

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΜΕΑΣ: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ: ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ

"Πειραματική Μελέτη του Μοντέλου της Γάμμα Κατανομής για την Περιγραφή του Φαινομένου των Σπινθηρισμών στις Ασύρματες Οπτικές Επικοινωνίες σε Κανάλια Ασθενούς Ατμοσφαιρικής Τυρβώδους Ροής"

Μπουραζάνη Δήμητρα

2016112

Επιβλέποντες:

Ε. Νισταζάκης, Αναπλ. Καθηγητής
Ε. Τσίλης, Επικ. Καθηγητής
Α. Τζανακάκη, Επικ. Καθηγήτρια

Αθήνα 2018

" Δηλώνω υπεύθυνα ότι δεν έχω υποπέσει σε περιπτώσεις λογοκλοπής ή αντιγραφής, όπως αυτές διασαφηνίζονται παρακάτω

Μπουραζάνη Δήμητρα

Οδηγίες αποφυγής Λογοκλοπής και Αντιγραφής [απόσπασμα από http://www.samos.aegean.gr/actuar/dlekkas/reports/OdigiesEPO12.pdf]

1. Μην παραθέτετε κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί χωρίς να τα περικλείετε σε εισαγωγικά και χωρίς να αναφέρετε το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών σας, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάσθηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Πρέπει να αναφέρετε πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική σας εργασία. Αυτό τιμωρείται ως αντιγραφή.
3. Υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορείτε να εντάξετε στην εργασία σας εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια. Εσείς μπορείτε να χρησιμοποιείτε τέτοιο υλικό, με μέτρο, γιατί οι εργασίες είναι μικρού μεγέθους και πρέπει πάντα να κυριαρχούν οι δικές σας ιδέες.
4. Αυστηρά τιμωρείται επίσης η παρουσίαση έργου άλλων ως προσωπικής εργασίας."

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεκπεραιώθηκε στο Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης Ραδιοηλεκτρολογίας και Ηλεκτρονικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπλ. Καθ. Έκτορα Νισταζάκη και τον Δρα Αργύρη Στασινάκη για την ανάθεση του θέματος καθώς και την εμπιστοσύνη, την στήριξη και βοήθεια που μου προσέφεραν καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Γιώργο Ρουμελά και Νίκο Ανδρούτσο για την βοήθειά τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που είναι δίπλα μου και με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.

Περίληψη

Τα οπτικά ασύρματα συστήματα επικοινωνίας ελεύθερου χώρου (FSO) λειτουργούν με τεχνολογία οπτικής επαφής που χρησιμοποιεί λέιζερ για την παροχή οπτικής ζεύξης μεταξύ του πομπού και του δέκτη χρησιμοποιώντας την ατμόσφαιρα. Τα συστήματα FSO παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως πολύ υψηλό bit rate, χρήση οπτικού φάσματος χωρίς ανάγκη αδειοδότησης και χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Λόγω της διάδοσης της δέσμης λέιζερ στην ατμόσφαιρα, τα συστήματα αυτά είναι ευάλωτα σε καιρικές συνθήκες και ατμοσφαιρικά φαινόμενα, όπως η ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή, που προκαλεί το φαινόμενο σπινθηρισμού και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του συστήματος. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της τυρβώδους ροής στην απόδοση του συστήματος, χρησιμοποιούνται πολλές στατιστικές κατανομές για τη μοντελοποίηση του καναλιού. Σε αυτή την εργασία εξετάζεται πειραματικά η ακρίβεια της κατανομής γάμμα ως προς την περιγραφή των διακυμάνσεων της ακτινοβολίας στον δέκτη μιας σύνδεσης FSO, υπό συνθήκες ασθενούς τυρβώδους ροής. Τα θεωρητικά εκτιμώμενα αποτελέσματα, για την απόδοση του συστήματος, παρουσιάζονται και συγκρίνονται με τα πειραματικά δεδομένα, με στόχο την επαλήθευση ή όχι της ακρίβειας του χρησιμοποιούμενου μοντέλου. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μια οριζόντια σύνδεση FSO, μήκους περίπου τριών χιλιομέτρων και τριάντα πέντε μέτρων πάνω από τη θάλασσα. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν την υψηλή ακρίβεια με την οποία περιγράφει το συγκεκριμένο μοντέλο την επίδραση της τυρβώδους ατμοσφαιρικής ροής.

Λέξεις κλειδιά: οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (FSO), ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή, κατανομή γάμμα

Abstract

Free space optical (FSO) communication systems operate with a line-of-sight technology that uses laser to provide optical links between the transmitter and the receiver using the atmosphere. The FSO systems provide many advantages, such as very high bit rate, unlicensed optical spectrum and low installation and operational cost. Due to the propagation of the laser beam in the atmosphere, these systems are vulnerable to weather conditions and atmospheric phenomena, such as atmospheric turbulence, that causes the scintillation effect which results in performance reduction. In order to study the influence of turbulence at the system's performance, many statistical distributions have been used to model the channel. In this work the accuracy of gamma distribution to describe the irradiance fluctuations at the receiver of an FSO link under weak turbulence conditions is experimentally examined. The theoretically estimated results, for Bit Rate performance are presented and compared with those obtained experimentally in order to verify the model. The experiment's setup is constituted by a horizontal FSO link with length of almost three kilometers and thirty five meters above the sea. The results verify the accuracy of the specific model.

Keywords: free space optical communications (FSO), atmospheric turbulence, gamma distribution

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 7

1.1 Εισαγωγή 7

1.2 Ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών 10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 13

2.1 Ατμοσφαιρική τυρβώδης ροη και φαινόμενο σπινθηρισμού 13

2.2 Η παράμετρος C_n^2 για ζεύξεις πάνω από την θάλασσα 16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 19

3.1 Μετρικές για την αξιοπιστία και την απόδοση του συστήματος 19

3.2. Πιθανότητα διακοπής 20

3.3 Μέση χωρητικότητα 21

3.4. Χωρητικότητα διακοπής 21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 23

4.1. Point-to-Point FSO ζεύξη 23

4.2. Εκτίμηση πιθανότητας διακοπής 24

4.3. Εκτίμηση μέσης χωρητικότητας 26

4.4. Εκτίμηση διακοπής της χωρητικότητας 26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 28

5.1 Θεωρητική μελέτη και προσομοίωση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής μέσω στατιστικών κατανομών 28

5.2 Η κατανομή γάμμα 30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 35

6.1 Πειραματική διάταξη 35

6.2 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων 36

6.3 Γραφικές απεικονίσεις και αριθμητικά αποτελέσματα 38

6.4 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά αναμενόμενων αποτελεσμάτων 43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 45

7.1 Συμπεράσματα.....45

Αναφορές.....48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Εισαγωγή

Η τάση της νέας εποχής, όπου η χρήση του διαδικτύου είναι αναγκαία και καθημερινή, έχει οδηγήσει στην αύξηση των απαιτήσεων, από τους χρήστες, για ανάπτυξη πιο εξελιγμένων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων που επιτρέπουν ζεύξεις με υψηλότατους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης σφαλμάτων. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το δίκτυο οπτικών ινών το οποίο ως σύστημα οπτικών τηλεπικοινωνιών προσφέρει μεγάλο εύρος ζώνης. Όμως τα ενσύρματα συστήματα διαθέτουν κάποια μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος, η δυσκολία εγκατάστασης και της αδυναμίας να "φτάσουν" σε πιο απομακρυσμένα μέρη. Το κενό που αφήνει το δίκτυο των οπτικών ινών έρχεται να συμπληρώσει το ασύρματο οπτικό σύστημα επικοινωνίας (FSO: Free Space Optical) το οποίο θα αποτελέσει ένα κομμάτι του 5G δικτύου [1] [2].

Τα συστήματα FSO επεκτείνονται ταχύτατα τις τελευταίες δεκαετίες, τόσο στον επιστημονικό όσο και στον εμπορικό τομέα, καθώς οι δυνατότητες που προσφέρουν είναι άφθονες. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή ασφάλεια, το μη εξουσιοδοτημένο οπτικό φάσμα, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης λειτουργίας και συντήρησης και η πολύ υψηλή χωρητικότητα καναλιού. Επίσης, λόγω του μήκους κύματος λειτουργίας, έχουν τεράστιο εύρος ζώνης, για την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών, και υψηλή απόδοση υπό κατάλληλες καιρικές συνθήκες [3].

Ορισμένες εφαρμογές που παρέχουν τα συστήματα FSO είναι η πρόσβαση "τελευταίου μιλίου", (last mile), η οποία συνδέει το δίκτυο οπτικών ινών με απομακρυσμένες περιοχές, το back up link, το οποίο χρησιμοποιείται ως λύση δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας για περιπτώσεις στις οποίες τα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνιών υποβαθμίζονται ή γίνονται δυσλειτουργικά και το back-haul, το οποίο χρησιμοποιείται για την μεταφορά προς τα πίσω μεταξύ του σταθμού

βάσης και των δικτύων κέντρων μεταγωγής 4G / 5G. Επίσης, τα FSO χρησιμοποιούνται ως προσωρινές συνδέσεις σε περιπτώσεις όπως όταν μια καταστροφή όπως ένας σεισμός προκαλέσει ζημιά στο υπάρχον ενσύρματο δίκτυο, το FSO μπορεί να εγκατασταθεί άμεσα μέχρι η ζημιά να επιδιορθωθεί, και τέλος σε περιπτώσεις με δύσκολα εδάφη, για παράδειγμα ένας δρόμος με πολύ κίνηση ή η διέλευση ενός ποταμού όπου η εγκατάσταση ενσύρματου δικτύου είναι δύσκολη το FSO αποτελεί λύση [2] [4]. Για τους λόγους αυτούς, τα συστήματα FSO μπορούν να συγκριθούν με τα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων (RF) [5].

Βασικές προϋποθέσεις για την λειτουργία αυτών των συστημάτων είναι η απαίτηση οπτικής επαφής (line of sight) και η point-to-point ζεύξη [6]. Ωστόσο, όπως κάθε σύστημα διαθέτει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, έτσι και τα συστήματα FSO παρά τα πολλά πλεονεκτήματα, που αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιμετωπίζουν ένα μεγάλο μειονέκτημα που έχει αντίκτυπο στις προϋποθέσεις αυτές και κατά συνέπεια στην απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος. Το πρόβλημα εντοπίζεται κατά διάδοση του σήματος στην ατμόσφαιρα από τον πομπό στον δέκτη. Τα συστήματα FSO χρησιμοποιούν την ατμόσφαιρα ως κανάλι μεταξύ του πομπού και του δέκτη, με αποτέλεσμα το μεταδιδόμενο σήμα να επηρεάζεται έντονα από τις διάφορες καιρικές συνθήκες που μπορούν να επικρατούν όπως η ομίχλη, η υγρασία, η βροχή κλπ. και άλλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή. Από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που αναφέρθηκαν, αυτό που επηρεάζει περισσότερο τα FSO συστήματα είναι η ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή.

Η τυρβώδης ροή, λοιπόν, δημιουργείται από τυχαίες μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης στην ατμόσφαιρα και δημιουργεί τυχαίες μεταβολές στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Ο τρόπος που προκαλούνται οι τυχαίες μεταβολές στον δείκτη διάθλασης είναι ο ακόλουθος. Η ατμόσφαιρα αποτελείται από μικρούς θύλακες αέρα. Οι θύλακες αυτοί θερμαίνονται με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας τους για σύντομο χρονικό διάστημα και τελικά τη μετακίνηση τους σε υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα [2]. Οπότε, στα FSO συστήματα ο ελεύθερος χώρος της ατμόσφαιρας ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη αντιμετωπίζει το πρόβλημα της τυχαίας μεταβολής του δείκτη διάθλασης. Η δέσμη laser εκπέμπεται

από τον πομπό και καθώς ταξιδεύει στην ατμόσφαιρα μέρος της εκτρέπεται από την πορεία της λόγω της τυρβώδους ροής. Με λίγα λόγια η τυρβώδης ροή προκαλεί σκέδαση της δέσμης laser οδηγώντας στη διακύμανση της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη με αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος του σήματος στον δέκτη και άρα μείωση της απόδοσης του συστήματος [6] [7]. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σπινθηρισμός (scintillation). Ο σπινθηρισμός είναι ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο και στην ακραία του μορφή μπορεί να προκαλέσει ακόμα και διακοπή της σύνδεσης για λίγα δευτερόλεπτα λόγω κακής ευθυγράμμισης του πομπού και του δέκτη. Για το λόγο αυτό το φαινόμενο της τυρβώδους ροής είναι σημαντικό να μελετηθεί. Οι διακυμάνσεις της ακτινοβολίας στον δέκτη είναι έντονες σε σχέση με τη μέση ακτινοβολία που φθάνει στον δέκτη οπότε η τυρβώδης ροής μελετάται στατιστικά [3] [6].

Προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση αυτών των συστημάτων ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, διάφορες ερευνητικές ομάδες προσπαθούν να βρουν και να προτείνουν νέες τεχνικές για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μικρότερη εξάρτηση της αξιοπιστίας, της διαθεσιμότητας και της απόδοσης του FSO συστήματος από τις καιρικές μεταβολές.

Η τυρβώδης ροή περιγράφεται με διάφορα στατιστικά μοντέλα που έχουν προταθεί. Η κατηγοριοποίηση τους γίνεται ανάλογα με την ένταση της τυρβώδους ροής, δηλαδή ανάλογα με το πόσο ήπια ως ισχυρή μπορεί να χαρακτηριστεί [3] [5] [8]. Κάποια μοντέλα χρησιμοποιούνται μόνο για ήπια τυρβώδη ροή, χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η λογαριθμική κατανομή και η κατανομή γάμμα, κάποια για μέτρια, κάποια για ισχυρή, όπως η κατανομή K και κάποια για όλο το εύρος της, δηλαδή από ήπια ως ισχυρή, για παράδειγμα η γάμμα-γάμμα κατανομή, η malaga και η I-K κατανομή.

Στην εργασία αυτή θα μελετήσουμε την ασθενή τυρβώδη ροή και θα χρησιμοποιηθεί η κατανομή γάμμα για την περιγραφή της, η οποία θα διερευνηθεί πειραματικά για το αν μπορεί ή όχι να επιβεβαιωθεί η ακρίβειά της ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη. Το κύριο σώμα αυτής της εργασίας είναι η σύγκριση μεταξύ της θεωρητικής

κατανομής γάμμα CDF και της πειραματικής CDF καμπύλης. Η πειραματική καμπύλη προκύπτει από την επεξεργασία πειραματικών δεδομένων bit rate τα οποία συλλέχθηκαν από μια ζεύξη FSO που είναι εγκατεστημένη μεταξύ του λιμανιού του Πειραιά και ενός φάρου στην Ψυττάλεια. Κριτήριο για την επιλογή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ήπιες καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κάποιες μέρες μέσα στον χρόνο [9] [10]. Τα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται και το αποτέλεσμά επιβεβαιώνει ή όχι την ακρίβεια του της στατιστικής κατανομής γάμμα ως ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει τις μεταβολές της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη του ασύρματου οπτικού συστήματος τηλεπικοινωνίας, λόγω της τυρβώδους ατμοσφαιρικής ροής.

1.2 Ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών

Τα ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνιών αποτελούνται από τρία βασικά μέρη: τον πομπό, το κανάλι και το δέκτη. Ο πομπός παράγει και εκπέμπει μια οπτική δέσμη laser η οποία διαμορφώνεται κατάλληλα για να μεταφέρει την πληροφορία. Συνήθως τα μήκη κύματος, λ, που επιλέγονται στα FSO συστήματα είναι 0.68μm, 0.845μm, 1.31μm, 1.55μm και 10μm [11]. Τα FSO συστήματα είναι ένα κομμάτι των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας. Η τάση της εποχής θέλει όλα τα συστήματα των οπτικών επικοινωνιών να μπορούν να συνδέονται και να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους για να υπάρχει καλύτερη και μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου και περισσότερες δυνατότητες. Οπότε τα μήκη κύματος που επιλέγονται να χρησιμοποιούνται περισσότερο από τα ασύρματα οπτικά συστήματα επικοινωνίας είναι αυτά που είναι συμβατά με το μήκος κύματος του δικτύου των οπτικών ινών. Στις οπτικές ίνες τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι τα 0.85μm, τα 1.31μm και τα 1.55μm. Κατά την διάδοση του σήματος μέσα από την ίνα δεν διαδίδεται μόνο ένα σήμα αλλά μπάντες και τα μήκη κύματός τους έχουν οριστεί από την ITU να είναι από 1.26μm μέχρι 1.625μm [12]. Οπότε τα μήκη κύματος όπου

το δίκτυο οπτικών ινών συμβαδίζει με τα ασύρματα οπτικά συστήματα έχουν τιμές 1.31μm και 1.55μm. Επίσης, το μήκος κύματος είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας διότι συνδέεται άμεσα με την τυρβώδη ροή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, άρα από αυτόν εξαρτάται η εξασθένιση του σήματος κατά την διάδοση [13].

Η διάμετρος της δέσμης laser που ξεκινάει από τον πομπό είναι λίγα χιλιοστά και κατά την διάδοση η διάμετρος αυτή ανοίγει και καταλήγει στον δέκτη η ενεργός διάμετρος να φτάνει ως και τα δύο μέτρα. Η μέγιστη απόσταση που μπορούν να τοποθετηθούν ο πομπός και ο δέκτης είναι 10km [11]. Η διάδοση δια μέσω της ατμόσφαιρας γίνεται ευθύγραμμα και η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη είναι απαραίτητη όπως και η ευθυγράμμιση. Οποιοδήποτε εμπόδιο ή αστοχία ευθυγράμμισης μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια δεδομένων άρα και μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Τα τελευταία έτη η χρήση των FSO συστημάτων έχει αυξηθεί και αυτό γίνεται επειδή διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς δεδομένων, που πρακτικά μπορεί να φτάσει μέχρι τα 10Gbps, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, μεγάλη ασφάλεια και χαμηλή πιθανότητα σφάλματος. Επίσης, δεν απαιτείται ειδική χορήγηση άδειας για την χρήση συγκεκριμένων συχνοτήτων.

Όπως κάθε σύστημα, έτσι και στα ασύρματα οπτικά ελεύθερου χώρου εκτός από πλεονεκτήματα έχουν και μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών έχουν αντίκτυπο κυρίως στην απόδοση και την αξιοπιστία τους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ένα βασικό πρόβλημα είναι η απόκλιση στόχευσης ή ακόμα χειρότερα η απώλεια στόχευσης που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης του συστήματος ακόμα και διακοπή λήψης από τον δέκτη. Οπότε ο πομπός και ο δέκτης πρέπει να βρίσκονται συνεχώς σε ευθυγράμμιση και οπτική επαφή. Επίσης, υπάρχει ο περιορισμός της χιλιομετρικής απόστασης των 10km που μπορούν να καλύψουν αυτά τα συστήματα. Τέλος, το βασικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα αυτά είναι η διάδοσή τους στην ατμόσφαιρα. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν δεν είναι πάντα ιδανικές. Φαινόμενα

όπως βροχή, υγρασία και κυρίως ομίχλη επηρεάζουν το σήμα καθώς οι διαστάσεις των υδροσταγονιδίων είναι συγκρίσιμες με αυτές του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Επίσης, το φαινόμενο της τυρβώδους ροής δημιουργεί σπινθηρισμό με αποτέλεσμα να επηρεάζει το σήμα δημιουργώντας γρήγορες διακυμάνσεις της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη. Οπότε οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει πολύ τα συστήματα FSO ως προς την απόδοση, την διαθεσιμότητα με κίνδυνο διακοπής της ζεύξης και την αξιοπιστία καθώς η μετάδοση σφάλματος είναι πιθανή [14].

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων όπως χρήση πολλαπλών συχνοτήτων, χρήση υβριδικών συστημάτων, τεχνικές ευθυγράμμισης και κυρίως η τεχνική της διαφορικής λήψης.

Στην εργασία αυτή θα μελετήσουμε μόνο για τον παράγοντα της τυρβώδους ροής που επιδρά στην ζεύξη και τρόπους που μπορούμε να την προβλέψουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Ατμοσφαιρική τυρβώδης ροη και φαινόμενο σπινθηρισμού

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα πολύ σημαντικό ατμοσφαιρικό φαινόμενο που επηρεάζει έντονα την απόδοση και την αξιοπιστία των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή. Η ατμοσφαιρική τυρβώδης ροή οφείλεται σε τυχαίες μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης στην ατμόσφαιρα, που έχουν ως αποτέλεσμα τυχαίες μεταβολές του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας [2] [6] [9] [10] [15]. Αυτές οι διακυμάνσεις του δείκτη διαθλάσεως παρατηρούνται κυρίως λόγω των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας μεταξύ της ατμόσφαιρας, του εδάφους και των ωκεανών [6] [15]. Ο μηχανισμός αυτής της διακύμανσης είναι ο ακόλουθος: Μικροί θύλακες αέρα της ατμόσφαιρα θερμαίνονται με αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας τους για σύντομο χρονικό διάστημα και τελικά τη μετακίνηση τους σε υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Αυτοί οι θύλακες, λόγω της διαφορετικής τους πυκνότητας, έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης από αυτόν που υπάρχει στον αέρα της περιοχής τους. Έτσι, καθώς η οπτική δέσμη διέρχεται από την περιοχή όπου ο δείκτης διάθλασης έχει μεταβληθεί, κάποιο μέρος της εκτρέπεται, με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει στον δέκτη με λιγότερη ενέργεια από το αναμενόμενο. Ο μεγάλος αριθμός αυτών των θυλάκων προκαλεί γρήγορες και μεγάλες διακυμάνσεις της κανονικοποιημένης έντασης της ακτινοβολίας στον δέκτη [1]. Αυτή η τυχαία μεταβολή της ακτινοβολίας λέιζερ καταλήγει σε χρονικές και χωρικές διακυμάνσεις της ακτινοβολίας του οπτικού σήματος στον δέκτη και αυτό το φαινόμενο ορίζεται ως σπινθηρισμός και παρατηρείται αύξηση του για συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων [6] [7] [9] [10] [15].

Ο σπινθηρισμός είναι ένας πολύ σοβαρός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση, και μερικές φορές τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία, των συστημάτων επικοινωνίας FSO είτε για επίγειες ζεύξεις είτε για δορυφορικές ζεύξεις μεταφοράς

δεδομένων. Το φαινόμενο του σπινθηρισμού εξασθενεί το ληφθέν σήμα με τυχαίο τρόπο. Έτσι, προκειμένου να προσομοιωθεί το οπτικό σήμα που φθάνει στον δέκτη, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η κατάλληλη στατιστική κατανομή και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF), η οποία περιγράφει σωστά τα στατιστικά στοιχεία εξασθένισης κάθε περιοχής. Με την πάροδο των ετών έχουν προταθεί πολλά στατιστικά μοντέλα για την προσομοίωση αυτών των στατιστικών εξασθένισης λόγω του φαινομένου της ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής και έχουν προκύψει είτε από πειραματικά αποτελέσματα είτε από θεωρητικές μελέτες ή και από τα δύο. Το βασικό ζήτημα είναι ότι κάθε περιοχή έχει τις ιδιαιτερότητές της, ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες, την ώρα της ημέρας και τη δύναμη της τυρβώδους ροής [6] [16].

Έτσι, τα προτεινόμενα στατιστικά μοντέλα αφορούν τις ασθενείς, μέτριες, ισχυρές ή πολύ ισχυρές συνθήκες τυρβώδους ροής. Η ισχύς της τυρβώδους ροής μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της παραμέτρου C_n^2, η οποία εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους των καιρικών συνθηκών. Για να μελετήσουμε την επίδραση του σπινθηρισμού στην απόδοση των FSO ζεύξεων, ορίζουμε μερικές στατιστικές ποσότητες για την ποσοτική εκτίμηση του σπινθηρισμού. Χαρακτηριστική ποσότητα είναι ο δείκτης σπινθηρισμού [6] [7]:

$$\sigma_I^2 = \frac{<I^2> - <I>^2}{<I>^2} = \frac{<I^2>}{<I>^2} - 1 \qquad (1)$$

όπου I είναι η ακτινοβολία του οπτικού σήματος στον δέκτη και <·> υποδηλώνει τη μέση τιμή της ποσότητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση τιμή μπορεί να εκτιμηθεί είτε με ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων που λαμβάνονται στο δέκτη ταυτόχρονα σε διαφορετικές θέσεις, κοντά η μία στην άλλη, είτε από μεγάλο αριθμό δειγμάτων που λαμβάνονται στο δέκτη σε μια θέση για διαφορετικές χρονικές στιγμές. Έτσι, υποθέτουμε ότι η διαδικασία είναι εργοδική (ergodic). Αυτή η υπόθεση είναι πολύ σημαντική διότι μία από τις

κύριες παραμέτρους απόδοσης του συστήματος που παρουσιάζονται παρακάτω (κεφάλαιο 5.2) είναι η εργοδική ή η μέση χωρητικότητα καναλιού [6], η οποία προσφέρει πολύ σημαντικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του συστήματος επικοινωνίας που μελετάμε. Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι στην θεωρία ασθενούς σπινθηρισμού, ο δείκτης σπινθηρισμού είναι ανάλογος με τη διακύμανση Rytov και δίνεται ως εξής [6] [7] :

$$\sigma_{I,Rytov}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2)$$

όπου C_n^2 αντιπροσωπεύει την ισχύ της τυρβώδους ροής, k=2π/λ είναι ο οπτικός κυματάρυθμος και L είναι το μήκος ζεύξης FSO.

Ο δείκτης σπινθηρισμού έντασης σ^2 αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη διακύμανση της ισχύος και είναι ένα μέτρο των σπινθηρισμών. Για ασθενή τυρβώδη ροή η παράμετρος παίρνει τιμές σ^2>0.3 και για ισχυρή τυρβώδη ροή η παράμετρος σ^2 κορένεται. Η ισχύς της τυρβώδης ροής μπορεί να είναι από ασθενή έως ισχυρή ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Για ισχυρή τυρβώδη ροή, το αποτέλεσμα σπινθηρισμού είναι αξιοσημείωτο λόγω της πολλαπλής σκέδασης. Για ασθενή τυρβώδη ροή υπάρχει μονή σκέδαση που προκαλεί απόκλιση της δέσμης με αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα σπινθηρισμού [1].

Η παράμετρος C_n^2 αντιπροσωπεύει τη παράμετρο κατανομής του δείκτη διάθλασης στην ατμόσφαιρα, και μετριέται σε $m^{-2/3}$. Είναι το μέτρο της έντασης της τυρβώδους ροής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετρική [17]. Εξαρτάται από το ύψος, h, και από ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και τη μερική πίεση υδρατμών. Για οριζόντιες ζεύξεις μικρών αποστάσεων η παράμετρος θεωρείται σταθερή. Για ζεύξεις χαμηλού ύψους, η C_n^2 είναι μέγιστη το μεσημέρι, σταθερή το βράδυ και ελάχιστη κατά την διάρκεια της ανατολής και της δύσης του ηλίου [1]. Οι τιμές της C_n^2 κυμαίνονται από 10^{-17} $m^{-2/3}$ για ασθενή έως 10^{-13} $m^{-2/3}$ για ισχυρή τυρβώδη ροή. Δίνεται ως [17]:

$$C_n^2 = (79 \times 10^{-6} P/T^2)^2 C_T^2 \quad (3)$$

όπου P η ατμοσφαιρική πίεση, T η θερμοκρασία και C_T^2 η σταθερά θερμοκρασιακής κατανομής (temperature structure constant) από την οποία προκύπτει η C_n^2 παράμετρος.

Υπάρχουν πολλά μοντέλα για την εκτίμηση της C_n^2 παραμέτρου. Το Hufnagel-Vally (ή HV5/7 μοντέλο) είναι ένα ευρέως γνωστό και χρησιμοποιούμενο μοντέλο που δείχνει την εξάρτηση της παραμέτρου C_n^2 από το ύψος, h και την ταχύτητα του ανέμου, v, όπου η ζεύξη FSO λειτουργεί. Στην συντομογραφία του μοντέλου αυτού, δηλαδή το HV5/7, οι τιμές 5 και 7 αντιστοιχούν στην συνοχή του ατμοσφαιρικού μήκους, (r_0) σε cm, και στην γωνία, (θ_0) σε μrad, αντιστοίχως για λ=0.55μm. Στις περιπτώσεις όπου το λ=1.315μm οι παραπάνω τιμές γίνονται r_0=14cm και θ_0=20μrad. Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου αυτού δίνεται ως [6]:

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2 \left(\frac{h}{10^5}\right)^{10} \exp\left(\frac{h}{10^3}\right) + 2.7 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + \\ + C_n^2(0) \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) \quad (4)$$

όπου $C_n^2(0)$ είναι η τιμή της παραμέτρου C_n^2 από το έδαφος σε $m^{-2/3}$, h το ύψος από το έδαφος σε m και v η ταχύτητα του ανέμου σε m/s. Οι τιμές της παραμέτρου C_n^2 κυμαίνονται από $10^{-17} m^{-2/3}$ έως $10^{-13} m^{-2/3}$ για ένταση τυρβώδους ροής από ήπια έως ισχυρής, αντίστοιχα [6].

2.2 Η παράμετρος C_n^2 για ζεύξεις πάνω από την θάλασσα

Για ζεύξεις με χαμηλό ύψος πάνω από την επιφάνεια της γης, ο ατμοσφαιρικός αέρας επηρεάζεται από τις ιδιότητες του υποστρώματός του. Δηλαδή, υπάρχει διαφορά μεταξύ της επαφής αέρας-έδαφος και αέρας-νερό. Σε αυτή την εργασία, μας ενδιαφέρει η αλληλεπίδραση αέρα-νερού και πιο συγκεκριμένα αέρα-θάλασσας. Η ανταλλαγή ενέργειας αέρα-εδάφους γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με μοριακή αγωγιμότητα. Στην περίπτωση του αέρα-νερού υπάρχει μια πρόσθετη ανταλλαγή μάζας και μεταφορά θερμότητας με χρήση της μεταγωγής, της οριζόντιας μεταφοράς και της εξάτμισης. Λόγω της μεγάλης θερμικής χωρητικότητας του νερού, απαιτείται πολύ περισσότερη ενέργεια για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός όγκου νερού από ό, τι για τα περισσότερα εδάφη. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας στα στρώματα αέρα-νερού από ότι στα στρώματα εδάφους-αέρα. Επιπλέον, οι καθημερινές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του νερού είναι μικρές. Έτσι, η τιμή C_n^2 πάνω από το νερό είναι μικρότερη από την αναμενόμενη πάνω από το έδαφος και οι ημερήσιες μεταβολές είναι λιγότερο έντονες [1] [9] [10].

Γενικά, δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο μοντέλο $C_n^2(h)$ για ζεύξεις πάνω από την θάλασσα. Παρ 'όλα αυτά, υπάρχει ένα μοντέλο που εξυπηρετεί την εκτίμηση της τυρβώδους ροής για περιοχές όπου η ζεύξη είναι εγκατεστημένη πάνω από τη θάλασσα και εξαρτάται από το ύψος, h. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί για ζεύξεις που δεν υπερβαίνουν το ύψος των 6 km, και έχει την ακόλουθη μορφή [7] [18]:

$$C_n^2(h) = c_1 + c_2 \exp\left(-\frac{h}{c_3}\right) + c_4\left(-\frac{h}{c_5}\right) \qquad 0 \le h \le 6\text{km} \tag{5}$$

Αυτό το μοντέλο εξάγεται από το μοντέλο Hufnagel-Vally, Εξ. (4), με τις σταθερές c_1-c_5 να περιγράφουν διάφορες περιπτώσεις. Αυτές οι σταθερές c_1-c_5 αντιπροσωπεύουν τις διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει η Εξ. (5) ανάλογα με τρεις περιπτώσεις που εξαρτώνται από την ένταση της τυρβώδους ροής: ήπια, μέτρια και ισχυρή. Οι σταθερές c_1, c_2 και c_4 σχετίζονται με την ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή και οι σταθερές c_3 και c_5 σχετίζονται με το ύψος, h, πάνω από την

θαλάσσια περιοχή. Οι τιμές αυτών των σταθερών καθώς και οι τιμές της παραμέτρου C_n^2 δίδονται στον Πίνακα 1.

Περίπτωση	$C_n^2(h=0)$ $[m^{-2/3}]$	$c_1[m^{-2/3}]$	$c_2[m^{-2/3}]$	$c_3[m]$	$c_4[m^{-2/3}]$	$c_5[m]$
Ήπια	$1.0x10^{-16}$	$9.8286\ x10^{-18}$	$7.1609\ x10^{-17}$	100	$1.9521\ x10^{-17}$	1500
Μέτρια	$8.0x10^{-16}$	$9.8583\ x10^{-18}$	$4.9877\ x10^{-16}$	300	$2.9228\ x10^{-16}$	1200
Ισχυρή	$1.0\ x10^{-14}$	$9.2002\ x10^{-18}$	$9.4387\ x10^{-15}$	800	$6.7328\ x10^{-16}$	1000

Πίνακας 1: Τιμές των σταθερών για μοντέλα C_n^2 με ζεύξη πάνω από τη θάλασσα [7].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Μετρικές για την αξιοπιστία και την απόδοση του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι συνθήκες ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής, διαμέσου του καναλιού διάδοσης, προκαλούν το φαινόμενο σπινθηρισμού, το οποίο εξασθενεί το ληφθέν σήμα με τυχαίο τρόπο. Η εξασθένιση του σήματος μελετάται στατιστικά και μπορεί να θεωρηθεί γρήγορη ή αργή [6]. Για τις περιπτώσεις καναλιών γρήγορης στατιστικής εξασθένισης, οι διακυμάνσεις της έντασης του σήματος θεωρούνται ότι είναι πολύ γρήγορες ενώ κανάλια με αργή στατιστική εξασθένιση αυτές οι διακυμάνσεις είναι πολύ αργές και μπορούν να συγκριθούν με το ρυθμό bit της ζεύξης. Στην πράξη, ο χαρακτηρισμός ενός καναλιού ως γρήγορης ή αργής στατιστικής εξασθένισης εξαρτάται μόνο από το ρυθμό μετάδοσης bit της ζεύξης. Έτσι, καθώς οι ρυθμοί δεδομένων αυξάνονται, τα κανάλια επικοινωνίας της ατμόσφαιρας περιγράφονται καλύτερα ως κανάλια αργής στατιστικής εξασθένισης. Από την άλλη πλευρά, καθώς μειώνεται ο ρυθμός δεδομένων, το κανάλι περιγράφεται καλύτερα ως κανάλι γρήγορης στατιστικής εξασθένισης [6]. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, είναι προφανές ότι όταν ένα κανάλι μπορεί να μεταδίδει με πολύ υψηλούς ρυθμούς bit rate, χαρακτηρίζεται ως κανάλι αργής στατιστικής εξασθένισης, ενώ για χαμηλότερους ρυθμούς bit rate, χαρακτηρίζεται ως κανάλι γρήγορης στατιστικής εξασθένισης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η απόδοση ενός καναλιού FSO εξαρτάται πολύ από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι, είναι προφανές ότι οι στατιστικές εξασθένισης του καναλιού και επομένως ο επιτεύξιμος ρυθμός bit rate, αλλάζουν συνεχώς. Συνεπώς, στην πράξη, μια τέτοια ζεύξη δεν θα μπορούσε πάντα να προβλέψει την αργή ή την γρήγορη στατιστική εξασθένιση. Συνεπώς, προκειμένου να προσεγγίσουμε καλύτερα την χωρητικότητα της οπτικής ζεύξης υπό πραγματικές συνθήκες, πρέπει

να εκτιμήσουμε την χωρητικότητα του καναλιού τόσο για τις στατιστικές εξασθένισης όσο και για την πρακτική χωρητικότητα του καναλιού [6].

Στην συνέχεια, διερευνάται η διαθεσιμότητα και η απόδοση μιας point-to-point FSO ζεύξη με διαμόρφωση IM/DD και AWGN, για τυρβώδη ροή από ήπια έως ισχυρή. Επίσης θα γίνει εκτίμηση της πιθανότητας διακοπής, της μέσης χωρητικότητας και της χωρητικότητας διακοπής. Είναι προφανές ότι αυτές οι μετρικές δεν είναι οι μοναδικές που μπορούν να εκτιμηθούν, αλλά για τον συγκεκριμένο τύπο FSO ζεύξεων, μπορούμε να αξιολογήσουμε αποτελεσματικά τη διαθεσιμότητα και την απόδοσή τους.

3.2. Πιθανότητα διακοπής

Η μετρική πιθανότητα διακοπής υπολογίζεται και για αργή και για γρήγορη στατιστική εξασθένιση και συνδέεται με την αξιοπιστία της οπτικής ζεύξης [19] [20]. Θεωρείται ως μια ιδιαίτερα σημαντική μετρική για το σχεδιασμό ενός FSO συστήματος, καθώς αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η στιγμιαία SNR στον δέκτη να πέσει κάτω από ένα κρίσιμο κατώφλι που αντιστοιχεί στο όριο ευαισθησίας του δέκτη. Είναι σαφές ότι καθώς η πιθανότητα αυτή γίνεται μικρότερη, τόσο πιο αξιόπιστη είναι η σύνδεση. Προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία του καναλιού, οι παράμετροι του συστήματος FSO θα πρέπει να προσαρμόζονται ώστε να εξισορροπούν τις διακυμάνσεις της ακτινοβολίας που προκαλούνται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες τυρβώδους ροής. Παρ 'όλα αυτά, οι συνθήκες ισχυρής ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στην αξιοπιστία των ζεύξεων. Για το λόγο αυτό, τα υβριδικά συστήματα επικοινωνίας FSO έχουν μεγάλο ερευνητικό και εμπορικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια [6].

3.3 Μέση χωρητικότητα

Για την εκτίμηση της απόδοσης της ζεύξης FSO θα πρέπει να υπολογίσουμε διαφορετικές μετρικές για την περίπτωση αργής ή γρήγορης στατιστικής εξασθένισης. Έτσι για τη γρήγορη στατιστική εξασθένιση υπολογίζουμε τη μέση εργοδική χωρητικότητα [20] [21] [22] [23] ενώ για αργή στατιστική εξασθένιση υπολογίζουμε τη χωρητικότητα διακοπής [6] [24] [25]. Η μέση (εργοδική) χωρητικότητα ενός καναλιού αντιπροσωπεύει την επιτεύξιμη χωρητικότητα μιας πραγματικής οπτικής ζεύξης ελεύθερου χώρου [22]. Δηλαδή, αυτό είναι ένα μέγεθος που αντιπροσωπεύει το πραγματικό ανώτερο όριο των δεδομένων που μπορούν να διαδοθούν μέσω του καναλιού για την συγκεκριμένη FSO ζεύξη και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Προκειμένου να εκτιμηθεί αυτό, μελετάται η ακτινοβολία του σήματος στον δέκτη και εκτιμάται το SNR υποθέτοντας ότι το μονοπάτι διάδοσης του σήματος είναι ένας προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος (AWGN). Αυτό σημαίνει ότι, σε αυτή την εργασία, δεν εμπλέκονται παράμετροι εξασθένησης όπως βροχή, ομίχλη, χαλάζι, κτλ, διότι θεωρούνται ότι παραμένουν αμετάβλητες για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα. Όλες αυτές οι παράμετροι αποδυναμώνουν το οπτικό σήμα στον δέκτη, αλλά η επίδρασή τους μπορεί να θεωρηθεί ως μόνιμη αν συγκριθεί με τις γρήγορες μεταβολές της ακτινοβολίας που προκαλεί η τυρβώδης ροή [6].

3.4. Χωρητικότητα διακοπής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν στο κανάλι επικρατεί αργή στατιστική εξασθένιση, μια πολύ σημαντική μετρική είναι η χωρητικότητα διακοπής. Η χωρητικότητα διακοπής αντιπροσωπεύει τη χωρητικότητα για την πιθανότητα (1-r) των δυνατοτήτων του καναλιού [6] [24] [25]. Αυτό σημαίνει ότι αυτή είναι η πρακτική χωρητικότητα της οπτικής ζεύξης στην περίπτωση όπου οι μεταβολές των

συνθηκών της ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής είναι αργές σε σύγκριση με τη διάρκεια μετάδοσης bit. Η πιθανότητα (1-r) για την εκτίμηση της χωρητικότητας διακοπής μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις επιδόσεις που απαιτούνται για κάθε εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1. Point-to-Point FSO ζεύξη

Προκειμένου να διερευνηθεί η αξιοπιστία και η απόδοση του FSO συστήματος επικοινωνίας εκτιμώντας τις μετρικές που αναφέρθηκαν παραπάνω, την πιθανότητα διακοπής, την μέση χωρητικότητα και την χωρητικότητας διακοπής σε κανάλια υπό την επίδραση της τυρβώδους ροής, θεωρώντας το μοντέλο καναλιού που ακολουθεί. Επικεντρωνόμαστε στις point-to-point, χωρίς κώδικα, FSO ζεύξεις με AWGN, για κανάλια με ήπια έως ισχυρή τυρβώδη ροή, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση έντασης / άμεση ανίχνευση (IM/DD). Επιπλέον, υποθέτουμε ότι η δέσμη λέιζερ διαδίδεται κατά μήκος μιας οριζόντιας διαδρομής μέσω ενός καναλιού με τυρβώδη ροή με πρόσθετο λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN). Το κανάλι θεωρείται ότι είναι χωρίς μνήμη και σταθερό, με ανεξάρτητες και ταυτόσημες κατανομές στατιστικής εξασθένισης. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις γρήγορης στατιστικής εξασθένισης, υποθέτουμε ότι το κανάλι είναι εργοδικό. Σε αυτή την περίπτωση, το στατιστικό μοντέλο καναλιού δίνεται από την ακόλουθη μαθηματική έκφραση [6] [20] [21] [26]:

$$y = sx + n = \eta I x + n \tag{6}$$

όπου y είναι το ηλεκτρικό σήμα στον δέκτη, s = ηI είναι η στιγμιαία ένταση της δέσμης, η είναι η πραγματική αναλογία μετατροπής φωτός σε ρεύμα στον δέκτη, I είναι η κανονικοποιημένη ένταση της ακτινοβολίας, x είναι το διαμορφωμένο σήμα το οποίο είναι δυαδικό και παίρνει τιμές "0" ή "1" και n είναι ο AWGN με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση $\sigma^2 = N_0/2$.

Ένα κοινό κανάλι FSO μπορεί να θεωρηθεί ως τυχαία μεταβλητό κανάλι λόγω του γεγονότος ότι η οπτική δέσμη διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας με τυρβώδη ροή και η ένταση της ακτινοβολίας στον δέκτη κυμαίνεται ως τυχαία μεταβλητή (RV). Αυτές οι διακυμάνσεις της ακτινοβολίας οδηγούν σε διακυμάνσεις στην τιμή του στιγμιαίου ηλεκτρικού λόγου σήματος-προς-θόρυβο (SNR) στο δέκτη, γ, η οποία συμπεριφέρεται και ως μία τυχαία μεταβλητή της μορφής $\gamma = s^2/N_0 = (\eta I)^2/N_0$. Επιπλέον, το μέσο ηλεκτρικό SNR στον δέκτη μπορεί να εκτιμηθεί ως $\mu=(\eta\langle I\rangle)^2/N_0$, [8] [26], όπου $\langle I\rangle$ είναι η μέση αναμενόμενη τιμή της έντασης της ακτινοβολίας. Με την κανονικοποιημένη ένταση της ακτινοβολίας στην μονάδα, δηλαδή $\langle I\rangle=1$, λαμβάνουμε την ακόλουθη εξάρτηση της στιγμιαίας SNR από την ακτινοβολία [6]:

$$I = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \tag{7}$$

Αυτές οι διακυμάνσεις του RV, I, προκαλούνται από την ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή και μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω στατιστικών μοντέλων. Η ακρίβεια κάθε μοντέλου εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής και τη σωστή επιλογή των παραμέτρων που παρουσιάζονται παρακάτω. Η μαθηματική υλοποίηση κάθε στατιστικού μοντέλου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της PDF ως συνάρτηση της ακτινοβολίας στον δέκτη, $f_I(I)$. Με ένα απλό μετασχηματισμό ισχύος του RV, I, λαμβάνουμε το αντίστοιχο PDF του γ, δηλαδή $f_\gamma(\gamma)$, και με ολοκλήρωση, λαμβάνουμε το CDF του γ, δηλαδή $F_\gamma(\gamma)$.

4.2. Εκτίμηση πιθανότητας διακοπής

Σε προηγούμενη ενότητα η πιθανότητα διακοπής ορίστηκε ως η μετρική σχεδιασμού για τα συστήματα επικοινωνίας FSO που αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα ότι η τιμή γ πέφτει κάτω από ένα κρίσιμο κατώφλι γ_{th}, το οποίο αντιστοιχεί στο όριο ευαισθησίας του δέκτη. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, θεωρούμε ότι η πιθανότητα διακοπής, P_{out}, δίνεται από την ακόλουθη μαθηματική έκφραση [6], [8] [20]:

$$P_{out} = \Pr(\gamma \leq \gamma_{th}) = F_{\gamma}(\gamma_{th}) \tag{8}$$

Είναι γνωστό από το νόμο του Shannon ότι η χωρητικότητα ενός καναλιού επικοινωνίας δίνεται από την ακόλουθη έκφραση [6]:

$$C=B\log_2(1+Γ) \tag{9}$$

όπου, Β είναι το εύρος ζώνης του καναλιού και Γ το SNR στον δέκτη.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το οπτικό κανάλι του ελεύθερου χώρου δεν παραμένει αμετάβλητος. Για το λόγο αυτό η τιμή του SNR στον δέκτη λειτουργεί σαν RV. Ως αποτέλεσμα, η εξ.(9) δίνει μόνο την στιγμιαία χωρητικότητα καναλιού που δεν έχει σημαντική σημασία. Για το λόγο αυτό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τις περιπτώσεις γρήγορης στατιστικής του RV του SNR στον δέκτη, που εξαρτάται από τις διακυμάνσεις έντασης της ακτινοβολίας στον δέκτη, το μέγεθος που εκτιμούμε είναι η μέση χωρητικότητα ενώ για περιπτώσεις αργής στατιστικής του RV του SNR στον δέκτη εκτιμούμε την ικανότητα διακοπής [6].

4.3. Εκτίμηση μέσης χωρητικότητας

Για τη γρήγορη στατιστική εξασθένιση, το SNR στον δέκτη κυμαίνεται ταχέως και έτσι η χωρητικότητα του καναλιού θεωρείται ως τυχαία μεταβλητή και η μέση τιμή του, είναι η λεγόμενη μέση ή εργοδική χωρητικότητα, <C>(46). Η εκτίμηση αυτού του μεγέθους μπορεί να αποφέρει σημαντική ποσότητα πληροφοριών για τις δυνατότητες της οπτικής ζεύξης. Έτσι, η τιμή του <C>, αντιπροσωπεύει την πρακτικά εφικτή χωρητικότητα ενός καναλιού FSO με τυρβώδη ροή, περιλαμβανομένου της γρήγορης στατιστικής εξασθένισης, και είναι μια πολύ κρίσιμη μετρική για την αξιολόγηση της απόδοσης της ζεύξης. Χρησιμοποιώντας τη εξ. (7) και τον ορισμό της μέσης χωρητικότητας παίρνουμε ότι η μέση χωρητικότητα ενός οπτικού καναλιού ελεύθερου χώρου μπορεί να οριστεί ως [6] [20]:

$$< C >= \int_0^\infty B\, log_2 \left(1 + \frac{(\eta I)^2}{N_0}\right) f_I(I) dI \qquad (10)$$

4.4. Εκτίμηση διακοπής της χωρητικότητας

Για αργή στατιστική εξασθένιση, η ένταση της ακτινοβολίας στον δέκτη κυμαίνεται πολύ αργά σε σύγκριση με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Έτσι, αυτό το κανάλι δεν μπορεί να θεωρηθεί εργοδικό και επομένως η εκτίμηση της μέσης χωρητικότητας δεν έχει καμία πρακτική σημασία. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μέγεθος που δίνει σημαντικές πληροφορίες για τις δυνατότητες του καναλιού είναι η χωρητικότητα διακοπής, C_{out}, η οποία είναι η εγγυημένη χωρητικότητα, δηλαδή $C>C_{out}$, για ένα ποσοστό 100x(1-r) των δυνατοτήτων του καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση, η θετική τιμή του r, με r≤1, αντιπροσωπεύει την πιθανότητα της

στιγμιαίας χωρητικότητας καναλιού να είναι μικρότερη από C_{out} και μπορεί να γραφεί ως [6]:

$$Pr[C<C_{out}]=r \tag{11}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση ότι σε ένα κοινό οπτικό κανάλι ελεύθερου χώρου η στιγμιαία ηλεκτρική SNR στον δέκτη γ είναι RV, η εκτίμηση της χωρητικότητας διακοπής θα μπορούσε να γίνει χρησιμοποιώντας τη PDF της στιγμιαίας χωρητικότητας C, η οποία αντιπροσωπεύεται με $f_C(C)$, οι οποίες έχουν υπολογιστεί από τα αντίστοιχα PDF για την κανονικοποιημένη ένταση του σήματος, I, και την στιγμιαία ηλεκτρική SNR στον δέκτη, γ. Έτσι, η παραπάνω πιθανότητα εξ. (11) μπορεί να εκτιμηθεί μέσω του ακόλουθου ολοκληρώματος [6]:

$$r = \int_0^{C_{out}} p_c\,(C)dC \tag{12}$$

Έτσι, από την εξ. (12), εάν είναι γνωστό το PDF των διακυμάνσεων της έντασης, είναι εφικτή η εκτίμηση της διακοπής της χωρητικότητας των πρακτικών ζεύξεων FSO.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκφράσεις για την εκτίμηση της διακοπής της χωρητικότητας μπορούν επίσης να ληφθούν μέσω της αντίστοιχης έκφρασης της πιθανότητας διακοπής εξ. (8). Έτσι, αντικαθιστώντας την εξίσωση της χωρητικότητας εξ. (9) στην έκφραση πιθανότητας διακοπής εξ. (8), η πιθανότητα που θα προκύψει είναι η τιμή r και η αντίστοιχη χωρητικότητα είναι της διακοπής, C_{out} [6].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Θεωρητική μελέτη και προσομοίωση της επίδρασης της ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής μέσω στατιστικών κατανομών

Όπως έχει ήδη αναφεθεί, οι έντονες διακυμάνσεις της ακτινοβολίας στον δέκτη, που προκαλούνται από την τυρβώδη ροή, επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας και μπορούν να μελετηθούν μόνο στατιστικά. Προκειμένου να προβλέψουμε με ακρίβεια την απόδοση, ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη και τη διαθεσιμότητα του συστήματος επικοινωνίας, έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση τους [6]. Θεωρούμε ότι η τυρβώδης ροή είναι ισοτροπική ή ομοιογενής [7]. Ένα κανάλι, επηρεασμένο από τη τυρβώδη ροή, παρουσιάζει τυχαία χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά, έτσι χρησιμοποιούνται διάφορες στατιστικές κατανομές για να το μοντελοποιήσουν. Κάθε μοντέλο είναι ακριβές μόνο για κάποια ή κάποιες περιπτώσεις της τυρβώδους ροής, δηλαδή για ήπια έως και ισχυρή. Ορισμένες κοινές θεωρητικές κατανομές είναι log-normal, K, I-K, γάμμα, γάμμα-γάμμα, malaga αρνητική εκθετική, κλπ. Πιο αναλυτικά, οι κατανομές log-normal και γάμμα περιγράφουν ασθενή τυρβώδη ροή, οι K και αρνητική εκθετική περιγράφουν ισχυρή τυρβώδη ροή και τέλος οι κατανομές γάμμα-γάμμα, malaga και I-K περιγράφουν την τυρβώδη ροή για ένταση από ήπια ως ισχυρή [6] [9] [10] [27].

Σε αυτή την εργασία, εξετάζουμε την ακρίβεια της κατανομής γάμμα ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη για ασθενή ένταση της τυρβώδους ροής. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί περιλαμβάνει σύγκριση μεταξύ θεωρίας και πειράματος με σκοπό την εξακρίβωση ή την απόρριψη της θεωρίας.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το θεωρητικό κομμάτι, η διαδικασία που ακολουθείται για την εξαγωγή του θεωρητικού αποτελέσματος είναι η παρακάτω. Η διαδικασία ξεκινάει με την PDF συνάρτηση της γάμμα κατανομής εκφρασμένη ως προς την κανονικοποιημένη ένταση της ακτινοβολίας, I. Μέσω κατάλληλης μαθηματικής διαδικασίας, που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο, η PDF συνάρτηση μετασχηματίζεται σε μορφές οι οποίες μαρτυρούν την εξάρτηση του συστήματος από την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης και από την απόδοση του συστήματος. Τελικά, εξάγεται η PDF συνάρτηση της γάμμα κατανομής συναρτήσει του bit rate, r. Επαναλαμβάνουμε την ίδια ακριβώς διαδικασία με την αθροιστική συνάρτηση CDF της κατανομής γάμμα εκφρασμένη ως προς την κανικοποιημένη ένταση της ακτινοβολίας και μετά από διαδοχικούς μετασχηματισμούς η γαμμα-CDF εκφράζεται ως προς τον ρυθμό μετάδοσης bit, r, που είναι το ζητούμενο. Χρησιμοποιώντας την τελευταία εξίσωση για διάφορες τιμές του r δημιουργείται μία καμπύλη της γάμμα-CDF ως προς r και αυτή αντιπροσωπεύει το θεωρητικό αποτέλεσμα που θα χρησιμοποιηθεί στην σύγκριση όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Όσον αφορά το πειραματικό κομμάτι, εξάγεται επίσης μία καμπύλη της αθροιστικής συνάρτησης CDF συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, r, όμως σε αυτή την περίπτωση οι τιμές της παραμέτρου r είναι πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Το πείραμα, από όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα αυτά, είναι μία FSO ζεύξη μεταξύ του λιμανιού Πειραιά (πομπός) και του φάρου στο νησί Ψυττάλεια (δέκτης) όπου καταγράφονταν μετρήσεις bit rate ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το πείραμα και ο τρόπος λειτουργίας του θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Οπότε, έχοντας πειραματικά δεδομένα ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε και με κατάλληλη επεξεργασία καθώς και χρήση των χαρακτηριστικών του πειράματος προκύπτει η πειραματική CDF καμπύλη. Αφού εξετάζουμε την περίπτωση της ασθενούς τυρβώδους ροής τα δεδομένα επιλέγονται με βάση τις καλές ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά την διάρκεια της ημέρας.

Τέλος, αφού έχουν προκύψει οι δύο καμπύλες, θεωρητική και πειραματική, σειρά έχει η μεταξύ τους σύγκρισή. Αυτό θα γίνει "μετακινώντας" την θεωρητική καμπύλη με σκοπό να "πέσει πάνω" στην πειραματική καμπύλη. Στη συνέχεια, η απόκλιση

που θα έχουν οι δύο καμπύλες θα μετρηθεί με μία κατάλληλη παράμετρο, τη RMSE που θα αναλυθεί παρακάτω. Δηλαδή, η διερεύνηση της ακρίβειας ή όχι της θεωρητικής κατανομής γάμμα ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη για ασθενή τυρβώδη ροή, εξαρτάται από την τιμή που θα πάρει αυτή η RMSE παράμετρος.

5.2 Η κατανομή γάμμα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην διπλωματική αυτή μελετάται πειραματικά η ακρίβεια της κατανομής γάμμα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του καναλιού για ασθενή τυρβώδη ροή. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί μαθηματικά η γάμμα κατανομή, δηλαδή το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας αυτής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF: Probability Density Function) που περιγράφει την κατανομή γάμμα ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης έντασης της ακτινοβολίας I, δίνεται ως [27]:

$$f_I(I;k) = I^{k-1} e^{-Ik} \frac{k^k}{\Gamma(k)} \tag{13}$$

όπου το Γ(z) δηλώνει τη συνάρτηση γάμμα και η παράμετρος k> 0 υπολογίζεται από την τιμή k=$\frac{1}{\sigma_P^2}$. Η παράμετρος σ_P^2 περιγράφει το δείκτη σπινθηρισμού δηλαδή την κανονικοποιημένη διακύμανση της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος I, δίδεται ότι: σ_P^2=$\frac{<I^2>}{<I>^2} - 1$. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου σ_P^2 χρησιμοποιούνται οι τιμές α και β όπως φαίνεται παρακάτω [28]:

$$\sigma_P^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (14)$$

$$\alpha = [exp\left(\frac{0.49\delta^2}{\left(1+0.18d^2+0.56\delta^{12/5}\right)^{7/6}}\right) - 1]^{-1} \quad (15)$$

$$\beta = [\exp\left(\frac{0.51\delta^2(1+0.69\delta^{12/5})^{-5/6}}{(1+0.9d^2+0.62d^2\delta^{12/5})^{5/6}}\right) - 1]^{-1} \quad (16)$$

όπου $d = \sqrt{kD^2/4L}$, $k=2\pi/\lambda$ είναι ο κυματάρυθμος του οπτικού σήματος, λ είναι το μήκος κύματος της οπτικής ακτινοβολίας, D είναι η διάμετρος της φωτοδιόδου του δέκτη και L είναι το μήκος ζεύξης. Η παράμετρος δ^2 αναπαριστά τη διακύμανση Rytov που δίνεται ως:

$$\delta^2 = 0.5C_n^2 \mathrm{k}^{7/6} \mathrm{L}^{11/6} \quad (17)$$

όπου το C_n^2 είναι η παράμετρος της τυρβώδους ροής η οποία έχει ήδη αναφερθεί.

Ο λόγος του ηλεκτρικού σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι σημαντική ποσότητα για τη ζεύξη καθώς δείχνει την πιθανότητα διακοπής της ζεύξης άρα και την αξιοπιστία του συστήματος, οπότε επόμενο βήμα είναι να γραφεί η PDF συναρτήσει του στιγμιαίου SNR, γ. Ορίζουμε το στιγμιαίο SNR ως $\gamma=(\eta I)^2/N_o=s^2/N_o$ και το μέσο ηλεκτρικό SNR ως $\mu=(\eta E[I])^2/N_o$, όπου E[.] αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη τιμή και στην περίπτωση αυτή μπορούμε να υποθέσουμε ότι E[I]=1 λόγω της κανονικοποιημένης ακτινοβολίας. Η παράμετρος η είναι η κανονικοποιημένη ένταση της ακτινοβολίας και η παράμετρος s είναι η στιγμιαία αύξηση έντασης [8]

[9] [10] [26]. Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό τυχαίων μεταβλητών (RV) έχουμε ως αποτέλεσμα την ακόλουθη PDF ως συνάρτηση του γ [29]:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{(\gamma/\mu)^{\frac{k-2}{2}}}{2\mu} e^{-\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}k} \frac{k^k}{\Gamma(k)} \tag{18}$$

Μία ακόμη παράμετρος που καθορίζει την απόδοση της ζεύξης είναι η μέση χωρητικότητα. Η κανονικοποιημένη χωρητικότητα του καναλιού δίνεται ως [6] [8] [9] [10] [19] [23]:

$$\tilde{C} = C/B = \log_2(1+\gamma) \tag{19}$$

όπου C είναι η χωρητικότητα του καναλιού, B είναι το εύρος ζώνης του καναλιού και γ είναι το SNR στον δέκτη. Χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματισμό RV στην εξίσωση (18) και (19) έχουμε ως αποτέλεσμα την ακόλουθη PDF ως συνάρτηση του $\tilde{C}$:

$$f_{\tilde{c}}(\tilde{c}) = \frac{2^{\tilde{c}} ln2}{2\mu} \sqrt{\frac{2^{\tilde{c}}-1}{\mu}}^{k-2} e^{-\sqrt{\frac{2^{\tilde{c}}-1}{\mu}}k} \frac{k^k}{\Gamma(k)} \tag{20}$$

Υποθέτοντας ότι ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας bit, r, είναι πολύ μικρότερος, στην πράξη, σε ένα πραγματικό σύστημα επικοινωνίας από τον μέγιστο ρυθμό bit, που μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της χωρητικότητας του καναλιού, μπορεί να θεωρηθεί ότι, $\tilde{C} = Ar$ όπου το A δίδεται σε δευτερόλεπτα. Έτσι, χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματισμό RV λαμβάνουμε την ακόλουθη PDF ως συνάρτηση του r:

$$f_r(r) = \frac{2^{Ar} Aln2}{2\mu} \left(\frac{2^{Ar}-1}{\mu}\right)^{\frac{k-2}{2}} e^{-\sqrt{\frac{2^{Ar}-1}{\mu}}k} \frac{k^k}{\Gamma(k)} \quad (21)$$

Για την διευκόλυνση και την καλύτερη ακρίβεια της διερεύνησης κατά την σύγκριση των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων για την εξακρίβωση της κατανομής γάμμα για ασθενή τυρβώδη ροή, προτιμούμε την αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας CDF (Cumulative Density Function). Γενικά, η CDF είναι η ολοκληρωμένη μορφή της PDF και στην προκειμένη περίπτωση η CDF της κατανομής γάμμα ως συνάρτηση της κανονικοποιημένης έντασης της ακτινοβολίας I, δίνεται ως [27]:

$$F_I(I; k, \theta) = \frac{\gamma(k, \frac{I}{\theta})}{\Gamma(k)} \quad (22)$$

όπου Γ(z) δηλώνει τη συνάρτηση γάμμα, γ(α,x) είναι η χαμηλότερη ατελής συνάρτηση γάμμα και οι παράμετροι k> 0 και θ> 0 υπολογίζονται με την τιμή k=$\frac{1}{\sigma_P^2}$ και θ=σ_P^2, όπου σ_P^2 είναι ο δείκτης σπινθηρισμού δηλαδή η κανονικοποιημένη διακύμανση της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος και μπορεί να εκτιμηθεί από τις εξισώσεις (14) - (17). Για να μετατραπεί η Εξ. (15) σε μια με ευκολότερη μορφή, διατηρούμε μόνο την παράμετρο k αφού k=1/θ. Η νέα μορφή της συνάρτησης CDF της κανονικοποιημένης έντασης της ακτινοβολίας I είναι:

$$F_I(I; k) = \frac{\gamma(k, Ik)}{\Gamma(k)} \quad (23)$$

ενώ η CDF ως συνάρτηση του γ, το οποίο εκφράζει την αξιοπιστία της ζεύξης, δίδεται ως:

$$F_{\gamma}(\gamma;k) = \frac{\gamma(k,\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}k)}{\Gamma(k)} \quad (24)$$

Όσον αφορά την απόδοση της ζεύξης, λαμβάνουμε υπόψη τη μέση κανονικοποιημένη χωρητικότητα καναλιού που δίνεται στην Εξ.(19) και την Εξ.(24), καταλήγουμε στη CDF ως συνάρτηση του $\tilde{C}$:

$$F_{\tilde{c}}(\tilde{c};k) = \frac{\gamma(k,k\sqrt{\frac{2^{\tilde{c}}-1}{\mu}})}{\Gamma(k)} \quad (25)$$

Εν κατακλείδι, όπως αναφέρεται στη συνάρτηση PDF, θεωρείται ότι ο ρυθμός μετάδοσης bit, r, που μεταδίδεται στην πράξη σε ένα πραγματικό σύστημα επικοινωνίας είναι πολύ μικρότερος από το μέγιστο ρυθμό bit, που μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της χωρητικότητας του καναλιού. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι $\tilde{C} = Ar$, οπότε λαμβάνουμε την ακόλουθη CDF ως συνάρτηση του r:

$$F_{r}(r;k) = \frac{\gamma(k,k\sqrt{\frac{2^{Ar}-1}{\mu}})}{\Gamma(k)} \quad (26)$$

όπου το A είναι μια παράμετρος κανονικοποίησης η οποία χρησιμοποιείται για να συνδέσει τον μετασχηματισμό του μέγιστου ρυθμού δεδομένων που εκτιμάται από την Εξ.(19), για το κανάλι τηλεπικοινωνιών, με την ρεαλιστική τιμή r, που επιτυγχάνεται με το τηλεπικοινωνιακό μας σύστημα FSO. Δηλαδή, ο συντελεστής A είναι αυτός που δίνει τη σχέση μεταξύ του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης bit του συστήματος και της μέγιστης τιμής μετάδοσης bit με βάση τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Επιπλέον, ο συντελεστής A μετριέται σε s.

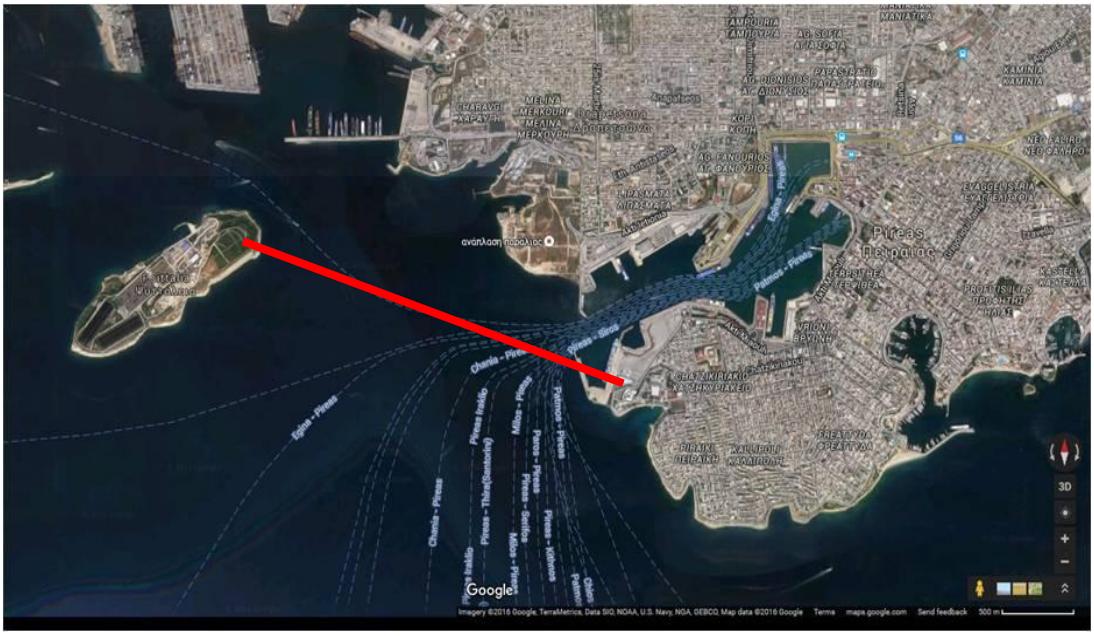
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 Πειραματική διάταξη

Προκειμένου να διερευνηθεί η ακρίβεια της κατανομής γάμμα, ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη, εξετάζεται πειραματικά εάν τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρητικά από την κατανομή συμπίπτουν ικανοποιητικά με εκείνα που προκύπτουν πειραματικά. Το πείραμα πραγματοποιείται στο λιμάνι του Πειραιά στην Αθήνα, οπότε το κανάλι είναι η ατμόσφαιρα πάνω στη θάλασσα. Η εγκατάσταση του πειράματος αποτελείται από έναν οριζόντιο σύνδεσμο FSO μήκους 2958m και 35m πάνω από τη θάλασσα και χρησιμοποιείται το σύστημα διαμόρφωση έντασης/άμεση ανίχνευση (IM/DD: intensity modulation/direct detection) [9] [10]. Ο πομπός είναι εγκατεστημένος στο λιμάνι του Πειραιά στην Ελληνική Ναυτική Ακαδημία και ο δέκτης στο φάρο του νησιού της Ψυττάλειας. Χρησιμοποιεί έναν ανιχνευτή φωτοδιόδων, που έχει την τεχνική της χιονοστιβάδας, με διάμετρο ανοίγματος 40cm. Η οπτική πηγή που εκπέμπει ο δέκτης είναι δέσμη λέιζερ η οποία λειτουργεί σε μήκος κύματος 845nm και η ισχύς που μεταδίδεται είναι 90mW.

Ο πομπός εκπέμπει συνεχώς δέσμη λέιζερ, ενώ ο δέκτης έχει προγραμματιστεί για να κάνει μια νέα καταχώρηση bit rate κάθε 1 δευτερόλεπτο σε έναν εγκατεστημένο υπολογιστή [10]. Όταν το πείραμα ολοκληρώνεται, γίνεται επιλογή δεδομένων που ανταποκρίνονται σε κατάλληλες, για τη γάμμα κατανομή, καιρικές συνθήκες. Αυτή η επιλογή είναι αναγκαία επειδή η κατανομή γάμμα αναφέρεται μόνο σε ασθενής τυρβώδη ροή και κατά συνέπια σε καλές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επομένως, τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούμε είναι αυτά που συνέβησαν μέρες με καθαρό καιρό κατά τη διάρκεια του μεσημεριού (δηλαδή από τις 12:00 έως τις 16:00). Συγκεκριμένα, οι καιρικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από θερμοκρασία μεταξύ 15-30°C, ατμοσφαιρική πίεση 990-1010mbars, σχετική υγρασία μέχρι 70%,

ταχύτητα ανέμου έως 3 m/s, απουσία κάποιων καιρικών φαινομένων όπως βροχή, ομίχλη ή χιόνι [9] [10].



Εικόνα 1: Πειραματική διάταξη FSO μεταξύ του Πειραιά και του φάρου στην Ψυττάλεια.

6.2 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί πειραματικά δεδομένα έτσι ώστε να εξακριβωθεί ή όχι η καταλληλότητα της γάμμα κατανομής στην περιγραφή της ασθενούς τυρβώδους ροής. Για να φτάσουμε σε αυτό, τα πειραματικά δεδομένα που αντλούμε από την FSO ζεύξη που περιγράφεται παραπάνω, πρέπει να επεξεργαστούν έτσι ώστε να πάρουμε την πληροφορία που έχουν.

Αφού επιλέξουμε τα δεδομένα που χρειαζόμαστε βάσει των καιρικών συνθηκών που επικρατούν, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 6.1, δημιουργούμε μία καμπύλη

η οποία περιγράφει την πειραματική CDF ως προς το bit rate των πειραματικών δεδομένων, όπως φαίνεται παρακάτω στα σχήματα (1)-(4) με την μπλε καμπύλη.

Αφού ολοκληρωθεί και η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, έχουμε πλέον δύο καμπύλες, μία θεωρητική και μία πειραματική CDF ως προς το bit rate. Τελευταίο βήμα της επεξεργασίας είναι να "φέρουμε" την θεωρητική CDF όσο πιο κοντά γίνεται με την πειραματική καμπύλη έτσι ώστε να γίνει η σύγκρισή τους.

Ο τρόπος για να μετακινήσουμε την θεωρητική CDF καμπύλη, έτσι ώστε να κάνει καλύτερη προσαρμογή στην πειραματική, είναι μέσω των παραμέτρων C_n^2 και A. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Η CDF της κατανομής γάμμα υπολογίζεται από την Εξ. (26). Πρώτα εισάγονται στην CDF εξίσωση τα σταθερά δεδομένα που έχει η FSO ζεύξη Πειραιά-Ψυττάλειας, όπως το μήκος της ζεύξης, το μήκος κύματος λ και η διάμετρος ανοίγματος του πομπού με τις τιμές που αναφέρονται παραπάνω, κεφάλαιο 6.1. Στη συνέχεια, τροποποιούμε τις παραμέτρους C_n^2 και A για να βρούμε εκείνες τις τιμές για τις οποίες η θεωρητική καμπύλη όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή με την πειραματική. Στα Σχήματα (1) - (4), η μπλε καμπύλη περιγράφει τα πειραματικά αποτελέσματα και η κόκκινη περιγράφει τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Αφού ολοκληρωθεί το βήμα της προσαρμογής, σειρά έχει η σύγκριση των δύο καμπυλών, που είναι το πιο σημαντικό βήμα της εργασίας καθώς είναι αυτό που θα καθορίσει αν εξακριβώνεται η γάμμα κατανομή για ασθενή τυρβώδη ροή, και αυτό γίνεται με την χρήση της παραμέτρου RMSE (:Root Mean Square Error). Η RMSE παράμετρος ουσιαστικά συγκρίνει κάθε πειραματική τιμή της πειραματικής CDF με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή της θεωρητικής CDF, δηλαδή συγκρίνει αυτές που έχουν το ίδιο bit rate, και στο τέλος παίρνουμε την μέση τιμή. Αν το αποτέλεσμα της σύγκρισης που θα προκύψει είναι RMSE<0.1 τότε λέμε με βεβαιότητα ότι η θεωρητική καμπύλη έχει πολύ καλή προσαρμογή με την πειραματική καμπύλη και έτσι μπορεί να επαληθευτεί η ακρίβεια της κατανομής γάμμα για περιγραφή ασθενούς τυρβώδους ροής. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η γάμμα κατανομή αποτυγχάνει και δεν είναι κατάλληλη για την περιγραφή ασθενούς τυρβώδους ροής.

Τα σχήματα (1) - (4) απεικονίζουν τις κατανομές CDF ως προς το bit rate για τέσσερις διαφορετικές μέρες. Μετά από την επεξεργασία, βρέθηκαν οι τιμές των παραμέτρων A, C_n^2 και τελικώς RMSE για τις οποίες η προσαρμογή της θεωρητικής στην πειραματική είναι η βέλτιστη, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Εάν τα αποτελέσματα της παραμέτρου RMSE είναι ικανοποιητικά, δηλαδή RMSE<0.1 τότε αποδεικνύεται ότι η κατανομή γάμμα είναι κατάλληλη για ασθενή τυρβώδη ροή.

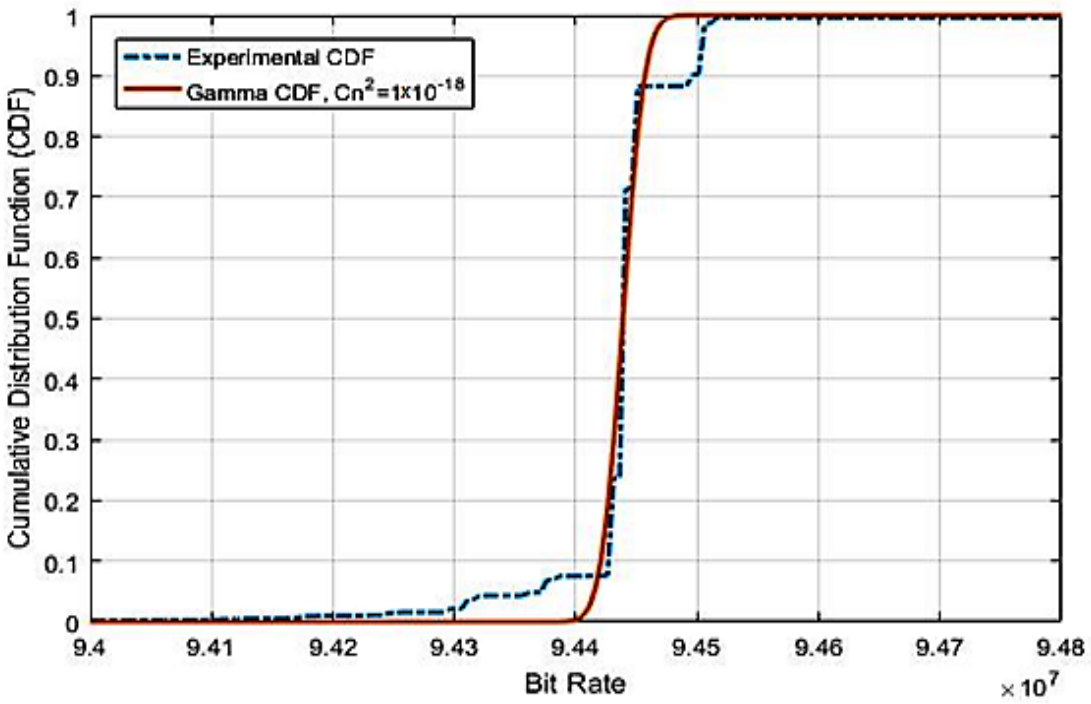
6.3 Γραφικές απεικονίσεις και αριθμητικά αποτελέσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στόχος αυτής της εργασίας είναι η επαλήθευση της ακρίβειας της κατανομής γάμμα, ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη, για συνθήκες ασθενούς τυρβώδης ροής. Για να το κάνουμε αυτό, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, συγκρίνουμε κάθε τιμή της θεωρητικής γάμμα CDF συνάρτησης με κάθε τιμή της πειραματικής CDF για το ίδιο bit rate. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής παρουσιάζονται τόσο γραφικά όσο και αριθμητά, για μεγαλύτερη ακρίβεια, με την βοήθεια της παραμέτρου RMSE.

Παρακάτω, στα σχήματα (1)-(4), παρουσιάζονται τα γραφήματα στα οποία η κόκκινη καμπύλη αντιπροσωπεύει τη θεωρητική γάμμα CDF και η μπλε καμπύλη αντιπροσωπεύει την πειραματική CDF. Αφού οι δύο αυτές καμπύλες συγκριθούν, τόσο με παρατήρηση όσο και με την αριθμητική παράμετρο RMSE, και παρατηρείται ικανοποιητική ταύτιση για το μεγαλύτερο κομμάτι του bit rate τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θεωρητική κατανομή γάμμα περιγράφει αρκετά καλά την ασθενή τυρβώδη ροή. Βέβαια δεν φτάνει απλώς η παρατήρηση οπότε για να επαληθεύσουμε τα αποτελέσματα της σύγκρισης αριθμητικά, χρησιμοποιούμε την παράμετρο RMSE, η οποία περιγράφηκε παραπάνω. Εάν η τιμή της παραμέτρου είναι RMSE<0.1 τότε δεχόμαστε και επαληθεύουμε ότι η γάμμα κατανομή είναι

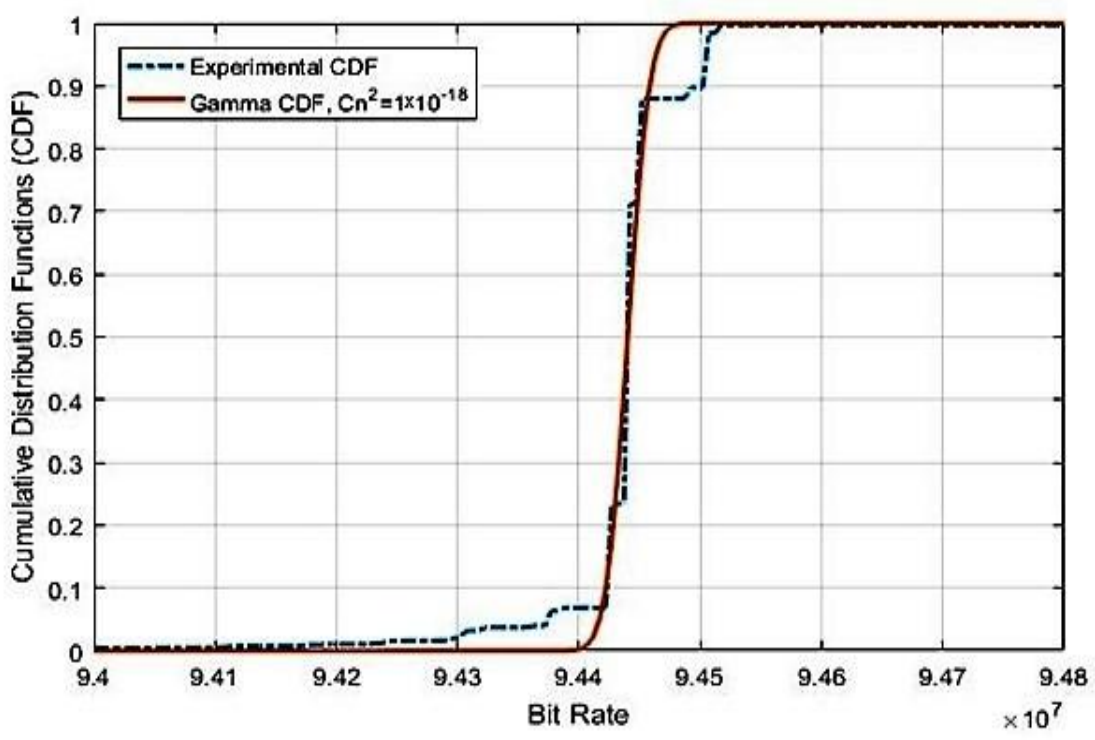
κατάλληλη για να περιγράψει την ασθενή τυρβώδη ροή. Τα αποτελέσματα της παραμέτρου RMSE για όλες τις ημέρες που επεξεργαστήκαμε παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Στο σχήμα (1) παρατηρούμε πολύ καλή προσαρμογή της θεωρητικής CDF της κατανομής γάμμα με την πειραματική CDF. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί και αριθμητικά παρατηρώντας ότι η τιμή της RMSE παραμέτρου είναι RMSE=0.0074<0.1 άρα βρισκόμαστε στα αποδεκτά όρια της παραμέτρου. Αυτό σημαίνει ότι για αυτή την μέρα η γάμμα κατανομή επιβεβαιώνεται. Επίσης, η ένταση της τυρβώδους ροής είναι C_n^2 =1×10^{-18} m$^{-2/3}$, κάτι που επιβεβαιώνει ότι οι συνθήκες υπό τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις είναι για ασθενή τυρβώδη ροή. Τέλος, η τιμής της παραμέτρου A για την συγκεκριμένη μέρα είναι A=2.8053×10^{-7}s.



Σχήμα 1: Σύγκριση της θεωρητικής γάμμα-CDF με τα πειραματικά μετρούμενα δεδομένα, για τις 16 Μαΐου [9]

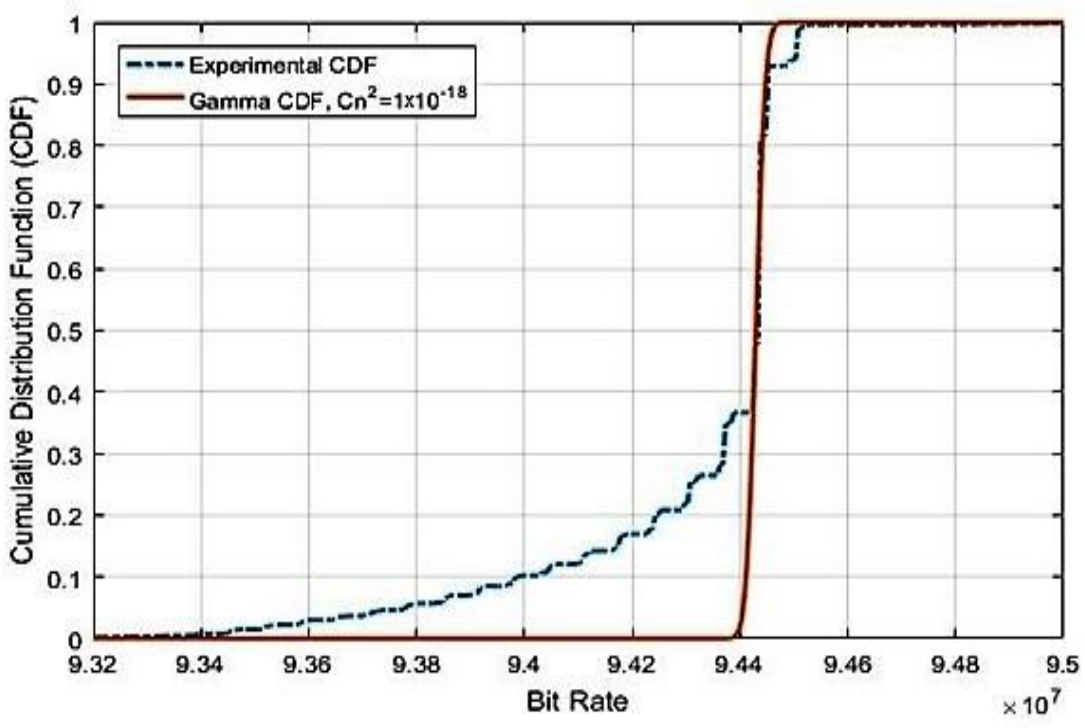
Τα αποτελέσματα στο Σχήμα (2) είναι παρόμοια με αυτά στο Σχήμα (1). Παρατηρούμε ότι η γάμμα CDF έχει πολύ καλή προσαρμογή με την πειραματική CDF. Επίσης, αριθμητικά η τιμή RMSE είναι RMSE=0.0073<0.1 κάτι που επιβεβαιώνει την καταλληλότητα της γάμμα κατανομής για την περιγραφή ασθενούς τυρβώδους ροής. Η ένταση της τυρβώδους ροής είναι C_n^2 = 1×10^{-18} m$^{-2/3}$ επιβεβαιώνοντας ότι για την συγκεκριμένη μέρα επικρατούσε ασθενή τυρβώδη ροή. Τέλος, η τιμή της A παραμέτρου που προκύπτει είναι A=2.805255×10^{-7}s.



Σχήμα 2: Σύγκριση της θεωρητικής γάμμα-CDF με τα πειραματικά μετρούμενα δεδομένα, για τις 22 Μαΐου [9]

Το σχήμα (3) διαφοροποιείται από τα δύο προηγούμενα. Παρατηρούμε ότι η γάμμα CDF συνάρτηση δεν συμπίπτει με τη πειραματική CDF για όλο το φάσμα του bit rate. Αρχίζει να κάνει καλή προσαρμογή της πειραματικής μετά την τιμή του bit rate στα 9.442x10^7. Οπότε η γραφική παράσταση δεν είναι σαφής για το αν η κατανομή γάμμα εξακριβώνεται, οπότε προχωράμε στην αριθμητική εξέταση. Η παράμετρος

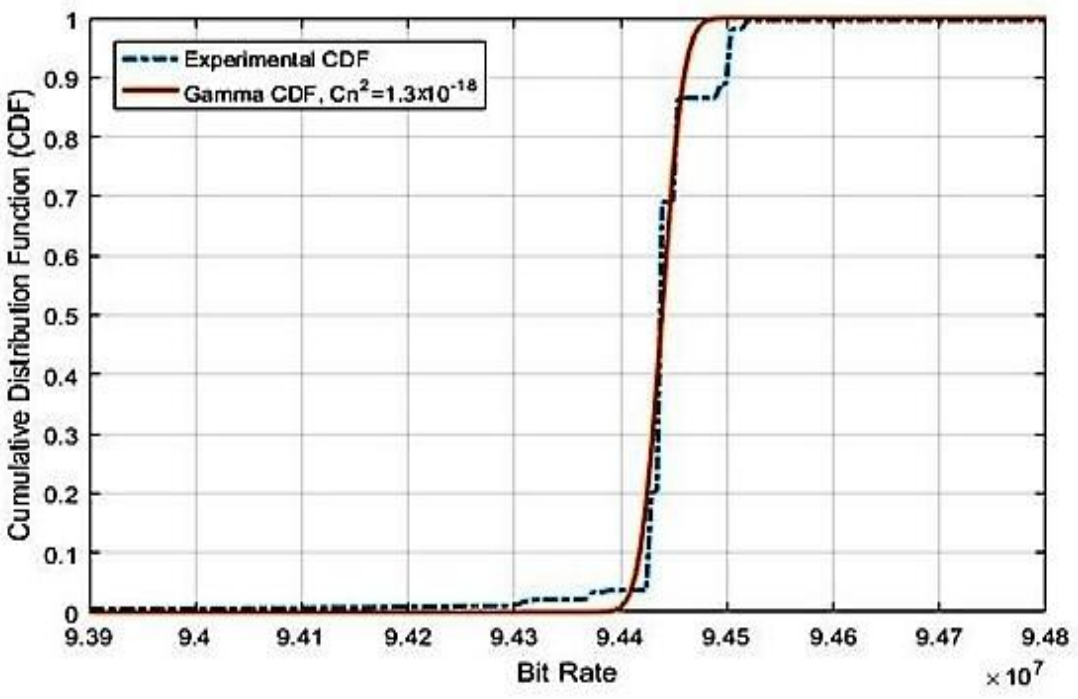
RMSE έχει μικρή τιμή όπως αναμενόταν, όπου RMSE=0.0257<0.1. Η θεωρητική και η πειραματική καμπύλη μπορεί να μην συμβαδίζουν για όλες τις τιμές bit rate με αποτέλεσμα η τιμή RMSE να μην είναι τόσο μικρή όσο αυτή των άλλων ημερών, αλλά αφού η παράμετρος RMSE βρίσκεται κάτω από το 0.1 τότε συμπεραίνουμε ότι η γάμμα κατανομή περιγράφει πολύ καλά την τυρβώδη ροή της συγκεκριμένης μέρας. Η ένταση της τυρβώδους ροής είναι C_n^2 = 1×10^{-18} m$^{-2/3}$, που σημαίνει ότι την συγκεκριμένη μέρα επικρατούσε ασθενή τυρβώδη ροή, όπως είναι αναμενόμενο. Τέλος η τιμή της παραμέτρου A είναι 2.8054×10^{-7}s.



Σχήμα 3: Σύγκριση της θεωρητικής γάμμα-CDF με τα πειραματικά μετρούμενα δεδομένα, για τις 4 Ιουνίου [9]

Το τελευταίο σχήμα, (4), έχει όμοια μορφή με τα σχήματα (1) και (2). Η καμπύλη της γάμμα CDF έχει πολύ καλή προσαρμογή με την πειραματική CDF με αποτέλεσμα να έχει την χαμηλότερη RMSE τιμή από όλες τις τέσσερις ημέρες, η οποία είναι RMSE=0.0051<0.1 κάτι που εξακριβώνει την γάμμα κατανομή. Η ένταση της τυρβώδους ροής είναι μεγαλύτερη από τις άλλες, C_n^2 =1.3×10^{-18} m$^{-2/3}$ αλλά

περιγράφει μέρα με ασθενή τυρβώδη ροή. Η τιμή της παραμέτρου A είναι A=2.8053×10^{-7}s και έτσι επιβεβαιώνει ότι η κατανομή γάμμα περιγράφει αρκετά καλά την ασθενή τυρβώδη ροή.



Σχήμα 4: Σύγκριση της θεωρητικής γάμμα-CDF με τα πειραματικά μετρούμενα δεδομένα, για τις 26 Ιουνίου [9]

Στον πίνακα που ακολουθεί, πίνακας 2, είναι συγκεντρωμένες οι τιμές των παραμέτρων A, C_n^2 και RMSE και για τις τέσσερις μέρες που επεξεργαστήκαμε. Παρουσιάζεται παρακάτω:

Ημερομηνία	**16/5**	**22/5**	**4/6**	**26/6**
A [s]	2.8053×10^{-7}	2.805255×10^{-7}	2.8054×10^{-7}	2.8053×10^{-7}
$\boldsymbol{C_n^2}$ **[m$^{-2/3}$]**	1×10^{-18}	1×10^{-18}	1×10^{-18}	1.3×10^{-18}

RMSE CDF	$74x10^{-4}$	$73x10^{-4}$	$257x10^{-4}$	$51x10^{-4}$

Πίνακας 2: Οι τιμές των παραμέτρων A, C_n^2 και RMSE για όλες τις μέρες [9].

6.4 Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικά αναμενόμενων αποτελεσμάτων

Καθώς ολοκληρώθηκε η επεξεργασία των δεδομένων και για τις τέσσερις ημέρες που έχουν επιλεχθεί, και έχει γίνει η σύγκριση της θεωρητικής CDF γάμμα κατανομής με την πειραματική CDF έχουν προκύψει οι τιμές των παραμέτρων A, C_n^2 και RMSE για την κάθε μέρα, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.

Παρατηρώντας τις τιμές της παραμέτρου C_n^2 από τον πίνακα 2 συμπεραίνουμε ότι είναι ότι η ένταση της τυρβώδους ροής C_n^2 είναι της τάξη μεγέθους του είναι 10^{-18} $m^{-2/3}$. Το θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει καλύτερα το πείραμα, υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες πάνω από θαλάσσια περιοχή, είναι το προτεινόμενο μοντέλο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2 [7]. Χρησιμοποιώντας τη μαθηματική έκφραση της Εξ. (5), και επιλέγοντας τις ειδικές παραμέτρους, η θεωρητική ένταση της τυρβώδους ροής που προκύπτει είναι $C_n^2=7.936\times10^{-17}m^{-2/3}$ [10]. Οπότε, συγκρίνοντας το πειραματικό C_n^2 ($\sim10^{-18}$ $m^{-2/3}$) με το θεωρητικό C_n^2 ($7.936\times10^{-17}m^{-2/3}$) είναι προφανές ότι η πειραματική τιμή του C_n^2 προσεγγίζει τη θεωρητική σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Από αυτή την σύγκριση συμπεραίνουμε ότι και για τις τέσσερις μέρες, που επιλέχθηκαν προς επεξεργασία, η ατμοσφαιρική συνθήκη που επικρατούσε ήταν η ασθενής τυρβώδη ροή όπως και είναι το ζητούμενο της παρούσας εργασίας.

Όσον αφορά την παράμετρο RMSE, έχουμε ήδη αναφέρει ότι πρόκειται για την πιο σημαντική παράμετρο της σύγκρισης αυτής καθώς ανάλογα με την τιμή της επαληθεύει ή καταρρίπτει την ακρίβεια της γάμμα κατανομής. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2, οι τιμές που προέκυψαν και για τις τέσσερις μέρες είναι ότι

RMSE<<0.1 που είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Άρα από την παράμετρο αυτή μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η κατανομή γάμμα περιγράφει πολύ καλά την τυρβώδη ροή που επικρατεί τις συγκεκριμένες μέρες.

Συμπερασματικά από τις δύο αυτές παραμέτρους παρατηρούμε ότι έχουμε επαληθεύσει πειραματικά την ακρίβεια της κατανομής γάμμα ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη για συνθήκες με ασθενή ατμοσφαιρική τυρβώδη ροή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή, μελετήσαμε οπτικά συστήματα επικοινωνίας ελεύθερου χώρου (FSO). Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα και τις εφαρμογές που παρέχουν, όπως η υψηλή ασφάλεια, το μη εξουσιοδοτημένο οπτικό φάσμα, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης λειτουργίας και συντήρησης και η πολύ υψηλή χωρητικότητα καναλιού, έχουν ένα σοβαρό μειονέκτημα. Η διάδοση της ακτίνας λέιζερ από τον πομπό στο δέκτη γίνεται δια μέσου της ατμόσφαιρα και προκαλεί προβλήματα στην απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος. Το κύριο πρόβλημα του ατμοσφαιρικού καναλιού είναι το ατμοσφαιρικό φαινόμενο, η τυρβώδης ροή. Η τυρβώδης ροή δημιουργείται από τυχαίες μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης στην ατμόσφαιρα και δημιουργεί τυχαίες μεταβολές στον δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σκέδαση της δέσμης laser από το "μονοπάτι" που ακολουθεί, οδηγώντας στη διακύμανση της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη. Αυτή η διακύμανση της ακτινοβολίας άλλοτε είναι πιο έντονη και άλλοτε πιο ήπια και αυτό εξαρτάται από την ένταση της τυρβώδους ροής που επικρατεί στο ατμοσφαιρικό κανάλι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος του σήματος στον δέκτη και άρα μείωση της απόδοσης του συστήματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σπινθηρισμός.

Η παράμετρος που περιγράφει την ένταση της τυρβώδους ροής είναι η C_n^2 και για την εκτίμησή της έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα. Το πιο διαδεδομένο είναι αυτό των Hufnagel-Vally και με κατάλληλες προσεγγίσεις το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για περιοχές πάνω από την θάλασσα.

Η τυρβώδης ροή επηρεάζει την αξιοπιστία και την απόδοση των FSO συστημάτων επικοινωνίας. Είναι αναγκαίο, λοιπόν, να μπορεί να εκτιμηθεί η αξιοπιστία και η απόδοση των συστημάτων αυτών ανάλογα με τις συνθήκες τυρβώδους ροής που επικρατούν. Για την εκτίμηση αυτή χρησιμοποιούνται κάποιες μετρικές και οι πιο

βασικές να είναι η πιθανότητα διακοπής, η μέση χωρητικότητα και η χωρητικότητα διακοπής.

Οι διακυμάνσεις της ακτινοβολίας στον δέκτη, που δημιουργούνται εξαιτίας της επίδρασης της τυρβώδους ροής στην δέσμη laser, είναι τυχαίες και μπορούν να μελετηθούν μόνο στατιστικά. Προκειμένου να προβλέψουμε αυτές τις διακυμάνσεις στον δέκτη, μοντελοποιήσαμε το ατμοσφαιρικό κανάλι με στατιστικές κατανομές. Συγκεκριμένα, μελετήσαμε τη κατανομή γάμμα, η οποία περιγράφει συνθήκες ασθενούς τυρβώδους ροής. Για την επαλήθευση της ακρίβειας της κατανομής γάμμα, ως προς την περιγραφή των μεταβολών της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στον δέκτη, επεξεργαστήκαμε πειραματικά δεδομένα bit rate που προέκυψαν από μια εγκατεστημένη ζεύξη FSO μεταξύ του λιμανιού του Πειραιά και του φάρου στο νησί Ψυττάλειας, σε χαμηλό υψόμετρο πάνω από τη θάλασσα. Η διάταξη αυτή κατέγραφε bit rate που έφταναν στον δέκτη από τον πομπό μέσω της δέσμης laser. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν προς επεξεργασία ήταν αυτά που είχαν καταγραφεί για μέρες με καθαρό καιρό, καθώς εξετάζουμε την περίπτωση της ασθενούς τυρβώδους ροής. Από τα πειραματικά δεδομένα και μετά από επεξεργασία προέκυψε η πειραματική CDF.

Όσον αφορά το θεωρητικό μέρος, δηλαδή την εξίσωση που περιγράφει την CDF της γάμμα κατανομής, προέκυψε μετά από μαθηματική και φυσική επεξεργασία από τη θεωρητική γάμμα PDF.

Οι δύο καμπύλες, η θεωρητική και η πειραματική CDF, συγκρίθηκαν σημείο προς σημείο χρησιμοποιώντας την παράμετρο RMSE. Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται για να εξακριβώσει αν οι θεωρητική καμπύλη κάνει καλή προσαρμογή στην πειραματική και ως συνέχεια την εξακρίβωση ή όχι της κατανομής γάμμα. Από αυτή την σύγκριση προέκυψε ότι η παράμετρος RMSE<<0.1 που σημαίνει ότι η γάμμα κατανομή περιγράφει πολύ καλά την ασθενή τυρβώδη ροή. Επίσης, από την σύγκριση αυτή προέκυψε ότι η παράμετρος C_n^2 είναι της τάξης μεγέθους του $\sim 10^{-18}$ που σημαίνει ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή της ζεύξης για τις μέρες που έγινε η επεξεργασία των μετρήσεων ήταν η ασθενής τυρβώδη ροή.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης επιβεβαίωσαν πειραματικά ότι η κατανομή γάμμα μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια τις διακυμάνσεις της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνουν στον δέκτη, οι οποίες προκαλούνται από συνθήκες ασθενούς ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής.

Αναφορές

[1] Henniger, H. and Wilfert, O. (2010), "An Introduction to Free-Space Optical Communications", *Radioengineering, Vol 19, No 2,* pp.203-212.

[2] Ghassemlooy, Z. and Popoola, W.O. (2010), "Terrestrial Free-Space Optical Communications", *Network Layer and Circuit Level Design, Eds S. Ait Fares and F. Adachi.*

[3] Nistazakis, H.E., Tsigopoulos, A.D, Hanias, M.P., Psychogios, C.D., Marinos, D., Aidinis, C. and Tombras, G.S. (2011), "Estimation of Outage Capacity for Free Space Optical Links over I-K and K Turbulent Channels", *RADIOENGINEERING, VOL. 20, NO. 2,* pp.493-498.

[4] Khalighi, M.A. and Uysal, M. (2014), "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective", *IEEE COMMUNICATION SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 16, NO. 4,* pp.2231-2258.

[5] Tsiftsis, T.A., Sandalidis, H.G., Karagiannidis, G.K. and Uysal, M. (2009), "Optical Wireless Links with Spatial Diversity over Strong Atmospheric Turbulence Channels", *IEEE Transactions on Wireless Communications, VOL. 8, NO. 2,* pp.951-957.

[6] Nistazakis, H.E., Katsis, A. and Tombras, G.S. (2012), "On the Reliability and Performance of FSO and Hybrid FSO Communication Systems over Turbulent Channels", *Nova Publishers ,* pp.69-112.

[7] Majumdar, A.K. (2005), "Free-Space Laser Communication Performance in the Atmospheric Channel", *Optical and Fiber Communications Reports, Vol. 2,* pp.345-396.

[8] Nistazakis, H.E., Tsiftsis, T.A. and Tombras, G.S. (2009), "Performance Analysis of Free-Space Optical Communication Systems Over Atmospheric Turbulence Channels", *IET Communications vol. 3,* pp.1402-1409.

[9] Bourazani, D., Stassinakis, A.N., Nistazakis, H.E., Varotsos, G.K., Tsigopoulos, A.D. and Tombras, G.S. (2018), "Experimental accuracy investigation for irradiance fluctuations of FSO links modeled by gamma distribution", *8th IC-SCCE*.

[10] Kampouraki, M.N., Stassinakis, A.N., Nistazakis, H.E., Chronopoulos, G.G., Tsigopoulos, A.D., Fafalios, M.E. and Tombras, G.S.(2014), "Experimental and Theoretical Bit Rate Estimation of Turbulence FSO Link Over the Maritime Area at Piraeus Port", *6th IC-SCCE.*

[11] Stassinakis, A.N, Hanias, M.P, Nistazakis, H.E. and Tombras, G.S. (2012) “Evaluation of outage probability for time Diversity schemes in free space optical systems over I-K atmospheric turbulence channels” *Proceedings of 2nd PanHellenic Conference on Electronics and Telecommunications*.

[12] Συβρίδης, Δ. "Οπτικές επικοινωνίες και οπτικά δίκτυα", σημειώσεις μαθήματος, *τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, ΕΚΠΑ*.

[13] Στασινάκης, Α. Ν. (2016), "Επίγιες ασύρματες οπτικές τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις και μελέτη τεχνικών για την βελτίωση της απόδοσής τους", *Διδακτορική διατριβή,*Αθήνα.

[14] Στασινάκης, Α. Ν. (2013), "Μελέτη εξάρτησης της απόδοσης των επίγειων συστημάτων ασύρματων οπτικών επικοινωνιών παρουσία ατμοσφαιρικής τυρβώδους ροής, με τον αριθμό και το μέγεθος των δεκτών", *Διπλωματική εργασία,* Αθήνα.

[15] Arnon, S. (2003), "Optical wireless communications", *Encycl. Opt. Eng., Marcel Dekker Inc. New York,* pp. 1866-1886.

[16] Andrews, L. (2004), "Field guide to atmospheric optics", *SPIE Field Guides, Vol. FG02, Ed. J.E. Greivenkamp, SPIE PRESS.*

[17] Nistazakis, H.E. and Tombras, G.S. (2012), "On the Use of Wavelength and time Diversity in Optical Wireless Communication Systems Over Gamma–Gamma Turbulence Channels", *Elsevier: Optics & Laser Technology 44,* pp.2088-2094.

[18] MacGovern, A.J., Nahrstedt, D.A. and Johnson, M.M. (2000), "Atmospheric Propagation for Tactical Directed Energy Application", *Laser Weapons Technology, Todd D. Steiner, Paul H. Merritt, Eds., SPIE,Vol. 4034,* pp.128–139.

[19] Katsis, A., Nistazakis, H.E. and Tombras, G.S., "Bayesian and Frequentist Estimation of the Average Capacity of Log Normal Wireless Optical Channels", *IeCCS 2007 (Int. e-Conf. on Computer Science), December (2007), AIP Proc., (2008), 1060,* pp.26–29.

[20] Sandalidis, H. G.and Tsiftsis, T. A., (January 2008), "Outage Probability and Ergodic Capacity of Free-Space Optical Links over Strong Turbulence", *Electronics Letters, Vol. 44, No. 1,* pp. 46-47.

[21] Nistazakis, H.E., Karagianni, E.A., Tsigopoulos, A.D., Fafalios, M.E. and Tombras, G.S. (2009), "Average capacity of optical wireless communication systems over atmospheric turbulence channels", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 8,* pp. 974-979.

[22] Lazarakis, F., Tombras, G.S. and Dangakis, K., (1994), "Average Channel Capacity in a Mobile Radio Environment with Rician Statistics", *IEICE Trans. Commun., Vol. E77-B, No. 7,* pp. 971-977.

[23] Laourine, A., Stephenne, A. and Affes, S. (2007), "Estimating the ergodic capacity of log normal channels", *IEEE Commun. Lett., 11, (7),* pp.568–570.

[24] Nistazakis, H.E., Tombras, G.S., Tsigopoulos, A.D., Karagianni, E.A. and Fafalios, M.E., (2009), "Capacity estimation of optical wireless communication systems over moderate to strong turbulence channels", *Journal of Communications and Networks, Vol. 11, Iss. 4,* pp. 387-392.

[25] Furrer, S., Coronel, P. and Dahlhaus, D., (July 2006), "Simple ergodic and outage capacity expressions for correlated diversity Ricean fading channels", *IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol. 5, No. 7,* pp. 1606-1609.

[26] Zhu, X. and Kahn, J.M. (2002), "Free-Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence Channels", *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 50, NO. 8,* pp.1293-1300.

[27] Epple, B. (2010), "Simplified Channel Model for Simulation of Free-Space Optical Communications", *Optical Communications Networking, Vol. 2,* pp.293-304.

[28] Stassinakis, A.N., Nistazakis, H.E. and Tombras, G.S. (2012), "Comparative Performance Study of One or Multiple Receivers Schemes for FSO Links Over Gamma–Gamma Turbulence Channels", *Journal of Modern Optics, Vol. 59, No. 11,* pp.1023–1031.

[29] Varotsos, G.K., Nistazakis, H.E., Volos, Ch.K. and Tombras, G.S. (2016), "FSO Links with Diversity Pointing Errors and Temporal Broadening of the Pulses Over Weak to Strong Atmospheric Turbulence Channels", *Elsevier: Optic127,* pp.3402-3409.