιστικές εξασθενίσεις κάθε καναλιού.

Στη βιβλιογραφία διατίθεται ένας μεγάλος αριθμός στατιστικών μοντέλων με τα οποία γίνεται περιγραφή καναλιών διαλείψεων, όπως τα Rice, Rayleigh, Nakagami-m και Hoyt [30]. Η κατανομή Weibull μπορεί να θεωρηθεί ως μία προσέγγιση της γενικευμένης κατανομής Nakagami της ίδιας τάξης με την κατανομή Nakagami-m [30] και διαπιστώθηκε πως μπορεί να εφαρμοστεί και στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και, γενικότερα των τηλεπικοινωνιών. Αυτό προέκυψε από το γεγονός της άριστης προσαρμογής σε πειραματικές μετρήσεις του πλάτους, και επομένως της ισχύος, των διαλείψεων μικρής κλίμακας σε κανάλια εσωτερικού [40] αλλά και σε εξωτερικού χώρου.

Για την Nakagami-m [48], προκειμένου να καθορισθεί η πρώτη και δεύτερη τάξη στατιστική για τα μοντέλα κανάλια πολυδιοδεύσεων (πολλαπλών διαδρομών), είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών της Συνάρτησης Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ) και της περιβάλλουσας της, ενώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών των ιδιοτήτων της περιβάλλουσας των οικογενειών των καμπύλων της ΣΠΠ.

Η αναλυτική έκφραση για την περιβάλλουσα των μέγιστων της οικογένειας καμπυλών της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας προσδιορίζεται ανάλογα με τις σχετικές παραμέτρους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θέση των μέγιστων αυτών των συναρτήσεων προσδιορίζεται μοναδικά από την εξίσωση της περιβάλλουσας του, ανεξάρτητα από τις τιμές των άλλων παραμέτρων. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να προσδιορισθούν οι οριακές συνθήκες για τη ραδιομετάδοση, για δεδομένες συνθήκες διάδοσης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://www.tmth.edu.gr/aet/thematic_areas/p539.html.
- [2] Anton A. Huurdeman “The worldwide history of telecommunications”, Chapter 3, Wiley-IEEE Press, August 2003.
- [3] http://www.radio-electronics.com/info/radio_history/morse/sfbmorse.php.
- [4] Davide M. Forin, G. Incerti, G.M. Tosi Beleffi, A.L.J. Teixeira, L.N. Costa, P.S. De Brito André, B. Geiger, E. Leitgeb and F. Nadeem Graz, “Free Space Optical Technologies”, Ηλεκτρονική διεύθυνση:
http://www.intechopen.com/source/pdfs/9705/InTech-Free_space_optical_technologies.pdf
- [5] Laura Garwin and Tim Lincoln, “A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World”, University of Chicago Press. ©2003.
- [6] Χ. Σιμάτης, Ε. Καραγιάννη, Α. Τσιγκόπουλος, Μ. Φαφαλιός, Ε.Ε. Νισταζάκης, Γ.Σ. Τόμπρας, “Απόδοση και Αξιοπιστία Συστημάτων Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών”, Ναυσίβιος Χώρα, ISSN: 1791-4469, σελ. 135-150, 2008.
- [7] http://images.pennnet.com/articles/cim/cap/cap_234362.jpg.
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Last_mile.
- [9] Scott Bloom, PhD Chief Technical Officer, AirFiber, Inc. & W. Seth Hartley, Optical Propagation Specialist AirFiber, Inc. The Last-Mile solution: Hybrid FSO Radio, 2002. Ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.freespaceoptic.com/WhitePapers/Hybrid_FSO.pdf
- [10] http://www.elva-1.com/products/telecom/FSO_mmW_backup.html.

- [11] Isaac I. Kim and Eric Korevaar, “Availability of Free Space Optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems”, Optical Access Incorporated.
- [12] Gibbins J. Chris, “A Comparison of Propagation at Millimetric, Submillimetric and Infrared Wavelengths”, Radio Communications Research Unit, Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxfordshire.
- [13] Arun K. Majumdar, “Free-space laser communication performance in the atmospheric channel”, Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2005.
- [14] David W. Hahn, “Light Scattering Theory”, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University Of Florida, July 2009.
- [15] Grant W. Petty, “A First Course In Atmospheric Radiation”, Sundog Publishing, Madison, Wisconsin, April 2006.
- [16] Thomas E. Michael, “Optical Propagation in Linear Media: Atmospheric Gases and Particles, Solid-State Components and Water”, Oxford University Press, 2006.
- [17] Goodman W. Joseph, “Statistical Optics”, John Wiley & Sons, Inc., 1985.
- [18] Kedar Debbie and Arnon Shlomi, “Urban Optical Wireless Communication Networks: The Main Challenges and Possible Solutions”, Ben-Gurion University of the Negev, IEEE May 2004.
- [19] Bass Michael, “Handbook of Optics: Volume V Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optics”, Third Edition, McGraw Hill, 2010.
- [20] Zhouyue Pi and Farooq Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems”, IEEE Communications Magazine, June 2011.

- [21] Roger L. Freeman, “Radio System Design for Telecommunication” Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [22] Yu.M. Timofeyev and A.V. Vasilev, “Theoretical Fundamentals of Atmospheric Optics”, Cambridge International Science Publishing, 2008.
- [23] Filippo Giannetti, Marco Luise and Ruggero Reggiannini, “Mobile and Personal Communications in the 60 GHz Band: A Survey”, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [24] Βαρώτσος Κ. και Καρράς Γ., “Σημειώσεις Εισαγωγής στη Φυσική της Ατμόσφαιρας”, Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2000.
- [25] Anurag Vidyarthi, B.S. Jassal and R. Gowri, “Modeling of Rain Drop-Size Distribution for Indian Region”, IEEE, 2011.
- [26] T. Utsunomiya and M. Sekine, “Rain Attenuation at Millimeter and Submillimeter Wavelengths”, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 26, No. 6, June 2005.
- [27] ITU Radiocommunication Assembly, “Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods”, ITU-R P.838-3, 2005.
- [28] Prasanna Adhikari, “Understanding Millimeter Wave Wireless Communication”, Loea Corporation, 2008.
- [29] Robert C. Daniels and Robert W. Heath, Jr., “60 GHz Wireless Communications: Emerging Requirements and Design Recommendations”, The University of Texas at Austin, IEEE Vehicular Technology Magazine, September 2007.

- [30] Marvin Kenneth Simon, Mohamed-Slim Alouini, “Digital communication over fading channels”, Book chapter 2, 2nd Edition, Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing, 2005.
- [31] Proakis J., “Digital Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, USA, 1999.
- [32] H.E.Nistazakis, G.S.Tombras, M.P.Hanias, A.D.Tsigopoulos and M.E.Fafalios, “Average Capacity Estimation of Hybrid FSO/MMW Wireless Communication Systems”, Mosharaka International Conference on Communications, Propagation and Electronics (MIC-CPE 2010), pp.24-29, 5-7 March 2010, Amman, Jordan.
- [33] Athanasios Papoulis, “Πιθανότητες Τυχαίες Μεταβλητές και Στοχαστικές Διαδικασίες”, σελ. 260, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα Θεσσαλονίκη 2002.
- [34] http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading.
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Rician_fading.
- [36] H. E. Nistazakis, A. Katsis, G. S. Tombras “On the reliability and performance of FSO and Hybrid FSO Communication Systems over Turbulent Channels”, Book Chapter 2, ISBN: 978-1-61761-735-5 Editor: Russell J. Marcuso © 2010 Nova Science Publishers, Inc.
- [37] Sagias, N.C., Zogas, D.A., Karagiannidis, G.K., Tombras, G.S. (2004). “Channel capacity and second-order statistics in Weibull fading”, IEEE Communications Letters, Vol. 8, No. 6.
- [38] W. Weibull, “A statistical distribution function of wide applicability”, ASME Journal of Applied Mechanics, 27:293–297, Σεπτέμβριος 1951.
- [39] http://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution.

- [40] Σαργιάς Χ. Νικόλαος «Μελέτη Μοντέλου Συσχετισμένων Διαλείψεων Weibull και Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Ψηφιακών Δεκτών Διαφορισμού», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη, Ζωγράφου, Αθήνα 11 Μαρτίου 2005.
- [41] H.E. Nistazakis, E.A. Karagianni, A.D. Tsigopoulos, M.E. Fafalios, and G.S. Tombras, “Average capacity of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels”, *IEEE J. Lightwave Technology*, Vol. 27, no. 8, pp. 974-979, 2009.
- [42] J.(Tiffany) Li, M. Uysal, “Optical wireless communications: system model, capacity and coding”, *Proc. Vehicular Tech. Conf.*, pp. 168-172, 2003.
- [43] M.A. Al-Habash, L.C. Andrews, and R.L. Phillips, “Mathematical model for the irradiance PDF of a laser beam propagating through turbulent media”, *Opt. Eng.*, Vol. 40, no. 8, pp. 1554-1562, 2001.
- [44] G. Tzeremes, C.G. Christodoulou, “Use of Weibull distribution for describing outdoor multipath fading”, *IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.*, Vol. 1, pp. 232-235, 2002.
- [45] T. Kamalakis, I. Neokosmidis, A. Tsipouras, T. Sphicopoulos, S. Pantazis, I. Andrikopoulos, “Hybrid free space optical/millimeter wave outdoor links for broadband wireless access networks”, proceeding of the 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor Mobile Radio Communications, 2007.
- [46] <http://eom.springer.de/m/m110110.htm>.
- [47] Suzuki H., “A statistical model for urban multipath propagation”, *IEEE Transactions on Communications*, 1977.

- [48] Integral Characteristics of the Nakagami-m Distribution of Signal Envelope Stefanovic, Z., Hana; and Savic, M., Ana, 2010.
- [49] Janaswamy R., “Encyclopedia of RF and Microwave Engineering”, *University of Massachusetts*, Amherst, USA.
- [50] Nakagami M., “The m-distribution, a General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading in Statistical Methods in Radio Wave Propagation”, *W. G. Hoffman, Ed., Pergamon*, Oxford, England, 1960.
- [51] R. Ramaswami and K. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*. San Diego: Academic Press, 2002.
- [52] Λάμπρης Γεώργιος, “Επίγεια Συστήματα Υβριδικών Ασύρματων Τηλεπικοινωνιών FSO/MMW και Απόδοσή τους ανάλογα με τις Ατμοσφαιρικές Συνθήκες”, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Διπλώμα Ειδίκευσης Ηλεκτρονικής και Ραδιοηλεκτρολογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, ακαδημαϊκό έτος 2010-2011.